

Utilisation des données acquises par télédétection
pour la mise à jour des modèles hydrologiques
de fonte nivale

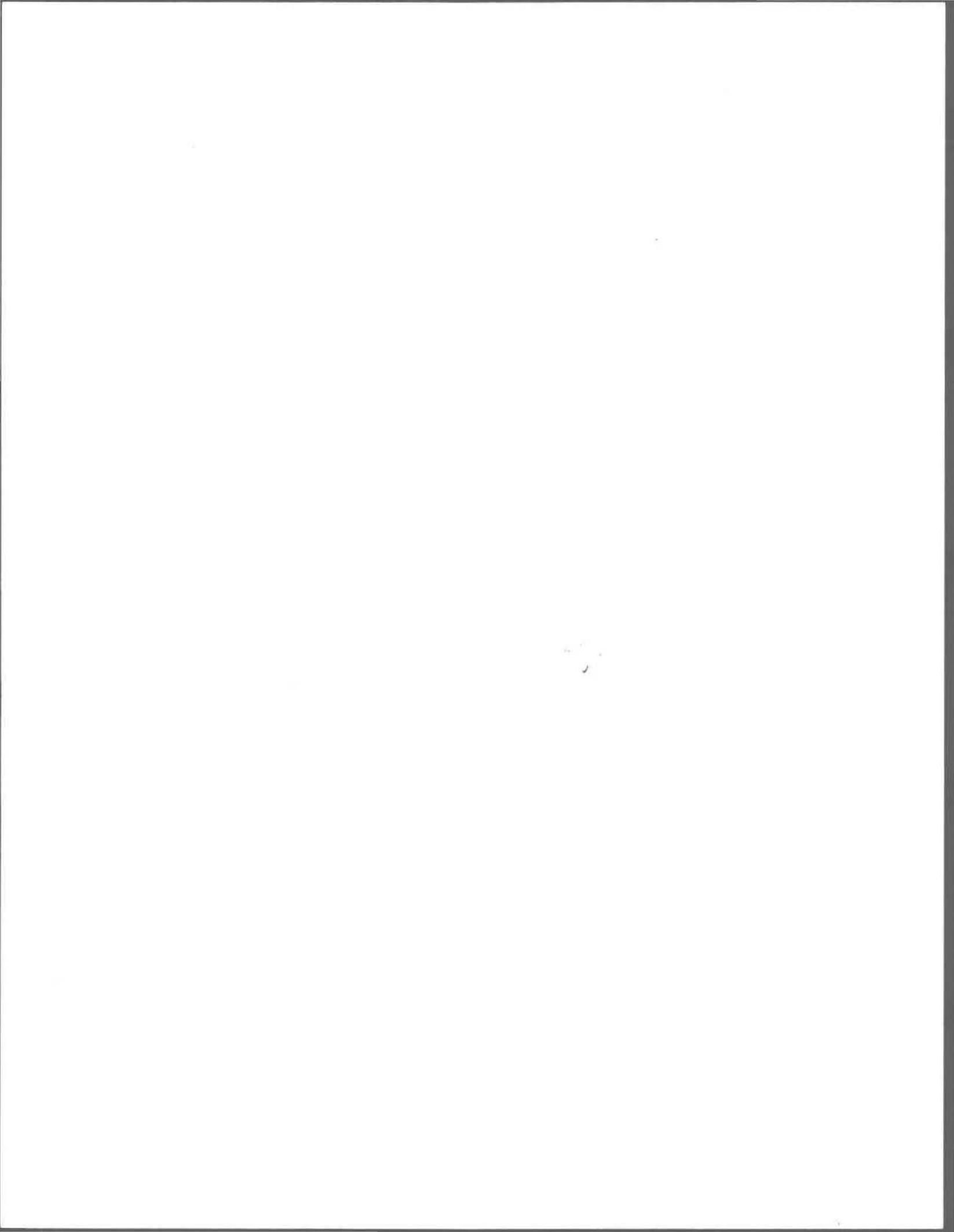
Thèse de maîtrise

Par

Jacques Dupont
B.Sc. géographie physique

Université du Québec
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

Novembre 1983



REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mon directeur de mémoire, monsieur Jean-Pierre Fortin, pour m'avoir permis de mener à bien la réalisation du mémoire de maîtrise. De plus, je voudrais souligner l'aide importante qu'ont apporté mes conseillers monsieur Guy Morin de l'INRS-Eau et monsieur Guy Rochon de l'Université Laval au niveau technique et scientifique. J'aimerais également témoigner ma reconnaissance aux scientifiques qui m'ont apporté une aide précieuse tout au long des recherches; monsieur Bénéï Goze Bertin pour sa contribution technique et scientifique à la réalisation globale du projet, madame Wanda Sochanska pour son aide technique et monsieur Paul Gilbert pour sa contribution à la numérisation du bassin versant de la rivière Nottaway. En outre, je souligne la contribution importante de madame Elaine Parent pour la réalisation du document, de monsieur André Parent pour sa réalisation graphique et de toutes les autres personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de l'étude.

RESUME

La première partie de ce mémoire de maîtrise présente un survol des principaux concepts liés au couvert de neige et aux méthodes utilisées en télédétection. De plus, une description générale de l'utilisation de la télédétection au niveau des modèles hydrologiques de fonte nivale complète cette section.

La deuxième partie du mémoire met l'accent sur l'application d'une méthodologie de mise à jour du modèle hydrologique CEQUEAU basée sur des données acquises par télédétection. Cette méthode repose sur l'élaboration d'une technique de cartographie nivale axée sur le traitement numérique des images satellites de type NOAA.

Mots clés:

CEQUEAU, classification, correction géométrique, coût-efficacité, couvert de neige, débit, écoulement, fonte nivale, fuseau, hydrogramme, hydrologie, image diachronique, image satellite, masque, mise à jour, modèle, neige, NOAA, Nottaway, numérisation, printemps, rivière, SCANIQ, simulation, télédétection, UTM.

Référence

DUPONT, J. (1983).

Utilisation des données acquises par télédétection pour la mise à jour des modèles hydrologiques de fonte nivale. INRS-Eau, mémoire de maîtrise, 216 p., 3 annexes.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU COUVERT NIVAL	6
1.1 Paramètres de base	7
1.2 Formation	9
1.3 Dynamique	11
1.4 Processus de fonte	15
1.5 Caractéristiques spectrales	18
CHAPITRE 2. REVUE DES METHODES ACTUELLES D'OBSERVATION DU COUVERT NIVAL PAR TELEDETECTION ET DE PREVISION DE LA FONTE PRINTANIERE	21
2.1 Observation du couvert nival par télédétection	22
2.1.1 Définition	22
2.1.2 Problématique d'observation du couvert nival par télédétection à partir de satellites	23
2.1.3 Systèmes d'observation du couvert nival	25
2.1.3.1 Gamme visible et infra-rouge (proche et thermique)	27
2.1.3.2 Gamme micro-onde	31
2.1.3.3 Rayonnement gamma	34
2.1.3.4 Limitations des systèmes de télédétection	36
2.1.3.5 Choix d'un système de télédétection approprié	39

	<u>PAGE</u>
2.1.4 Techniques d'analyse des données acquises par télédétection	40
2.1.4.1 Support des données acquises par télédétection	40
2.1.4.2 Appareils d'analyse	41
2.1.4.3 Eventail des techniques de cartographie du couvert nival	41
2.1.4.4 Limitations des techniques de cartographie	49
2.1.4.5 Techniques appropriées pour la cartographie	49
2.1.4.6 Importance des données au sol pour la vérification des images satellites	50
2.1.4.7 Minimisation des problèmes de nébulosité et de couvert forestier	50
2.2 Méthodes de prévision de la fonte du couvert nival	54
2.2.1 Modèles de prévision opérationnels et expérimentaux	59
2.2.1.1 Données	60
2.2.1.2 Modèles ne faisant pas appel aux données de télédétection	62
2.2.1.3 Méthodes avec télédétection	62
2.2.1.3.1 Modèles basés essentiellement sur des données acquises par télédétection	67
2.2.1.3.2 Modèles basés sur des données hydrométéorologiques et des données acquises par télédétection	68
2.2.1.3.3 Application des données acquises par télédétection à la calibration et la mise à jour des modèles hydrologiques	70
2.2.1.4 Limitations d'emploi	71
2.2.2 Choix du modèle requis	71
2.2.2.1 Critères de performance	73
2.2.2.2 Vérification de la précision et de la fiabilité	75
2.2.2.3 Choix du modèle approprié	75

	<u>PAGE</u>
2.3 Coût-efficacité des systèmes de prévision	78
2.4 Perspectives d'avenir	80
CHAPITRE 3. CADRE DE L'ETUDE	84
3.1 Aspects physiques du bassin de la rivière Nottaway	85
3.2 Description des réseaux d'échantillonnage de données	95
3.3 Modèle CEQUEAU	101
3.3.1 Description générale	101
3.3.2 Sous routine de fonte	104
3.4 SCANIQ	105
CHAPITRE 4. COMMENTAIRES SUR L'IMAGERIE NOAA	107
4.1 Fréquence d'observation	108
4.2 Retrait de la limite nivale	114
4.3 Essai de perception des variations de l'équivalent-eau ...	115
CHAPITRE 5. ADAPTATION D'UNE METHODOLOGIE DE MISE A JOUR AU MODELE CEQUEAU PAR L'UTILISATION DES DONNEES ACQUISES PAR TELEDETECTION	117
5.1 Traitement des images satellites	118
5.1.1 Caractéristiques des images satellites NOAA	118
5.1.2 Procédures de traitement des images satellites	120
5.1.2.1 Corrections atmosphériques et radiométriques	120
5.1.2.2 Elimination des nuages	122
5.1.2.3 Discrimination du couvert nival	123
5.1.3 Analyse combinatoire entre l'image et les données au sol	132
5.1.4 Analyse statistique entre l'image et les données au sol	137
5.1.5 Application au bassin de la rivière Nottaway	138

	<u>PAGE</u>
5.1.5.1 Fuseaux UTM	138
5.1.5.2 Numérisation des limites du bassin	141
5.1.5.3 Superposition aux images	142
5.1.6 Données résultantes	142
5.2 Traitement des données issues de SCANIQ	144
5.2.1 Adaptation des données SCANIQ sur la grille CEQUEAU	144
5.2.2 Paramètres de mise à jour du modèle CEQUEAU	146
5.2.3 Méthodes à l'essai	146
5.2.4 Limitations	148
5.3 Simulation hydrologique	149
5.3.1 Préparation de la banque de données	149
5.3.2 Préparation du modèle CEQUEAU	150
5.3.3 Mise à jour	152
5.3.3.1 Simulation avec des données d'équivalent en eau obtenues aux stations nivométriques	154
5.3.3.2 Simulation avec des données de superficie de couvert nival obtenues par télédétection	154
5.3.3.3 Comparaison	156
5.4 Remarques au niveau de la correction	166
5.5 Répartition du manteau nival	171
5.6 Application de la méthode sur un modèle non calibré	175
5.7 Conclusion	178
CHAPITRE 6. SUGGESTIONS POUR L'AVENIR	180
6.1 Suggestions au niveau du cadre de l'étude	181
6.2 Suggestions au niveau de SCANIQ	182
6.3 Suggestions au niveau du modèle CEQUEAU	182
6.4 Suggestions au niveau de la procédure de mise à jour	183
CHAPITRE 7. USAGE OPERATIONNEL	184

	<u>PAGE</u>
CONCLUSION	191
BIBLIOGRAPHIE	195
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

	<u>PAGE</u>
Tableau I-1 Raisons pour l'observation du couvert nival	3
Tableau 2.1 Caractéristiques des satellites actuels	26
Tableau 2.2 Liste des problèmes et limitations des systèmes de télédétection rencontrés dans la littérature	38
Tableau 2.3 Observations et mesures au sol pour la cartographie du couvert nival	51
Tableau 2.4 Sources d'erreurs intervenant sur les résultats de la simulation	72
Tableau 2.5 Bénéfices généraux de l'information améliorée pour la gestion et l'utilisation des ressources en eau	79
Tableau 2.6 Objectifs opérationnels et de recherche pour les années 80	83
Tableau 3.1 Stations météorologiques de la région de la rivière Nottaway	99
Tableau 3.2 Stations nivométriques de la région de la rivière Nottaway	100
Tableau 3.3 Stations hydrométriques en service ou ayant existé sur le bassin versant de la rivière Nottaway	100
Tableau 4.1 Pourcentage des fréquences d'images satellites utilisables pour la zone couvrant le sud du Québec ...	113
Tableau 4.2 Pourcentage des fréquences d'images satellites utilisables pour la zone couvrant le bassin de la rivière Nottaway	113
Tableau 5.1 Données nivométriques utilisées pour la simulation et résultats des comparaisons entre celles-ci et l'image du 10 avril 1981	133
Tableau 5.2 Résultats de l'analyse combinatoire entre les données au sol et l'imagerie satellite	135
Tableau 5.3 Paramètres optimaux du modèle CEQUEAU calibré	151

	<u>PAGE</u>
Tableau 5.4 Comparaison des simulations non corrigées, corrigées avec des lignes de neige et corrigées avec des données issues du traitement des images satellites	160
Tableau 5.5 Différence des lames d'eau mensuelles (mm) entre le débit observé (Q_o) et le débit calculé (Q_c) pour les quatre simulations	168
Tableau 5.6 Résultats de l'intégration de données satellites au niveau d'un modèle non calibré	176
Tableau 5.7 Différence des lames d'eau mensuelles (mm) entre le débit observé (Q_o) et le débit calculé (Q_c) avant et après correction (mise à jour)	177

LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
Figure 1.1	Profils verticaux de vent dans 2 types de peuplement	14
Figure 1.2	Exemple de détermination du facteur de degré-jours ...	19
Figure 1.3	Signatures spectrales de la neige selon l'état du manteau nival	19
Figure 2.1	Distribution des fenêtres de transmission atmosphérique dans l'atmosphère terrestre au niveau du spectre électro-magnétique	24
Figure 2.2	Positions relatives des fenêtres énergétiques des rayonnements gamma	35
Figure 2.3	Relation entre le comptage net et l'équivalent-eau de la neige	37
Figure 2.4	Plan des données satellites multitudes stratifiées, calibré par des mesures de lignes de neige pour l'estimation du contenu en eau de la neige au niveau du bassin	44
Figure 2.5	Exemple de création d'un masque binaire	46
Figure 2.6	Classification descriptive réalisée par le groupe de travail de l'UNESCO/IHD	57
Figure 2.7	Baisse typique du couvert nival selon Leaf (1969)	65
Figure 2.8	Ecart-type de la procédure de prévision vs la date, pendant la fonte sur les rivières King et Kern	65
Figure 2.9	Pourcentage vs temps de couvert nival résiduel pour le bassin de la rivière Conejos	69
Figure 2.10	Volume annuel d'écoulement vs le déplacement linéaire des courbes d'ablation du manteau nival pour le bassin de la rivière Conejos	69
Figure 2.11	Effet de la complexité d'un modèle mathématique sur la solution	77

	<u>PAGE</u>
Figure 2.12 Effet d'un progrès technologique sur une frontière de production de coût-efficacité	81
Figure 2.13 Description conceptuelle des bénéfices à partir des prévisions améliorées	81
Figure 3.1 Situation géographique du bassin de la rivière Nottaway	86
Figure 3.2 Bassin hydrographique de la rivière Nottaway	87
Figure 3.3 Carte géologique du bassin de la rivière Nottaway	88
Figure 3.4 Extension de la mer de Tyrell et du lac proglaciaire Ojibway-Barlow sur le bassin de la rivière Nottaway ..	89
Figure 3.5 Situation des dépôts meubles sur le bassin de la rivière Nottaway	91
Figure 3.6 Distribution des précipitations sur le bassin de la rivière Nottaway	92
Figure 3.7 Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1941-1970) pour Chibougamau	93
Figure 3.8 Hydrogramme de la rivière Nottaway, station MRN 080701	93
Figure 3.9 Zones bioclimatiques du bassin versant de la rivière Nottaway	94
Figure 3.10 Emplacement des stations météorologiques par rapport au bassin versant de la rivière Nottaway	96
Figure 3.11 Emplacement des stations nivométriques par rapport au bassin versant de la rivière Nottaway	97
Figure 3.12 Emplacement des stations hydrométriques sur le bassin versant de la rivière Nottaway	98
Figure 3.13 Schématisation du bassin versant naturel de la rivière Nottaway avec l'aide d'une grille carrée	102
Figure 4.1a Fréquence d'observation des images satellites pour la saison 1975-1976	109

	<u>PAGE</u>
Figure 4.1b	Fréquence d'observation des images satellites pour la saison 1976-1977 110
Figure 4.1c	Fréquence d'observation des images satellites pour la saison 1977-1978 111
Figure 4.1d	Fréquence d'observation des images satellites pour la saison 1978-1979 112
Figure 5.1	Représentation du territoire couvert par l'analyse des images numériques 139
Figure 5.2	Représentation de l'erreur associée à l'interpolation de la grille UTM du fuseau 18 sur le fuseau 17 140
Figure 5.3	Distribution des pourcentages de superficie nivale pour toute la zone du bassin de la rivière Nottaway telle qu'obtenue par SCANIQ 143
Figure 5.4	Débits observés et calculés sur le bassin versant de la rivière Nottaway: simulation de base sans correction pour l'année 1981 153
Figure 5.5	Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway: simulation corrigée par des lignes de neige pour l'année 1981 155
Figure 5.6	Distribution des pourcentages de couvert nival selon l'essai numéro 1 157
Figure 5.7	Distribution des classes de pourcentages de couvert nival selon l'essai numéro 2 158
Figure 5.8	Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway: simulation corrigée par des données de superficie nivale, provenant de l'analyse des images NOAA pour l'année 1981 159
Figure 5.9	Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway: comparaison de la simulation de base et des simulations corrigées pour l'année 1981 .. 162

	<u>PAGE</u>	
Figure 5.10	Variation temporelle de la valeur absolue de l'écart journalier entre les débits calculés Q_C et les débits observés Q_O , en pourcentage du débit journalier observé pour l'année 1981	163
Figure 5.11	Variation temporelle de la valeur absolue de l'écart journalier entre les débits calculés Q_C et les débits observés Q_O , en M.C.S. pour l'année 1981	164
Figure 5.12	Cumul des débits journaliers observés et calculés pour la période du 1er janvier au 30 juin 1981	165
Figure 5.13	Cumul des débits journaliers observés et calculés pendant la crue printanière, du 13 avril au 30 juin 1981	167
Figure 5.14	Distribution de l'équivalent-eau du couvert nival pour le 21 avril 1981, avant la mise à jour	172
Figure 5.15	Distribution de l'équivalent-eau du couvert nival pour le 21 avril 1981, après la mise à jour, avec les données de superficie nivale classées	173
Figure 5.16	Distribution de l'équivalent-eau du couvert nival pour le 21 avril 1981, après la mise à jour avec les données de superficie nivale non classées	174
Figure 7.1	Organigramme d'un système de traitements opérationnels des images satellites pour des applications hydrologiques et de recherche	186
Figure 7.2	Procédure d'interpolations au niveau des fuseaux UTM pour le traitement opérationnel de plusieurs bassins versants	190

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

		<u>PAGE</u>
Photo 1.	Image multibande originale du 10 avril 1981, après correction géométrique	124
Photo 2.	Image multibande originale du 21 avril 1981, après correction géométrique	124
Photo 3.	Image multibande originale du 22 mai 1981, après correction géométrique (image de référence)	125
Photo 4.	Image multibande du 10 avril 1981, après l'application d'un masque voilant les formations nuageuses principales (jaune) et d'un autre masque caractérisant le sol nu (vert)	125
Photo 5.	Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image multibande du 10 avril 1981 de celle du 22 mai 1981	126
Photo 6.	Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image multibande du 21 avril 1981 de celle du 22 mai 1981	126
Photo 7.	Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image du 10 avril 1981 de celle du 22 mai 1981, combinée à un masque des surfaces sans neige (rouge)	127
Photo 8.	Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image du 21 avril 1981 de celle du 22 mai 1981, combinée à un masque des surfaces sans neige (rouge)	127
Photo 9.	Image différentielle du 21 avril 1981 et du 22 mai 1981, complétée du masque des contours du bassin versant de la rivière Nottaway	128

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le couvert nival constitue l'un des phénomènes hydrologiques les plus représentatifs des régions nordiques. La mesure de ses caractéristiques semble très simple à première vue, puisque la neige constitue l'un des facteurs les plus facilement reconnaissables sur une photographie aérienne ou sur une image prise par un satellite (Evans, 1974). Ce n'est toutefois pas si aisé. Meier (1975) donne une description très juste de ce phénomène. Selon lui, la neige peut être caractérisée comme un matériel grandement dispersé, granulaire, stratifié, instable thermodynamiquement, extrêmement variable dans le temps et l'espace et possédant des propriétés électromagnétiques uniques. La neige au sol est toujours sujette à un environnement thermique changeant, de sorte que ses caractéristiques physiques varient continuellement. Comme elle est facilement érodée et redéposée par le vent, la hauteur de neige au sol varie dans le temps ou dans l'espace. La fonte s'avère encore plus complexe et plus rapide. Dans certains bassins hydrologiques, elle peut survenir en l'espace de quelques jours à quelques semaines (Ferguson et Lapczaks, 1977), s'avérant la source première de l'écoulement annuel (Fitzgibbon et Dunne, 1979) et peut souvent contribuer entre 35 et 60% au volume annuel. C'est de là que vient son importance pour la gestion de la ressource eau.

Garstka et al. (1958) furent parmi les premiers à mentionner que des prévisions précises du volume d'eau emmagasiné sous forme de neige étaient nécessaires afin d'optimiser la gestion des réservoirs utilisés pour la production hydroélectrique et de satisfaire les besoins en eau de l'agriculture et des municipalités. Tous les auteurs ont confirmé ce fait par la suite. Haefner (1977) a poussé cette déclaration plus loin en établissant une liste détaillée des activités dépendantes de telles prévisions (tableau I-1).

Toutefois, l'estimation ou la prévision des volumes d'eau emmagasinés sous forme de neige s'est avérée très problématique, surtout à cause du

TABLEAU I-1. RAISONS POUR L'OBSERVATION DU COUVERT NIVAL

<p>Gestion de la ressource eau</p> <ul style="list-style-type: none">- besoins et réserves d'eau fraîche- prévisions d'écoulement- irrigation- production hydroélectrique- contrôle de crue- sédimentation- navigation
<p>Hasard</p> <ul style="list-style-type: none">- avalanches- inondations- surveillance des zones urbaines- surveillance des voies de circulation et de communication
<p>Planification</p> <ul style="list-style-type: none">- implantation humaine- récréation- transport- agriculture- évaluation des terres en général
<p>Demandes scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none">- emplacement de la limite nivale transitoire et climatique- variations et distribution de la limite nivale saisonnière et régionale- distribution ou schémas de fonte- influence sur le bilan radiatif et les conditions atmosphériques- impacts géoécologiques- influence sur les infrastructures humaines

manque de données d'entrée aux modèles hydrologiques et de la représentativité de celles-ci (Meier, 1974b). Plusieurs approches ont été prises pour contourner ce problème et de nombreux types de modèles furent développés afin de simuler d'une façon plus ou moins exacte le comportement nival pendant la fonte.

L'imagerie satellite apporte une nouvelle perspective en vue de la modélisation du couvert nival. De nombreux facteurs semblent l'avantager. Elle permet des observations spatiales offrant une meilleure délimitation de la limite nivale que celle obtenue par interpolation des mesures ponctuelles au sol (Eschner et al., 1977). Elle est idéale pour des régions peu accessibles, dont le réseau hydrométéorologique est peu dense (Meier, 1974a). Les satellites fournissent également des observations répétitives de grandes surfaces (Salomonson et Hall, 1980) et surtout, les données satellites sont disponibles à un coût moindre que les observations au sol ou par survols aériens, sans impliquer les risques associés à ces derniers.

Malgré ses grands attraits, l'imagerie satellite a reçu une acceptation quelque peu limitée par la présence de certaines lacunes (Salomonson et Hall, 1980), qui seront discutées plus loin. De nombreuses méthodes de cartographie et de prévisions ont été mises au point, mais elles s'avèrent parfois difficiles d'application pour une raison ou une autre, dans le cadre d'un usage opérationnel au Québec.

Dans la plupart des approches antérieures, les prévisions ont été faites soit par des modèles sans télédétection, soit par des modèles modifiés pour inclure la télédétection ou encore par des modèles conçus pour la télédétection seule. Tous ont un point en commun: améliorer la précision des prévisions à court et long terme. Pour plusieurs raisons les modèles conçus pour la télédétection seule sont difficilement applicables à nos régions. Par exemple, la majorité de ces modèles, ne sont applicables qu'en milieu montagneux où la limite nivale est généralement bien délimitée selon l'altitude.

De toutes les méthodes potentielles, il en est une qui a retenu notre attention. L'approche choisie semble très prometteuse du fait qu'elle suggère l'utilisation de données numériques obtenues par satellite pour aider à optimiser et calibrer objectivement un modèle déterministe afin d'améliorer la précision des simulations et des prévisions. Cette technique, relativement peu traitée dans la littérature, permet de lier la variabilité spatiale de la fonte du modèle déterministe à la variabilité temporelle et spatiale de l'extension du couvert nival de l'imagerie satellite.

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU COUVERT NIVAL

1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU COUVERT NIVAL

La précision des prévisions et des simulations repose sur la connaissance du système à simuler. Mieux il est compris, plus facile est sa transposition sous forme de modèle. Les caractéristiques du couvert nival ont été étudiées depuis longtemps, mais c'est le U.S. Corps of Engineers (1956, 1960), qui le premier a fourni une description globale des principaux mécanismes régissant la dynamique du couvert nival. D'autres auteurs ont suivi dans ce sens par la suite. Toutefois, il reste encore beaucoup de recherche à effectuer pour parvenir à une meilleure compréhension de la dynamique du couvert nival et ce en raison de la complexité qui la caractérise. En fait, la dynamique de la fonte de la neige devient très complexe lorsque les températures sont proches du point de congélation.

1.1 Paramètres de base

La définition des divers paramètres de base du couvert nival peut s'avérer utile pour la compréhension des chapitres ultérieurs.

1. Equivalent ou contenu en eau de la neige

L'équivalent en eau représente la lame d'eau qui résulterait de la fonte totale du stock de neige (UNESCO-IASH-WMO, 1970). Ce facteur s'avère le plus important pour les prévisions de fonte (Wiesnet et McGinnis, 1974). Il dépend de nombreux facteurs dont la topographie, la précipitation, le vent, la végétation, les processus de fonte et la distribution spatiale du couvert nival.

2. Densité (ρ):

La densité peut être définie comme étant la masse de neige par unité de volume (UNESCO-IASH-WMO, 1970). C'est un fac-

teur d'importance pour la fonte. Elle augmente généralement jusqu'au printemps. La densité est affectée par la température, l'élévation (McMillan et Smith, 1975), le type de précipitation, le vent, etc... La densité moyenne des précipitations solides est d'environ 0,1. Toutefois la densité de la neige au sol est généralement plus élevée.

3. Epaisseur (H):

L'épaisseur représente la hauteur physique observée du couvert nival. Ulaby et Stiles (1980) mentionnent qu'elle peut être utilisée pour des prévisions, mais que l'équivalent-eau et la densité lui sont préférés à cause de sa variabilité spatiale. Rappelons que l'équivalent en eau de la neige au sol est égal au produit de la hauteur par la densité de cette neige.

4. Eau libre (m):

L'eau libre est la fraction du poids d'eau liquide contenue dans les interstices entre les grains de neige et qui n'est pas liée solidement aux grains individuels. C'est aussi un indice du murissement du couvert nival pour la prévision de fonte. Elle se caractérise par de grandes variations temporelles, des difficultés de mesure élevées et une compréhension incomplète de son comportement (Ulaby et Stiles, 1980).

5. Taux de fonte:

Le taux de fonte représente la lame d'eau journalière écoulee dans le bassin et est généralement exprimé en $\text{mm j}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Il varie sur le bassin en fonction de la température de l'air, de la pression de vapeur, du vent, du rayonnement

solaire, de l'albédo, de la végétation et des conditions de surface (Anderson, 1972). C'est un des facteurs les plus importants au niveau de la fonte nivale.

6. Superficie du couvert nival:

La superficie du couvert nival représente la surface couverte par la neige. Sa variabilité dépend des facteurs énoncés précédemment.

7. Limite nivale:

La limite nivale représente la bordure ou la limite séparant une zone couverte de neige, d'une zone sans neige.

1.2 Formation

Le couvert nival est la résultante de l'accumulation des précipitations solides au sol et de divers autres éléments, tels que le givre, les précipitations liquides, la glace, l'eau liquide et divers polluants (McKay, 1968). De plus, l'altitude, la proximité des grandes masses d'eau, l'utilisation du sol, la topographie, la végétation et la température sont autant de facteurs déterminants sur les variations locales de la formation du couvert nival. Il s'en suit que la distribution spatiale du volume de neige accumulé pendant l'hiver s'avère très difficile à évaluer (Meiman, 1968).

1. Altitude:

En général, l'accumulation de la neige augmente avec l'altitude sans baisse marquée de densité (Logan, 1972; Charbonneau et al., 1977). Steinhoff et Barnes (1976) ont même défini une relation du type $Y = b_0 + b_1X$, où; X est la variable

indépendante (altitude), Y est la variable dépendante (hauteur de neige), b_0 et b_i sont les coefficients de la régression linéaire.

2. Couvert forestier:

Selon Meiman (1968), la distribution nivale résultant de la présence d'un couvert forestier semble plus uniforme que celle associée à l'altitude. En fait, l'accumulation de la neige au sol a tendance à augmenter avec l'altitude et à être uniforme sous un couvert forestier. Toutefois, la voûte forestière peut affecter la distribution spatiale de l'accumulation nivale sur une échelle locale, par son action sur les mouvements d'air et le balayage (drift) (Jeffrey, 1968; Fitzgibbon et Dunne, 1979). De plus, la couronne des arbres de la forêt peut intercepter les précipitations solides et l'importance de cette interception dépend du type de peuplement et de sa densité (Meiman, 1968; Federer et al., 1973).

3. Proximité des grandes surfaces d'eau libre:

La proximité des grandes surfaces d'eau libre provoque un effet de réchauffement local, une augmentation de l'humidité de l'air et peut affecter la distribution de la précipitation, exemple: le "Snowbelt" près des Grands Lacs (Brown et al., 1968). Ce facteur peut également impliquer des variations de température durant l'hiver, résultant en des changements rapides dans les caractéristiques du couvert nival (Howarth et Woo, 1975).

4. Topographie:

La topographie est un facteur physique important, puisqu'elle agit au niveau de l'exposition, par rapport à l'angle solaire

et au niveau du mouvement des masses d'air. C'est un phénomène très localisé (Meiman, 1968; Lauer et Draeger, 1974).

5. Utilisation du sol :

Elle influence grandement la redistribution du couvert nival selon sa rugosité par rapport au vent (Howarth et Woo, 1975). Les variations à plus grande échelle de l'accumulation sont surtout reliées au climat régional par l'action des masses d'air, fronts et circulation atmosphérique en général (Charbonneau et al., 1977; Fitzgibbon et Dunne, 1979). Or selon Stepphun et Dick (1974) les variations d'accumulation nivale à grande échelle provoquées par ces facteurs seraient minimales au niveau des bassins de petite taille (moins de 100 km²).

Il est évident qu'au niveau de la télédétection, les variations locales bien qu'importantes à petite échelle, soient reléguées au deuxième plan en raison de l'observation de très grandes surfaces comme on le verra plus loin.

1.3 Dynamique

La dynamique du couvert nival s'avère très complexe et il n'est nullement question ici de l'aborder dans le détail.

Le couvert nival est un système ouvert qui se forme par l'apport de précipitations lorsque la température est sous zéro °C et qui évolue, mûrit, réagit sous l'influence de divers paramètres, avant que ne commence la fonte printanière. Il est grandement dépendant de facteurs comme les précipitations liquides, la température de l'air, la pression barométrique et l'addition de précipitation solide (Logan, 1972). L'albédo, le vent, l'humidité relative et la nébulosité sont d'autres facteurs pouvant influencer la dynamique du couvert nival (Algazi et Suk, 1975).

Une revue des différents éléments de la dynamique nivale peut s'avérer intéressante pour une meilleure compréhension de son comportement.

1. Densité:

La densité du couvert nival est influencée surtout par la densité des précipitations de nouvelle neige qui peuvent varier de 0,03 à 0,25 selon la température de l'air et le tassement de la neige existante (Riley et al., 1972). Les autres paramètres décrits plus haut ont également un rôle à jouer dans l'accroissement de la densité (McKay, 1968; Logan, 1972). La forêt joue aussi un rôle important, en favorisant une diminution de la densité sous le couvert forestier par rapport aux zones non forestières. Cette action est une résultante directe de la protection qu'offre la forêt contre le vent et autres paramètres du genre (Jeffrey, 1968; Fitzgibbon et Dunne, 1979).

2. Tassement:

Le tassement est une résultante du vieillissement du stock de neige et de l'interaction des éléments précités. Selon Riley et al. (1972), le taux de tassement peut être exprimé par une fonction du type: $\bar{\rho}_t - \rho_{\max}$ où ρ_{\max} (densité maximale) peut atteindre 0,45 à 0,6 et où $\bar{\rho}_t$ est la densité moyenne au temps t. Le taux de tassement est à son maximum pendant la fonte.

3. Evaporation:

L'évaporation est un phénomène très restreint à la surface du couvert nival. Elle atteint parfois 3% du volume total saisonnier, mais est généralement compensée par la condensation (Lemmela et Kuusisto, 1974; Odegaard et Orstrem, 1977). Ces

faibles montants sont surtout dus à la faible quantité de chaleur disponible et au fait que la probabilité que la fonte survienne, soit plus élevée, puisqu'elle nécessite moins d'énergie que l'évaporation.

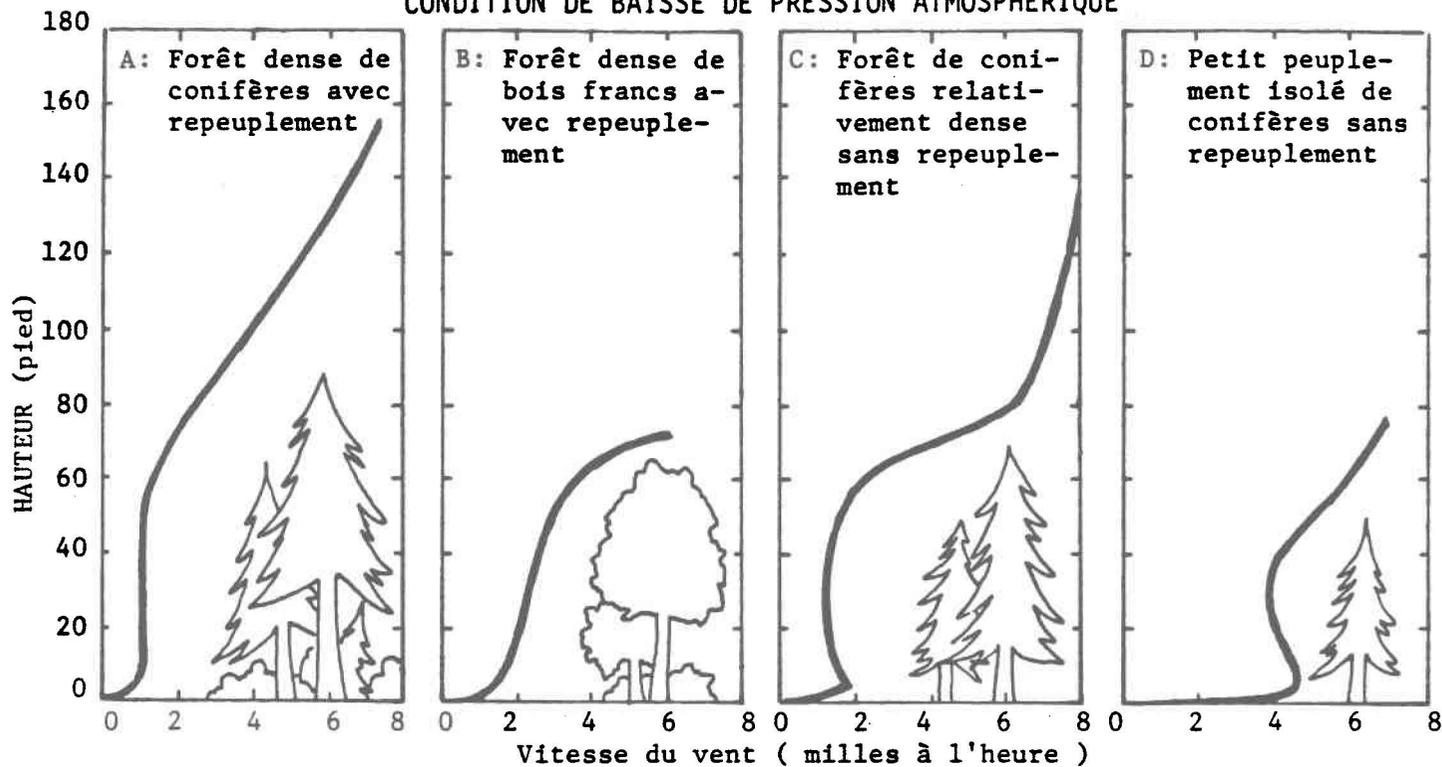
4. Vent:

Le vent est responsable de la redistribution de la neige par l'action du balayage (drift). Il est influencé par la rugosité du terrain. Son action est d'autant plus grande que les zones sont uniformes et non couvertes de végétation (figure 1.1). Il s'en suit une prise en charge par le vent (zone d'ablation) qui redépose la neige dans les endroits abrités lorsque la capacité de transport du vent diminue (Jeffrey, 1968; Fitzgibbon et al., 1979). Au printemps, il permet l'augmentation de l'évaporation par l'évacuation de la vapeur d'eau au-dessus de la neige et agit sur les flux de chaleur sensible et latente (Jeffrey, 1968).

5. Bilan thermique:

Le bilan thermique est bien décrit par Riley et al. (1972) et le U.S. Corps of Engineers (1956, 1960). Il est relativement complexe, mais primordial pour la compréhension de la fonte nivale. Il s'effectue principalement par conduction, mais la diffusion thermique peut être affectée par les caractères structuraux et cristallins de la neige, le degré de compaction, l'étendue des couches de glace, le degré d'humidité et la température nivale. Mais, selon Riley et al. (1972), la densité s'avère un bon indice des propriétés thermiques. La température au bas du couvert nival est normalement maintenue à 0 °C par l'apport du flux géothermique dans les régions où le pergélisol est absent. Le bilan thermique lors de la fonte est abordé au chapitre 2.

CONDITION DE BAISSÉ DE PRESSION ATMOSPHERIQUE



CONDITIONS D'INVERSION

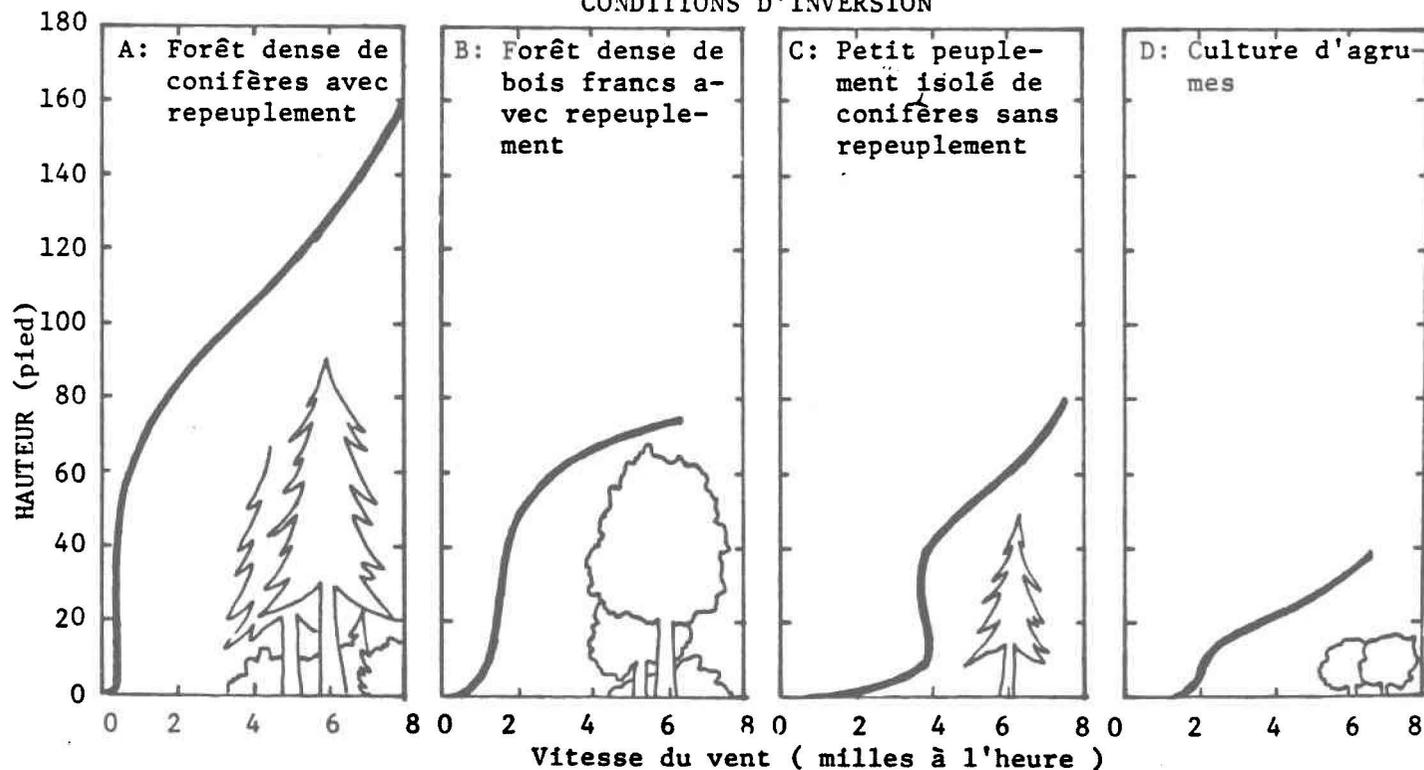


Figure 1.1: Profils verticaux de vent dans 2 types de peuplement (tiré de Jeffrey, 1968)

6. Bilan radiatif:

Le bilan radiatif est influencé par des paramètres locaux tels que les ombrages, les variations topographiques, une répartition inégale de la poussière à la surface, des variations de la densité de végétation (McKay, 1968; Jeffrey, 1968). Le couvert nival réfléchit les ondes courtes avec un fort albédo mais absorbe les ondes longues. Il possède également une forte émissivité au niveau de ces dernières.

1.4 Processus de fonte

La fonte du manteau nival semble être causée principalement par l'influence de la température (Rango, 1978; Dey et al., 1979). Toutefois le phénomène est beaucoup plus complexe, puisque la fonte est une résultante de trois phénomènes de base du transfert radiatif, lorsque le couvert nival a atteint 0 °C: rayonnement, convection et condensation (Odegaard et Ostrem, 1977; Moravec et Danielson, 1980). Toutefois, l'élévation, la pression de vapeur d'eau, les fronts d'air chaud, l'exposition, la pluie, le vent, la chaleur latente et le flux géothermique peuvent y contribuer à des degrés variables (Mel'Chanov, 1973; Odegaard et Ostrem, 1977).

Généralement la fonte débute en surface pour se répercuter vers le fond (Riley et al., 1972; Dunne et al., 1976). Baker et Carder (1977) ont donné une très bonne description du phénomène de la fonte dans le couvert nival:

"La chaleur produite à cette couche (surface), produit de la fonte, qui avec la pluie, percole dans le couvert nival. Si celui-ci possède un déficit calorifique, l'eau gèlera et relachera de la chaleur qui chauffera le couvert nival. Quand le couvert nival devient isotherme, l'eau additionnelle satisfera la capacité de rétention de la neige et toute l'eau en excès sortira par le fond du manteau nival. Une perte de chaleur par

la surface nivale refroidira le couvert nival et l'eau en excès gèlera pour satisfaire le déficit calorifique jusqu'à ce que toute l'eau en excès ait gelé et que le manteau nival développe un déficit calorifique".

Le murissement est un des indices de la disparition prochaine du manteau nival et il serait intéressant de le mesurer. La capacité de rétention semble répondre à ce critère. C'est la quantité d'eau retenue dans le manteau nival au temps où la fonte apparaît à la base. Il est surtout lié à la densité de la neige (Riley et al., 1972). La capacité de rétention se compare généralement aux valeurs de lames d'eau fondue dans les premières étapes de fonte (Martinec, 1972). Ce paramètre s'avère aussi très variable puisqu'il peut changer fortement sur une base journalière (Dunne et al., 1976).

Le taux de fonte représente un des paramètres d'importance au niveau des prévisions de fonte. Ce facteur s'exprime en $\text{mm jr}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Il traduit une lame d'eau de fonte produite par une température d'un degré-jour. L'ampleur de cette lame d'eau dépend de divers facteurs, dont la densité de la neige, la température de l'air et de la neige et la nébulosité (Landale et Gill, 1972). Cependant, plusieurs des facteurs énumérés à la section 1.4, sont également responsables de la variabilité du taux de fonte. Selon Meiman (1968), cette variable peut servir d'indice du temps requis par le couvert nival, pour fondre complètement. Généralement, le taux de fonte maximal survient lorsque la température de l'air augmente encore et que le couvert nival commence à disparaître (Martinec, 1972, 1980a, 1980b). Schumann et al. (1980) notent également que les grands changements de l'étendue du couvert nival ne correspondent pas nécessairement à des variations importantes du taux de fonte. Ainsi, une variation importante de l'étendue du couvert nival pendant l'hiver peut être associée à de faibles changements du taux de fonte, tandis qu'au printemps, le phénomène inverse se produit. Ainsi, de faibles variations de la superficie du couvert nival peuvent être liées à des changements marqués du taux de fonte.

Le volume maximal d'écoulement de fonte dépend surtout des caractéristiques physiques du bassin. Il est d'autant plus élevé que les pentes sont fortes, que l'équivalent-eau est important et que le pourcentage du couvert forestier sur le bassin est faible (Landale et Gill, 1972; Mel'Chanov, 1973). Le drainage de l'eau emmagasinée peut aussi contribuer, et même parfois de façon catastrophique, au maximum de crue. Toutefois, le volume d'eau disponible à l'écoulement est grandement dépendant du déficit en eau du sol et donc des précipitations antérieures au début de l'hiver (Quick et Pipes, 1972). Landale et Gill (1972) ont bien traduit ce phénomène:

"La quantité et les caractéristiques des matériaux de surface demeurent les facteurs physiques les plus importants causant des variations dans l'écoulement de fonte. Le type de matériel et surtout le degré de saturation précédant le gel, contrôlent le volume d'infiltration et l'emmagasinement au printemps suivant. La roche à nu implique une capacité d'emmagasinement moindre en eau de fonte dans le sol, ce qui résulte en un volume d'écoulement plus important".

C'est d'ailleurs le cas de plusieurs emplacements du Bouclier Canadien. Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que les différents types d'écoulement sont très difficiles à différencier (Martinec, 1980a).

Pour sa part la disparition du couvert nival est très irrégulière et ce en raison de la différence d'épaisseur de neige due aux facteurs énoncés à la section 1.2 et aux taux de fonte différentiels (Martinec, 1980a, 1980b). Cette variabilité joue un grand rôle sur l'écoulement au printemps.

Outre ces divers paramètres, l'évaporation et la sublimation déjà abordées à la section 1.3, n'ont que peu d'influence.

Weiss et Wilson (1958) et Martinec (1960) utilisent la notion de degrés-jours pour exprimer le taux de fonte. Le nombre de degrés-jours est déterminé par le nombre de degrés au-dessus de 0 °C pour une température

journalière moyenne. Weiss et Wilson (1958) ont mis en relation le nombre de degrés-jours observé avec la valeur d'équivalent en eau résultant de la fonte (figure 1.2). Cette relation permet de déterminer un taux de fonte moyen caractérisé par la pente de la relation linéaire.

1.5 Caractéristiques spectrales

De nombreux auteurs ont abordé l'étude des propriétés de diffusion et de rayonnement de la neige. O'Brien et Munis (1975) ont pour leur part défini les caractéristiques spectrales dans la gamme visible et infrarouge du spectre électro-magnétique.

La neige est caractérisée par une réflectance spectrale élevée au niveau de longueurs d'onde situées dans le visible et l'infrarouge proche (entre 0,7 et 1,4 μm). Cette réflectance n'est comparable qu'à celle de certains types de roches et de nuages. Ce phénomène se traduit par un albédo très élevé. Le rayonnement non réfléchi est absorbé de 81 à 100% dans les premiers 20 centimètres d'épaisseur de neige. Au niveau de l'infrarouge thermique, la neige agit à la façon d'un corps noir (Barnes et al., 1974). La neige peut aussi être comparée à un diffuseur idéal comme l'ont mentionné Staenz et Haefner (1981).

Plusieurs facteurs peuvent modifier les réflectances: la forme du grain, l'épaisseur du couvert nival, la densité, l'humidité, la pollution de surface et l'âge du manteau nival (Haefner, 1977). Selon Bergen (1975), la densité devient le facteur gouvernant l'albédo lorsque la taille des particules dépasse 1,5 millimètre.

La réponse spectrale du couvert nival diminue graduellement avec l'augmentation des longueurs d'onde (figure 1.3) (O'Brien et Munis, 1975; Staenz et Haefner, 1981). Toutefois, l'intensité de cette variation dépend des conditions physiques du couvert de neige. Ainsi, la détérioration du manteau nival s'accroît avec l'âge et le murissement (Staenz et Haefner, 1981). Par exemple, l'albédo d'une neige nouvelle est supérieur à l'albédo

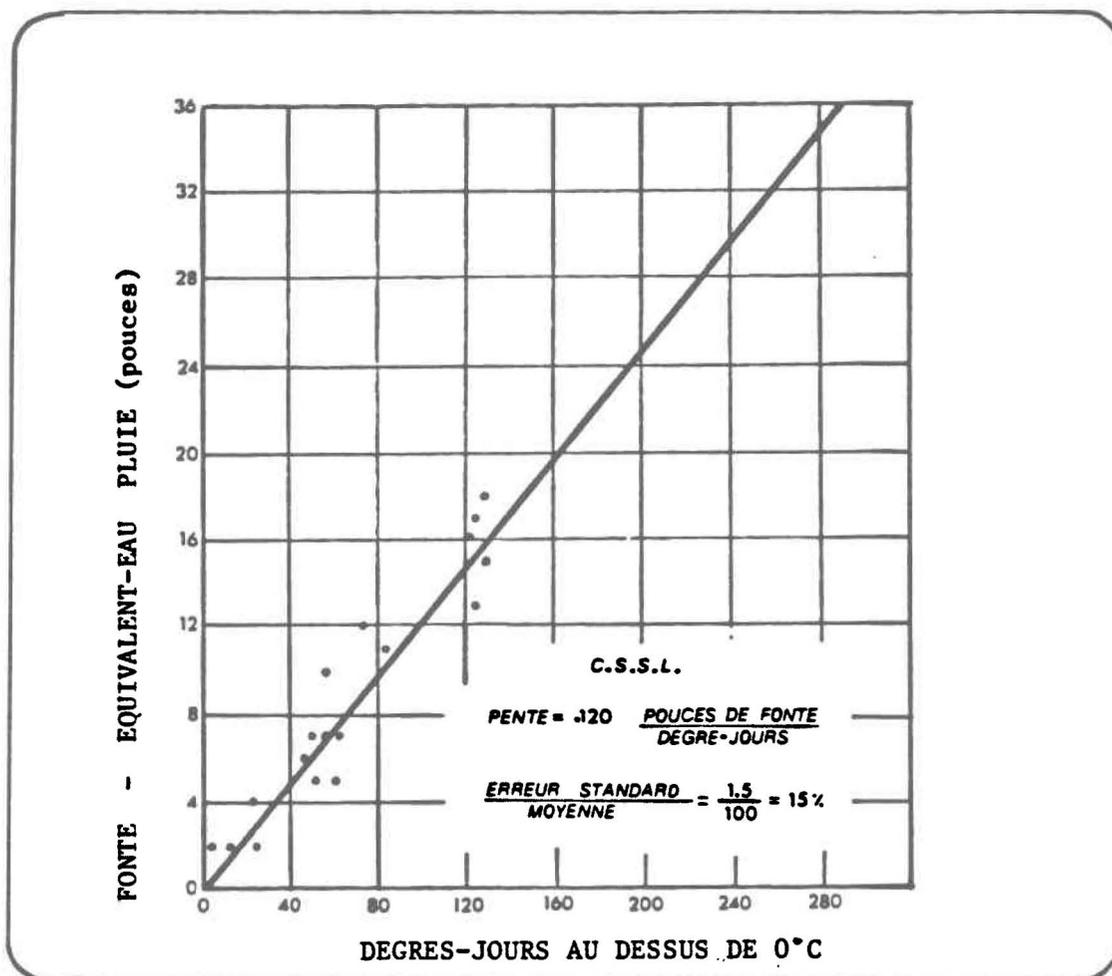


Figure 1.2: Exemple de détermination du facteur de degré-jours
(tiré de Weiss et Wilson, 1958)

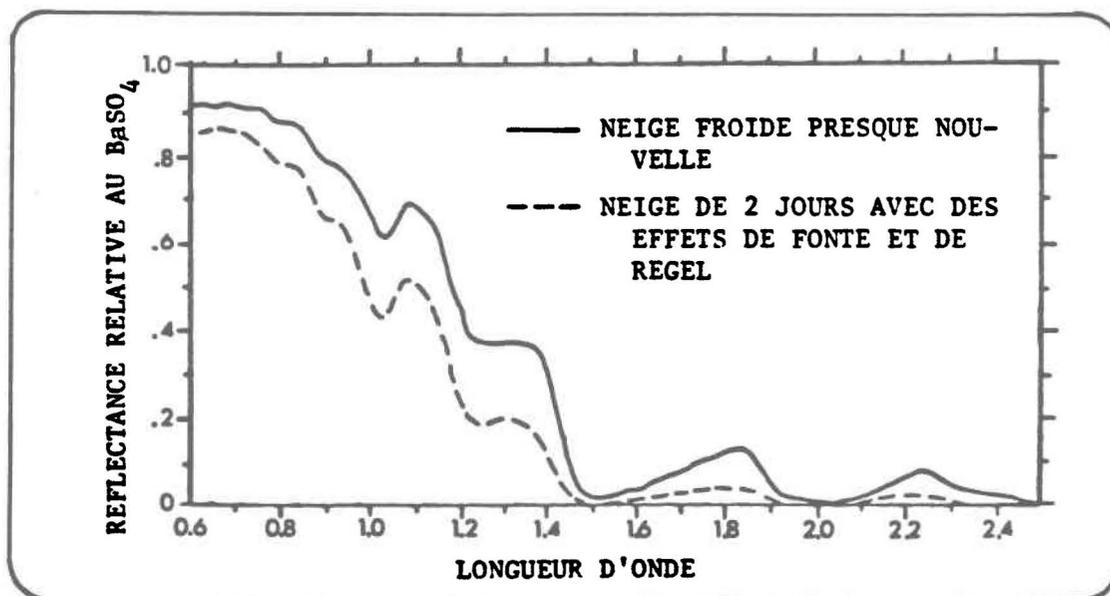


Figure 1.3: Signatures spectrales de la neige selon l'état du manteau
nival (tiré de O'Brien et Munis, 1975)

d'une neige vieille de deux jours et cette tendance s'accroît avec l'augmentation de la taille granulaire des particules de neige (McGinnis et al., 1975): Bergen (1975) note que l'albédo peut passer rapidement de 0,91 à 0,6 ou 0,7. Dans un même contexte, Jeffrey (1968) rapporte des diminutions d'albédo passant de 0,84 à 0,4. La pluie et la fonte contribuent fortement à la réduction du rayonnement réfléchi et cette baisse d'albédo est surtout marquée au niveau du rayonnement infrarouge (O'Brian et Munis, 1975). Staenz et Haefner (1981) notent que ce comportement de la part du couvert nival permet de dégager une relation entre une neige sèche et une neige mouillée. En fait le rapport spectral de ces deux types de neige augmente graduellement pendant le passage de la partie visible à la partie infrarouge du spectre électro-magnétique.

Il faut mentionner que la réponse spectrale du manteau nival est également liée à l'angle solaire, à l'exposition de la surface nivale au soleil et aux conditions d'illumination (Odegaard et Ostrem, 1977; Wiesnet, 1980). Or, selon ces auteurs, le couvert nival se comporte comme une surface lambertienne lorsque les conditions d'illumination sont diffuses et que le couvert nival est uniforme.

CHAPITRE 2

REVUE DES METHODES ACTUELLES D'OBSERVATION
DU COUVERT NIVAL PAR TELEDETECTION ET DE
PREVISION DE LA FONTE PRINTANIERE

2. REVUE DES METHODES ACTUELLES D'OBSERVATION DU COUVERT NIVAL PAR TELEDETECTION ET DE PREVISION DE LA FONTE PRINTANIERE

De nombreuses méthodes furent mises au point afin de prévoir le déroulement de la fonte nivale, tant du point de vue de la modélisation hydrologique que du côté de l'imagerie satellite. Toutefois, pour de nombreuses raisons, les deux domaines furent rarement traités conjointement. De plus, aucune synthèse à ce jour n'a décrit l'ensemble de ces méthodes. Certains ouvrages généraux ont été réalisés dans l'un ou l'autre domaine, tels ceux de Barnes et Bowley (1968, 1974) pour la télédétection, mais la plupart des études réalisées représentent surtout des analyses de détail.

2.1 Observations du couvert nival par télédétection

De nombreuses études furent réalisées pour démontrer l'applicabilité de la télédétection au phénomène de la dynamique de la fonte nivale. Barnes et Bowley (1968, 1974) ont été parmi les premiers à faire un survol global des diverses techniques de télédétection en vigueur à ce moment. Ces méthodes furent développées pour différents environnements hydrologiques, mais il ne fait nul doute que la majorité des bassins étudiés se situent dans les massifs montagneux de l'ouest américain, où fut mis sur pied le programme ASVT (Nasa's Applications Systems Verification Test). Relativement peu de bassins furent analysés en dehors de ces régions. Le nombre est encore plus restreint au Canada. Les chapitres suivants montreront l'état actuel de notre connaissance dans ce domaine.

2.1.1 Définition

La télédétection regroupe plusieurs domaines. Elle est associée principalement à l'imagerie satellite. Mais, l'observation à distance à partir d'avions à haute altitude ou d'autres systèmes d'observations aéroportés ou au sol fait également partie intégrante de ce champ d'intérêt. L'aspect technique et technologique des systèmes d'observation constitue aussi une autre partie du domaine de la télédétection. Haefner (1977) a noté de nombreux avantages dans l'emploi de la télédétection:

- observation simultanée de grandes surfaces permettant une comparaison régionale efficace;
- observation des régions éloignées et inaccessibles;
- observation de la dynamique du couvert nival;
- classification aisée de l'utilisation du sol.

Toutefois, il ne faut pas se cacher que certaines limitations peuvent survenir, dépendant du but, de la méthodologie ou de l'instrumentation, ce qui n'en diminue pas son attrait pour autant.

2.1.2 Problématique d'observation du couvert nival par télédétection à partir de satellites

Le choix de longueurs d'ondes appropriées s'avère très important pour la détection nivale puisque la neige peut être très bien détectée à une certaine longueur d'onde mais non à une autre. De plus, ce choix doit tenir compte de la transmission atmosphérique, si les observations sont effectuées à partir de satellites. Ainsi, l'atmosphère est caractérisée par des phénomènes d'absorption survenant à certaines longueurs d'ondes données lesquels sont dus à l'eau, au CO_2 , à l'azote et aux poussières. L'observation ne peut être efficace qu'aux longueurs d'onde correspondant aux fenêtres où l'absorption est nulle ou presque (figure 2.1). L'observation dans les longueurs d'onde inférieures au visible est impossible à partir des satellites et l'observation aux ondes supérieures doit être judicieusement choisie. Toutefois, ceci n'empêche pas certaines observations telle celle de l'émission de rayonnements gamma d'origine terrestre, mais cette observation nécessite des vols à basse altitude pour contrer l'effet d'atténuation de l'atmosphère. Le choix de l'angle d'observation s'avère aussi important, puisque la réponse spectrale en est grandement dépendante (O'Brien et Munis, 1975).

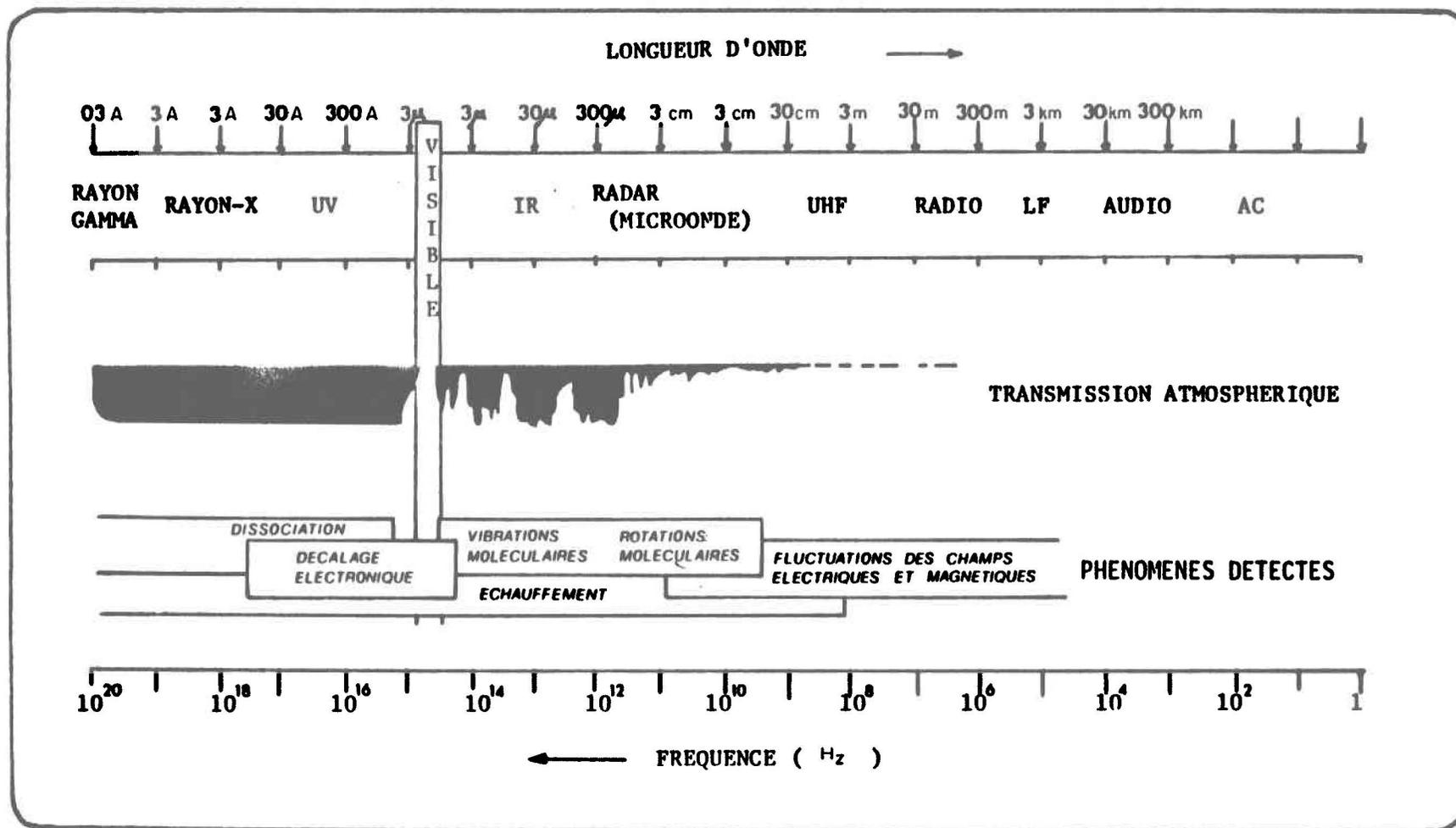


Figure 2.1: Distribution des fenêtres de transmission atmosphérique dans l'atmosphère terrestre au niveau du spectre électro-magnétique (tiré de Badqley et al., 1969)

La neige elle-même possède une signature spectrale bien définie (figure 1.3). La réflectance est maximale dans le visible et décroît graduellement dans l'infrarouge pour devenir presque inexistante dans les micro-ondes (O'Brien et Munis, 1975). Les longueurs d'onde 1,55 - 1,75 μm et 2,1 - 2,35 μm constituant des zones de forte absorption, s'avèrent intéressantes quand elles sont comparées à la signature spectrale des nuages, qui possèdent un albédo élevé dans cette partie du spectre électromagnétique. Ceci permet une bonne discrimination des deux phénomènes (Waterman et al., 1980). L'eau est caractérisée par une très forte absorption du rayonnement aux longueurs d'onde supérieures à 0,8 μm , ce qui abaisse grandement sa réflectance. Lorsqu'elle est présente dans la neige pendant la fonte, elle cause une forte diminution de la réflectance du manteau nival. Ce phénomène est encore plus marqué dans l'infrarouge (O'Brien et Munis, 1975).

2.1.3 Systèmes d'observation du couvert nival

Cette section aborde les divers systèmes d'observations à distance du couvert nival en se limitant aux ondes électromagnétiques, soit: le rayonnement gamma (10^{-12} μm) visible et proche infrarouge (10^{-6} m), infrarouge thermique (10^{-5} m), et micro-onde (10^{-3} - 10^{-1} m) (Meier, 1975). Il ne s'agit toutefois que d'une description sommaire de chaque système, en rapport avec la détection du couvert nival. Le tableau 2.1 fournit une vue synoptique des caractéristiques des principaux systèmes de télédétection actuels et passés.

Une image satellite est composée de pixels. Ces derniers sont les plus petits éléments d'une image numérique et se comparent à la notion de grain de l'image en photographie. La superficie au sol que couvre un pixel détermine la résolution de l'image. Plus la résolution est élevée et plus petite est la surface couverte par un pixel. Ce qui se traduit par une augmentation du niveau de détail. La brillance apparente de chaque pixel est la résultante des brillances combinées de la neige, de la forêt, des affleurements rocheux, des ombrages, de l'eau et même des structures humaines.

TABLEAU 2.1. CARACTERISTIQUES DES SATELLITES ACTUELS (Tiré de Valocin, 1976; Haefner, 1977; Rango, 1978)

SYSTEME	BANDES SPECTRALES	COUVERTURE SPATIALE DE L'IMAGE	FREQUENCE D'OBSERVATIONS	MISE EN SERVICE	RESOLUTION
OPERATIONNEL					
- NOAA/VHRR	0,6 - 0,7 μm 10,5 - 12,5 μm	Sub-continentale	visible: 1 par jour I.R.Th: 2 par jour	1972 -	Visible: 0,9 km I.R.: 4,0 km
- ESSA-NOAA (AVCS-SR)	AVCS: 0,6 - 0,7 μm SR: 10,5 - 12,5 μm	Sub-continentale	visible: 1 par jour I.R.Th: 2 par jour	1966 -	4,0 km
- SMS/GOES (VISSR)	0,6 - 0,7 μm 10,6 - 12,5 μm	1/3 du globe	1/2 heure	1974 -	1,0 km (2, 4, 8 km)
- TYROS-M (AVHRR) - NOAA-5,6 (AVHRR)	0,58 - 0,68 μm 0,725 - 1,0 μm 3,55 - 3,93 μm 10,5 - 11,5 μm 11,5 - 12,5 μm	Sub-continentale 2200 km x 5000 km (2200 x 2200 km)	visible: 1 par jour I.R.Th: 2 par jour	1979 -	Visible: 1,0 km I.R.Th: 1,0 km
SEMI-OPERATIONNEL					
- LANDSAT MSS ERTS 1, 2, 3	0,5 - 0,6 μm 0,6 - 0,7 μm 0,7 - 0,8 μm 0,8 - 1,1 μm	185 x 185 km	1:18 jours	1972 -	80 m
- LANDSAT-D (MSS-TM)	MSS: voir ci-haut TM: 0,45 - 0,52 μm 0,52 - 0,60 μm 0,63 - 0,69 μm 0,73 - 0,90 μm 1,55 - 1,75 μm 10,4 - 12,55 μm	185 x 185 km	1:16-18 jours	1981	MSS: 80 m TM: 30 m
- AVION HAUTE ALTITUDE DE LA NASA	Visible Infra-rouge proche Infra-rouge thermique	400 - 900 km ²	variable	Couverture occasionnelle dans des endroits choisis pour des périodes de 10 ans et plus	~ 10 m
RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT					
- SKYLAB EREP CAMERAS MULTIBANDES SPECTROMETRES	Visible: 0,41 - 0,46 μm 0,46 - 0,51 μm 0,52 - 0,56 μm 0,62 - 0,67 μm 0,68 - 0,76 μm I.R.: 0,78 - 0,88 μm 0,98 - 1,08 μm 1,09 - 1,19 μm 1,20 - 1,30 μm 1,55 - 1,75 μm 2,10 - 2,35 μm I.R.Th 10,20 - 12,50 μm	10 000 - 30 000 km ²	variable	1973 - 1974	80 m
- SKYLAB EREP MICRO-ONDE RADIOMETRE DIFFUSEUR	13,9 GHz	0-48° angle d'incidence	variable	1973 - 1974	11 km
- NIMBUS HRIR-THIR	HRIR: 0,7 - 1,3 μm THIR: 10,5 - 12,5 μm	Sub-continentale	journalier	1972 (discontinu)	-
- NIMBUS 1-4 (ESMR)	RADIOMETRES MULTIBANDES	Sub-continentale	journalier dans des endroits choisis	Discontinu depuis 1974	4 - 55 km
- NIMBUS 5-6 (ESMR)	1,55 GHz 0,86 GHz	Sub-continentale	journalier	Discontinu depuis 1972	30 km
- HCMM/HCMR	1,35 GHz	Bande de 700 km	1:3 jours	1978 -	500 m
- NIMBUS-6 (SMMR) SEASAT-A (SMMR)	6,6 GHz 10,69 GHz 18,0 GHz 22,2 GHz 37,0 GHz	Bande de 1000 km	~ 1:3 jours	1978	92 x 144 km 57 x 88 km 34 x 53 km 28 x 43 km 17 x 26 km
- SEASAT-A (SAR)	1,35 GHz	Bande de 100 km	-	1978	25 m
- DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)	- Visible et I.R. 0,4 - 1,1 μm - I.R. Ther. 8,0 - 13,0 μm 1,5 - 1,6 μm	-	2 par jour 4 par jour pour les 2 satellites	-	0,6 - 4 km

2.1.3.1 Gamme visible et infrarouge (proche et thermique)

Les données satellites dans la gamme du visible et de l'infrarouge n'ont d'applications que pour l'observation de la couche superficielle du couvert nival (Meier, 1972; Barnes et Bowley, 1980; Stiles et Ulaby, 1980). Toutefois, de nombreux auteurs ont déterminé d'une manière plus ou moins précise l'existence d'une relation entre la réflectance nivale et l'épaisseur (McGinnis et al., 1975; Eschner et al., 1977). Les résultats montrent un facteur de corrélation généralement faible et une épaisseur détectable extrêmement variable pouvant aller de 2 à 3 cm selon Barnes et Bowley, (1968) à 70 cm selon Eschner et al. (1977). Ce genre d'observations pourrait peut-être s'avérer intéressant pour des surfaces très homogènes, de faible épaisseur nivale et possédant des caractéristiques de surface hautement uniformes. Ce qui ne s'avère pas le cas pour la plupart des bassins.

L'observation du couvert nival dans le visible et l'infrarouge peut s'avérer très utile pour la cartographie du couvert nival ou pour la détermination de certaines caractéristiques du murissement du couvert nival (Schneider, 1980). La superficie observable du couvert nival par un satellite s'avère une fonction de la bande spectrale employée (Schneider et al., 1976) et de la résolution spectrale (Wiesnet, 1980).

Il y a une limite à l'observation du sol dans cette portion du spectre. Ainsi, les observations dans le visible et le proche infrarouge sont restreintes aux périodes diurnes lorsqu'il n'y a pas de nuage. L'infrarouge thermique peut être employé à toute heure du jour, mais demeure tout de même limité par la nébulosité (Meier, 1972). Les fenêtres d'observations se situent entre 0,4 à 0,7 μm pour le visible, 0,8 à 2,35 μm pour l'infrarouge et entre 10,5 à 12,5 μm pour l'infrarouge thermique. L'utilisation des températures de brillance (température apparente) observées dans l'infrarouge thermique fut aussi analysée pour la cartographie du couvert nival. Théoriquement, ce système permet de détecter les températures de surface du couvert nival. En partant de l'hypothèse que le manteau nival est isotherme, la théorie montre qu'il serait possible de détecter les

zones du couvert nival possédant une température égale à 0 °C, délimitant ainsi les zones potentielles de fonte. Des études ont été réalisées en ce sens, mais les résultats ne semblent guère convaincants. Les analyses ont montré que la détection des températures de brillance et leur correspondance avec la température réelle de la neige n'étaient pas encore assez précises. De plus, une faible résolution spatiale et la présence de végétation ou autres objets peuvent perturber la détection des températures réelles du couvert nival (Poulin, 1974).

Une description sommaire des caractéristiques de base des principaux systèmes satellites s'impose pour la compréhension des prochaines sections:

1. LANDSAT (ERTS-1,2,3):

L'imagerie Landsat repose sur l'utilisation de quatre bandes spectrales (tableau 2.1) où les bandes 4 et 5 sont situées dans le visible et les bandes 6 et 7 sont situées dans l'infrarouge. La fréquence de passage de chaque satellite au-dessus d'un même point est de 18 jours. Lors de l'opération conjointe de 2 satellites placés en opposition de phase, un même point peut être observé à tous les neuf jours. L'imagerie Landsat est caractérisée par une projection quasi orthogonale qui peut être facilement corrigée. La dimension d'un pixel est de 80 m. De plus, la tache élémentaire au sol est de 80 m par 80 m environ, soit 0,64 hectare (Luther et al., 1975). Une seule image peut couvrir des bassins de taille allant jusqu'à 34 000 km² (Wiesnet et McGinnis, 1974).

C'est la bande MSS-5 qui semble le mieux représenter l'étendue réelle du couvert nival, bien qu'elle soit à quasi saturation. La bande MSS-7 (infrarouge) représente mieux les conditions de fonte à la surface du couvert

nival (Hofer et Fuller, 1977). Ainsi, lorsqu'il y a de la fonte dans le couvert nival, il y a une production d'eau libre et cette eau a la caractéristique d'absorber fortement le rayonnement solaire. Ce qui se traduit par un albédo beaucoup plus faible que pour de la neige sèche. De plus, le rapport de la bande MSS-5 sur la bande MSS-7 permet de détecter efficacement les zones de fonte ou de murissement et de suivre l'évolution du manteau nival (Rango et al., 1975).

La venue du satellite Landsat D permettra des observations au sol avec une résolution de 30 mètres et une plus grande gamme de bandes spectrales que les trois premiers satellites Landsat (tableau 2.1).

2. NOAA:

Les premiers satellites météorologiques de la NOAA¹ sont ceux de type TIROS, ITOS et ESSA, qui ont finalement été remplacés par ceux de type NOAA. Ils sont dotés de capteurs VHRR (Very High Resolution Radiometer) dans le visible (0,6 - 0,7 μm) et SR (Scanning Radiometer) dans l'infrarouge thermique (10,5 - 12,5 μm), dont la résolution chez les derniers venus de la série est de 1 km. Les caractéristiques principales sont présentées au tableau 2.1. Ces satellites possèdent une orbite polaire synchrone qui permet une image journalière dans le visible et deux (nuit et jour) dans l'infrarouge. Ils sont également caractérisés par une grande distorsion de l'image qui doit être corrigée avant l'utilisation. La

¹ NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

superficie couverte par une image est de $1700 \times 6000 \text{ km} = 10\,200\,000 \text{ km}^2$.

Les derniers venus de la série, NOAA-7 et TIROS-N, sont caractérisés par des capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) à cinq canaux (tableau 2.1). Ils travaillent en combinaison pour produire quatre passages par jour au-dessus d'une même région (03:00, 07:30, 15:00 et 19:30 heure normale) (Schneider, 1980).

3. GOES/SMS:

Ce sont des satellites météorologiques géostationnaires à deux canaux (visible: $0,55 - 0,75 \mu\text{m}$ et thermique: $10,5 - 12,5 \mu\text{m}$). Le système d'imagerie GOES est caractérisé par une fréquence d'observation élevée, soit à toutes les demi-heures. Toutefois, la distorsion est élevée et il y a une baisse radiale de la résolution à partir de l'équateur à cause de la courbure de la terre. Un avantage sérieux du système SMS/GOES est la possibilité de réaliser des séquences d'images (film loop). La série a débuté avec les satellites prototypes SMS 1 et 2 qui ont été suivis de GOES 1, 2 et 3. GOES 2 se situe au-dessus de l'équateur à 75° de longitude ouest et GOES 3 se situe à 150° de longitude ouest, à une altitude d'environ $35\,000 \text{ km}$.

4. NIMBUS:

La série Nimbus est caractérisée par un capteur HRIR (High Resolution Infrared Radiometer) dans la gamme de l'infrarouge proche ($0,7 - 1,3 \mu\text{m}$) et d'un capteur infrarouge thermique THIR (Thermal Infrared Radiometer) ($10,5 - 12,5 \mu\text{m}$). Toutefois, la résolution de ce dernier

s'avère très faible et n'est vraiment applicable que pour les grandes surfaces planes (Meier, 1974a; Barnes et Bowley, 1974).

5. AUTRES:

Il existe d'autres types de satellites, mais leur fréquence de passage les limite en tant que systèmes utilisables opérationnellement. Skylab EREP (Earth Resource Experimental Package) S192 était constitué d'une plate forme satellite qui n'est maintenant plus en fonction. C'était un balayeur multicanal à treize bandes dont les bandes 1 à 6 fonctionnaient dans le visible, les bandes 7 à 12 dans l'infrarouge proche et la bande 13 dans l'infrarouge thermique (tableau 2.1). Sa résolution était de 80 mètres (Valovcin, 1976; Barnes et Smallwood, 1975). D'autres systèmes tels que HCMM (Heat Capacity Mapping Mission), DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) et certains autres procédés de photographies aériennes ont été ou sont encore utilisés en recherche (Bowley, et al., 1981).

2.1.3.2 Gamme micro-onde

L'utilisation des micro-ondes s'avère des plus intéressantes pour la détermination de l'équivalent en eau du manteau nival. Elles peuvent traverser les nuages et autres éléments et ces observations sont sensibles aux changements de propriétés diélectriques des matériaux (neige, glace, eau, etc...). Ces dernières sont principalement une fonction du contenu en eau (Ulaby, 1977; Goodison et al., 1980). La plupart des essais sont présentement faits au sol. Toutefois, dans le cas de satellites ou de vols aéroportés, la résolution radiométrique est très faible puisqu'elle est fonction de la taille de l'antenne employée (Ulaby, 1977). Les paramètres du couvert nival influençant les micro-ondes sont: l'épaisseur, l'équiva-

lent-eau, la taille des particules, la présence d'eau libre, le type et les conditions d'humidité des matériaux sous-jacents et la longueur d'onde utilisée pour réaliser les observations (Ulaby, 1977; Schmugge, 1980; Goodison et al., 1980). La présence d'eau libre s'avère probablement un des facteurs les plus déterminants, en causant un accroissement des températures de brillance des radiomètres (systèmes passifs) et une baisse de la valeur du coefficient de diffusion (σ°) des systèmes actifs (Barnes et Bowley, 1980; Stiles et al., 1981). Il existe aussi deux sources d'émission représentées par le sol et la neige et chacune d'elles est gouvernée par des propriétés de transmission et de réflectance des interfaces air-neige, neige-sol, ainsi que par l'absorption et les propriétés de diffusion de la couche nivale (Hall et al., 1978; Stiles et al., 1981). Une attention spéciale doit aussi être portée à la longueur d'onde employée. Ainsi une longueur d'onde supérieure à 3 cm éliminera les effets atmosphériques et les nuages tandis qu'une longueur d'onde trop élevée pourra même faire disparaître la présence du manteau nival (Meier, 1972). Pour parer à ce genre d'inconvénient, il est possible d'employer plusieurs radiomètres de longueurs d'onde différentes pour cerner les caractéristiques principales du couvert nival (Ulaby et Stiles, 1980) et éliminer l'influence au sol sous-jacent (Rango et al., 1979).

Il existe deux types de capteurs micro-ondes: les systèmes actifs (radar) et les systèmes passifs (radiomètre):

1. Actif (Radar):

Les systèmes actifs permettent de mesurer la réflectivité radar qui est liée au coefficient de rétrodiffusion (σ°). Elle peut être comparée à la réflectivité mesurée par les capteurs optiques (Stiles et al., 1981). Jusqu'à maintenant, la plupart des systèmes radars ont été utilisés à bord d'avion (Meier, 1974a). Les systèmes SLAR (Side Looking Airborne Radar) et SAR (Synthetic Aperture Radar) sont quelques-uns des plus employés en océanographie. Au

niveau des systèmes radars placés sur orbite, SEASAT-A fut le premier en opération avec un radar à ouverture synthétique à son bord. Ce système possédait une résolution élevée (25 m), mais il est rapidement tombé en panne.

2. Passif (radiomètre):

Les systèmes passifs mesurent le rayonnement émis par la scène observée. Ce rayonnement est capté sous une forme radiométrique qui traduit les températures de brillance du terrain (Stiles et al., 1981). Parmi les radiomètres placés sur orbite, la série Nimbus fut l'une des premières en opération. Les premiers satellites de la série Nimbus, étaient caractérisés par des radiomètres de type ESMR (Electronic Scanning Microwave Radiometer) opérant avec une longueur d'onde de 1,55 cm. Toutefois, leur résolution se limitait à 25 km (Kunzi et Staelin, 1975; Chang et al., 1980). Plus récemment, Nimbus G fut mis en orbite avec un radiomètre de type SMMR (Multichannel Scanning Microwave Radiometer) opérant avec 5 longueurs d'onde (0,8 à 6 cm). Toutefois, aucune amélioration n'a été apportée au niveau de la résolution spectrale (Hall et al., 1978).

L'utilisation opérationnelle de l'imagerie micro-onde est encore loin d'être réalisée et Stiles et al. (1981) en résumant l'état actuel:

"La physique de l'émission, de la réflexion et de la diffusion du rayonnement à partir des couverts de neige est encore mal connue. Plusieurs équations devront être résolues avant qu'un meilleur système d'observation micro-ondes actif ou passif, puisse être imaginé."

2.1.3.3 Rayonnement gamma

Plusieurs auteurs ont étudié la possibilité d'utiliser le rayonnement gamma pour la détection de l'équivalent en eau du couvert nival, dont Dahl et Odegaard (1970), Dmitriev et al. (1971), Peck et Bissell (1973), ainsi que plusieurs autres par la suite.

L'utilisation de l'atténuation des rayons gamma est intéressante pour l'estimation de l'équivalent-eau total du couvert nival. Cette atténuation est une mesure directe de la masse totale de la neige (Grasty et Holman, 1972) qui est basée sur l'hypothèse que l'eau atténue le flux du rayonnement gamma entre le sol et le détecteur. Le rayonnement gamma provient principalement des isotopes radioactifs (K, Bi, Π) dans le sol (figure 2.2). Toutefois des sources secondaires proviennent du radon (Rn^{222}) et du rayonnement cosmique (Peck et al., 1971). Zotimov (1968) mentionne que 91% de ce rayonnement terrestre est confiné aux dix premiers centimètres du sol.

La mesure de l'atténuation des rayons gamma peut s'effectuer selon deux approches. La première approche nécessite le survol d'un même itinéraire à deux périodes différentes, mais selon une même altitude (Endestrol, 1980). Généralement, les résultats des survols d'hiver sont comparés aux résultats d'un survol effectué pendant l'été. La deuxième approche requiert deux survols d'un même itinéraire dans un court intervalle de temps où le survol d'été n'est pas nécessaire. La méthode la plus fréquemment commentée dans la littérature implique le survol d'un même lieu à deux altitudes différentes. La détermination de l'équivalent en eau pour chacune des deux approches repose sur une base similaire. Elle requiert la mesure des différences de rayonnement enregistrés entre les deux survols (survol d'été et d'hiver pour la première approche et survol à deux altitudes différentes pour la deuxième approche). La différence spectrale est mesurée à partir des pointes de rayonnement associées aux isotopes radioactifs (figure 2.2). Cette différence est une fonction directe de l'équivalent en eau du couvert nival au sol.

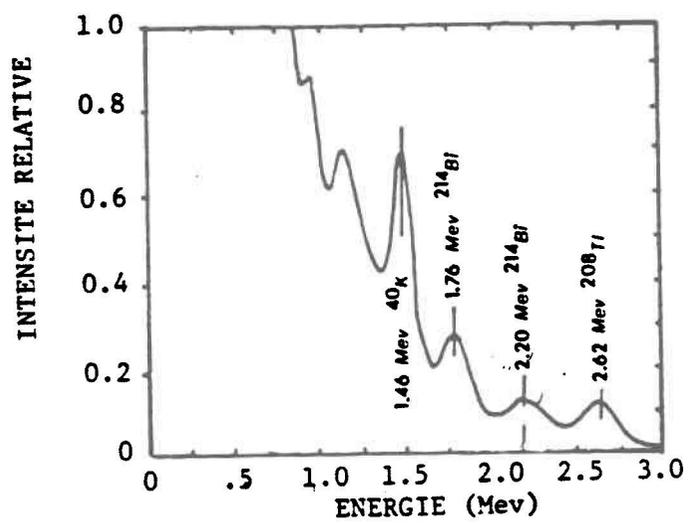


Figure 2.2: Positions relatives des fenêtres énergétiques des rayonnements gamma (tiré de Peck et al., 1971)

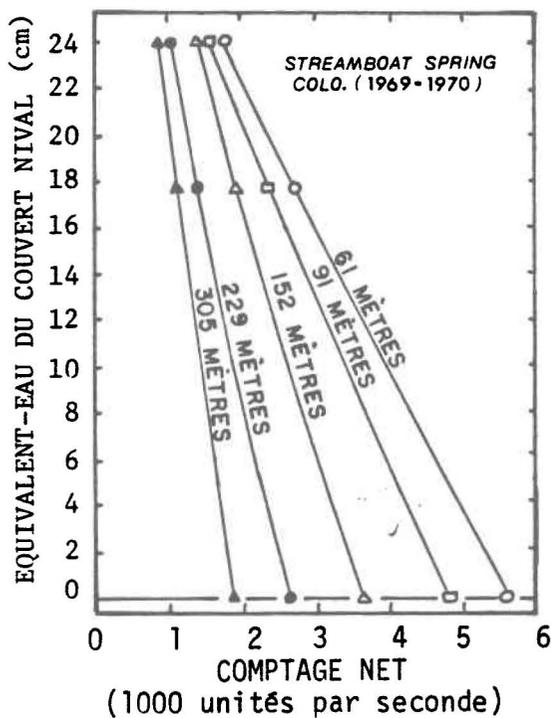
Cependant, l'utilisation du système dépend de nombreux facteurs, dont l'altitude et l'humidité du sol, mais également de la masse d'air entre le sol et l'avion, de l'angle de pénétration, de l'épaisseur du couvert nival, des erreurs de navigation, des variations saisonnières du rayonnement cosmique, de la topographie etc... La plupart de ces facteurs peuvent être corrigés, mais certains constituent de véritables contraintes. Ainsi l'altitude maximale d'un survol ne peut guère dépasser 150 m, si l'on désire conserver une précision acceptable pour l'évaluation de l'équivalent en eau de la neige (figure 2.3) (Peck et al., 1980). L'épaisseur limite de détection varie de 25 à 50 cm d'équivalent-eau (Endestrol, 1980) et la topographie s'avère une contrainte quasi insurmontable en milieu montagneux puisqu'elle implique des variations de distance entre l'avion et le sol qui se traduisent par des fluctuations importantes du rayonnement gamma.

La précision dépend de l'attention portée aux facteurs précités et aux mesures. Des erreurs de précision de moins de 10% sont difficiles à obtenir, mais selon Loijens (1975) des estimations à $\pm 0,9$ cm d'équivalent-eau sont réalisables au Canada, dans les zones à relief peu prononcé.

Bien que ce système soit quasi opérationnel au Canada, il n'en reste pas moins qu'il s'applique mieux aux régions où de faibles variations de l'humidité du sol, des concentrations de radon, de la topographie et du rayonnement gamma sont observées. Le dernier facteur est moins problématique sur le Bouclier Canadien où le flux est relativement constant (Grasty et Holman, 1972). Toutefois, cette méthode représente toujours un certain risque d'opération à cause de la basse altitude requise pour les survols.

2.1.3.4 Limitations des systèmes de télédétection

Une foule de problèmes peuvent être liés à l'observation du couvert nival par satellite. Ces problèmes sont liés aux caractéristiques techniques de l'appareillage ou bien aux caractéristiques physiques et spectrales de la composition de la surface terrestre. Le tableau 2.2 intègre les principaux problèmes soulevés dans la littérature en rapport avec



1: Corrigé aux index communs d'humidité atmosphérique et du sol.

Figure 2.3: Relation entre le comptage net et l'équivalent-eau de la neige (Streamboat Spring, Colorado; période de recherche 1969-1970) (tiré de Peck et al., 1980)

TABLEAU 2.2. LISTE DES PROBLEMES ET LIMITATIONS DES SYSTEMES DE TELEDETECTION RENCONTRES DANS LA LITTERATURE

1. Nébulosité
2. Couvert forestier
3. Délais d'obtention des images satellites et des données
4. Faible fréquence de passage des satellites
5. Résolution spectrale et taille du pixel
6. Faible précision des données sur de petits bassins
7. Nature lithologique du sol
8. Réflectance spectrale voisine pour la neige et d'autres matériaux
9. Angle solaire
10. Topographie erratique ou rugueuse
11. Ombrage sur les pentes orientées au nord
12. Couvert nival trop mince pour être détecté (< 3 cm)
13. Limite nivale indistincte
14. Erreurs d'interprétation
15. Variations radiométriques et spectrales des séries d'images
16. Variations de la qualité et du caractère du couvert nival en zone forestière
17. Distorsion des images satellites
18. Faible contraste entre les éléments composant le manteau nival
19. Faible précision des températures de brillance dans l'infrarouge thermique et les microondes

la télédétection. Il est certain que ces problèmes ne sont pas toujours rencontrés. Certains sont liés à un seul type de satellite et peuvent être contournés par l'emploi d'un autre système d'imagerie. D'autres problèmes peuvent être évités par une observation attentive ou par des méthodes de discrimination plus ou moins complexes et enfin, rares sont ceux qui empêchent totalement l'observation du couvert de neige. A ce sujet, plusieurs auteurs ont décrits différentes méthodes et palliatifs pour éviter ces contraintes dont Barnes et Bowley (1974). Une description plus détaillée des méthodes palliatives dans le cas de couvert forestier et de nébulosité sera présentée à la section 2.1.4.5.

2.1.3.5 Choix d'un système de télédétection approprié

Il y a de fortes divergences d'opinion de la part des auteurs sur le choix du type d'imagerie à employer. Toutefois, les divergences sont surtout limitées à NOAA et Landsat. Certains d'entre eux (Eschner et al., 1977; Dey et al. 1979; Schumann et al., 1980) préfèrent l'imagerie NOAA à celle de landsat tandis que d'autres mettent l'accent sur l'imagerie Landsat (Brown et al., 1980). Toutefois, tous sont d'accord sur la supériorité de l'imagerie satellite sur la photographie aérienne, en raison d'une plus grande facilité à cartographier et une plus grande objectivité dans la détermination des limites nivales (Barnes et Bowley, 1974). Elle s'avère aussi moins chère et plus rapide (Rango et Itten, 1976). Plusieurs auteurs suggèrent l'emploi d'une imagerie complémentaire à l'imagerie de base choisie (Eschner et al., 1977). Ainsi, le système le plus prometteur actuellement combine une imagerie satellite à haute résolution et faible fréquence de passage et une autre à plus faible résolution et haute fréquence (Rango et Salomonson, 1977b). De tous les systèmes d'imagerie disponibles, il y en a trois qui possèdent une application opérationnelle; Landsat, NOAA et GOES. Or, selon la plupart des auteurs, la combinaison Landsat-NOAA serait le meilleur système pour observer l'étendue du couvert nival (Tueller, 1978). Au niveau de la précision, les observations NOAA et Landsat ne diffèrent pas beaucoup selon Algazi et Suk, (1975).

Il n'existe pas encore de système satellite conçu pour la détermination de l'équivalent-eau, mais le développement des techniques micro-ondes est très prometteur dans ce domaine.

Parfois, le système d'imagerie requis peut dépendre de certains autres besoins. Dans les bassins de petite taille, où l'analyse de détail est nécessaire, l'imagerie Landsat s'avère la seule candidate potentielle. Dans d'autres cas, une limite nivale trop détaillée s'avère difficile à cartographier et le choix se porte alors sur un satellite à plus faible résolution (1 km: NOAA-GOES) (Tueller, 1978). GOES peut s'avérer le choix optimal dans les cas où l'étude requiert la stabilité spatiale d'un même pixel de jour en jour (Wiesnet, 1980).

2.1.4 Techniques d'analyse des données acquises par télédétection

Il existe de nombreuses techniques qui se sont raffinées relativement lentement ces dernières années. La plupart des techniques présentées ici ont pour but de reconstituer l'étendue du couvert nival. La précision relative de chacune d'elles réside dans leur capacité à localiser la position exacte de la limite nivale transitoire. Cette démarcation n'est pas vraiment continue. Elle est plutôt constituée d'îlots plus ou moins grands (Haefner, 1977).

2.1.4.1 Support des données acquises par télédétection

Les images satellites peuvent être acquises sous une forme analogique ou numérique. Le support analogique consiste en une image reproduite sur un papier photographique ou sur un transparent. Les images satellites nous parviennent généralement sous un format de 250 mm par 250 mm. Toutefois, les transparents sont parfois disponibles dans un format de 70 x 70 mm (images Landsat). Les images sont également disponibles sous forme de données numériques conservées sur rubans magnétiques. Les données numériques permettent de conserver plus d'informations que les données analogiques. En fait, les données numériques sont copiées directement de

l'image numérique provenant du satellite, ce qui n'implique aucune transformation importante, tandis que l'image analogique provient de la transcription d'une image numérique sur un support analogique. Ce transfert réduit généralement l'information originale.

Les données analogiques ou numériques proviennent généralement de l'observation de la terre selon plusieurs bandes spectrales (tableau 2.1) montrant la zone d'étude selon diverses longueurs d'onde. Chacune de ces bandes spectrales permet de produire une image noir et blanc de la zone observée. La superposition de plusieurs de ces bandes (généralement trois) permet de créer une image multibande fausse couleur de la même zone.

2.1.4.2 Appareils d'analyses

Cette section n'a pour but que de décrire sommairement les principaux appareils d'analyse servant à appliquer les diverses techniques d'analyse présentées à la section 2.1.4.3. Elles nécessitent toutes des données satellites sous une forme ou une autre, dépendant de la technique. De nombreux petits appareils peuvent entrer en ligne de compte, tels les planimètres électroniques ou manuels etc... Mais les instruments les plus employés sont: le stéréoscope, l'équidensitomètre et les appareils numériques avec ou sans console interactive. Une description plus détaillée de ces appareils est donnée à l'annexe I.

2.1.4.3 Eventail des techniques de cartographie du couvert nival

A. Méthodes analogiques

1. Cartographie manuelle:

La cartographie manuelle consiste à déterminer la limite nivale sur l'image satellite et de la retransposer sur une carte topographique avec l'aide d'un photo-restituteur (Zoom Transfert Scope). Cette méthode s'avère longue si la limite

nivale est discontinue. Les résultats sont très subjectifs et imprécis. L'approche de la cartographie manuelle doit tenir compte de la végétation, de la densité, de l'exposition, de l'élévation et de la pente (Katibah, 1975). Barnes et Bowley (1974a) ont déjà classé les techniques manuelles d'interprétation actuelles. Outre ces auteurs, plusieurs autres ont commenté cette méthode: Meier et Evans (1975), Rango et Itten (1976), Schumann (1978), Rango (1980) et Schumann et al. (1980).

2. Altitude moyenne:

La méthode de l'altitude moyenne permet de déterminer la superficie du couvert de neige, à partir de l'altitude de la limite nivale en plusieurs endroits du bassin versant (Meier et Evans, 1975). Elle requiert l'utilisation conjointe d'images satellites et de cartes topographiques. Par exemple, la superficie nivale d'un bassin partiellement enneigé peut être estimée par l'opération suivante: tout d'abord, il faut déterminer l'altitude de la limite nivale à différents points observables du bassin. L'altitude moyenne est estimée à partir de ces points. Par la suite, il suffit de calculer la superficie du sol au-dessus de l'altitude moyenne, à l'aide de la carte topographique. C'est une méthode rapide, nécessitant peu d'équipement et ayant une bonne précision. Toutefois, elle présente de sérieuses lacunes. Elle ne s'emploie qu'en terrain montagneux où le couvert nival est assumé uniforme, ce qui est rarement le cas. L'altitude de la limite nivale peut varier également selon l'exposition de la pente par rapport au soleil. Elle surestime souvent l'étendue nivale. Cette méthode peut s'avérer intéressante pour la détermination de l'étendue du couvert nival à partir des bassins adjacents ayant les mêmes caractéristiques physiques que le bassin concerné, lorsque ce dernier est enneigé.

3. Estimation de l'étendue nivale par la méthode de la grille:

L'utilisation d'une grille carrée pour la détermination de la superficie du couvert nival fut introduite par Lauer et Draeger (1974) mais le concept même de la grille carrée provient de Solomon et al. (1968). Cette méthode est basée sur le concept d'images diachroniques où on effectue une comparaison qualitative entre une image satellite sans neige au sol et une image montrant un certain couvert nival. L'analyse s'effectue de carreau à carreau où le technicien détermine la proportion de couvert nival se trouvant dans le carreau. La fraction associée au couvert nival peut être traduite en dixième (1/10) ou selon une classification particulière, telle celle proposée par Katibah (1975). Cet auteur propose cinq classes d'étendue du couvert nival, s'échelonnant comme suit: 0%, 0 à 20%, 20 à 50%, 50 à 98% et 100%. La sommation du produit du pourcentage de couvert nival de chaque carreau et de la superficie réelle des carreaux permet d'établir une estimation de l'étendue du couvert nival sur le bassin.

Cette technique s'avère moins rapide que les deux premières, mais demeure relativement précise. Elle s'avère plus précise en régions planes et avec l'utilisation d'images couleurs. Cette technique peut aussi s'avérer une étape intéressante pour l'usage du traitement numérique. Le même genre de concept fut employé dans certains modèles physiographiques déterministes (modèle CEQUEAU).

L'interprétation est relativement simple et peut être comparée avec des données de surface dans une analyse statistique (Katibah, 1975) (figure 2.4).

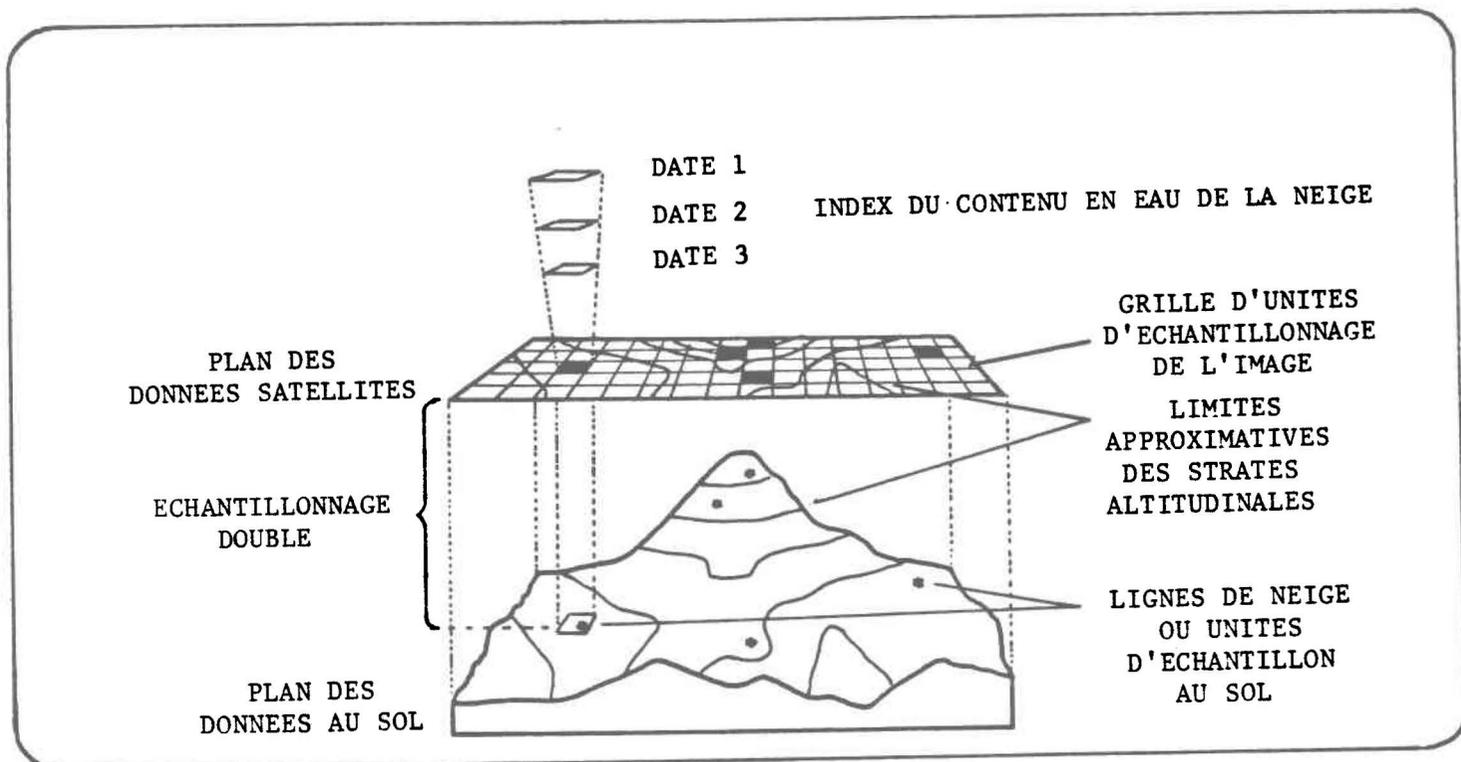


Figure 2.4: Plan des données satellites multidates stratifiées, calibré par des mesures de lignes de neige pour l'estimation du contenu en eau de la neige au niveau du bassin (tiré de Khorram, 1977a)

4. Méthode du seuil spectral:

La méthode du seuil spectral introduit les techniques électroniques. Elle est réalisée par l'intermédiaire d'un équidensitométrètre (voir annexe I). La méthode repose sur la réalisation d'un masque binaire correspondant à l'interprétation visuelle du couvert nival (figure 2.5). C'est une méthode essentiellement qualitative. L'utilisation d'une telle technique peut impliquer certains problèmes. Ainsi, la superficie du couvert nival peut être facilement surestimée avec une tentative d'inclure les faibles radiances. L'erreur varie entre 5 et 10%, mais peut atteindre 30% selon l'expérience du technicien (Meier et Evans, 1975). De plus, la méthode du seuil spectral est inefficace pour repérer la neige sous un couvert forestier et le coût d'opération est très élevé en raison du prix de l'équipement utilisé.

B. Méthodes numériques ou informatisées:

1. Séquence de film:

L'utilisation des séquences de film fut discutée par Smith (1975) et par Chaters et Suomi (1975). Elle est principalement destinée à l'utilisation des images GOES. La méthode consiste en un montage sur film d'une série d'images satellites. La séquence résultante défile dans un ordinateur préparé à cet usage (McIDAS: University of Wisconsin Man Interactive Data Access System). La détermination de la surface du bassin versant et la localisation de certains repères géographiques sont réalisées à partir de données de référence au sol. Le couvert nival est ensuite délimité subjectivement sur l'écran avec l'aide d'un curseur optique. Cette procédure permet d'obtenir une précision variant de 3 à 5% de l'étendue réelle du couvert nival (Schneider et McGinnis, 1977). Toutefois,

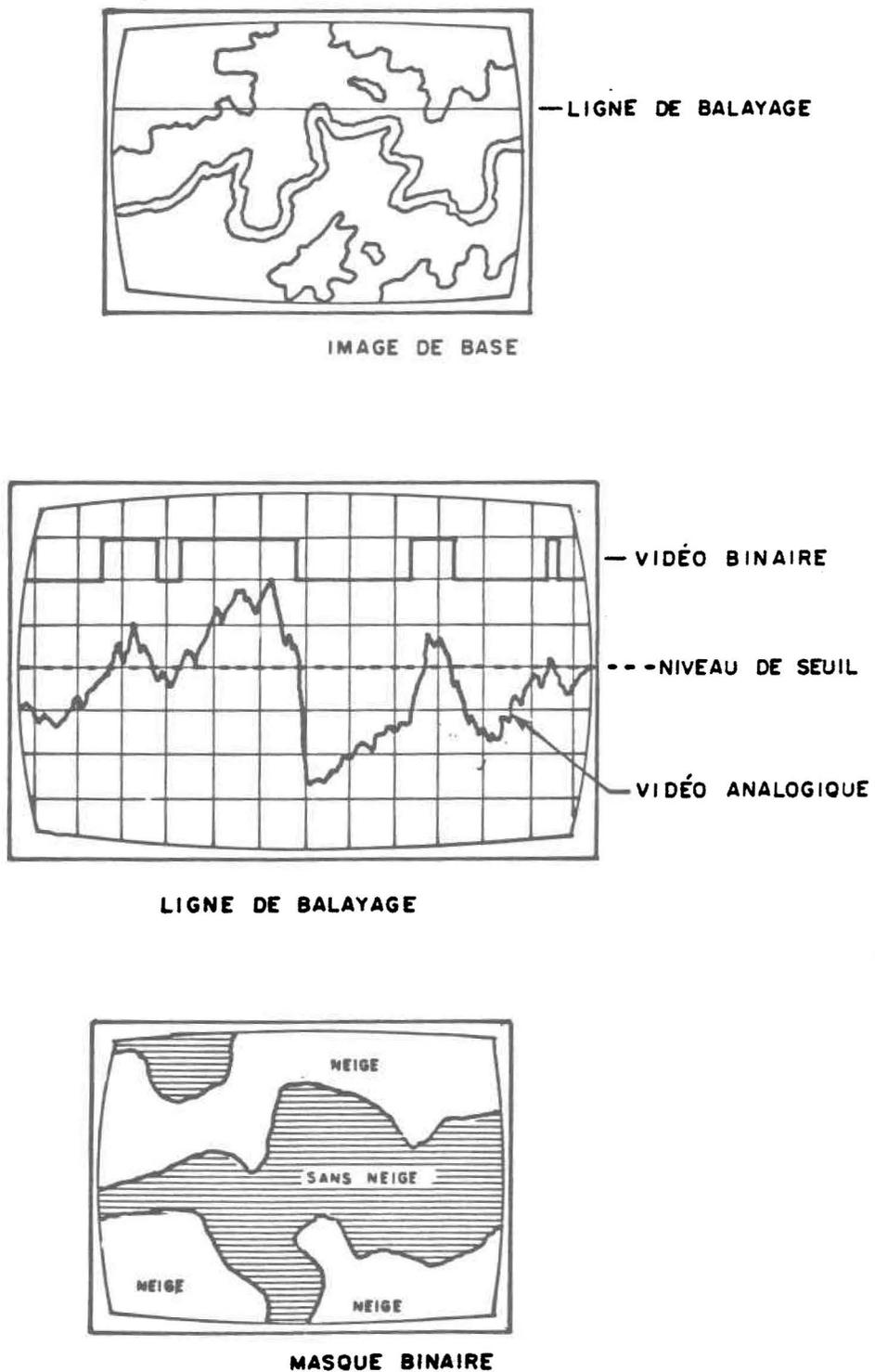


Figure 2.5 . Exemple de création d'un masque binaire
(tiré de Evans , 1974) .

cette méthode requiert une certaine expérience dans l'observation des caractéristiques nivales et de l'opération du système. La discrimination des nuages par l'intermédiaire du CSR (Cloud Substraction Routine) développé par Mosher (1977) s'avère un atout précieux. Cette procédure requiert l'analyse combinée de six images ou moins, où les pixels ayant les radiances les plus basses sont conservées en mémoire. L'ordinateur génère ensuite une cartographie composée du couvert nival (Gird, 1980). Toutefois, une telle application nécessite que le couvert nuageux ait été absent sur au moins une des images satellites.

2. Techniques numériques:

Les techniques numériques sont les méthodes de pointe au niveau du traitement des images satellites. Toutefois, ceci n'implique pas pour autant qu'elles soient les plus précises. Elles n'ont vu le jour qu'avec Landsat I, en raison de la nécessité de certaines mesures de prétraitement tels les corrections géométriques ou radiométriques, la calibration et le filtrage du bruit (Rango et Itten, 1976). L'opération de base est réalisée par l'entremise d'un algorithme informatique qui permet de créer un masque numérique (brillance de base) de l'image à partir de la réflectance ou de la couleur d'une ou de plusieurs bandes spectrales (Merry et al., 1977; Tarpley et Schneider, 1980). L'ordinateur permet la ségrégation de la neige au niveau du pixel mais le seuil critique demeure souvent problématique. La classification résultante permet la répartition des diverses radiances en plusieurs classes (Bartolucci et al., 1975) ou la séparation des pixels recouverts de neige et des pixels non recouverts de neige (Martinec et Rango, 1980).

Il existe deux grands types de système numérique actuellement à l'oeuvre ou sur le point de l'être: les systèmes supervisés (interactif) et non supervisés.

1. Supervisé: usage d'informations pour aider l'ordinateur à reconnaître les caractéristiques du couvert nival. L'information peut aider à identifier et reclasser les pixels antérieurement indéfinis. Les systèmes LARSYS-3 (Luther et al., 1975; Rango et Itten, 1976), IMAGE-100 (Dallam et Foster, 1975, Rango et Itten, 1976), l'algorithme GISS du Goddard Institute for Space Studies (Merry et al., 1977) et SCANIQ (Audet, 1981), constituent quelques-uns de systèmes numériques supervisés.
2. Non supervisé: les systèmes supervisés reposent généralement sur une classification entièrement automatisée définie à partir d'un algorithme pré-établi. Le système Stansort II fait partie de cette classe (Rango et Itten, 1976).

La précision des systèmes numériques est moyenne et se compare aux techniques manuelles. Toutefois, ces systèmes sont intéressants à plusieurs points de vue. Ils sont objectifs et très rapides. Ils peuvent également discerner un grand nombre de classes (Tarpley et Schneider, 1980). Les systèmes d'analyse numérique sont toutefois désavantagés par des coûts d'exploitation élevés. Ils sont également sujets à plusieurs des problèmes liés à la télédétection (tableau 2.2) comme la plupart des autres méthodes de traitement décrites précédemment (Waterman et al., 1980; Tarpley et Schneider, 1980).

2.1.4.4 Limitations des techniques de cartographie

Quelle que soit la technique employée, il existe toujours certaines limitations d'autant plus importantes qu'un système opérationnel est désiré. Ainsi, l'utilisation ou le choix d'une technique dépend des coûts, des délais et de la précision requise. D'autres limitations sont induites par la qualité des images, l'expérience du spécialiste et les caractéristiques physiques de l'appareillage (Odegaard et Ostrem, 1977).

2.1.4.5 Techniques appropriées pour la cartographie

La meilleure approche selon plusieurs semble être représentée par un système grandement interactif possédant un bon algorithme, allié à un spécialiste expérimenté (Itten, 1975). Le système choisi pourrait employer plusieurs types d'informations, d'entrées analogiques ou numériques avec des contours altitudinaux et des séquences temporelles (images diachroniques) pour l'édition. La méthode de la grille carrée pourrait compléter ce système.

Rares sont les systèmes alliant haute précision, objectivité, rapidité et faible coût (Meier et Evans, 1975). Un compromis devient donc nécessaire. Or, Aul et Ffolliott (1975) mentionnent qu'il n'y a vraiment pas de différences significatives dans la valeur des résultats obtenus avec les diverses méthodes, ce qui amène les méthodes manuelles aux premières loges (Bowley et Barnes, 1979). Il est aussi évident que ces techniques sont à améliorer au niveau du détail et de la forme.

Les méthodes numériques automatisées sont encore loin d'être vraiment opérationnelles, puisque beaucoup de recherche s'avère nécessaire pour combler certaines lacunes (Gird, 1980). Toutefois certaines de leurs caractéristiques les placent en bonne position pour le traitement futur de grandes quantités d'images et la cartographie routinière dans les projets à long terme (Haefner, 1977).

2.1.4.6 Importance des données au sol pour la vérification des images satellites

Il est nécessaire d'avoir recours à des observations au sol pour la vérification et la calibration des images satellites. Ainsi, les données utilisées pour la comparaison peuvent provenir de plusieurs sources dont: les photographies aériennes, les lignes de neige (Snow Survey) et le réseau hydrométéorologique (Rango et Itten, 1976) (tableau 2.3). Toutefois, il peut y avoir des variations importantes entre les deux types de données, en raison du caractère spatial des images satellites et du caractère ponctuel des stations au sol, ou encore des différences entre les observations aériennes et satellites (Brown et al., 1980).

2.1.4.7 Minimisation des problèmes de nébulosité et de couvert forestier

La nébulosité et le couvert forestier constituent les plus sérieuses contraintes parmi celles qui sont passées en revue à la section 2.1.3.4. Ils méritent donc une attention spéciale.

Nébulosité

La nébulosité est probablement le problème majeur en ce qui concerne les systèmes de capteurs dans le visible et l'infrarouge. Une série de palliatifs peut être suggérée:

1. Séquence d'images satellites: les séquences d'images représentent une suite d'images successives prises pendant un certain laps de temps s'échelonnant sur plusieurs jours. Lors de la succession des images sur l'écran vidéo d'un système d'analyse d'images, les nuages subissent un déplacement relatif par rapport au sol qui reste fixe. Ainsi, l'observation de plusieurs images permet de créer une cartographie composée du couvert nival durant cette période (Gird, 1980);

TABLEAU 2.3. OBSERVATIONS ET MESURES AU SOL POUR LA CARTOGRAPHIE DU COUVERT NIVAL.

1-	OBSERVATIONS DE LA POSITION DE LA LIMITE NIVALE TRANSITOIRE
	<ul style="list-style-type: none"> - observations visuelles - photographies - cartographie
2-	MESURES ET OBSERVATIONS DE DIVERS PARAMETRES NIVAUX CHOISIES AU SITE D'ECHANTILLONNAGE
	<ul style="list-style-type: none"> - type de neige - caractérisation de la surface nivale (forme, netteté, humidité, âge, etc...) - caractérisation du manteau nival (granulométrie, humidité, etc...) - profil des températures du manteau nival ✓ - épaisseur de la neige - masse de la neige - température de l'air - humidité de l'air - angle de la pente et exposition - nébulosité - heure du jour

2. Brilliance minimale: la méthode de la brillance minimale a été décrite à la section 2.1.4.3. Elle permet de dégager les radiances minimales des séquences d'images satellites. Ces radiances sont un signe de l'absence de nuages. Toutefois, elle n'élimine pas les nuages et le succès de cette approche repose sur l'absence du couvert nuageux sur au moins une image de la séquence (Mosher, 1977; Gird, 1980);
3. Référence aux observations complémentaires sur la nébulosité: il est possible de déterminer s'il y a présence ou absence de couvert nuageux sur une image en faisant appel aux données d'observation sur les nuages réalisées à partir du sol (Barnes et Bowley, 1974);
4. Reconnaissance des caractéristiques morphologiques au sol: la présence d'objets repérables sur l'image implique l'absence de nuage. Ces caractéristiques peuvent être: des rivières, des lacs, des routes, des régions côtières, des forêts et autres repères distincts (Barnes et Bowley, 1974);
5. Texture: cette méthode est basée sur la détermination des contours nuageux. Généralement, les nuages montrent des contours particuliers, des ombrages et d'autres types de caractéristiques du genre (Barnes et Bowley, 1974);
6. Analyse spectrale discriminatoire: Haefner (1977) a mentionné que l'analyse spectrale discriminatoire était impossible aux longueurs d'onde caractérisant les systèmes d'observation Landsat, NOAA et GOES. Toutefois, O'Brian et Munis (1975) ainsi que Valovcin (1976) ont montré qu'il était possible de discriminer la neige des nuages par l'entremise de l'observation du sol aux lon-

guez d'onde 1,55 à 1,75 μm et de 2,1 à 2,35 μm . Dans cette région du spectre électromagnétique, la neige affiche des radiances faibles contrairement aux nuages qui sont caractérisés par un albédo élevé;

7. Bassins adjacents: il y a possibilité d'estimer le couvert nival dans les zones montagneuses par l'observation des bassins versants connexes et par la méthode de l'altitude moyenne (2.1.4.3) (Brown et al., 1980);
8. Température apparente: Algazi et Suk (1975) ont soulevé la possibilité d'utiliser l'infrarouge thermique ou les micro-ondes passifs pour séparer les nuages et la neige sur la base de la température apparente (Tap);
9. Augmenter la fréquence d'observation: ceci augmente la probabilité d'obtenir des images de jour sans nuages.

Aucune des méthodes présentées ne permet d'observer le couvert nival au travers des nuages. Leur utilisation sert principalement à mieux distinguer le couvert nival des formations nuageuses.

Couvert forestier

C'est un facteur grandement limitatif dans les régions forestières et qui devient encore plus complexe avec le type de végétation (résineux) et l'accroissement de densité du couvert forestier. Certaines méthodes palliatives peuvent être élaborées mais elles n'éliminent pas totalement cette perturbation, elles donnent plutôt des indices de la présence du couvert nival:

- comparaison temporelle entre des images avec et sans neige;

- utilisation de photographies aériennes;
- observation de neige en clairière;
- élargissement et agrandissement des images satellites et des photographies aériennes;
- observations multibandes: certaines bandes spectrales peuvent permettre de détecter plus clairement la présence de végétation ou de neige;
- différences de tonalité: sur les images GOES ou NOAA. La présence nivale en milieu forestier peut être détectée par une légère variation des radiances;
- observations des imprégnations blanches en forêt;

2.2 Méthodes de prévisions de la fonte du couvert nival

L'objectif premier d'une gestion efficace des ressources hydriques repose sur l'estimation précise des débits pendant et avant la saison de fonte (Shafer et Leaf, 1980). Or, l'estimation des débits à venir doit reposer sur une connaissance du système hydrologique et des facteurs qui influencent son comportement. Cette connaissance est à la base de prévisions efficaces comme l'ont mentionné Twedt et al. (1977):

"La prévision idéale de l'état futur d'un système repose sur la parfaite compréhension de son comportement et la connaissance exacte de ses futures entrées. Une incertitude au niveau de cette connaissance tendrait à diminuer la précision de la prévision".

Mais ce n'est pas si simple en pratique, une représentation systémique devient alors nécessaire et ces auteurs le montrent bien:

"La connaissance exacte du système ne pouvant être atteinte, ceci implique la formulation d'hypothèses simplifiées, d'où une perte de précision devant être acceptée. Par exemple, l'hypothèse de base, formulée lors de l'élaboration d'un modèle hydrologique conceptuel, soutient que les débits simulés sont équivalents aux débits produits par le vrai système lorsque les conditions sont similaires".

Exception faite du modèle physique ou analogique, le modèle est une représentation mathématique qui rend compte de l'état d'un système et de son comportement sous l'influence de certaines variables (Hannaford et Hall, 1980). Actuellement, la physique est passablement comprise à la base mais le défi réside dans l'introduction de la télédétection dans ces modèles (Wiesnet, 1980).

Il faut faire une certaine distinction entre les termes prédiction et prévision. Le dernier est relié à l'occurrence des phénomènes hydrologiques en temps réel tandis que le premier concerne l'occurrence future sans égard pour le temps d'occurrence réel (Sittner, 1976).

Les variables ponctuelles mesurées sur le terrain (précipitation, rayonnement, etc...) sont autant d'indices de la variabilité spatiale de la dynamique du couvert nival, d'où l'importance au niveau de leur choix et de leur représentativité par rapport au système réel. Idéalement, l'estimation des variables du transfert radiatif telles la conduction, le rayonnement et la convection s'avèrerait intéressante pour la fonte (Riley et al., 1972), mais il faut également tenir compte des limitations de base de notre connaissance des facteurs de fonte et de la disponibilité des données (Ragan, 1977). Deux groupes de variables sont définis dans la littérature; les variables décrivant l'état physique du couvert nival et celles représentées par les variables météorologiques déterminant sa fonte ou son accumulation. Généralement l'équivalent-eau constitue la donnée critique (Anderson, 1972).

Les prévisions peuvent être de deux (2) types (Loijens, 1975):

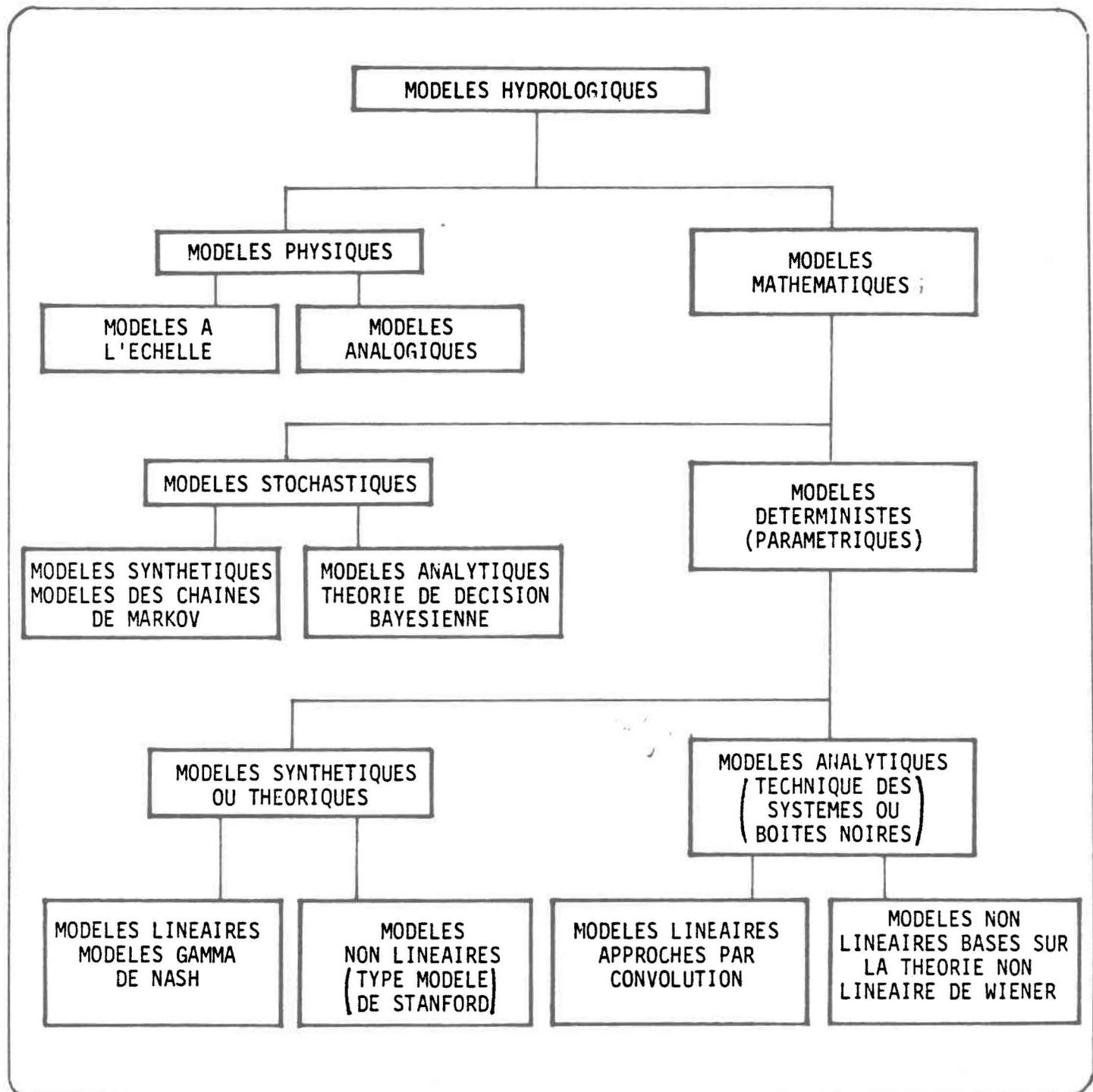
1. court terme: ce sont des données courantes sur le couvert nival observé ainsi que les conditions météorologiques prévues, telle que la prévision à court terme des débits journaliers (1 à 7 jours);
2. long terme: c'est la prévision du volume hydrique saisonnier sur la base des conditions courantes du manteau nival et de la distribution probable des événements météorologiques futurs.

La classification des modèles s'avère une tâche des plus complexe et qui devient de plus en plus élaborée et conflictuelle (Martinec, 1980a). Toutefois, Ibbitt (1973) cite une classification descriptive sommaire réalisée par le groupe de travail de l'UNESCO/IHD (figure 2.6).

La classification des modèles est difficile à réaliser pour plusieurs raisons. Ainsi, les modèles ne simulent pas tous les mêmes éléments (débit, fonte, évaporation, etc...). Ils ne correspondent pas tous à des types bien définis de modèle: statistique, stochastique, empirique, conceptuel, etc... De plus, des différences dans leur structure et leurs paramètres d'entrée compliquent la tâche.

Bien que les modèles de fonte soient conçus dans un premier temps pour les prévisions d'écoulement de fonte, ils peuvent être modifiés (dépendant du type de modèle) pour inclure et répondre aux phénomènes suivants:

1. estimation de la disponibilité de l'équivalent en eau de la fonte nivale;
2. estimation du volume d'accumulation de la neige et des pertes subséquentes;



Tiré de Ibbitt R.P. (1973)

Figure 2.6: Classification descriptive réalisée par le groupe de travail de l'UNESCO/IHD.

3. simulation de l'échange calorifique à la surface nivale;
4. simulation de la rétention d'eau liquide et simulation des propriétés de transmission de la neige;
5. simulation de l'échange calorifique à l'interface sol-neige;
6. estimation de l'extension spatiale du couvert nival.

Le choix actuel des usagers se porte surtout sur les modèles simples impliquant peu de variables et n'étant pas trop coûteux. Les modèles de régression tels les modèles d'index de degrés-jours demeurent les plus populaires. Le choix doit reposer sur une série de critères de base (Sittner, 1976):

1. les caractéristiques climatiques et physiographiques dans la zone où le modèle sera employé;
2. le but de la prévision: événements continus ou isolés, crues, basses eaux ou les deux;
3. les données disponibles, longueur de la série chronologique, qualité des données, types de variables;
4. les données disponibles opérationnellement: qualité et type;
5. la possibilité de transposer les paramètres dans les régions possédant une faible densité de stations hydrologiques;
6. la possibilité de mettre à jour les variables d'état du modèle;

7. les besoins informatiques pour l'optimisation et pour les prévisions, dans la mesure de la capacité des ordinateurs disponibles;
8. l'expérience du personnel qui utilisera le modèle.

Les modèles ne sont pas à l'abri des erreurs de tous genres, mais celles-ci peuvent être minimisées sans toutefois être complètement éliminées. L'écart type absolu tend à diminuer avec l'avance de la saison de fonte (Brown et Hannaford, 1975). Cependant, une erreur survenant tôt en saison aura une répercussion tout au long de l'année. La précipitation tardive peut également augmenter la source d'erreur procédurale (Brown et Hannaford, 1975). Brown et al. (1980) ont une vision particulière de l'évolution de l'amélioration future des prévisions hydrologiques:

"Les techniques de prévision ont progressé au degré où l'application de nouveaux types de données ne pourraient apporter que de légères améliorations de la précision des prévisions, surtout tôt en saison lorsque l'erreur de prévision est hautement dépendante du volume de précipitation qui survient après la date de prévision. Le développement de nouveaux types de données telle que la détermination de l'étendue du couvert nival par l'intermédiaire de la télédétection n'éliminera pas le besoin de recueillir des données sur la précipitation, l'équivalent eau et l'évolution du couvert nival dans un futur prévisible".

2.2.1 Modèles de prévisions opérationnels et expérimentals

Il existe de nombreux modèles en application un peu partout dans le monde dont plusieurs sont utilisés sur une base opérationnelle par diverses agences privées ou gouvernementales. Ils peuvent être regroupés sous deux rubriques: les modèles avec ou sans télédétection. Le premier type s'avère le dernier introduit dans les processus de simulation bien que l'usage de photographies aériennes l'ait précédé.

2.2.1.1 Données

La modélisation hydrologique des processus survenant sur un bassin versant repose essentiellement sur les données de terrain (données hydro-météorologiques, données géographiques, données nivométriques, etc...). Elles servent à la simulation de la dynamique hydrologique, mais elles peuvent également être utilisées au niveau de la mise à jour des résultats de la simulation. Toutefois, l'utilisation d'un certain type de données dépend de sa disponibilité et de son délai d'obtention (Waterman, 1980). Les principales données servant à la modélisation du phénomène de fonte nivale sont selon McMillan et Smith (1975): l'équivalent en eau du couvert nival, l'épaisseur nivale, la densité de la neige, la température de l'air, les précipitations et les débits. Elles sont employées dans la majorité des modèles utilisés actuellement. L'étendue du couvert nival est un autre paramètre physique important mais elle n'est utilisée que lorsque les modèles peuvent en tenir compte et que la télédétection peut en fournir une estimation.

La liste suivante représente quelques types d'instruments ou de méthodes employés pour la mesure des différentes variables. Elle n'est toutefois pas exhaustive, ne s'en tenant qu'aux paramètres principaux:

- équivalent-eau, épaisseur et densité nivale:
 - lignes de neige;
 - coussin à neige;
 - nivomètre à radio-isotopes de type horizontal;
 - nivomètre à profil nucléaire.

- équivalent-eau seul:
 - pluviomètre;
 - équation de régression;
 - rayonnement gamma;
 - rayonnement cosmique;

- épaisseur nivale:
 - photogrammétrie;
 - table et échelle à neige;
 - marqueur aérien;

- contenu en eau libre:
 - méthodes calorimétriques;
 - méthodes à partir des propriétés diélectriques;
 - séparation par centrifugation;
 - micro-ondes.

Les données hydrométéorologiques peuvent aussi être recueillies à distance par divers systèmes de télémétrie tels: Landsat Data Collection (LDC), SMS/GOES Data Collection System, le système SNOTEL et le système microonde (Schumann et al., 1980). L'échantillonnage double stratifié peut s'avérer un excellent moyen d'analyser statistiquement les données au sol et les données de télédétection (figure 2.4) (Khorram, 1977). La validité des mesures demeure toutefois très sensible à la variation et à l'hétérogénéité de l'équivalent-eau du manteau nival, à la conversion empirique de l'épaisseur en équivalent-eau, à la précision des mesures, et au nombre et à la représentativité des conditions météorologiques locales des stations (Morin et al., 1979). Malgré l'attention apportée à ces facteurs, les lignes de neige ne sont pas nécessairement représentatives du couvert nival pour le bassin entier, mais peuvent être utilisées comme indice de l'équivalent-eau du couvert nival sur le bassin versant (Stiles et al., 1981). Une amélioration possible du réseau d'échantillonnage déjà existant, selon McMillan et Smith (1975), est d'augmenter le nombre de sites d'échantillonnage sur le bassin tout en réduisant le nombre d'échantillons de dix à deux par ligne de neige.

2.2.1.2 Modèles ne faisant pas appel aux données de télédétection

Les modèles ne faisant pas appel aux données de télédétection sont probablement parmi les plus nombreux, ce qui rend un survol complet très difficile à réaliser.

Il existe cinq types de relation de base qui servent généralement à la construction des nouveaux modèles. Les cinq types de relation de base sont:

- modèle basé sur les degrés-jours;
- modèle de régression linéaire multiple;
- modèle de bilan hydrique;
- modèle d'index de précipitation;
- modèle basé sur les équations générales de fonte.

Une description plus détaillée de chacune de ces relations est donnée à l'annexe 2.

2.2.1.3 Méthodes avec télédétection

L'usage de la télédétection s'avère un choix très valable qui prend de plus en plus d'ampleur. Présentement, de nombreuses recherches sont en cours mais l'évolution demeure relativement lente en raison de la dépendance des développements au niveau des satellites. Malgré l'avancement des recherches, les hydrologues sont hésitants à employer ces systèmes, bien que ceux-ci soient d'une grande précision et d'une grande représentativité (Ragan, 1977). Ces avantages sont indiscutables: observation de régions éloignées, adaptation possible au traitement informatique et coût-efficacité élevé (Rango, 1977). Son plus grand avantage fut traduit par Ragan (1977):

"La possibilité d'observer de grands bassins versants ou de grandes surfaces est l'une des qualités majeures de la télédétection. Cet attrait est encore plus grand lorsqu'il est possible d'observer plusieurs bassins versants à partir d'une même image".

Deux types d'application sont possibles: la prévision du volume d'eau emmagasiné dans le couvert nival et la modélisation hydrologique de la distribution temporelle de l'écoulement de fonte (Hannaford et Brown, 1979). Leur précision dépend souvent de la possibilité de trouver le début de la période de fonte du couvert nival.

L'applicabilité de la télédétection repose en grande partie sur son efficacité relative à améliorer les prévisions de fonte comparativement à celle des autres paramètres hydrométéorologiques. Ainsi, l'étude des hydrogrammes de crue printanière s'avère un outil de base important pour l'évaluation des simulations (Rango et al., 1975).

Le meilleur indice du volume d'écoulement de fonte demeure l'équivalent-eau du couvert nival et à un second niveau son épaisseur. Ils sont toutefois difficiles à déterminer présentement avec les moyens techniques à notre disposition, ce qui reporte l'emphase sur l'étendue du couvert nival ou la limite nivale selon le cas (Tueller, 1978). Cette dernière est très intéressante en montagne du fait que le volume résiduel d'écoulement de fonte est lié à l'altitude de la limite nivale (Rango et al., 1975).

Il existe trois (3) grandes familles de modèles adaptables aux systèmes de télédétection: les modèles de régression, les modèles de relation graphique et les modèles déterministes. Les deux premiers types sont surtout caractéristiques des modèles utilisant la télédétection seule.

1. Analyses de régression: elles utilisent des données au sol conjointement avec les données satellites. Elles peuvent être sous la forme de régression linéaire ou non linéaire telles que:

$$R = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

$$R = ax_1^b x_2^c x_3^d$$

Les variables les plus communes sont la superficie du couvert nival, l'emmagasinement de l'eau dans le manteau nival, l'altitude, la densité de drainage, la végétation, etc... Mais, dans la plupart des cas, les auteurs utilisent une relation entre l'écoulement de fonte et l'étendue du couvert nival (Leaf, 1969; Rango et Salomonson, 1977a; Rango, 1978; Bowley et Barnes, 1979; Odegaard et al., 1980; Schumann et al., 1980).

2. Relations graphiques: elles sont développées à partir des données de terrain, dont l'écoulement de fonte qui s'avère la variable prédominante. Cet écoulement devient une fonction de la couverture nivale au sol. Les relations graphiques peuvent être simples ou complexes mais la plupart d'entre elles sont caractérisées par des courbes (Martinec, 1972, 1980a; Thompson, 1975; Odegaard et al., 1980). La majorité des courbes de récession sont dérivées de l'équation de Leaf (1969) (figure 2.7), qui se traduit comme suit:

$$SCA = \frac{100a}{1 + e^{-b(T_{50} - t)}}$$

où SCA = étendue du couvert nival (%);

t_{50} = temps où SCA = 50%;

a,b = coefficient;

et t = nombre de jours de fonte.

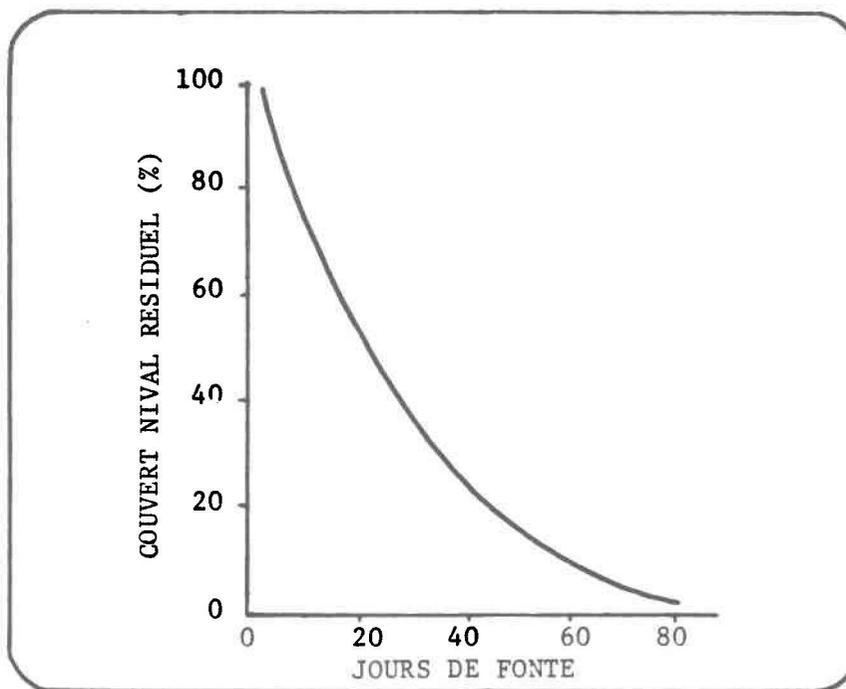


Figure 2.7: Baisse typique du couvert nival selon Leaf (1969).

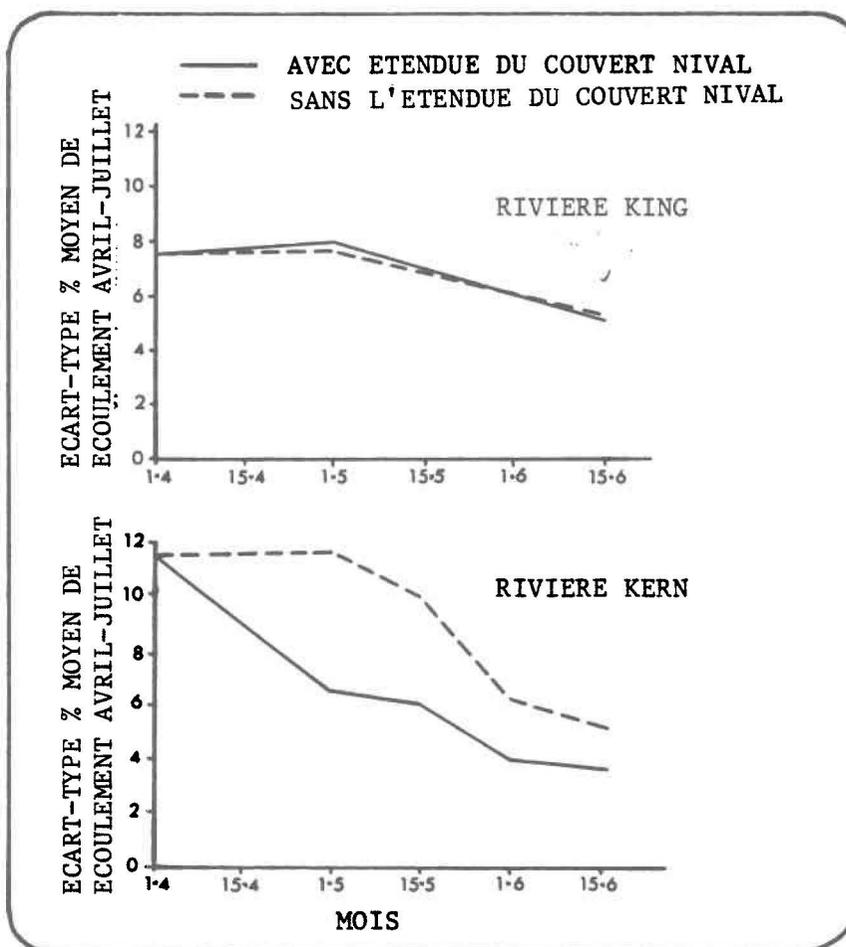


Figure 2.8: Ecart-type de la procédure de prévision vs la date, pendant la fonte sur les rivières King et Kern (tiré de Hannaford et Brown, 1979).

Toutefois, Thompson (1975) mentionne que les courbes de récession varient d'une année à l'autre, mais que les courbes de récession sans dimension demeurent relativement stables à chaque année, sans être influencées par les variations de conditions de température, d'épaisseur, d'équivalent-eau et d'écoulement total.

3. Modèles déterministes: ce sont des modèles qui furent modifiés ou créés de façon à pouvoir accepter les données d'étendue du couvert nival obtenues par télédétection. Ces modèles peuvent se retrouver sous les mêmes formes que ceux abordés au chapitre 2.2.1.2.

En raison de ses divers avantages sur les données ponctuelles au sol, l'usage de la télédétection pourrait aider à améliorer la précision des prévisions d'écoulement de fonte résiduelle (Bowley et al., 1981) à partir de nouveaux modèles ou de modèles existants.

Peu de modèles simulant la fonte nivale ont été conçus pour tenir compte des données acquises par télédétection. La plupart de ceux-ci ont été spécialement construits pour utiliser des données hydrométéorologiques (CEQUEAU, HSP-SNOWMELT, SSARR, STANFORD, etc...). Avec la venue de l'imagerie satellite, certains modèles ont été modifiés pour permettre l'utilisation des données acquises par télédétection (SSARR, KING'S RIVER HYDRO MODEL, SUBALPINE WATER BALANCE MODEL, UBC, etc...). Toutefois, l'utilisation majeure de la télédétection demeure au niveau des modèles de régression et des courbes empiriques.

Les prochaines sections mettent en relief, les divers modes d'application des données acquises par télédétection.

2.2.1.3.1 Modèles basés essentiellement sur des données acquises par télédétection

Les modèles utilisant la télédétection comme variable de base sont presque essentiellement des modèles statistiques élaborés à partir de modèles de régression linéaire simple ou de relations graphiques. Ce sont probablement les méthodes les moins coûteuses et les plus rapides ayant un rapport coût-efficacité très élevé. Ils sont principalement employés pour des prévisions à long terme ou saisonnières, bien que certains chercheurs les emploient pour des prévisions à court terme.

La régression linéaire simple est la méthode la plus répandue. La précision de la relation peut être déterminée par l'interprétation des coefficients de corrélation et de divers autres indices (erreur absolue, écart-type, etc...). La relation entre l'écoulement de fonte saisonnier et l'étendue du couvert nival est probablement la plus importante. Les auteurs suivants ont employé diverses variantes de cette relation (Rango et al., 1975, 1977a; Aul et Ffolliott, 1975; Zuzel et Cox, 1978). La relation entre l'écoulement de fonte nivale et l'accumulation est également utilisée. Schumann et al. (1980) ont utilisé une variante de la première approche par l'entremise des logarithmes, mais cette méthode peut s'avérer biaisée parce qu'elle diminue les écarts à la droite. Un dernier type de régression linéaire relie les valeurs d'étendue du couvert nival sur une base mensuelle avec les valeurs des mois antécédents. Une relation graphique est ensuite déterminée pour faire des prévisions de 30, 60 ou 90 jours (Algazi et Suk, 1975).

Le deuxième type d'approche, qui est représenté par les relations graphiques, mise principalement sur les courbes de récession dont le concept vient de Leaf (1969) et qui a été décrit au chapitre 2.2.1.3. Ces courbes relient le pourcentage de couvert de neige du bassin à l'écoulement de fonte proprement dit. Elles établissent une relation qualitative positive entre ces deux variables (Rango et al., 1975). Elles ne nécessitent pas de nombreuses années pour la calibration. Toutefois, elles sont très

sensibles à la précipitation tardive, ce qui implique des corrections au niveau de la courbe. Chaque bassin possède ses propres relations caractéristiques, qui gardent une allure semblable d'année en année (figure 2.9). Cependant, ces relations ne sont applicables qu'en terrain montagneux. Le temps de récession est une fonction du volume d'eau emmagasiné dans le couvert nival. Leaf et Haefner (1971), Odegaard et Ostrem (1977), Odegaard et al. (1980) ont utilisé cette méthode, mais Moravec et Danielson (1980) et Shafer et Leaf (1980) sont allés plus loin. Ils ont superposé les courbes de récession du couvert nival de plusieurs saisons de fonte successives. Les distances relatives entre chacune de ces courbes sont transposées sur un autre graphique, lequel relie l'écoulement annuel de fonte à ces distances. Généralement, il est possible de dessiner une droite passant par la plupart des points (figure 2.10).

2.2.1.3.2 Modèles basés sur des données hydrométéorologiques et des données acquises par télédétection

Ces types de modèles emploient les données de télédétection comme paramètres additionnels. Les modèles peuvent être modifiés ou même créés spécialement pour tenir compte des informations fournies par la télédétection. Généralement, les auteurs s'entendent pour utiliser principalement l'étendue du couvert nival (Bowley et Barnes, 1979; Barnes et Bowley, 1980; Wiesnet, 1980). L'avantage de l'emploi de telles informations est d'améliorer les prévisions à court terme (Brown et al., 1980) puisque les images satellites peuvent parfois être obtenues rapidement (Rango, 1980).

L'amélioration de la précision n'est pas toujours possible. Hannaford et Brown (1979) ont soulevé ce problème après simulation sur deux bassins avec le même modèle (figure 2.8). Ils ont remarqué qu'il y avait amélioration de l'écart-type dans certains bassins, tandis que sur d'autres, l'amélioration était presque nulle. Cette différence de comportement de l'écart-type semble liée à la qualité du réseau de données. Un bassin possédant un réseau de mesures dense montre peu d'amélioration de l'écart-type, tandis qu'un bassin possédant un réseau de mesures de faible densité

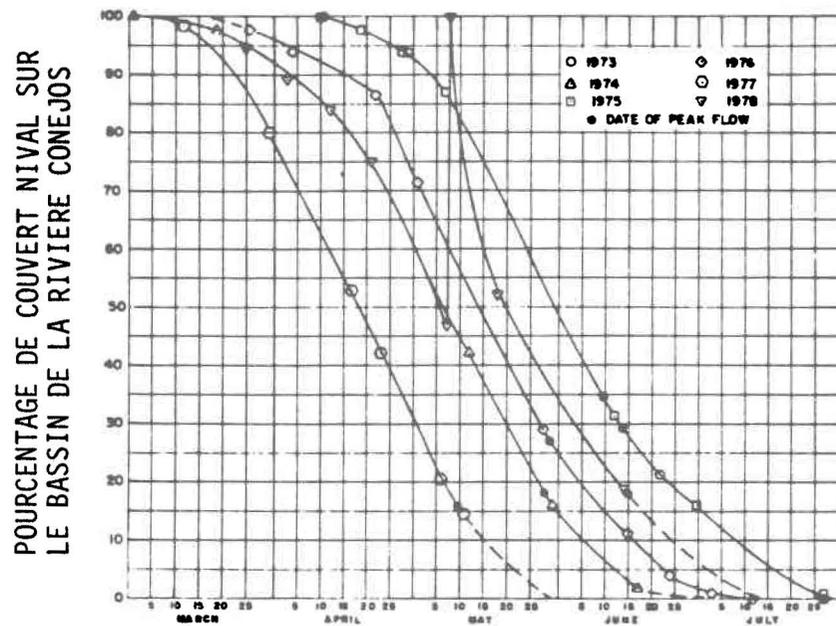


Figure 2.9: Pourcentage vs temps de couvert nival résiduel pour le bassin de la rivière Conejos (tiré de Moravec et Danielson, 1980)

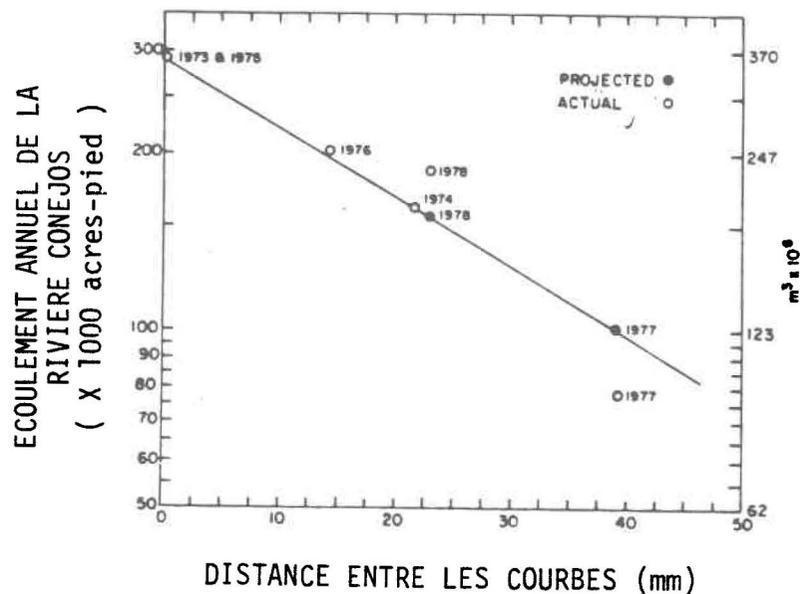


Figure 2.10: Volume annuel d'écoulement vs le déplacement linéaire des courbes d'ablation du manteau nival pour le bassin de la rivière Conejos (tiré de Moravec et Danielson, 1980)

affiche une réduction nette de l'écart type. Il semble donc que l'addition de la télédétection place les bassins versants à égalité au niveau de l'écart-type.

2.2.1.3.3 Application des données acquises par télédétection à la calibration et la mise à jour des modèles hydrologiques

Il n'y a aucun doute que l'étendue du couvert nival peut s'avérer un paramètre d'entrée intéressant dans une modélisation. La plupart des auteurs admettent que les données de télédétection fournissent une vision spatio-temporelle de la dynamique nivale et que cette observation peut réduire l'erreur de prévision (Hannaford et Brown, 1979; Morin et al., 1979; Shafer et Leaf, 1980; Staenz et Haefner, 1981). Toutefois, les données de télédétection peuvent servir à d'autres fonctions que celles de variables d'entrée.

Leur attrait majeur réside dans leur capacité à mettre les modèles à jour pendant la fonte après la première prévision, pour abaisser l'erreur absolue entre les débits observés et les débits calculés. Cet aspect est déterminant pour une gestion efficace (Brown et al., 1980). Un deuxième attrait réside dans l'importance de la télédétection comme facteur de comparaison pour la vérification du comportement du modèle et de la qualité des prévisions. Un dernier, et non moins important attrait, est le potentiel des données acquises par télédétection pour la calibration de modèles hydrologiques complexes afin de corriger la variabilité temporelle des simulations (Wiesnet et McGinnis, 1974). Cette avenue est encore très peu exploitée puisque tous essaient d'incorporer la télédétection dans le modèle et non de le corriger par une calibration basée sur des données temporelles exactes. Peu d'auteurs ont touché cet aspect à l'exception de Fortin et al. (1979). Un autre attrait, non moins intéressant, est la possibilité de modéliser la réponse du bassin même en l'absence d'images satellites. Cette approche implique l'utilisation de modèles non modifiés au niveau de la sous routine de fonte. Le nombre d'images disponibles durant la fonte est moins crucial dans ce type d'approche puisqu'une seule

image prise au moment de la fonte peut s'avérer suffisante pour améliorer la prévision tandis qu'un modèle modifié requiert des images caractérisant toute la période de fonte. Il existe bien d'autres choix pour contourner ce problème, mais ils impliquent une augmentation de l'erreur d'estimation.

2.2.1.4 Limitations d'emploi

Les modèles sont tous limités par certains types d'erreurs qu'il faut minimiser lorsque c'est possible. Les incertitudes de prévision ont une tendance à diminuer avec l'avance de la saison (Quick, 1972), mais l'erreur associée au pourcentage de l'écoulement résiduel augmente en l'absence d'autres informations, puisque l'erreur de prévision initiale demeure constante pendant la baisse du volume d'eau emmagasinée. La prévision des modèles peut s'avérer très variable dépendant du bassin, du modèle et d'autres facteurs. Certains bassins peuvent permettre une bonne précision tandis que ce n'est pas le cas pour d'autres.

Il y a vraiment deux types d'erreurs et de limitations dans une modélisation. Certaines peuvent être évitées lors de la conception du modèle, d'autres doivent être prises en compte pendant la simulation.

Le tableau 2.4 présente une liste sommaire des contraintes potentielles encourues lors de la modélisation. La qualité du modèle sera rehaussée si une attention particulière leur a été portée lors de l'application.

2.2.2 Choix du modèle requis

Lorsqu'il faut choisir un modèle particulier, il faut tenir compte d'une foule de facteurs. Dépendamment de nos besoins, il faut choisir un modèle selon son rapport coût-efficacité, la disponibilité des données, les caractéristiques physiques du bassin et la vocation du modèle sur le bassin qui doit être simulé. Dans cette section, nous tentons de déterminer le

TABLEAU 2.4. Sources d'erreurs intervenant sur les résultats de la simulation.

1. Sources d'erreurs associées à la conception des modèles et à la variabilité climatique:

- utilisation de relations empiriques;
- représentativité du système par le modèle;
- erreurs de prévisions;
- erreurs aléatoires dues aux années de conditions extrêmes;
- modèle biaisé;
- complexité ou simplicité du modèle;
- représentativité de la relation écoulement - étendue nivale.

2. Sources d'erreurs dont il faut tenir compte dans la modélisation:

- problèmes de comparaison entre données;
- présence d'eau liquide dans la neige pouvant fausser les prévisions;
- manque d'accessibilité au bassin;
- caractéristiques du réseau hydrométéorologique;
- disponibilité des données;
- qualité des données;
- erreurs de mesure;
- erreurs systématiques dues aux appareils de mesure;
- caractère ponctuel des données;
- erreurs humaines;
- pertes en eau sur le bassin;
- erreurs relatives aux systèmes de télédétection.

type de modèle pouvant répondre de façon efficace aux besoins actuels de la simulation hydrologique et des méthodes permettant d'analyser son efficacité et sa précision.

2.2.2.1 Critères de performance

Le choix d'un modèle optimal réside souvent dans la comparaison de plusieurs modèles différents, ce qui peut s'avérer difficile, coûteux et parfois irréaliste. Si cette comparaison est nécessaire, il serait judicieux de comparer les modèles sur les mêmes bassins à partir de données identiques (Zuzel, 1981).

L'atout le plus important d'un modèle réside au niveau de la prévision. Tueller (1978) considère que le modèle devrait répondre aux points suivants:

1. estimation précise du volume de l'eau disponible pour l'écoulement sur le bassin;
2. précision et rapport coût-efficacité élevés;
3. identification et cueillette des données nécessaires de la manière la plus convenable possible.

Certains critères au niveau des données doivent aussi être observés puisqu'elles demeurent une considération importante pour un modèle de prévision opérationnel (Zuzel et Cox, 1978). Ainsi, l'équivalent-eau doit être préféré à l'épaisseur nivale (Martinec et Rango, 1980). L'usage de données satellites seules peut parfois s'avérer insuffisant (Thompson, 1975), mais les données acquises par télédétection qui sont utilisées doivent correspondre à des critères de fréquence, de résolution spatiale, etc... (Martinec et Rango, 1980). L'emploi de la température de l'air peut être préféré au bilan énergétique qui est plus difficile à simuler (Martinec et Rango, 1980).

Les auteurs portent divers jugements sur les objectifs que le modèle retenu doit rencontrer. La liste suivante en donne un aperçu:

- un modèle doit requérir des temps de traitement peu élevés (Zuzel, 1981);
- il pourrait être adapté à une banque de données définie par un système d'inventaire à mailles carrées (Charbonneau et al., 1979);
- il doit être applicable à des bassins non jaugés (Charbonneau et al., 1979);
- il doit être sensible aux variations spatiales des données (Charbonneau et al., 1979);
- un modèle physiographique doit exprimer l'effet intégré de la physiographie et du couvert forestier sur l'accumulation et la fonte nivale tout en ne demandant qu'un nombre limité de variables (Charbonneau et al., 1979);
- un modèle hydrologique conceptuel devrait tenir compte des processus physiques tels que le mouvement de l'eau dans le sol, l'accumulation nivale, la fonte du couvert nival, le ruissellement et le transfert de l'eau en rivière (Twedt et al., 1977);
- un modèle doit être adaptable à d'autres bassins (Bishop et Watt, 1975);
- les modèles doivent rester simples et physiquement réalistes (Quick et Pipes, 1972).

Rockwood (1972) a également fourni une liste des principales caractéristiques que devrait pouvoir rencontrer un modèle idéal:

- facilité d'application opérationnelle;
- développement des caractéristiques nécessaires par des méthodes simplifiées et systémiques;
- flexibilité et aisance pour la spécification des caractéristiques;
- utilisation de systèmes avancés de manipulation des données pour l'application du modèle au système fluvial;
- ajustement automatique du modèle sur une base journalière pour garder une continuité de tous les éléments hydrologiques du bassin et des réservoirs;

2.2.2.2 Vérification de la précision et de la fiabilité

Hawley et al. (1980) considèrent la précision comme une mesure de la comparaison entre les valeurs prédites et observées d'un paramètre. La comparaison implique l'utilisation de critères servant à orienter l'ajustement du modèle. Les critères d'ajustement du modèle peuvent être caractérisés par le coefficient de variation, l'erreur absolue etc... D'autres types de critères sont basés sur les coefficients statistiques tels que le coefficient de détermination et de corrélation, le coefficient de phase, le coefficient de persistance et la somme des carrés des écarts (Sittner, 1976). Certains auteurs ont utilisé des critères bien spécifiques tel le NSR^2 qui est une variante du coefficient de détermination (Kite, 1975), mais qui est relativement peu employé. Ils possèdent tous l'objectif commun de mesurer la performance relative entre les divers systèmes de détermination du contenu en eau (Sharp et Randall, 1975; Khorram, 1977).

2.2.2.3 Choix du modèle approprié

Le choix d'un modèle spécifique répondant à la majorité des critères de performance est presque impossible dans un contexte général, surtout

en raison du caractère non homogène des divers bassins versants. L'utilisation d'un modèle global est déconseillée en raison de la complexité et des connaissances qui nous échappent encore (Charbonneau et al., 1981). L'intercomparaison des modèles est aussi très ardue en raison des besoins et comportements de chaque modèle. Toutefois, elle n'est pas impossible puisque l'Organisation Météorologique Mondiale a procédé à la comparaison de dix modèles hydrologiques (Sittner, 1976). Il semble qu'aucun modèle actuel soit vraiment supérieur aux autres puisque chacun a ses lacunes et ses avantages.

Le choix actuel des modèles est principalement axé sur la simplicité et le coût. Ainsi, les méthodes d'index sont encore utilisées malgré les limites et les lacunes qu'elles comportent (Zuzel et Cox, 1978). La méthode des degrés-jours demeure encore la méthode la plus populaire au niveau de la fonte nivale. Son choix s'explique par sa simplicité d'application, le faible nombre de variables requises et la précision élevée à court terme.

Il semble toutefois qu'un modèle intermédiaire entre les modèles d'index et les modèles plus complexes, pouvant représenter le bilan hydrique ou les réponses hydrologiques, serait idéal au niveau coût-efficacité (figure 2.11). Il devrait utiliser des données facilement disponibles et être capable de prévoir à court ou long terme. L'utilisation de l'étendue du couvert nival à partir de la télédétection semblerait un atout de base surtout dans les endroits caractérisés par (Rango et al., 1977):

- de grandes surfaces au relief uniforme;
- des précipitations erratiques et une distribution du couvert nival indépendante de l'élévation;
- un réseau de mesures hydrométéorologiques de faible densité.

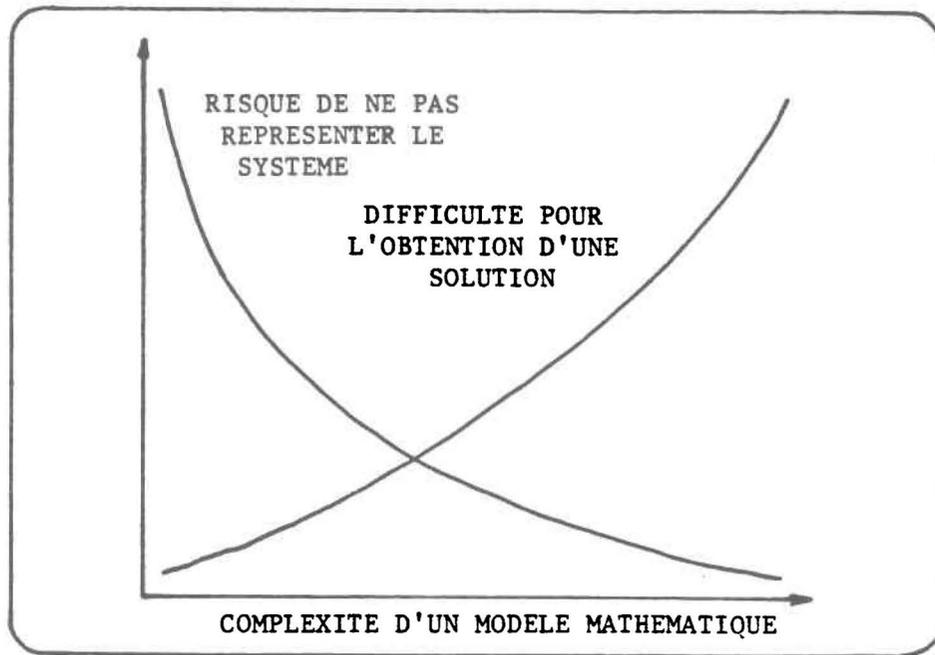


Figure 2.11: Effet de la complexité d'un modèle mathématique sur la solution (tiré de Overton, 1977)

La majorité des méthodes actuelles utilisant les données acquises par télédétection ne sont aptes qu'aux terrains montagneux, caractéristique de l'ouest américain et canadien. Très peu de modèles sont aptes à représenter les régions planes. Toutefois, le but de ce chapitre n'est pas de définir le modèle optimal, mais de mettre en évidence la complexité du choix. La recherche se portera probablement sur le développement de nouvelles méthodes intermédiaires et de simulations complexes. Ceci semble justifié par le fait que les méthodes d'index aient atteint un point où de grandes améliorations de précision ne soient plus possibles (Zuzel et Cox, 1978).

2.3 Coût-efficacité des systèmes de prévision

Les rapports coût-efficacité sont probablement au coeur de la gestion intégrée de la ressource eau, puisque l'amélioration de la précision peut se traduire rapidement en millions de dollars. Il faut toutefois faire la différence entre coût-efficacité et coût-bénéfice. Ce dernier essaie de quantifier en terme d'argent des bénéfices d'actions alternatives, tandis que le coût-efficacité permet d'estimer la valeur de bénéfices sur des bases différentes que la valeur monétaire (Sharp et Randall, 1975; Sharp et Thomas, 1975). Sur une base de comparaison des coûts, l'utilisation de données satellites comparées aux mesures conventionnelles montre un net avantage de la télédétection. Ainsi, Wiesnet et McGinnis (1974), estiment que le rapport coût-efficacité peut atteindre 200:1. Castruccio et al. (1980) avancent également un rapport de 77:1. Même en étant pessimiste, il semble qu'il y aurait possibilité d'épargner jusqu'à 50 à 75% sur les coûts (Ragan, 1977). Le tableau 2.5 montre aussi les avantages divers apportés par la télédétection. Les bénéfices majeurs au Québec iraient principalement à la production hydroélectrique, mais les activités de régularisation et d'irrigation s'en trouveraient également avantagées. La détermination du rapport coût-efficacité s'avère très complexe, mais il est possible qu'une augmentation de seulement 0,5% de la production énergétique ait de fortes répercussions économiques positives.

TABLEAU 2.5. BENEFICES GENERAUX DE L'INFORMATION AMELIOREE POUR LA GESTION ET L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU (Tiré de Castruccio et al., 1980).

	BENEFICES DIRECTS	BENEFICES INDIRECTS	BENEFICES INTANGIBLES
HYDROELECTRICITE	<ul style="list-style-type: none"> - Economie de coût due au mélange optimal de production hydroélectrique et thermique - Valeur ajoutée par une production optimale à l'amont du cours d'eau et aux sites à l'aval - Production hydroélectrique améliorée en planifiant une hausse d'efficacité générale de l'installation 	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation des combustibles fossiles - Conservation de l'emploi 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau de vie amélioré dû à la production hydroélectrique moins coûteuse
IRRIGATION	<ul style="list-style-type: none"> - Hausse du revenu net des fermes en raison des coûts de production moins élevés - Hausse du revenu net des fermes due à une sélection optimale des cultures - Amélioration dans l'efficacité opérationnelle des projets d'irrigation in situ 	<ul style="list-style-type: none"> - Hausse du revenu net des fournisseurs industriels du domaine agricole - Réduction du prix de la nourriture à la population - Réduction de l'énergie requise pour permettre l'irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des facilités et des services pour la communauté - Hausse du niveau de vie
INDUSTRIEL - MUNICIPAL	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration du captage du ruissellement de surface par la planification d'un système amélioré de canalisation d'égoût - Economie de coût par la réduction du pompage de l'eau par des puits 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des taux d'assurance-feu - Economie de coût à la population due à la disponibilité de l'eau - Expansion de l'activité industrielle due à la disponibilité accrue de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la qualité de vie standard du secteur
NAVIGATION	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des coûts de transport par des lachures d'eau planifiées de l'eau emmagasinée dans les réservoirs pour améliorer les cours d'eau navigables - Hausse de la valeur des services de transport résultant de la demande accrue pour un service amélioré 	<ul style="list-style-type: none"> - Hausse de l'activité commerciale et industrielle - Hausse de la valeur d'utilisation des terres le long du cours d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Valeur stratégique accrue des cours d'eau intérieurs
RECREATION PECHE ET MILIEU NATUREL	<ul style="list-style-type: none"> - Hausse de revenu à partir de l'utilisation accrue des terres récréationnelles et des services - Hausse des populations de poissons et de vie sauvage de meilleure qualité - Baisse de l'embolie chez les poissons par de meilleurs relâchements contrôlés à partir des réservoirs 	<ul style="list-style-type: none"> - Hausse de revenu à partir de la vente d'équipements récréationnels - Amélioration de la santé de la population récréationnelle active 	<ul style="list-style-type: none"> - Valeur esthétique des cours d'eau améliorés et de l'habitat sauvage - Valeur écologique des cours d'eau améliorés et de l'habitat sauvage - Valeur scientifique des écosystèmes aquatiques améliorés

La mise en oeuvre d'une nouvelle méthode de prévision peut conduire à une amélioration du rapport coût-efficacité en raison de l'augmentation des coûts actuels d'échantillonnage. Ainsi, Sharp et Randall (1975) mentionnent qu'une augmentation des coûts doit être compensée par une augmentation de la précision (figure 2.12). Une amélioration au niveau du rapport coût-efficacité permettra de déplacer la courbe générale.

L'amélioration du rapport coût-efficacité peut être réalisée à différents niveaux:

1. l'information doit être fournie à un coût moindre ou l'augmentation du coût doit être accompagnée d'informations additionnelles i.e., de la qualité des données (Luther et al., 1975);
2. l'usage de la télédétection semble être un outil efficace pour réduire le rapport coût-efficacité (Rango, 1977; Dey et al., 1979);
3. le rapport coût-efficacité peut être amélioré lorsque les services de prévision deviennent centralisés (Hansen, 1975).

La valeur du rapport coût-efficacité est dépendante de la valeur de la prévision. Ainsi une prévision surestimée ou sousestimée entraîne des pertes de potentiel qui doivent être compensées par des produits de substitution (Castruccio et al., 1980), d'où l'importance d'une prévision fiable (figure 2.13).

2.4 Perspectives d'avenir

L'état actuel de la recherche au niveau des modèles utilisant les données acquises par télédétection est encore aux premiers stades. Il n'y a qu'une dizaine d'années que les premières ébauches de projet utilisant les satellites furent mises sur papier. Or, cet axe fut développé en com-

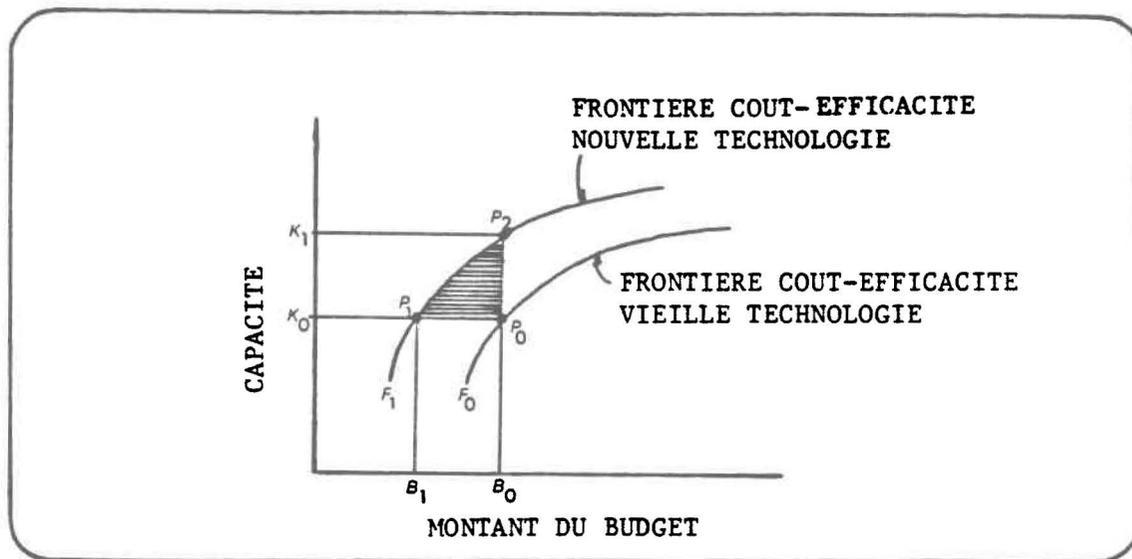


Figure 2.12: Effet d'un progrès technologique sur une frontière de production de coût-efficacité (tiré de Sharp et Randall, 1975)

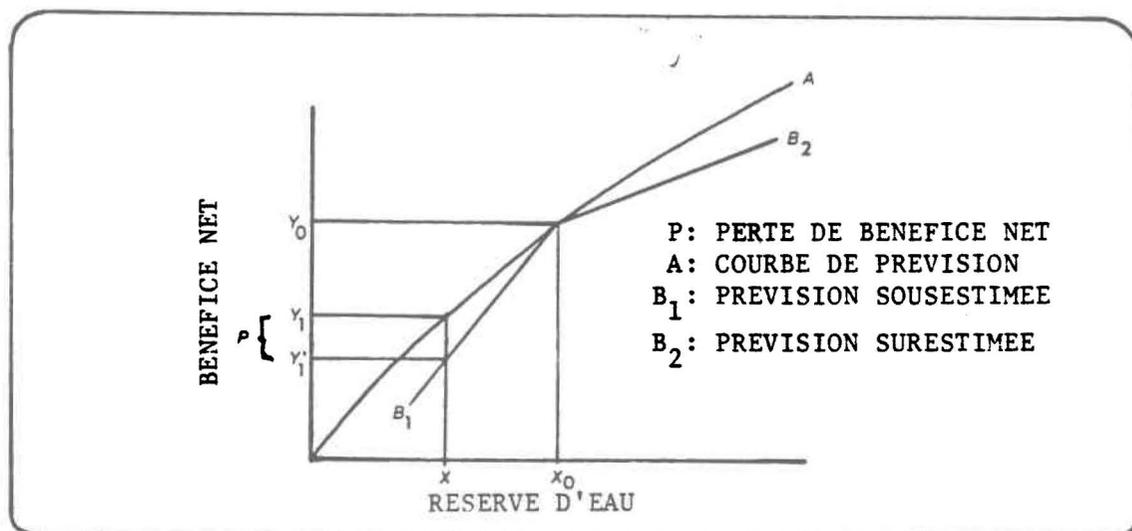


Figure 2.13: Description conceptuelle des bénéfices à partir des prévisions améliorées (tiré de Khorram, 1977)

binaison avec les satellites disponibles. Il est évident que les satellites actuels peuvent nous être grandement utiles, mais ils n'utilisent pas encore le plein potentiel du spectre électromagnétique pour l'observation de la surface terrestre. L'avènement de nouveaux satellites marquera une nouvelle étape dans l'observation nivale.

Les axes de recherches opérationnelles ou fondamentales ont été proposés par de nombreux auteurs dont Wiesnet (1980) qui en a esquissé un tableau presque complet (tableau 2.6).

Le but majeur sera d'améliorer les prévisions à court et à long terme tant sur la précision que sur la fréquence (Quick, 1972). Il faudra intensifier les études théoriques et expérimentales des processus de formation des crues et du comportement de la fonte nivale.

Une des grandes questions actuelles se situe toutefois au niveau du choix d'un modèle et Baker et Carder (1977) démontrent bien l'importance de ce choix au niveau de la gestion:

"Les tests de comparaison des modèles répondant de façon potentiellement correcte devraient fournir le type d'informations qui sera en usage chez le gestionnaire pour juger quels types de modèle sont mieux adaptés à leur propre situation particulière. Cette même source d'informations devrait aider les personnes dirigeant les travaux de développement de modèles en décidant quels modèles méritent un développement plus rapide ou un raffinement plus poussé".

TABLEAU 2.6. OBJECTIFS OPERATIONNELS ET DE RECHERCHE POUR LES ANNEES 80 (Tiré de Wiesnet, 1980).

1. OBJECTIFS OPERATIONNELS POUR LES ANNEES 80

1.1 Court terme

- réduire le temps d'obtention des images;
- optimiser les capteurs multibandes pour les études nivales;
- tester les modèles empiriques reliant l'étendue nivale à l'écoulement de fonte;
- comprendre les processus de fonte assez bien pour les modéliser avec les données d'entrée satellites;
- développer un programme automatique de cartographie numérisée de la neige;
- corriger les modèles de prévisions existants pour accepter les données satellites;
- cataloguer les données dans un répertoire international de données.

1.2 Long terme

- préparation informatique semi-automatisée du calcul d'écoulement de fonte en temps quasi réel;
- prévision saisonnière précise à court terme de la réserve d'eau du bassin basée sur des données d'écoulement de fonte nivale.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

2.1 Court terme

- tester un capteur discriminant neige/nuage;
- poursuivre les études de terrain sur la réflexion spectrale de la neige sous diverses conditions;
- développer des techniques pour estimer l'albédo nivale à partir des capteurs à bord de satellites;
- déterminer les effets de l'atténuation atmosphérique sur la réponse spectrale de la neige;
- déterminer les effets des propriétés physiques de la neige et du substrat sur la réflectance spectrale.

2.2 Long terme

- estimation de la densité et de l'équivalent-eau de la neige;
- compréhension de la réflexion spectrale de l'albédo de la neige au long de l'évolution du métamorphisme saisonnier.

CHAPITRE 3

CADRE DE L'ETUDE

3. CADRE DE L'ETUDE

La prochaine étape concerne la mise en application d'une méthode originale de prévision pour des bassins hydrographiques du Québec. Pour y arriver, il est nécessaire d'introduire la région d'étude ainsi que les outils qui seront employés.

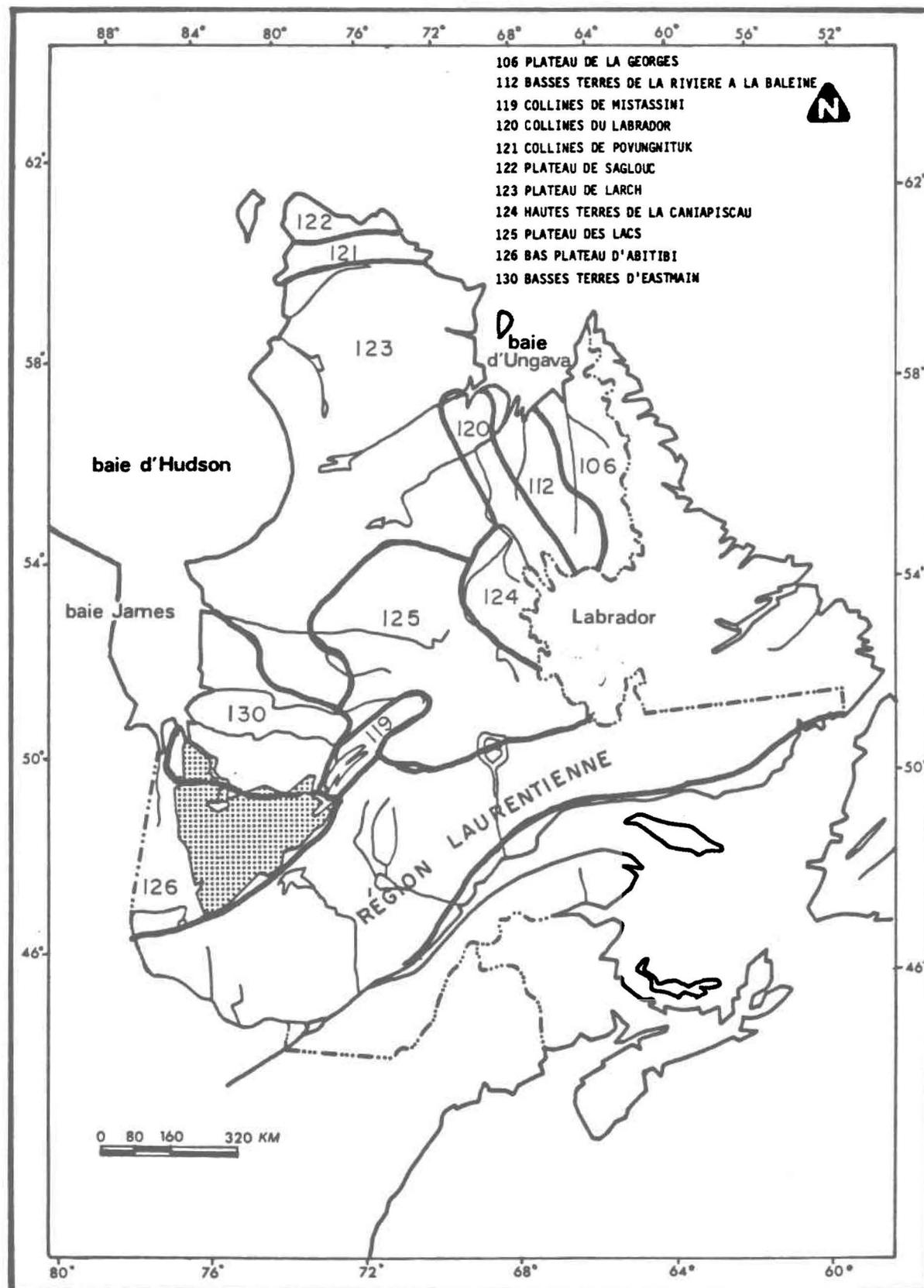
3.1 Aspects physiques du bassin de la rivière Nottaway

La région d'étude se situe entièrement sur le Bouclier Canadien et principalement sur les sous zones caractérisées par le bas plateau Abitibi, les basses terres d'Eastmain et la région Laurentienne (figure 3.1). Le bassin versant possède une superficie de 65 786 km² et la rivière Nottaway coule vers le nord-ouest pour se jeter dans la baie de James (figure 3.2). Cette région est caractérisée par deux unités physiographiques: les basses terres (plaine argileuse) et les hautes terres (plateaux). La première unité présente des dépôts d'argile avec des placages de sable. Le drainage y est mauvais, ce qui explique la multitude de tourbières. Toutefois, leur nombre diminue vers l'est. La région compte également une faible densité de lacs. Les hautes terres (2^e unité) sont marquées par l'influence des glaciers. On y dénote également un grand nombre d'affleurements rocheux. Cette zone compte une multitude de lacs souvent séparés que par de petites collines. Les dépôts meubles d'origine glaciaire ont une orientation dominante vers le nord et le nord-est (SEBJ, 1978).

La géologie du bassin est caractérisée presque exclusivement par des roches d'âge antérieur au précambrien. Les diverses unités sont présentées sur la carte géologique de la figure 3.3.

Le quaternaire de la région a influencé la morphologie et la distribution des dépôts meubles par l'entremise du lac proglaciaire Ojibway-Barlow et de la mer de Tyrell. Elles y ont laissé d'épais dépôts argileux (figure 3.4). Le retrait du glacier a également laissé plusieurs dépôts meubles derrière lui tels que les eskers, tills de fond et d'ablation,

Figure 3.1: Situation géographique du bassin de la rivière Nottaway (tiré de SEBJ, 1978).



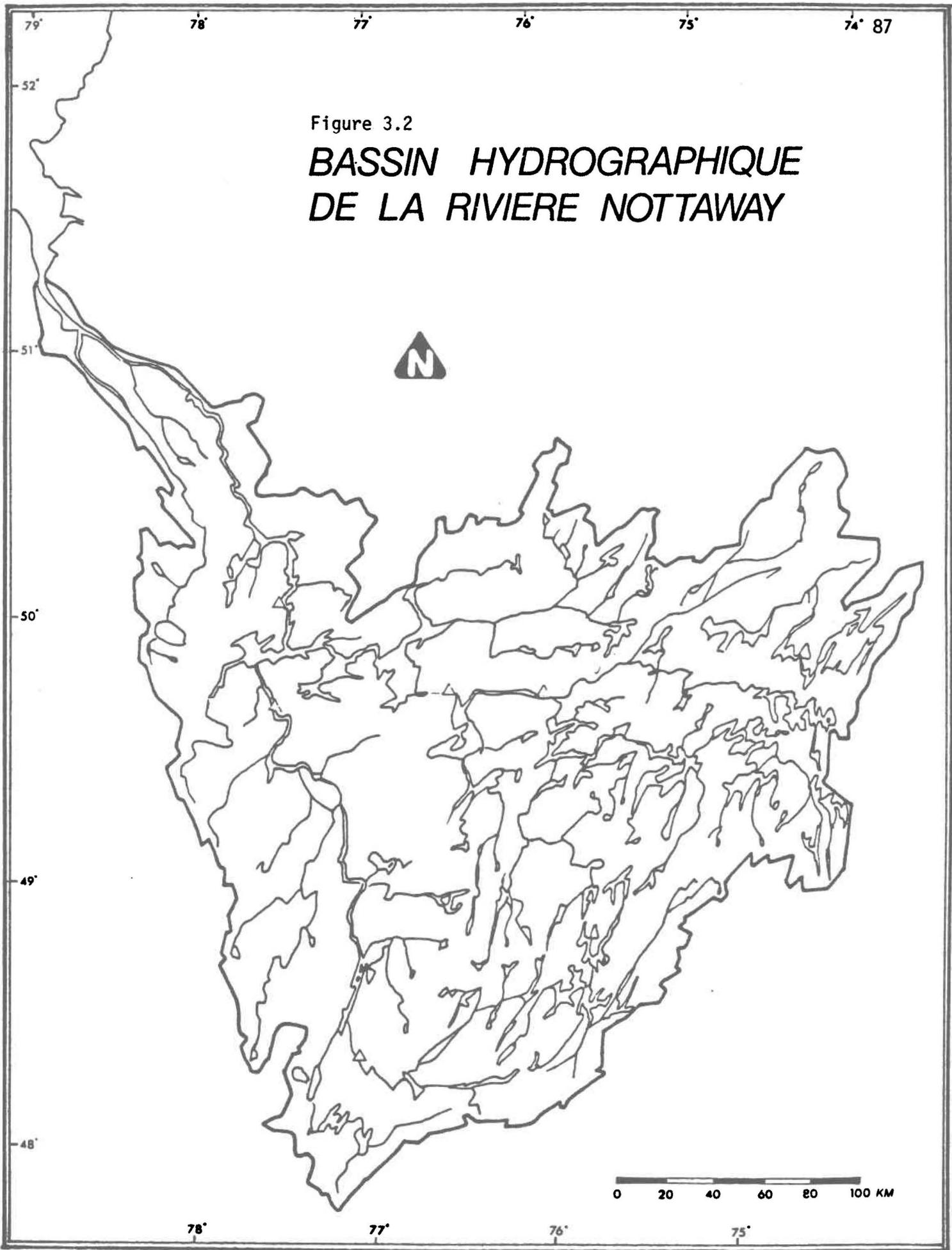
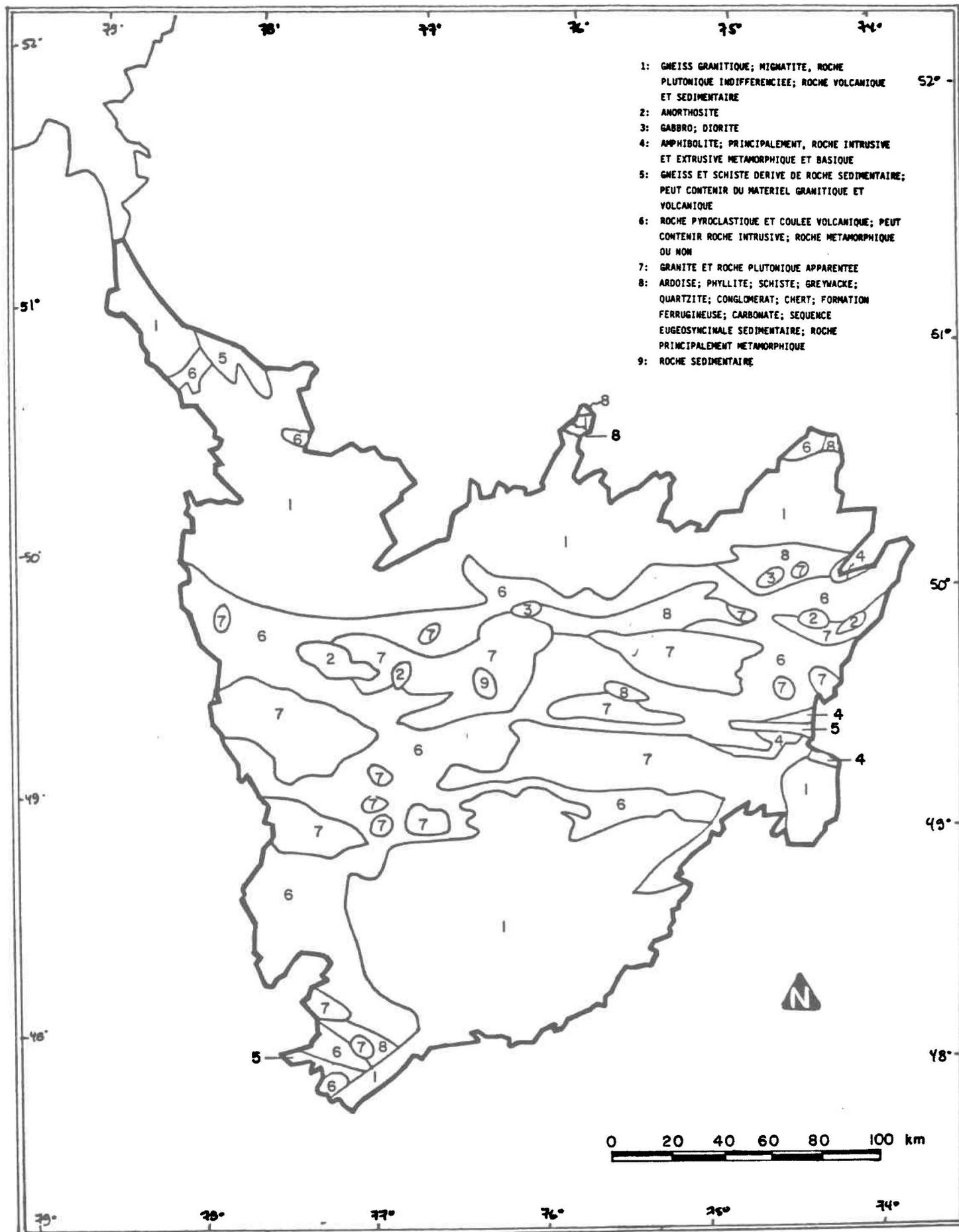
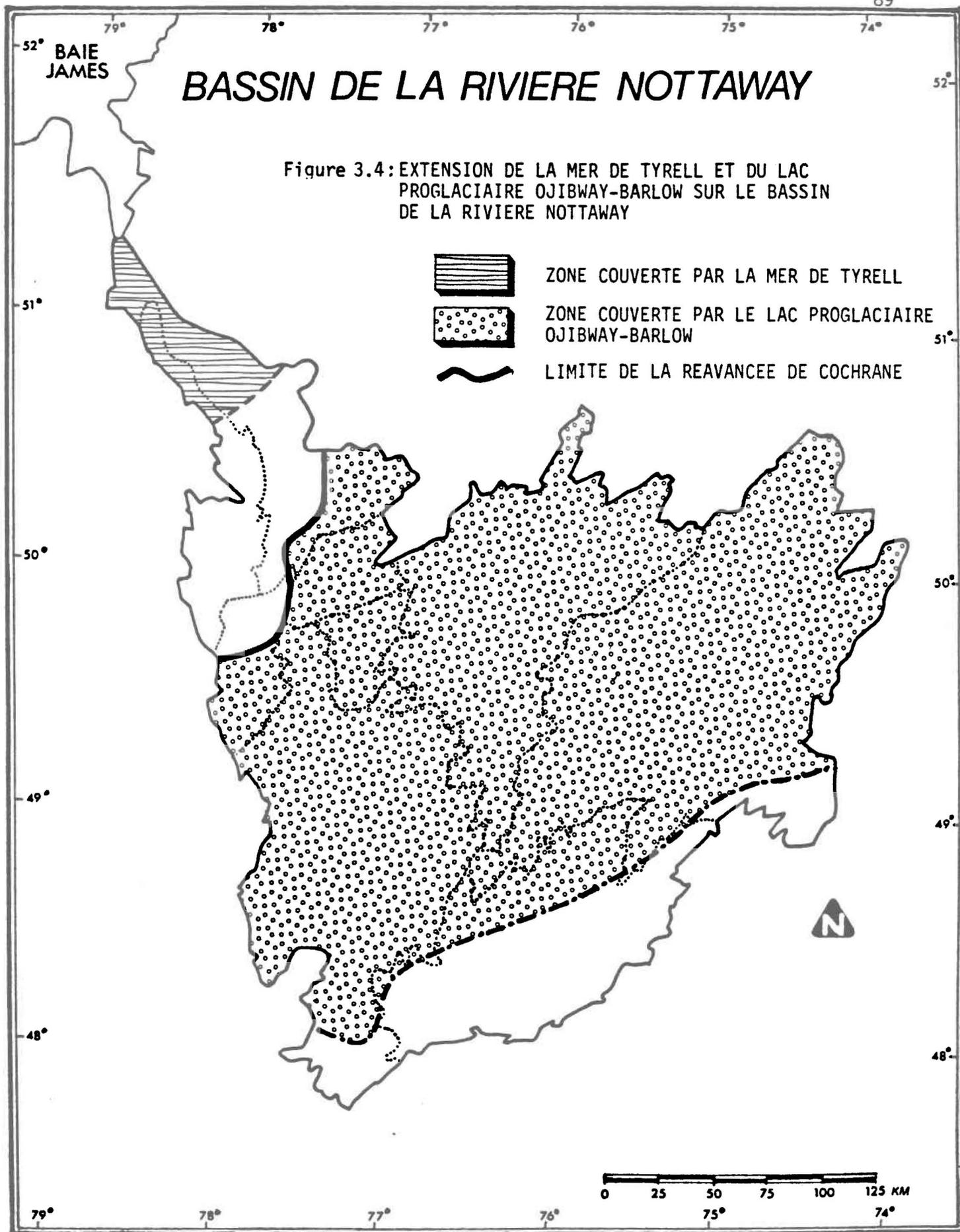


Figure 3.2
**BASSIN HYDROGRAPHIQUE
DE LA RIVIERE NOTTAWAY**

Figure 3.3: Carte géologique du bassin de la rivière Nottaway
(tiré de Douglas, 1972).





etc... (figure 3.5). L'action des cours d'eau a ensuite creusé le lit des rivières créant des terrasses fluviatiles. La SEBJ (1978) a expliqué plus en détail les caractéristiques des divers dépôts retrouvés sur le bassin (dépôts morainiques, dépôts argileux, dépôts fluvioglaciers, dépôts fluviaux et organiques).

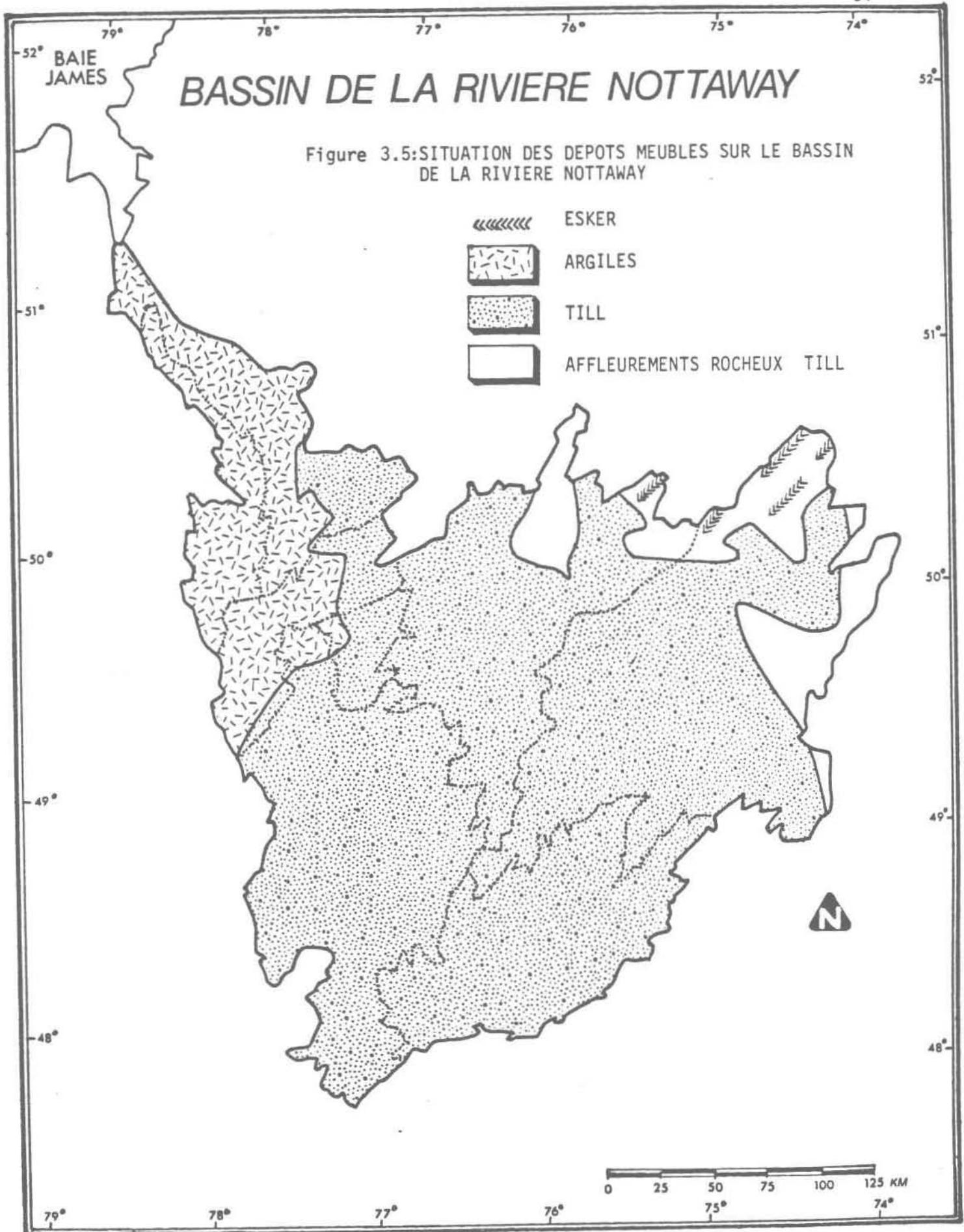
Le climat général de la région est représenté par le type Dfc (climat subarctique humide: taïga) de la classification de Köppen. La température moyenne annuelle est près de la valeur de 1,1 °C. L'isotherme moyen de janvier varie entre -20,6 °C et -23,3 °C, tandis que l'isotherme moyen de juillet varie entre 12,8 et 15,6 °C. La répartition de la précipitation totale annuelle et la répartition des précipitations nivales totales annuelles sont présentées à la figure 3.6. La fraction nivale varie entre 35 et 40% de la précipitation totale annuelle sur le bassin de la rivière Nottaway. Un histogramme type des précipitations solides et liquides pour la région de Chibougamau est montré à la figure 3.7.

La région chevauche deux zones bioclimatiques de la baie de James; la zone boréale et la zone "bas subarctique" qui sont séparées par l'isotherme de 1400 degrés-jours de croissance¹ (figure 3.9).

Les caractéristiques hydrologiques principales de la rivière Nottaway sont représentées par les variables suivantes (SEBJ, 1978):

- Longueur:	720 km
- Dénivellation:	417,6 m
- Débit à l'embouchure:	1160 m ³ /s
- Débit spécifique à l'embouchure:	0,018 m ³ /s/km ²

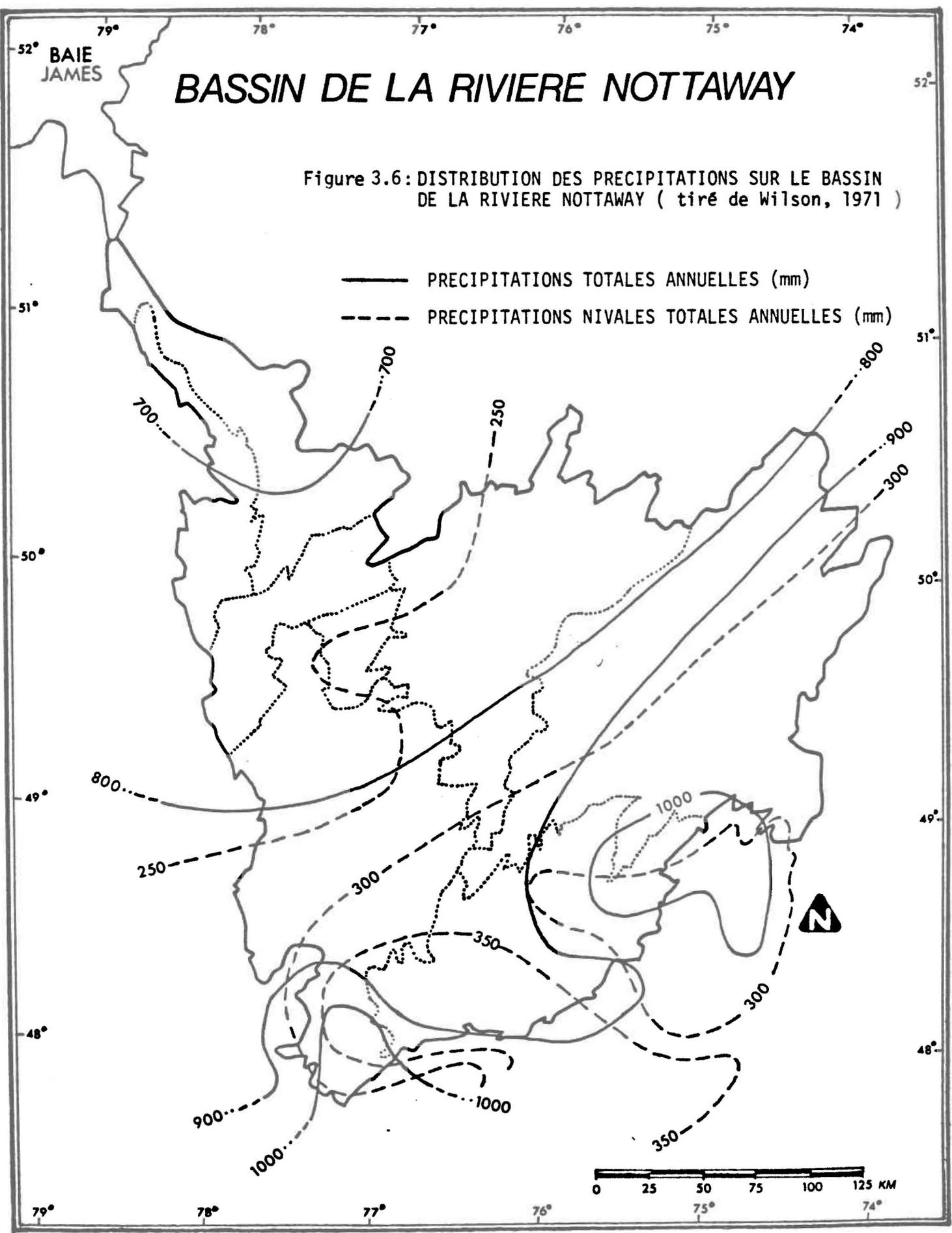
¹ Le nombre de degrés-jours de croissance est obtenu par la sommation de températures moyennes journalières supérieures à zéro degré Celsius pendant l'année.



BASSIN DE LA RIVIERE NOTTAWAY

Figure 3.6: DISTRIBUTION DES PRECIPITATIONS SUR LE BASSIN DE LA RIVIERE NOTTAWAY (tiré de Wilson, 1971)

- PRECIPITATIONS TOTALES ANNUELLES (mm)
- - - PRECIPITATIONS NIVALES TOTALES ANNUELLES (mm)



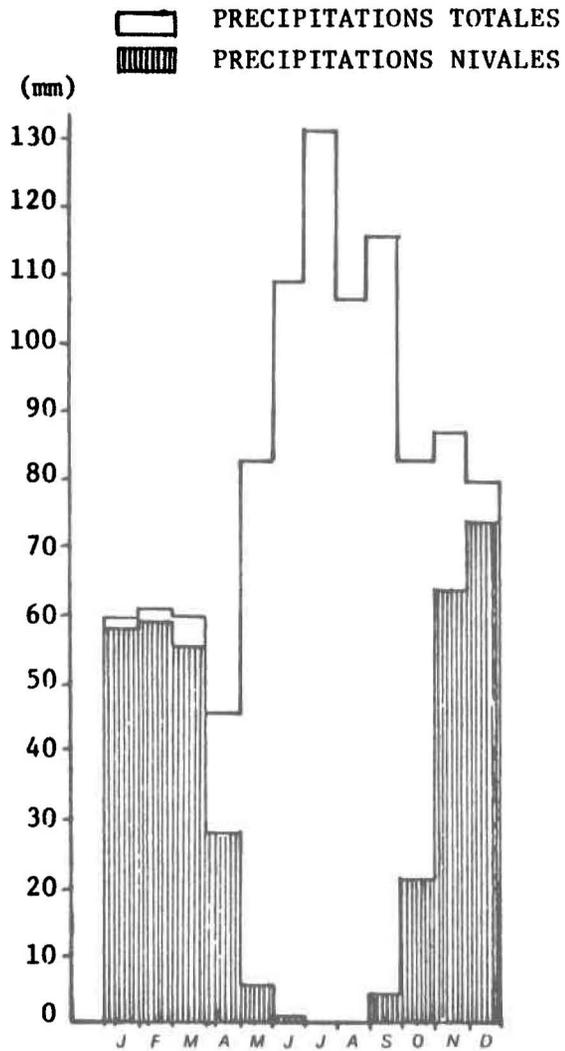


Figure 3.7: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1941-1970) pour Chibougamau (tiré de S.E.B.J., 1978)

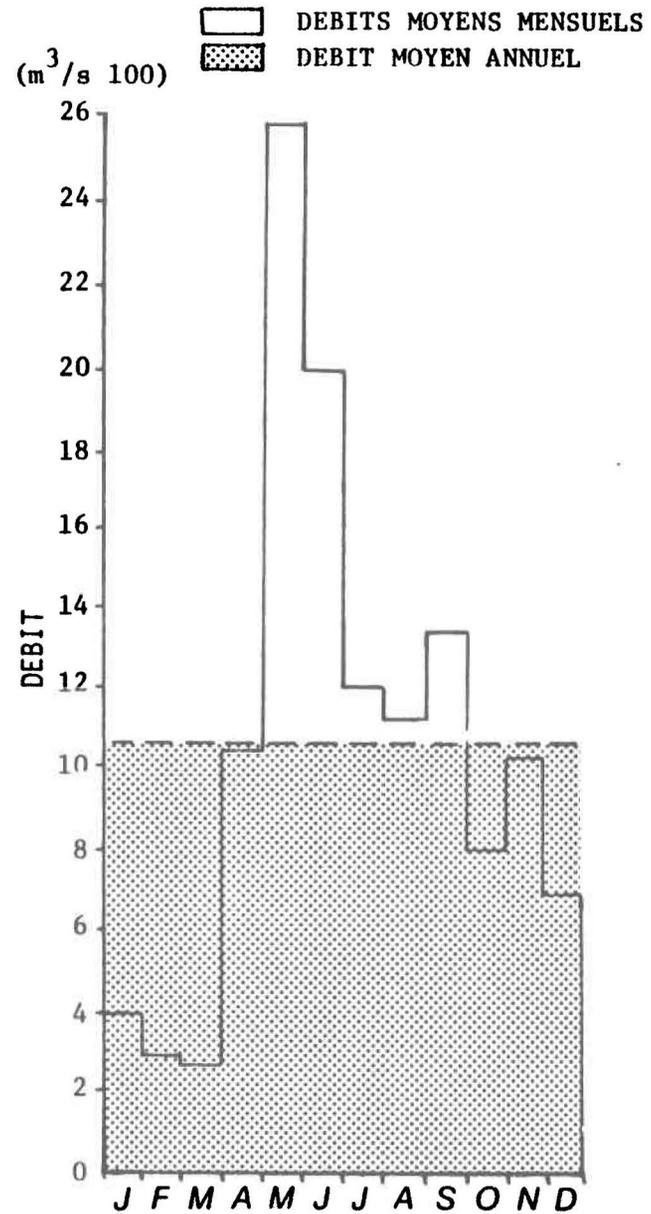
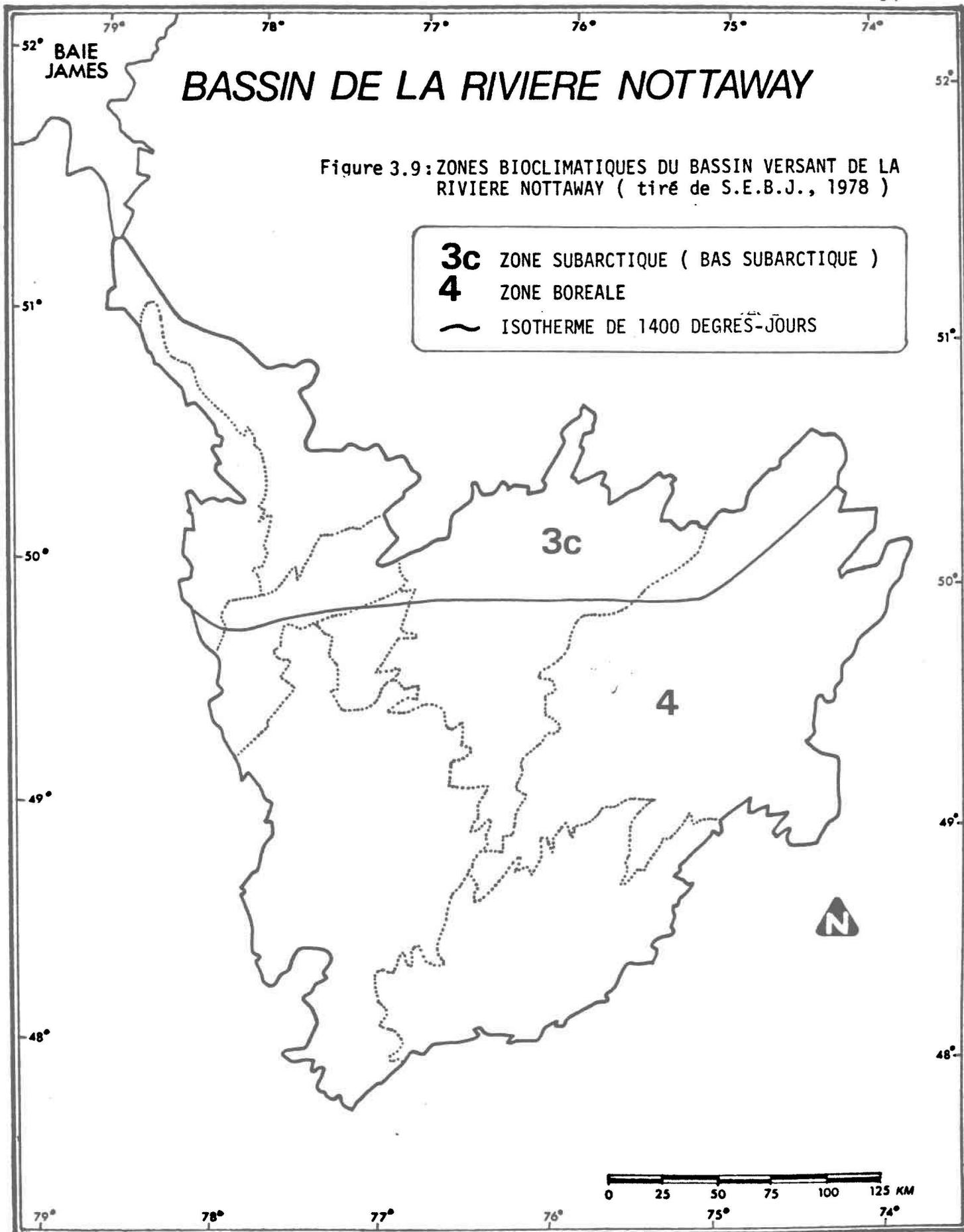


Figure 3.8: Hydrogramme de la rivière Nottaway, station MRN 080701 (tiré de S.E.B.J., 1978)



Le bassin montre deux crues d'importance inégale: une crue de fonte printanière (mai-juin avec récession en juillet) et une crue automnale moins importante, due aux pluies. Il y a également deux étiages: l'un pendant l'été après une période de faible précipitation et l'autre pendant l'hiver lorsqu'il y a absence de ruissellement et d'alimentation des nappes. L'hydrogramme annuel de crue pour la rivière Nottaway (station MRN 080701) est présenté à la figure 3.8. Enfin, il faut mentionner la présence du Lac au Goéland qui représente l'un des plus grands lacs de la région avec une surface de 255 km². La profondeur de celui-ci et de la plupart des autres lacs est toutefois assez faible.

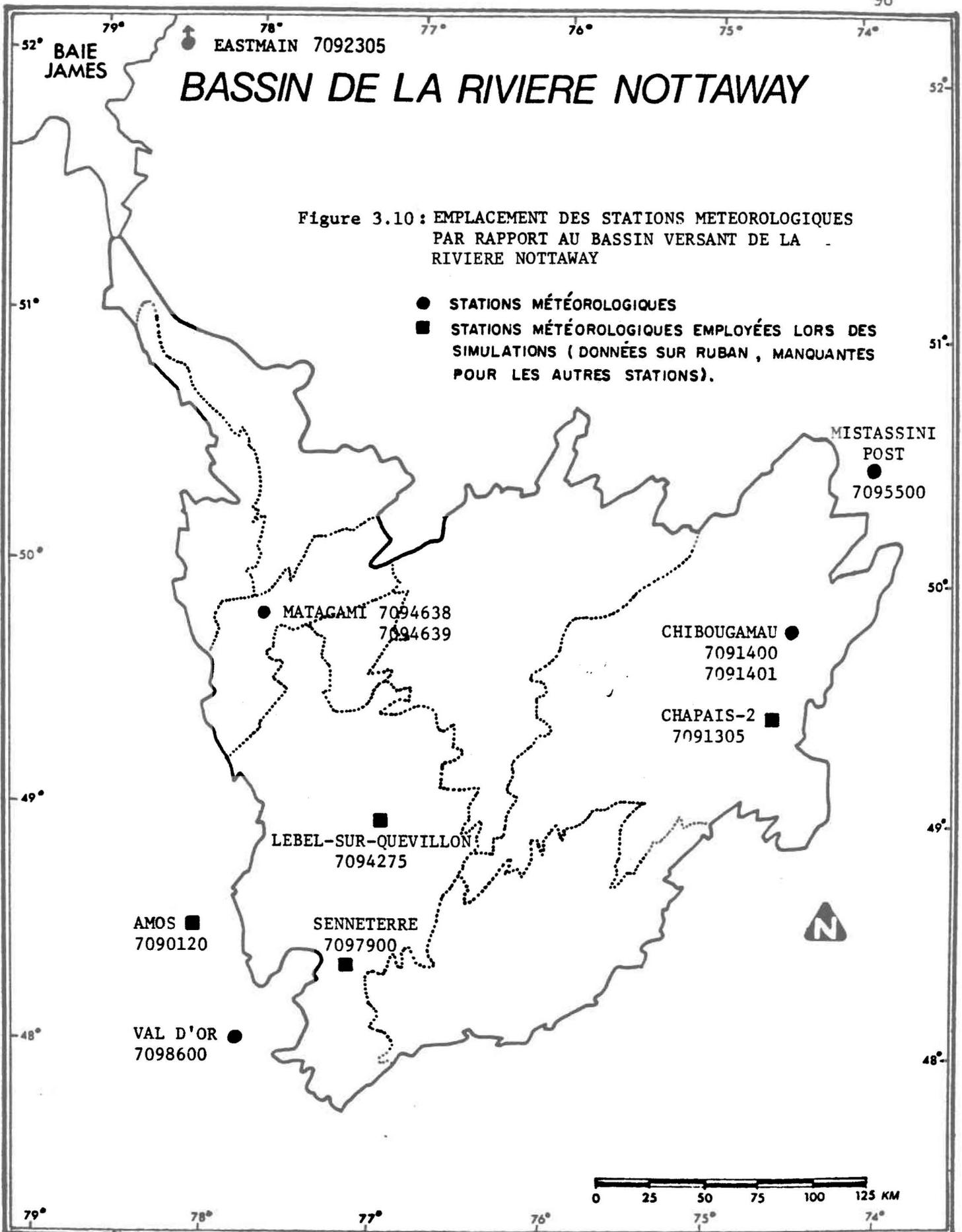
3.2 Description des réseaux d'échantillonnage de données

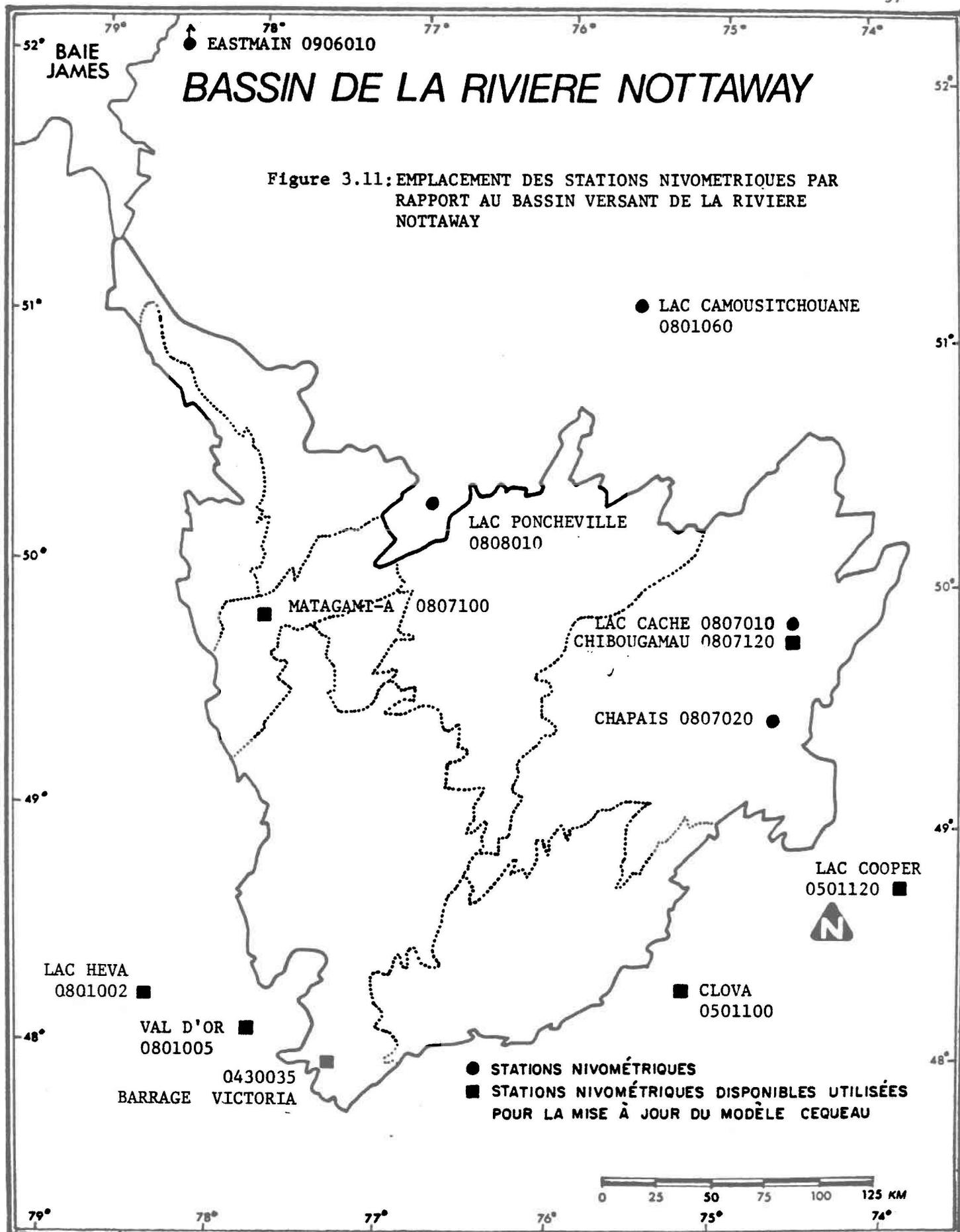
Le bassin physiographique de la rivière Nottaway possède des réseaux hydrométrique, météorologique et nivométrique relativement peu dense. Toutefois, les réseaux concernés s'avèrent plus denses que sur la plupart des bassins subarctiques environnants.

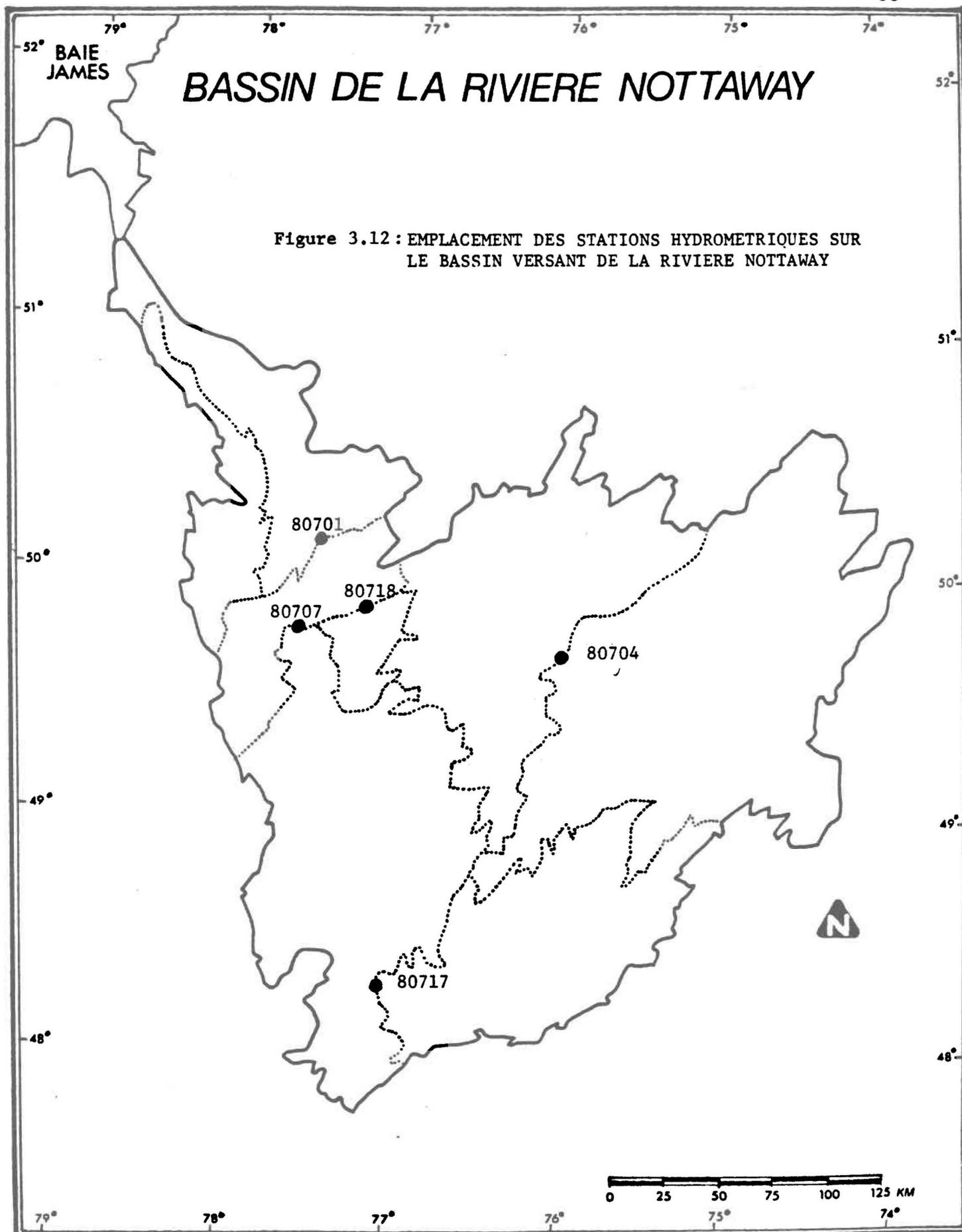
Les principales stations utilisables pour la modélisation du bassin de la Nottaway au niveau des réseaux hydrométrique, météorologique et nivométrique sont présentées aux figures 3.10, 3.11 et 3.12. Leurs caractéristiques principales sont regroupées sur les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 (Morin et al., 1980).

Les données météorologiques, incluant les données nivométriques, ont été fournies par le Service de météorologie du ministère de l'Environnement du Québec. Les données journalières disponibles sont les températures maximales et minimales de l'air et les précipitations solides et liquides. Le ministère fournit également des données nivométriques sur l'épaisseur, la densité et l'équivalent-eau du couvert nival à certaines dates pendant l'hiver.

Les données hydrométriques ont été fournies par la même source sous la forme de débits journaliers aux différentes stations.







BASSIN DE LA RIVIERE NOTTAWAY

Figure 3.12 : EMLACEMENT DES STATIONS HYDROMETRIQUES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE NOTTAWAY

TABLEAU 3.1. STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA REGION DE LA RIVIERE NOTTAWAY (Tiré de Morin et al., 1980).

NUMERO FEDERAL	NOM	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (mètres)	PERIODE DISPONIBLE	
					ANNEE DEBUT	ANNEE FIN ***
7090120	Amos**	48° 34'	78° 08'	310	1913	1981
7091305	Chapais 2* **	49° 47'	74° 51'	396	1962	1981
7091400	Chibougamau*	49° 54'	74° 18'	378	1936	1977
7091401	Chibougamau-A*	49° 49'	74° 25'	403	1971	1977
7092305	Eastmain	52° 15'	78° 31'	6	1960	1981
7094275	Lebel-sur-Quévillon* **	49° 03'	76° 59'	304	1967	1981
7094638	Matagami	49° 44'	77° 38'	256	1963	1974
7094639	Matagami-A	49° 46'	77° 48'	277	1973	1977
7095000	Mistassini-Post*	50° 25'	73° 53'	380	1885	1980
7095480	Nitchequon	53° 12'	70° 54'	536	1942	1977
7097900	Senneterre* **	48° 21'	77° 17'	312	1967	1981
7098600	Val D'Or	48° 03'	77° 47'	337	1951	1977

* Stations situées sur le bassin de la rivière Nottaway.

** Stations utilisées lors des simulations du modèle CEQUEAU.

*** Périodes de données disponibles sur support informatique. Ces dates ne représentent pas nécessairement la période finale d'opération. La plupart de ces stations sont encore en opération.

TABLEAU 3.2 STATIONS NIVOMETRIQUES DE LA REGION DE LA RIVIERE NOTTAWAY (Tiré de Morin et al., 1980).

NUMERO	NOM	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (mètres)	PERIODE DISPONIBLE	
501100	Clova**	48° 07'	75° 22'	440	1937	1982
501120	Lac Cooper**	48° 50'	74° 10'	465	1951	1982
801005	Val D'Or**	48° 03'	77° 47'	337	1963	1982
807010	Lac Caché*	49° 54'	74° 18'	381	1956	1982
807020	Chapais-A*	49° 37'	74° 52'	457	1966	1982
807100	Matagami-A* **	49° 46'	77° 48'	277	1974	1982
807120	Chibougamau-A* **	49° 49'	74° 25'	402	1972	1982
810150	Lac Albanel	51° 15'	72° 40'	392	1967	1982
810160	Lac Camousitchouane	51° 04'	75° 30'	306	1967	1982
906010	Eastmain**	52° 14'	73° 31'	6	1977	1982
801002	Lac Heva **	47° 51'	77° 22'	329	1979	1982
430035	Barrage Victoria * **	48° 11'	78° 20'	320	1968	1982

* Stations situées sur le bassin de la rivière Nottaway

** Stations utilisées lors de la mise à jour du modèle

TABLEAU 3.3 STATIONS HYDROMETRIQUES EN SERVICE OU AYANT EXISTE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE NOTTAWAY (Tiré de Morin et al., 1980).

NUMERO	NOM	BASSIN VERSANT km ²	PERIODE DISPONIBLE*	
			ANNEE DEBUT	ANNEE FIN
080701	Nottaway à la tête du lac Soscumica	57500	1961	1981
080704	Waswanipi à 0,3 mille en aval de l'Opawica	18700	1963	1981
080707	Bell à 4,8 milles en amont du lac Matagami	22200	1963	1981
080717	Megiscane à 8,4 milles en amont du lac Parent	8310	1966	1981
080718	Waswanipi à la tête	31900	1968	1981

* Période continue

3.3 Modèle CEQUEAU

3.3.1 Description générale

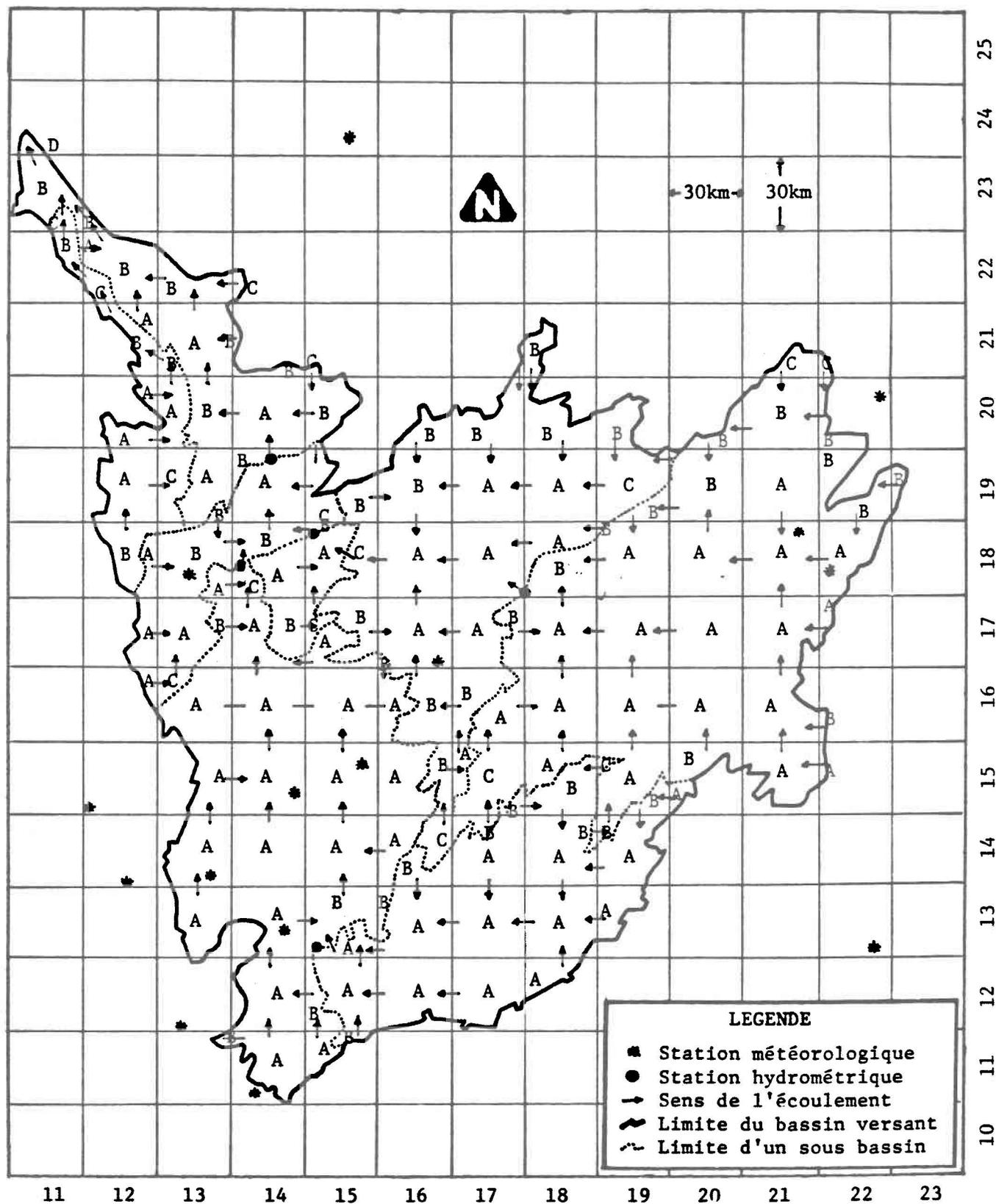
Selon Morin et al. (1975), le modèle CEQUEAU fut spécialement conçu pour:

- suivre dans l'espace et dans le temps, la formation et l'évolution des écoulements naturels;
- simuler les débits en n'importe quel point du réseau de drainage;
- pouvoir introduire toutes modifications artificielles de l'écoulement dans les cours d'eau.

Ce modèle déterministe fait appel à une grille à mailles carrées, pour décrire les principales caractéristiques physiographiques du bassin versant étudié (figure 3.13). Il est à remarquer que la taille de la grille peut être facilement changée selon les besoins de l'utilisateur (Charbonneau et al., 1977). Ce système permet l'estimation des variables suivantes selon chacun des carreaux entiers définis par la grille choisie (Girard et al., 1973):

- les données météorologiques d'entrée (à partir des données observées aux stations météorologiques);
- les lames d'eau produites par les précipitations ou les fontes de neige sur le sol compte tenu des données physiques et géologiques;
- le bilan hydrique de l'eau issu d'un carreau, à un pas de temps choisi à l'avance.

Figure 3.13: Schématisation du bassin versant naturel de la rivière Nottaway à l'aide d'une grille carrée (tiré de Morin et al., 1980)



Une attention spéciale doit être apportée au niveau des données de base caractérisant chacun des carreaux. Il existe trois types particuliers de données (Charbonneau et al., 1977):

- les données physiographiques: elles sont propres aux carreaux entiers et sont caractérisées par: l'altitude moyenne, la pente moyenne, l'orientation géographique, le pourcentage de couvert forestier, la nature de sous-sol, etc.;
- les données météorologiques: elles sont représentées par les précipitations solides et liquides, les températures maximales et minimales;
- les données hydrométriques: elles sont caractérisées par les débits de divers cours d'eau jaugés, les débits relâchés et les niveaux d'emménagement des réservoirs.

Le premier type de données constitue l'assise physique du carreau entier. Les données du deuxième type sont ponctuelles et doivent être interpolées en fonction de la plus proche station ou en fonction d'une pondération basée sur la distance aux trois stations météorologiques les plus proches (Charbonneau et al., 1977).

Le modèle CEQUEAU simule le bilan hydrique par une séparation du cycle hydrologique en éléments distincts représentés sous forme de sous-routines traduites par des équations mathématiques:

- l'accumulation et la fonte nivale;
- l'infiltration;
- la redistribution hydrique au sol;
- l'évapotranspiration;
- les fluctuations des nappes souterraines (écoulement de base);
- le transfert de l'écoulement en rivière.

Le fonctionnement du modèle est axé sur deux aspects du cycle hydrologique: la "production" d'eau disponible pour l'écoulement en rivière et le "transfert" ou écoulement effectif de cette eau vers l'exutoire.

LA FONCTION DE PRODUCTION: selon Girard et al. (1973), "elle doit traduire le comportement hydrologique des bassins ayant une même superficie (unité = carreau entier), mais dont les caractéristiques physiographiques peuvent être différentes comme le sont d'ailleurs les données météorologiques et les variables hydrologiques. Les paramètres de cette fonction sont déduits par des lois simples représentatives du phénomène physique".

LA FONCTION DE TRANSFERT (FORMATION) DE L'ÉCOULEMENT: selon les mêmes auteurs, "le transfert de l'écoulement dans le réseau prend les apports fournis par chaque carreau partiel proportionnellement à sa surface et assure le transfert de l'amont vers l'aval selon les caractéristiques du réseau. Le volume résiduel du pas de temps précédent et le volume d'eau libéré au dernier pas de temps par les carreaux situés en amont, viennent s'ajouter au volume produit par le carreau partiel au pas de temps donné".

La fonction de production est basée sur le découpage du bassin selon la grille carrée choisie (carreau entier) tandis que la fonction de transfert repose sur un second découpage de ces carreaux entiers en sous-unités de carreau ou carreaux partiels selon les lignes de partage des eaux entre les sous-bassins.

3.3.2 Sous routine de fonte

La fonte nivale repose sur les mêmes supports que le modèle général mais certaines caractéristiques du manteau nival sont basées sur deux hypothèses:

- la redistribution de la neige en surface: sur chaque carreau la couverture nivale est admise comme homogène;

- la distribution réelle du volume d'eau du couvert nival sur un même carreau varie en fonction des fontes locales.

L'état du manteau nival peut être facilement suivi sur chaque carreau et les fontes successives sont évaluées à partir de la méthode des degrés-jours ou par une autre méthode (Riley et al., 1972) tenant compte de:

- l'exposition moyenne du carreau;
- la pente locale;
- l'état du manteau nival;
- etc...

3.4 SCANIQ

Le Système conjoint d'analyse numérique d'images de Québec (SCANIQ) fut élaboré à partir d'un protocole d'entente entre l'université Laval, le ministère québécois de l'Énergie et des Ressources et le Centre de recherches forestières des Laurentides. Il est maintenant opérationnel depuis 1980 et est installé dans les bureaux du Centre québécois de coordination de la télédétection au ministère de l'Énergie et des Ressources.

Le système est composé de deux unités pouvant communiquer par l'intermédiaire d'un disque servant d'interface (disque 200 M octets). La première unité sert au traitement interactif (conversationnel) des images. Elle est caractérisée par le sous-système LCT-11 de la compagnie Dipix. Cette unité reçoit ses données d'entrée par le disque d'interface mais les inputs et les outputs sont contrôlés par la deuxième unité (PDP-11/40). L'opérateur est en communication avec le système conversationnel grâce à quatre composantes de base: le terminal graphique, la tablette graphique, la mini imprimante et le moniteur couleur. Cette dernière composante peut servir à identifier des pixels précis ou des zones de référence pour orienter les traitements ultérieurs sur le sous-système de traitement par lots (Audet, 1981). Ce dernier constitue la deuxième unité et est représenté

par l'ordinateur central PDP-11/40. Un logiciel Aries est également implanté sur le processeur du PDP-11/40. Les données doivent être lues sur le dérouleur de bande de ce sous système pour être ensuite emmagasinées sur une autre unité de disque de 88 M octets.

SCANIQ a toutefois une lacune. Il ne possède pas de photo imprimante, ce qui contraint l'utilisateur à générer les résultats sur une bande magnétique pour qu'ils soient transférés sur un autre système capable de produire un document sur papier photographique.

Outre les aspects précédents, il existe un programme maître pour piloter tous les programmes dont celui de la gestion des fichiers qui permet un dialogue entre l'ordinateur et l'utilisateur.

Le traitement numérique a été décrit par Audet (1981):

"Les véritables traitements numériques d'images sont effectués par des programmes ou des groupes de programmes permettant des classifications ou des accentuations d'images. Il est parfois utile avant ces traitements d'effectuer certains prétraitements comme des corrections radiométriques et géométriques également disponibles sur SCANIQ".

CHAPITRE 4

COMMENTAIRES SUR L'IMAGERIE NOAA

4. COMMENTAIRES SUR L'IMAGERIE NOAA

Certaines remarques surgissent après une étude des images NOAA ayant été prises lors des hivers 1975 et 1979 et provenant des satellites NOAA-4 et 5. Cette analyse vient compléter l'étude plus globale de l'utilisation de l'imagerie NOAA pour des fins d'optimisation en modélisation des phénomènes hydrologiques. Il faut mentionner que les images étudiées au cours de cette analyse complémentaire, sont des reproductions sur papier photographique et donc que l'information y est moindre que sur les transparents ou les images numériques. Elles s'avèrent suffisantes pour la détermination de la fréquence d'observation, de la résolution et d'autres paramètres généraux liés au couvert nival.

4.1 Fréquence d'observation

L'image NOAA couvre une très grande superficie (voir chapitre 2.1.3.1). Une seule image couvre aisément tout le Québec. Ainsi la fréquence est un terme relatif, associé à une zone d'étude déterminée. Une image peut montrer cette région libre de nuage tandis qu'à quelques centaines de kilomètres sur la même image, la nébulosité empêche l'observation des caractéristiques au sol.

Dans l'étude, deux régions d'intérêt furent choisies pour montrer la fréquence relative des images potentiellement utilisables: la région couvrant le bassin de la rivière Nottaway (entre 47° et 53° de latitude nord et entre 79° et 74° de longitude ouest) et la région couvrant le sud du Québec (entre 45° et 47° de latitude nord et entre 79° et 70° de longitude ouest) (figure 5.1). Ces deux régions furent choisies principalement en fonction des zones d'études du mémoire. Deuxièmement ces régions représentent des unités relativement homogènes au niveau de la nébulosité. Elles sont souvent toutes ennuagées ou pas du tout, mais rarement en partie.

La fréquence d'images utilisables est faible à l'automne (tableaux 4.1 et 4.2). Généralement, de quatre à huit journées d'observations sans

Figure 4.1c: Fréquence d'observation des images satellites pour la saison 1977-1978.

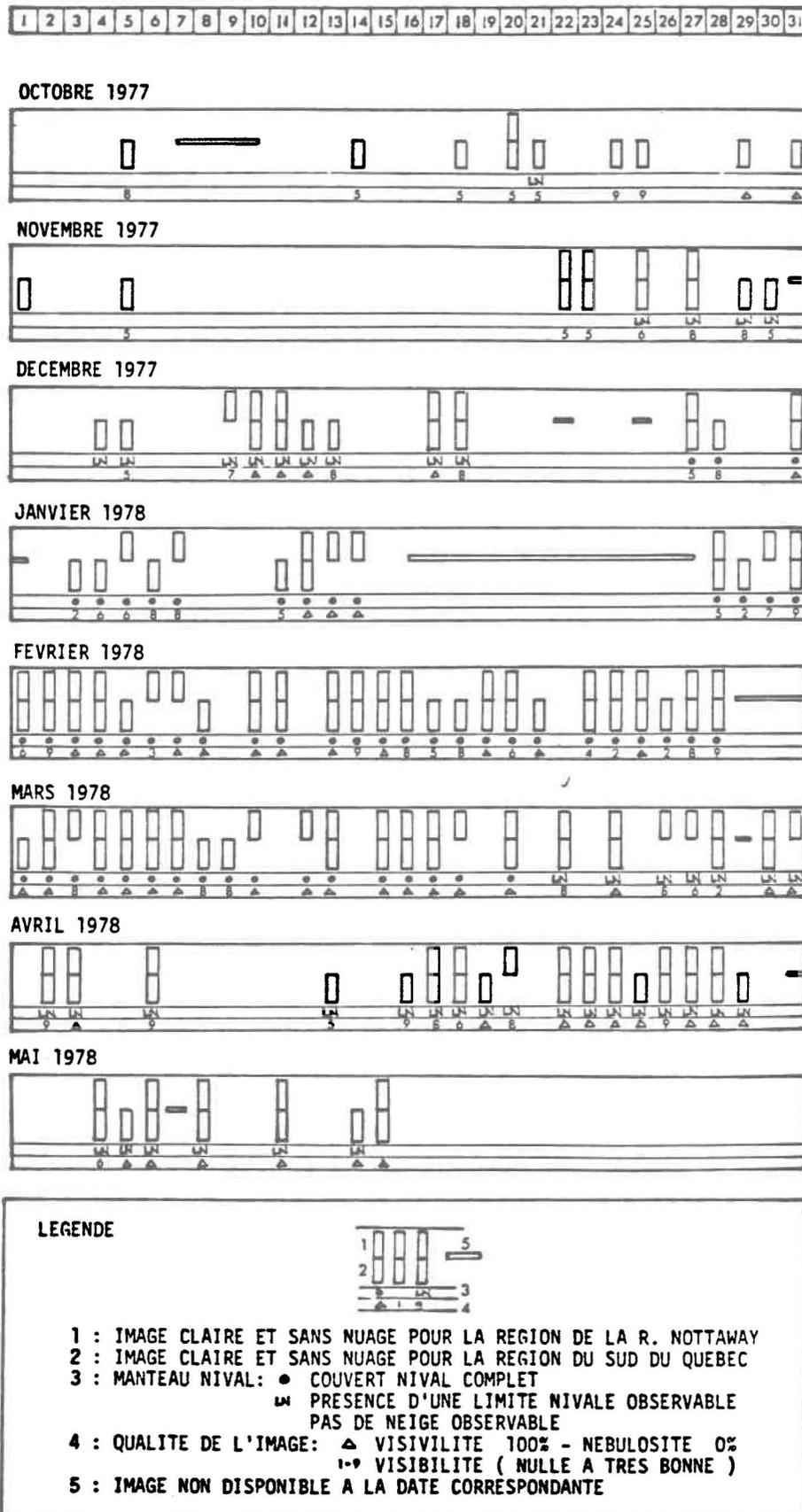


TABLEAU 4.1. POURCENTAGE DES FREQUENCES D'IMAGES SATELLITES UTILISABLES POUR LA ZONE COUVRANT LE SUD DU QUEBEC.

MOIS	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	VARIATION INTERANNUELLE	\bar{x}
	%	%	%	%	%	%
Octobre	29	30	29	31	29-31	30
Novembre	6	27	27	27	6-27	22
Décembre	41	45	35	36	35-41	39
Janvier	16	45	44	40	16-45	36
Février	25	31	82	57	25-82	49
Mars	48	39	57	—	39-57	48
Avril	40	50	53	—	40-53	48
Mai	16	50	50	—	16-50	39

TABLEAU 4.2 POURCENTAGE DES FREQUENCES D'IMAGES SATELLITES UTILISABLES POUR LA ZONE COUVRANT LE BASSIN DE LA RIVIERE NOTTAWAY.

MOIS	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	VARIATION INTERANNUELLE	\bar{x}
	%	%	%	%	%	%
Octobre	10	30	3	19	3-30	15
Novembre	3	50	13	20	3-50	22
Décembre	41	41	22	36	22-41	35
Janvier	19	45	44	40	19-45	37
Février	32	34	67	85	32-85	55
Mars	48	39	70	—	39-70	53
Avril	30	53	40	—	30-53	41
Mai	13	25	36	—	13-36	25

nuages sont disponibles au mois d'octobre et de novembre, mais la qualité de ces images est souvent diminuée par la présence de nuages minces ou dispersés. Ainsi, le mois de novembre 1975 n'a permis que deux images plus ou moins nettes au sud et seulement une au nord. Toutefois l'année suivante, cette même période a permis une quinzaine d'images nettes couvrant la partie nord et huit couvrant la partie sud.

L'hiver affiche généralement de meilleures conditions pour l'observation des caractéristiques au sol. Ainsi, à l'occasion de certaines années, le mois de janvier permet jusqu'à près d'une image de bonne sur deux tandis que d'autres années cette fréquence peut diminuer à 1:6. Entre les mois de décembre, janvier et février, les deux premiers montrent une fréquence légèrement plus faible que février qui peut permettre jusqu'à près de cinq observations utilisables sur une possibilité de six (année 1979). La fréquence d'observation pour les mois d'hiver s'avère deux fois plus élevée que pour les mois d'automne (tableaux 4.1 et 4.2).

Le printemps est caractérisé par une fréquence d'observation un peu plus faible qu'à l'hiver mais plus élevée qu'à l'automne. Ainsi, le mois de mars suivi de près par le mois d'avril affichent les fréquences les plus élevées de cette période. Ce sont également les mois les plus importants au niveau de la fonte printanière. La qualité des images est également meilleure à cette période, principalement en raison des meilleures conditions de luminosité (angle solaire plus élevé).

4.2 Retrait de la limite nivale

Les images NOAA permettent de suivre assez aisément le retrait de la limite nivale sur tout le Québec (figure 4.1a-d: images identifiées par "LN"). La limite nivale est facile à déterminer lorsqu'elle se situe au niveau des basses terres du Saint-Laurent, mais elle devient beaucoup moins nette lorsqu'elle recule vers le nord. Ce phénomène est facilement explicable par le fait que les basses terres du Saint-Laurent possèdent une densité végétale relativement faible, une grande proportion d'espaces à

découvert et une délimitation par les massifs montagneux des Appalaches et du contrefort des Laurentides. Les zones plus élevées en latitude (entre 46° et 52° de latitude nord) montrent une limite nivale moins nette pour des raisons inverses à celles des basses terres: couvert végétal continu de faible densité, peuplement de conifères (pas de perte du feuillage à l'automne) et un relief peu prononcé. La limite nivale affiche un recul très rapide et irrégulier. Ce phénomène est d'autant plus complexe à saisir que la discrimination du manteau nival est difficile à effectuer à ces latitudes.

4.3 Essai de perception des variations de l'équivalent-eau

Une tentative d'observation visuelle des images satellites NOAA dans le but d'associer l'augmentation de l'albédo de la neige à une augmentation de l'équivalent-eau n'a pas donné les résultats escomptés. Cette technique n'aurait pu servir que dans le cas d'un couvert nival homogène puisqu'une neige nouvelle montrant un albédo élevé ne reflète pas l'état des couches nivales sous-jacentes. Ce type d'analyse pourrait s'avérer intéressant pour la détermination des zones ayant reçu une nouvelle neige. Ainsi, la zone couverte de neige nouvelle afficherait un albédo plus élevé. Toutefois, le seuil de perception visuel ne peut détecter une variation d'albédo à partir des images disponibles pour l'étude en raison des variations relatives de réflectance d'une image à l'autre, de la qualité de l'image et de la végétation. L'application de cette méthode pourrait peut-être devenir intéressante avec l'emploi d'images numériques NOAA et LANDSAT ayant été corrigées radiométriquement auparavant pour permettre une comparaison possible entre les diverses images.

Deux phénomènes particuliers montrent un potentiel intéressant pour la caractérisation de l'état du manteau nival. Le premier concerne la distribution spatiale d'une chute de neige survenant après le retrait du manteau nival. Toutefois, sa valeur serait peut-être injustifiée opérationnellement en raison des coûts associés au traitement et à la date d'occurrence. Ce phénomène est habituellement observable tard au printemps, souvent après

le départ du manteau nival saisonnier. Cette couche est rarement très épaisse. Toutefois, ces apports de neige cumulés peuvent atteindre de 5 à 20% du volume total de précipitation nivale reçue pendant l'hiver.

Le deuxième phénomène concerne le murissement du manteau nival précédant la fonte et sa disparition. Ce phénomène souvent cité dans la littérature semble très apparent sur l'imagerie NOAA. La détermination de cette zone en combinaison avec la détermination de la limite de fonte nivale pourrait s'avérer très intéressante au niveau des prévisions de fonte à partir de la modélisation. Cette zone est très marquée au niveau du 46° ou 50° parallèle nord. Une étude de corrélation entre les données au sol et cette zone de murissement pourrait être très intéressante.

Il est évident que cette analyse ne représente qu'une étude sommaire basée sur des données satellites de qualité moyenne disponibles pour quelques années seulement. Toutefois, ces quelques données peuvent s'avérer d'une aide non négligeable pour la planification d'un système opérationnel de prévision à des fins hydrologiques.

CHAPITRE 5

ADAPTATION D'UNE METHODOLOGIE DE MISE A JOUR
AU MODELE CEQUEAU PAR L'UTILISATION DE DONNEES
ACQUISES PAR TELEDETECTION

5. ADAPTATION D'UNE METHODOLOGIE DE MISE A JOUR AU MODELE CEQUEAU PAR L'UTILISATION DE DONNEES ACQUISES PAR TELEDETECTION

Nous abordons un chapitre important qui traite des possibilités de mise à jour d'un modèle hydrologique (modèle CEQUEAU) permettant de simuler la fonte nivale par l'entremise de données de superficie du couvert de neige. Ces données proviennent du traitement numérique des images satellites réalisées par l'intermédiaire du système SCANIQ.

5.1 Traitement des images satellites

Les données furent traitées sur SCANIQ (Système conjoint d'analyses numériques d'images de Québec). Ce système a fait l'objet d'une description plus détaillée à la section 3.4. Les prochaines sections montreront le cheminement suivi lors du traitement.

5.1.1 Caractéristiques des images satellites NOAA

Les images choisies proviennent du satellite NOAA-6. Cette plateforme est caractérisée par cinq capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

Les cinq bandes sont:

1. Visible : 0,6 - 0,7 μm
2. Infrarouge proche : 0,7 - 1,0 μm
3. Infrarouge moyen : 3,5 - 3,9 μm
4. Infrarouge thermique : 10,5 - 11,5 μm
5. Infrarouge thermique : 11,5 - 12,5 μm

Toutefois, le dernier capteur infrarouge thermique était hors d'usage lors du passage du satellite en 1981.

Les images retenues couvrent la zone comprise entre le 47ième et le 52ième parallèle de latitude nord. La région couverte par chacune des

images permet la couverture complète des zones d'intérêt, soit le moyen nord québécois (région du complexe NBR, lac Saint-Jean, etc...).

Sept dates furent retenues au départ, soient les 10, 12, 15, 16 et 21 avril 1981, et le 2 et 22 mai 1981. Toutefois, les images du 12, 15 et 16 avril 1981 ainsi que celle du 2 mai ont été mises de côté en raison de la piètre qualité de l'image (nébulosité trop prononcée).

Généralement, les quatre bandes NOAA sont superposables lors de l'édition mais des exceptions surviennent parfois. Dans un tel cas, une correction géométrique séparée est requise pour chaque série de bandes.

Les données parviennent sous la forme de ruban magnétique contenant les images numériques dont la densité d'informations est de 1600 bits¹ par pouce. Celle-ci doit être ramenée à 800 bpi² pour que la lecture soit possible sur SCANIQ. De même, l'information au niveau du pixel doit être ramenée de 10 (1024 niveaux de gris) à 8 bits (256 niveaux de gris). Cette diminution ne cause aucune détérioration de la qualité des données satellites, les bits retranchés ne présentant pas d'informations supplémentaires notables pour l'analyse numérique de l'image.

Un rappel sommaire est de rigueur (référence au chapitre 2) pour la détermination de l'utilité des diverses bandes:

Bande 1: (0,6 - 0,7 μm). Elle est jugée optimale pour la détection de l'étendue maximale du couvert nival, mais les radiances de ce dernier sont souvent à saturation;

Bande 2: (0,7 - 1,0 μm). Elle est judicieuse pour la détermination des zones de fonte et de murissement du couvert nival.

¹ bit: pour Binary digITs (unité binaire).

² bpi: pour bit per inch (bit par pouce).

Dans cette bande, l'eau possède la caractéristique d'absorber une grande partie du rayonnement infrarouge;

Bande 3: (3,4 - 3,9 μm). Elle est intéressante pour la ségrégation de la neige et des nuages mais moins efficace que dans la fenêtre 1,5 - 1,7 μm ;

Bande 4: (10,5 - 11,5 μm). Elle peut aider à discerner la neige des nuages sur la base de leur différence de température.

Les quatre bandes peuvent être utilisées selon deux combinaisons lors du traitement numérique. La première combinaison est caractérisée par les bandes 1, 2, et 3 tandis que l'autre est formée des bandes 1, 2 et 4. Notre choix s'est porté sur la deuxième combinaison à cause d'un meilleur contraste du couvert nival dans la bande 4.

5.1.2 Procédures de traitement des images satellites

Il ne sera fait mention que des généralités du traitement des images NOAA dans la présente étude¹. La discussion ne portera pas sur la configuration des divers programmes et algorithmes utilisés. Le but premier de cette section concerne la démarche employée pour l'obtention des résultats finaux.

5.1.2.1 Corrections atmosphériques et radiométriques

Le traitement des images numériques doit être précédé de certaines mesures particulières permettant leurs utilisations au niveau des traitements subséquents.

¹ Des informations plus détaillées peuvent être obtenues dans le manuel d'utilisations de SCANIQ et dans la thèse de maîtrise de BÉNIÉ GOZE BERTIN.

Une première opération consiste à l'enlèvement des distorsions causées par la courbure terrestre. Cette correction géométrique est absolument nécessaire pour l'imagerie NOAA qui est caractérisée par une distorsion radiale prononcée. Un programme permet l'utilisation de repères aisément identifiables tant sur la carte topographique que sur l'image (lac, rivière, etc...). L'ajustement de l'image satellite par rapport à la carte topographique¹ est réalisé par l'emploi d'un polynôme du deuxième degré. L'erreur résiduelle au niveau des points de repère doit être inférieure à un kilomètre pour que la correction soit acceptable. Seize à vingt points de repère furent choisis pour la présente étude et l'erreur résiduelle s'est avérée inférieure à 0,9 kilomètre pour toutes les corrections.

Certains problèmes ont surgi relativement à la source même des images. Le système d'analyse numérique SCANIQ fut conçu originellement pour traiter l'imagerie Landsat caractérisée par une résolution élevée et des pixels de petites dimensions. Cette difficulté fut contournée par une réduction temporaire de l'échelle des images NOAA et par une modification de l'échelle de la grille UTM.

La zone corrigée sur l'image satellite possède une superficie nettement plus grande que le bassin étudié. Cette zone s'étend entre le 47ième et le 52ième parallèle de latitude nord et entre le 72ième et le 79ième méridien de longitude ouest (figure 4.1). Cette zone incorpore tout le bassin de la rivière Nottaway et une grande partie du moyen nord québécois.

Certains autres types de corrections peuvent s'avérer nécessaires. Les corrections radiométriques et atmosphériques sont de ce lot, mais elles n'ont pu être appliquées en raison de limitations dues au temps disponible

¹ La carte topographique utilisée doit être une projection UTM (Universal Transverse Mercator). Dans le cas présent, la carte possède une échelle de 1:250000.

et au système d'analyse numérique¹. Une correction atmosphérique aurait peut-être rendu possible l'utilisation des images du 12, 15 et 16 avril 1981 où un mince voile de nuages couvrait la zone à l'étude.

Un ajustement des radiances propres aux quatre bandes de chaque image a permis le visionnement superposé par l'application d'un même poids à chacune des bandes.

5.1.2.2 Elimination des nuages

L'élimination des nuages peut être réalisée sur une image partiellement couverte. Toutefois, les portions de sol cachées par ces nuages sont généralement perdues lors du traitement. Cette procédure ne peut être appliquée lorsque le couvert nuageux est complet ou très important, les senseurs visibles et infrarouges ne pouvant percer les nuages pour l'observation du sol sous-jacent. Toutefois, l'observation même partielle, peut fournir des indices judicieux sur le comportement hydrologique ou autre.

La méthode consiste dans la séparation de la neige et des nuages selon leurs radiances propres. Les bandes 3 (3,4-3,9 μ m) et 4 (10,5-11,5 μ m) peuvent être utiles à cette fin dépendamment du type de nuages observé. Les nuages possèdent généralement des radiances plus élevées que la plupart des autres éléments au sol dans la bande 3. Mais certaines exceptions peuvent surgir où les formations nuageuses ne peuvent être différenciées du couvert nival. La bande 4 (infrarouge thermique) peut parfois trancher un tel problème.

Cette bande permet l'observation des températures apparentes. Les nuages peuvent être plus "chaud" ou bien plus "froid" que le couvert nival,

¹ SCANIQ n'est pas conçu pour la réalisation de corrections atmosphériques pour l'imagerie NOAA, TYROS ou GOES.

permettant ainsi la ségrégation des deux phénomènes. Un objet "chaud" se caractérise par une teinte plus claire. Dans le cas des deux bandes, la génération d'un seuil de radiance peut être réalisée entre le couvert nival et le couvert nuageux. L'élimination du couvert nuageux consiste alors dans la réalisation d'un masque de la zone nuageuse. Une valeur "0" est accordée aux radiances correspondant aux nuages. Lors de la division de l'image par ce masque, une nouvelle image est créée laissant apparaître des zones sombres aux endroits où les nuages étaient présents. Cette procédure facilite l'observation du manteau nival.

L'image du 10 avril 1981 est un exemple de couvert nival partiellement caché par la présence de nuages au sud-ouest et au nord-ouest du bassin de la rivière Nottaway (photo 1). La ségrégation du couvert nival et des nuages n'est cependant pas parfaite, exception faite de nuages aux contours bien découpés. La photo 4 laisse apparaître cette zone translucide bordant les masses nuageuses. Ce cas est typique de la similarité des radiances de la neige et des nuages dans la plupart des bandes. Les masses principales sont facilement éliminées, mais les bordures de nuages minces et dispersés constituent un problème insurmontable pour le type de capteurs utilisés. La création d'un masque permettant l'enlèvement de cette zone de transition devient discutable puisqu'il tend également à éliminer des zones à couvert neigeux observable.

5.1.2.3 Discrimination du couvert nival

Plusieurs méthodes furent envisagées pour la détermination du couvert nival (masque, seuil de radiance, etc...), mais le choix final s'est porté sur une méthode originale basée sur les images diachroniques¹. Cette méthode prend son point d'appui sur une procédure mise au point par Tarpley et Schneider (1980).

¹ Elle consiste en la soustraction d'images de dates différentes.



Photo 1. Image multibande originale du 10 avril 1981, après correction géométrique (bande 1: 0,6 - 0,7 μm , bande 2: 0,7 - 1,0 μm , bande 4: 10,5 - 11,5 μm).

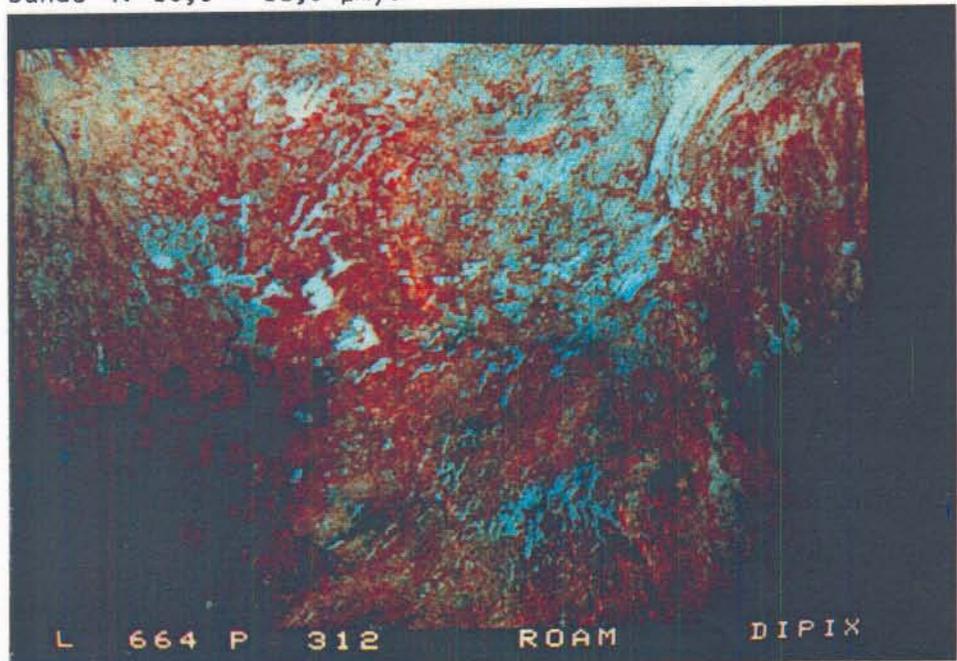


Photo 2. Image multibande originale du 21 avril 1981, après correction géométrique (bande 1: 0,6 - 0,7 μm , bande 2: 0,7 - 1,0 μm , bande 4: 10,5 - 11,5 μm).

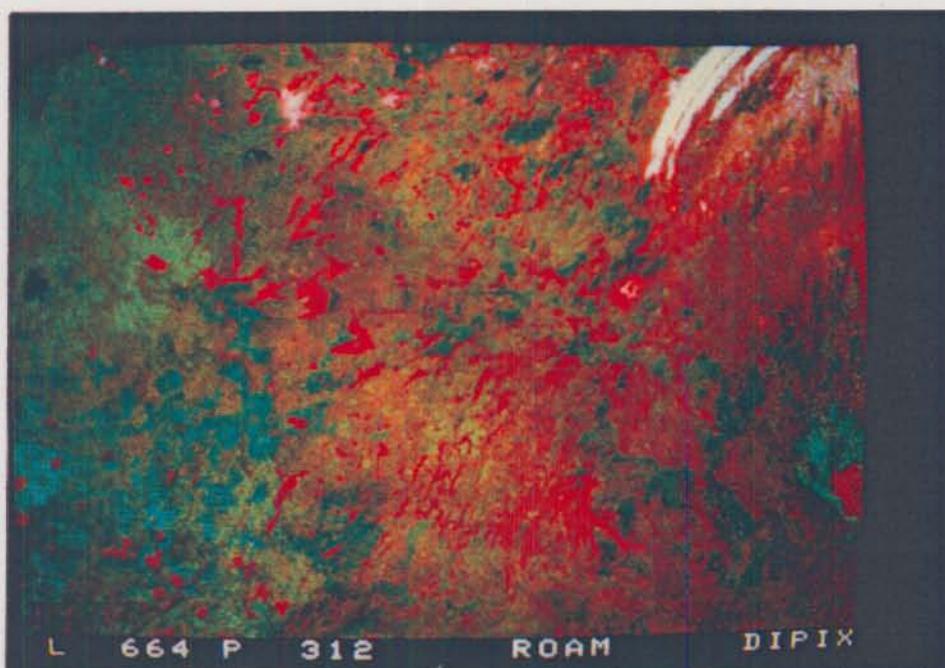


Photo 3. Image multibande originale du 22 mai 1981, après correction géométrique (image de référence) (bandes 1, 2 et 4).

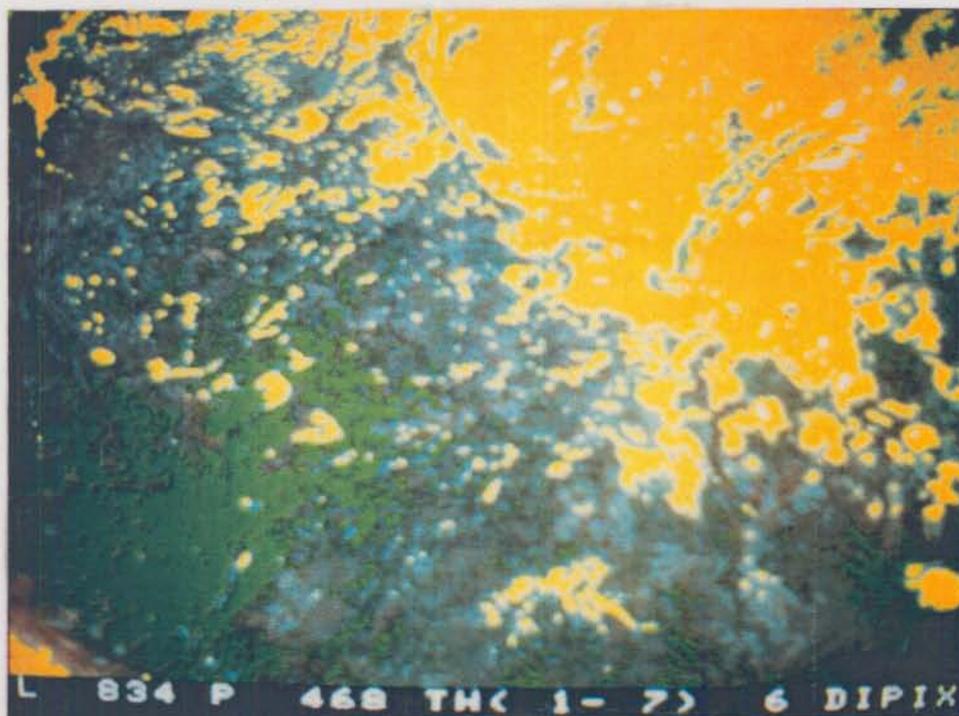


Photo 4. Image multibande du 10 avril 1981, après l'application d'un masque voilant les formations nuageuses principales (jaune) et d'un autre caractérisant le sol nu (bandes 1, 2 et 4).

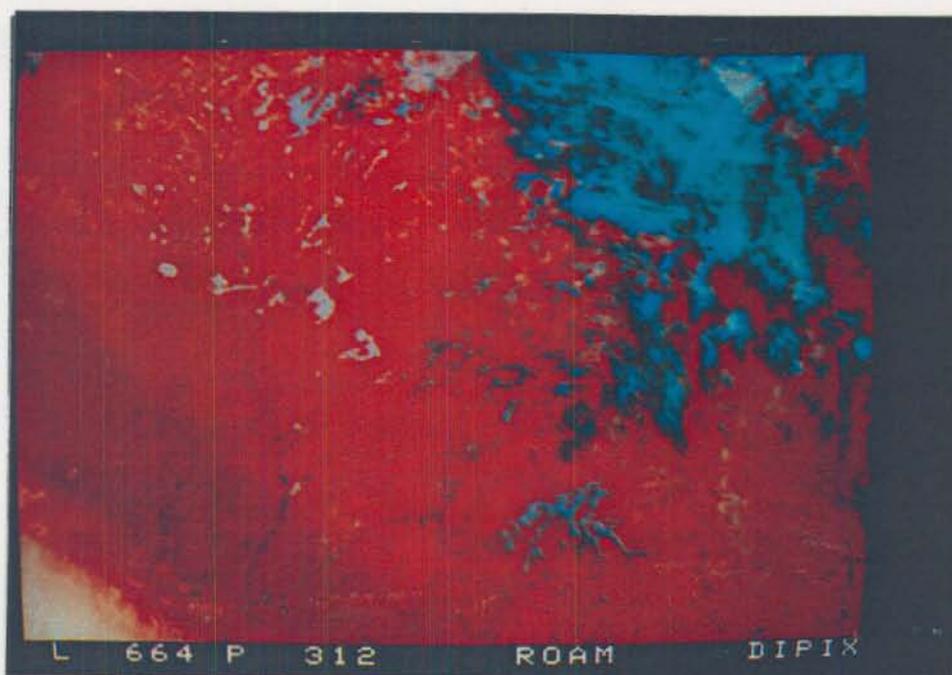


Photo 5. Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image multibande du 10 avril 1981 de celle du 22 mai 1981 (bandes 1, 2 et 4).

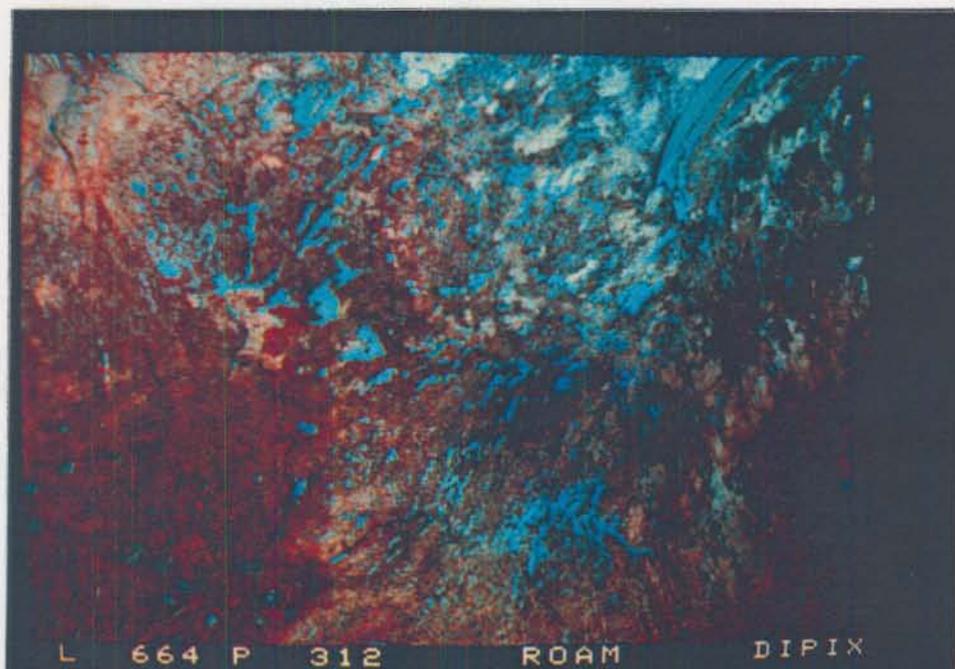


Photo 6. Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image multibande du 21 avril 1981 de celle du 22 mai 1981 (bandes 1, 2 et 4).

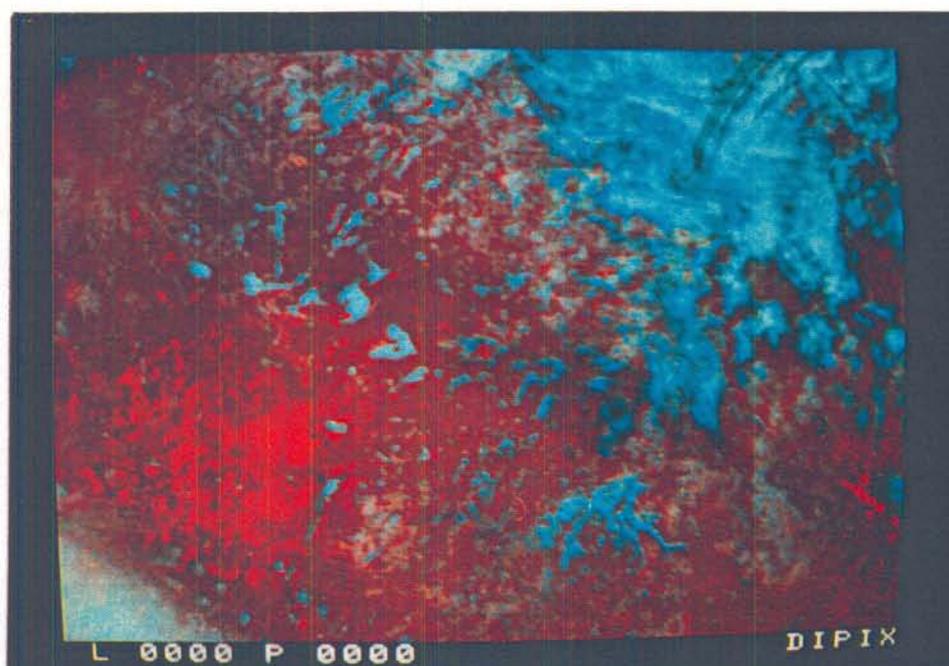


Photo 7. Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image du 10 avril 1981 de celle du 22 mai 1981, combinée à un masque des surfaces sans neige (rouge) (bandes 1, 2 et 4).

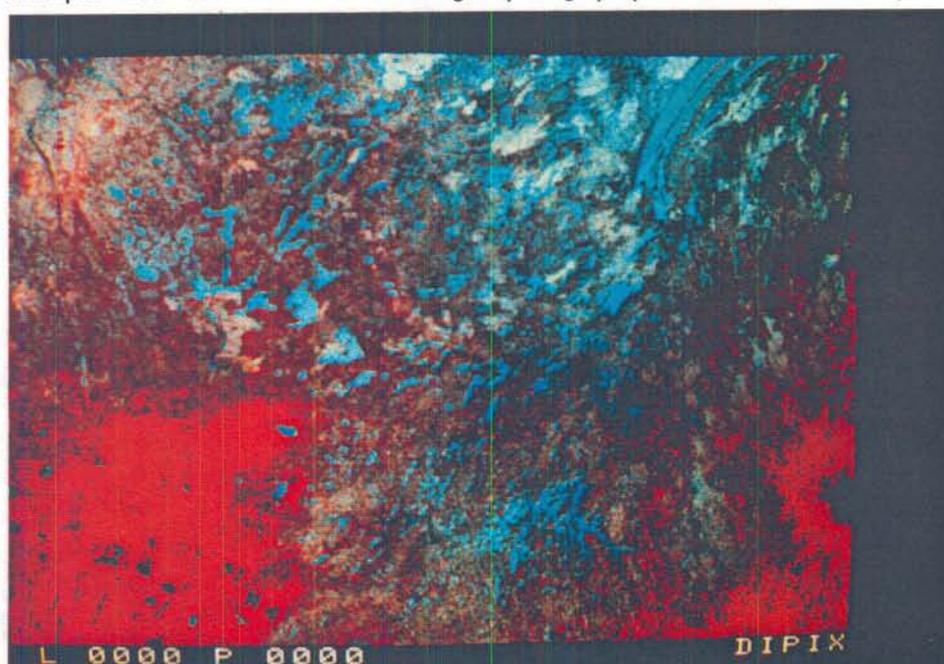


Photo 8. Image différentielle obtenue par la soustraction numérique de l'image du 21 avril 1981 de celle du 22 mai 1981, combinée à un masque des surfaces sans neige (rouge) (bandes 1, 2 et 4).



Photo 9. Image différentielle du 21 avril 1981 et du 22 mai 1981, complétée du masque des contours du bassin versant de la rivière Nottaway (bandes 1, 2 et 4).

Cette méthode nécessite une image sans neige en plus de l'image avec neige faisant l'objet de l'analyse. L'application de la technique implique qu'aucun changement de la qualité radiométrique de l'image n'ait eut lieu entre les deux dates. Cet aspect est d'une importance capitale au niveau de l'interprétation subséquente. De plus, les caractéristiques du couvert végétal ne doivent pas varier entre les deux dates. Les périodes les plus appropriées pour le choix de l'image de référence doivent donc se situer en dehors de la saison de croissance où la végétation est la moins active. L'automne et le printemps après le départ du couvert nival constituent des périodes favorables pour le choix de l'image de référence. La stabilité relative des conditions radiométriques de l'image et des réponses spectrales du couvert végétal entre les deux dates permet de poser l'hypothèse que tout changement de radiance pendant cet intervalle de temps peut être relié à la présence de neige.

La technique consiste en une soustraction numérique des deux images, soient l'image de référence et l'image à l'étude. L'expression mathématique s'exprime de la façon suivante:

$$L_d = L - L_r \quad (1)$$

où

- L : radiance de l'image à l'étude;
- L_r : radiance de l'image de référence;
- L_d : radiance différentielle.

Cette équation peut être séparée selon diverses composantes de réflectance:

$$L_d = (AR + B) - (A_r R_r + B_r) \quad (2)$$

où

- R et R_r : réflectances du sol;

A , B , A_r et B_r : paramètres tenant compte de l'illumination et de l'atmosphère.

Or, si les variations spatiales du paramètre A ne sont pas trop grandes, ce qui est généralement le cas lorsque le temps est clair, l'équation (2) peut être simplifiée:

$$L_d = A_m (R - R_r) + (B - B_r) \quad (3)$$

où

A_m : valeur moyenne de A et A_r .

L'effet relié à l'atmosphère est généralement très faible et peut être estimé égal à zéro lorsque les conditions sont idéales. Une radiance de 128 devrait normalement résulter lorsqu'il y a absence de neige sur l'image à l'étude. Cette valeur provient de l'équation suivante:

$$\frac{(I - I_r) + 256}{2} = I_d$$

où

I : image à l'étude;

I_r : image de référence;

I_d : image différentielle.

Ainsi, lorsqu'il n'y a aucune différence de radiance entre les deux images, l'image différentielle prend la valeur 128. La constante "256" (correspondant aux 256 niveaux de gris) permet d'éliminer les nombres négatifs pouvant résulter d'une soustraction numérique. Dans le cas d'images égales en qualité, la constante pourrait être négligée. Une radiance différentielle

supérieure à 128 est un indice de la présence de couvert nival. Toutefois, une radiance de 130 est plus représentative des conditions véritables puisqu'il existe un certain bruit. Ce dernier peut être estimé à plus ou moins deux unités de radiance. Le couvert nival est déterminé ultérieurement par l'application d'un seuil de radiance sur l'image différentielle.

L'image du 22 mai 1981 a été choisie pour représenter l'image de référence au niveau de notre recherche (photo 3). Cette image est de très bonne qualité et seule la partie nord-est est encore couverte d'un manteau nival de faible épaisseur. Cette présence nivale est de peu d'intérêt puisque le bassin versant est complètement libre de neige à l'exception de rares lacs qui ne sont pas complètement dégelés. Les conditions de végétation s'apparentent de près aux conditions existantes en avril puisque la saison de croissance à ces latitudes débute à la fin mai.

Deux images ont été traitées selon la méthode de discrimination nivale choisie. La première, soit celle du 10 avril 1981, montre un couvert nuageux sur le sud-ouest et le nord-est du bassin. Cette présence nuageuse introduit une certaine erreur au niveau de la limite nivale (photo 1). Les photos 5 et 7 représentent l'image obtenue après l'élimination de la plus grande partie des nuages, selon la technique du masque et de la soustraction diachronique. Les zones sans neige sont caractérisées par la couleur rouge sur la photo 7. La photo 5 représente la même image sans cette couleur. Le couvert nival occupe la partie nord-est du bassin et seule une zone située au sud-ouest du bassin est libre de neige à cette date.

L'image du 21 avril 1981 s'avère de meilleure qualité. Aucun nuage ne cache la région d'intérêt (photo 2). Les photos 6, 8 et 9 représentent l'image résultante de l'application des techniques décrites précédemment. Or, dans le but de mieux faire ressortir la limite nivale, une coloration rouge a été appliquée aux zones sans neige (photo 8). Cette couleur accentue l'effet séparateur mieux que toute autre teinte. Dans le cas de la photo 9, un masque des contours du bassin versant de la rivière

Nottaway a été appliqué à l'image de base. Il permet de définir la distribution spatiale du couvert nival sur le bassin versant seul. L'application du masque des contours du bassin versant peut devenir intéressante lorsque la zone d'intérêt ne concerne que le bassin versant.

Le couvert nival du 21 avril s'avère un peu moins étendu que celui du 10 avril 1981, mais la présence de nuages sur cette dernière image complique l'analyse. Le recul peu marqué de la limite nivale implique un ralentissement du processus de fonte combiné à l'arrivée de précipitations solides pendant la période séparant les deux dates. Cette explication est confirmée par les données météorologiques qui indiquent la présence d'une vague de froid pendant cet intervalle. L'image du 21 avril fut choisie pour la suite des opérations.

5.1.3 Analyse combinatoire entre l'image et les données au sol

Cette analyse est une étape importante pour l'application de la technique de soustraction diachronique. Elle permet la vérification de la méthode mise au point.

L'analyse fut complexe à réaliser. Elle nécessite l'emploi de données au sol, en l'occurrence, des données de lignes de neige. Les rares dates, où un échantillonnage au sol fut effectué, se situaient aux environs du 14 et du 27 avril 1981. Nos images sont datées du 10 et du 21 avril. Dans le cas du 21 avril, les dates d'échantillonnage au sol sont trop éloignées pour permettre leur utilisation à des fins comparatives. Une interpolation était également impossible puisque le couvert nival disparaît complètement entre le 14 et le 27 avril à la plupart des stations nivométriques. L'analyse peut être appliquée à l'image du 10 avril puisque quelques jours seulement (1 à 4) séparent l'image de la période d'échantillonnage. Toutefois, les résultats sont peu significatifs puisque les nuages couvrent la majorité des stations. Les quelques stations observables sont généralement concordantes avec l'image satellite (tableau 5.1).

TABLEAU 5.1. DONNEES NIVOMETRIQUES UTILISEES POUR LA SIMULATION ET RESULTATS DES COMPARAISONS ENTRE CELLES-CI ET L'IMAGE DU 10 AVRIL 1981.

No	Nom de la station	Numéro de la station	Coordonnées		Date d'échantillonnage des données nivométriques	Equivalent en eau (lignes de neige)	Image du 10 avril 1981	Concordance entre l'image et les données au sol
			Latitude	Longitude				
1	Barrage-A	0501065	47° 35'	74° 09'	11-4	11,4	● ²	* ⁵
2	Barrage-B	0501070	47° 38'	74° 00'	12-4	0	○ ³	*
3	Barrage Cabonga	0408055	47° 19'	76° 28'	13-4	0	○	*
4	Barrage des Quinze	0430025	47° 34'	79° 15'	13-4	0	N ⁴	
5	Barrage Dozois	0430026	47° 38'	77° 17'	14-4	1,0	N	
6	Barrage Gouin	0501080	48° 21'	74° 04'	13-4	0	●	
7	Barrage Victoria ¹	0430035	47° 51'	77° 22'	14-4	5,3	N	
8	Chemin Lac Cooper ¹	0501120	48° 50'	74° 10'	13-4	0	○	*
9	Chemin Rapide Sept	0430037	47° 48'	78° 18'	14-4	4,8	N	
10	Chibougamau-A ¹	0807125	49° 46'	74° 32'	15-4	18,0	●	*
11	Clova ¹	0501100	48° 07'	75° 22'	13-4	5,6	●	*
12	Dorval Lodge	0430020	47° 26'	77° 03'	13-4	0	N	
13	Eastmain ¹	0906010	52° 14'	78° 31'	13-4	15,8	●	*
14	Lac Heva ¹	0801002	48° 11'	78° 20'	13-4	0	N	
15	La Tuque	0501030	47° 27'	72° 49'	13-4	0	○	*
	Matagami-A ¹	0807100	49° 46'	77° 48'	15-4	6,7		
	Val D'or-A ¹	0801005	48° 03'	77° 47'	15-4	7,6		

¹ Stations nivométriques utilisées pour les simulations hydrologiques.

² Présence de neige au sol (sur l'image).

³ Absence de neige au sol (sur l'image).

⁴ Présence de nuages.

⁵ Concordance entre les données au sol et l'image du 10 avril 1981.

La méthode d'analyse combinatoire est une mesure de l'accord entre les données au sol et l'image. Les résultats de l'analyse au niveau de l'image du 10 avril indiquent que certains pixels concordent avec l'hypothèse avancée, mais que d'autres ne s'y conforment pas du tout. La nébulosité semble toutefois être la cause première de cette non-conformité. De plus, 50% des stations nivométriques se situent sous le couvert nuageux.

Une deuxième approche fut employée pour l'application de l'analyse combinatoire. Sa valeur statistique peut s'avérer de moins bonne qualité. Elle utilise les données de hauteur de neige recueillies aux stations météorologiques. Il est évident qu'une donnée basée sur une moyenne de dix prélèvements (ligne de neige) est supérieure à une donnée unique d'épaisseur nivale. Toutefois, la précision peut s'avérer secondaire si seulement la connaissance de la présence ou de l'absence de couvert nival est requise. La valeur d'un tel type de donnée est accrue par sa disponibilité journalière, ce qui implique la présence de données au sol pour la comparaison avec les images du 10 et 21 avril. La comparaison entre les données au sol et les images satellites se base sur une moyenne des neuf pixels les plus proches du pixel d'intérêt afin d'éliminer certaines erreurs de localisation. Toutefois, les valeurs moyennes observées sont très semblables à celui du pixel désigné.

L'image du 21 avril 1981 (photo 8) affiche une bonne concordance par rapport aux relevés de terrain (tableau 5.2). Plus de vingt-cinq stations confirment la présence ou l'absence de neige. Ces dernières représentent plus de 86% de l'échantillon, les six cas de transition ne sont pas considérés puisqu'il est impossible de déterminer s'il y a présence ou absence significative du couvert nival. Quatre stations dérogent à la règle, trois cas de non concordance sont reliés à une correction géométrique déficiente sur les bordures de l'image, l'autre cas s'explique par la présence de nuages au-dessus de la zone d'intérêt. Ces derniers accroissent la radiance du pixel. L'image du 10 avril 1981 semble moins concluante à première vue puisque seuls douze cas sont concordants en excluant les quatre cas transitoires. Toutefois, les dix-huit autres cas sont aisément explicables

TABLEAU 5.2. RESULTATS DE L'ANALYSE COMBINATOIRE ENTRE LES DONNEES AU SOL ET L'IMAGERIE SATELLITE.

No	Nom de la station climatologique	10 avril 1981						21 avril 1981					
		Coordonnées UTM		Radiances Bande 1 0,6 - 0,7 μm	Epaisseur nivale cm	Concordance ¹		Raisons de la non concordance	Radiances Bande 1 0,6 - 0,7 μm	Epaisseur nivale cm	Concordance		Raisons de la non concordance
		Longitude	Latitude			oui	non				oui	non	
1	Joute1	260750	5484130	128	25	*	*	correction géométrique	130	24	*	*	correction géométrique
2	Brouillan	215750	5523500	140	T ³	*	*	TR	131	T	*	*	TR
3	Lac Berry	255250	5412000	130	T	*	*	TR	127	T	*	*	TR
4	Amos	268130	5384880	129	0	*	*		126	T	*	*	TR
5	Manneville	243130	5383130	131	0	*	*	nuages	127	0	*	*	
6	Taschereau	227750	5396880	128	0	*	*		128	0	*	*	
7	La Sarre	199250	5419250	132	0	*	*	nuages	130	0	*	*	
8	Pouliaries	205500	5392250	133	0	*	*	nuages	125	0	*	*	
9	Mont Brun	223750	5369250	132	0	*	*	nuages	128	0	*	*	
10	Cadillac	248500	5345630	132	0	*	*	nuages	128	0	*	*	
11	Desmaraisville	415380	5485000	129	0	*	*		131	T	*	*	TR
12	Lebel sur Quév.	356250	5432750	132	T	*	*	TR	129	T	*	*	TR
13	Lac Morandière	304750	5384250	128	0	*	*		128	0	*	*	
14	Senneterre	330500	5359000	129	0	*	*		129	0	*	*	
15	Louvicourt	322250	5326250	130	0	*	*		129	0	*	*	
16	Val d'Or	292750	5325500	132	0	*	*	nuages	127	T	*	*	TR
17	Chibougamau	542500	5517750	150	21	*	*		143	15	*	*	
18	Chapais-2	510000	5513000	134	20	*	*		136	14	*	*	
19	Aigremont	583250	5460750	159	7	*	*		130	0	*	*	
20	Hemon	675250	5437250	149	0	*	*	nuages	128	0	*	*	
21	Albanel	688750	5417500	138	0	*	*	nuages	129	0	*	*	
22	Normandin	681000	5413250	132	0	*	*	nuages	127	0	*	*	
23	Lac Doré	667750	5403600	130	0	*	*		126	0	*	*	
24	Saint-Prime	691750	5385750	133	0	*	*	correction géométrique	136	0	*	*	correction géométrique
25	Roberval-A	702000	5377000	133		*	*		136	0	*	*	correction géométrique
26	Lac Bouchette	707750	5349250	133	8	*	*		128	0	*	*	
27	Remigny	185750	5302250	162	0	*	*	nuages	126	0	*	*	
28	Bar. des Quinze	181750	5274750	159	0	*	*	nuages	127	0	*	*	
29	Latulipe	197250	5261000	160	0	*	*	nuages	127	0	*	*	
30	Belleterre	221000	5255250	154	0	*	*	nuages	126	0	*	*	
31	Gr. L. Victoria	324500	5299500	132	0	*	*	nuages	127	0	*	*	
32	Lac Chateaufort	582250	5290750	134	8	*	*		128	0	*	*	
33	La Tuque	669750	5257250	135	0	*	*	nuages	131	0	*	*	nuages
34	Saint-Gilles	642000	5430000	133	0	*	*	nuages	130	0	*	*	
35	Matagami-A	305000	552000	133	T	*	*	TR	134	4	*	*	
						16	18	-16: nuages - 2: corrections géométriques - 4: transitions ²			31	4	- 3: corrections géométriques - 1: nuages 6: transitions ²

¹ Le seuil de concordance s'établit à 130, ce qui indique que le sol nu possède une radiance \leq 130.

² Ce sont des cas transitoires où les traces de neige ne permettent pas de déterminer s'il y a présence ou absence de neige sur le pixel.

³ T: Trace de neige au sol, non mesurable.

par la présence de nuages (16 cas) et d'une correction géométrique déficiente sur les bords de l'image (2 cas). Cette analyse montre que les résultats sont bons dans le cas de pixels où il n'y a pas de nuages et donc pour ceux où le choix était clair: neige ou sans neige. Une telle remarque implique que l'utilisation d'une classification automatisée du couvert nival va augmenter le nombre de pixels considérés avec neige, si l'influence des nuages n'a pas été minimisée ou éliminée auparavant. Une étude plus approfondie de ces exceptions a permis de relever cinq sources d'erreurs potentielles limitant l'application de l'analyse combinatoire:

- 1: corrections géométriques défailantes près de la bordure de l'image. Ce phénomène est causé par l'absence de repères pour la correction. Des erreurs atteignant 10 kilomètres sont alors possibles;
- 2: présence de nuages causant l'accroissement des valeurs de radiance au niveau du pixel ou empêchant l'observation du couvert nival;
- 3: présence de surfaces d'eau gelée à radiance élevée à proximité des stations météorologiques ou nivométriques;
- 4: faible précision des coordonnées de localisation des stations au sol. Un tel facteur peut introduire des erreurs de localisation de l'ordre de 2 à 3 kilomètres;
- 5: faible résolution de l'imagerie NOAA. La distribution du couvert nival peut être telle qu'il existe sur le pixel tout en étant disparu à la station météorologique ou nivométrique. La radiance du pixel indiquera une présence nivale.

La méthode utilisée sur l'image du 21 avril a également été appliquée à l'image du 10 avril, mais sans plus de succès qu'avec l'utilisation

des données de lignes de neige. Cependant, les données de hauteur de neige ont un certain avantage sur les données de lignes de neige puisqu'elles sont disponibles sur une base journalière continue, contrairement à des fréquences mensuelles ou bimensuelles pour les lignes de neige. Une analyse plus détaillée de chacun des pixels a montré que les erreurs du type 1, 2 et 3 étaient à l'origine de la non-concordance.

En résumé, il semble que l'analyse combinatoire entre l'image et les données au sol confirme l'applicabilité de la technique d'images diachroniques. Toutefois, le résultat est directement lié à la qualité de l'image et à son degré de couverture nuageuse.

5.1.4 Analyse statistique entre l'image et les données au sol

Une analyse statistique a été réalisée entre la valeur de radiance de la neige et l'équivalent-eau du couvert nival. Les résultats ne sont guère concluants, les données au sol étant trop rares. Un résultat positif se serait avéré une surprise puisque la plupart des auteurs réfutent la possibilité d'une relation équivalent-eau/radiance ou épaisseur nivale/radiance qui soit applicable aux couverts nivals d'épaisseur moyenne à grande (> 10 cm de neige ou > 1 cm d'équivalent-eau). L'analyse était risquée au départ à cause des facteurs suivants:

1. couvert végétal continu de faible densité;
2. diminution de la densité de végétation vers le nord;
3. faible résolution du satellite NOAA (1 km);
4. intégration de plusieurs éléments spécifiques au niveau du même pixel.

La détermination de la zone de murissement pourrait s'avérer un axe de recherche intéressant, mais un tel genre d'analyse nécessiterait la mise sur pied d'un réseau de données témoins au sol.

5.1.5 Application au bassin de la rivière Nottaway

En hydrologie, l'intérêt se porte au niveau d'un bassin ou d'un ensemble de bassins de drainage. La localisation de la zone d'intérêt devient alors déterminante avant la réalisation d'une quelconque correction à partir de la méthode diachronique.

Le bassin de la rivière Nottaway représente le cadre de l'étude, mais celui-ci est de nature très problématique. Deux problèmes majeurs ont surgi lors de l'analyse; la taille du bassin qui est pour le moins énorme (65 000 km²) et sa localisation. Jusqu'à maintenant, peu de bassins possédant cette envergure ont été traités dans la littérature. La plupart des auteurs se confinant à des analyses sur des bassins témoins de petite taille. Il aurait été sage d'en faire autant, mais ce choix nous a permis de vérifier la possibilité de traiter de grands bassins comme il s'en trouve beaucoup au Québec et au Canada.

5.1.5.1 Fuseaux UTM

Les fuseaux UTM ont constitué une entrave majeure au traitement numérique des images. La presque totalité des opérations ont été marquées par ce problème. Il faut mentionner que plus de 90% de la superficie du bassin de la rivière Nottaway se situe dans le fuseau UTM numéro 18. Ce dernier est localisé entre le 72ième et le 78ième méridien de longitude ouest (figure 5.1). Les 10% restant, représentés par la pointe nord-ouest, se situent dans le fuseau UTM numéro 17. Bien que ne représentant qu'une faible partie du bassin, cela introduit une distorsion non négligeable puisque la projection UTM 17 diffère de celle du numéro 18. Une interpolation du fuseau UTM numéro 18 vers l'ouest fut réalisée sur la partie du bassin située sur l'autre fuseau afin de contourner le problème. Cette interpolation implique toutefois une certaine erreur entre la carte topographique et la surface réelle. La figure 5.2 représente l'erreur résultant de l'interpolation. Une erreur de 0,5 km au niveau de la longitude fut détectée après calculs. Cette valeur demeure inférieure à 1 km, ce qui

Figure 5.1 : Représentation du territoire couvert par l'analyse des images numériques .

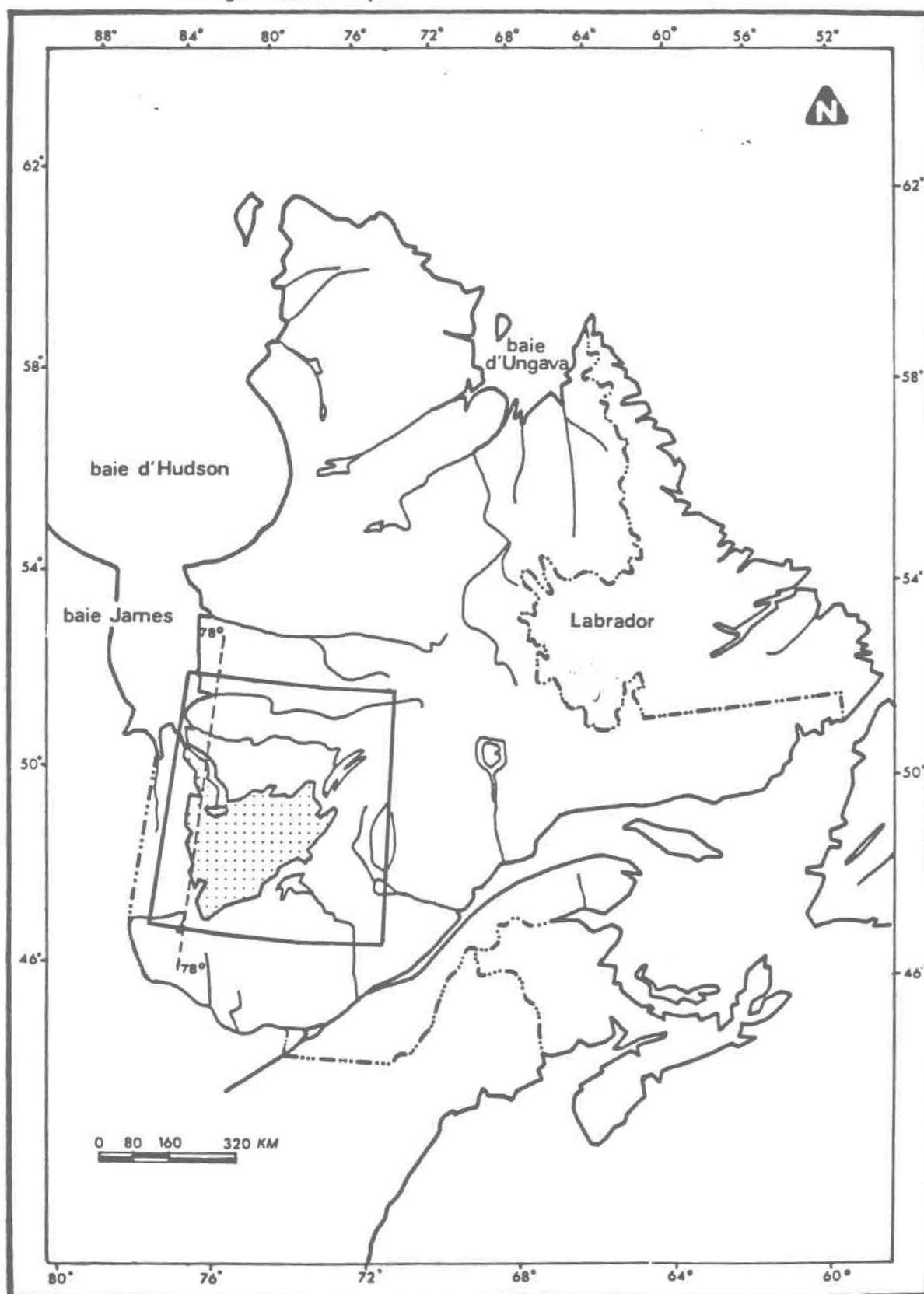
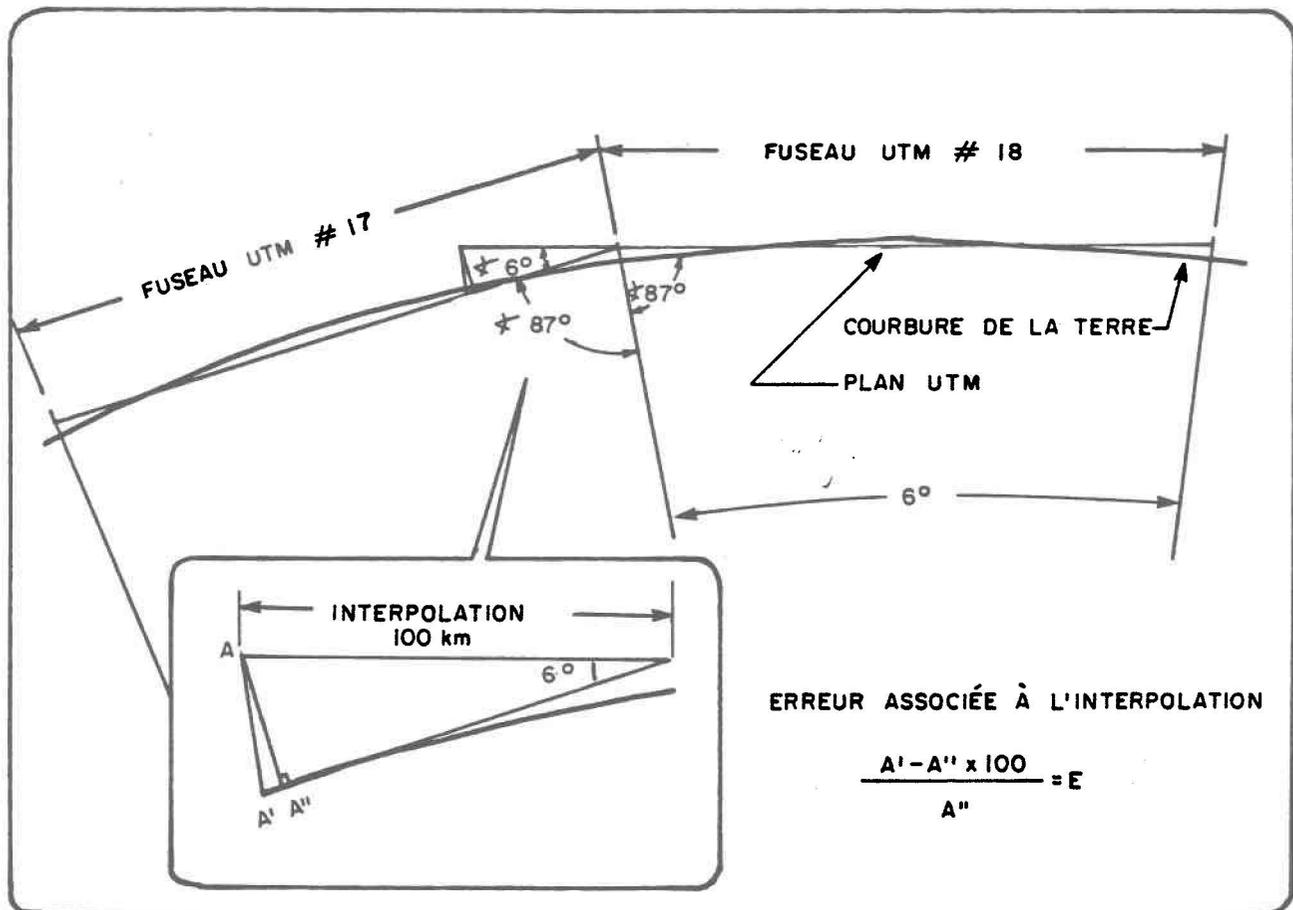


Figure 5.2 . Représentation de l'erreur associée à l'interpolation de la grille UTM du fuseau 18 sur le fuseau 17



est admissible (section 5.1.2.1). Par ailleurs, cette méthode semble fondée puisque l'Alcan a procédé de façon semblable pour le bassin du lac Saint-Jean¹.

5.1.5.2 Numérisation des limites du bassin

La création du masque des contours du bassin fut réalisée au moyen d'une série de cartes topographiques au 1:250 000 et d'une table à numériser de type GRADICON² utilisant un crayon optique et un lecteur magnétique de coordonnées.

La création d'une carte des contours est réalisée par un enregistrement en continu des coordonnées UTM des limites du bassin à partir de la carte topographique. Le bassin entier fut numérisé en plusieurs étapes en raison de la taille importante de ce dernier. Chaque portion du bassin a été disséquée en polygones d'une trentaine de kilomètres de côté pour les besoins de l'opération. Ces polygones ont été rassemblés ultérieurement lors du traitement informatique afin de recréer chacune des huit portions du bassin³. Les portions ont ensuite été rassemblées au niveau du système SCANIQ, selon une procédure d'addition, afin de recréer l'image entière du bassin. L'image résultante se présente sous la forme d'un masque binaire ("0" pour l'extérieur du bassin et "1" pour l'intérieur) (photo 10).

¹ Le réseau UTM coupe le bassin de drainage du lac Saint-Jean en deux portions distinctes.

Communication personnelle, M. Deslauriers, ingénieur, Alcan.

² Gracieusement mise à notre disposition par le ministère québécois de l'Energie et des Ressources.

³ Le bassin a dû être numérisé en huit parties distinctes en raison du nombre de cartes topographiques.

5.1.5.3 Superposition aux images

La création d'une image comportant le contour du bassin s'effectue par le rapport de l'image originale et du masque des contours. Les zones extérieures au bassin sont caractérisées de la radiance "0", tandis que la zone interne prend une radiance pouvant s'échelonner de 5 à 250 dépendamment des radiances composant l'image originale. Une grille UTM créée lors de la correction géométrique peut être appliquée ultérieurement comme système de référence. Dans le cas présent, un treillis à mailles carrées de 10 km de côté est de rigueur.

5.1.6 Données résultantes

L'extraction des résultats peut être réalisée après le traitement informatique de l'image (corrections, masques, grilles, discrimination neige - non neige, classification). Ceux-ci sont alors prêts pour l'étape suivante qui consiste en la simulation hydrologique. Les données de superficie nivale ont été extraites de la classification du couvert nival du 21 avril 1981 (photo 9). La classe 1 est constituée par les zones sans couvert nival, tandis que la classe 2 est constituée des zones recouvertes de neige. Les données sont présentées sous la forme de carreaux de 10 km de côté. Chaque carreau contient l'équivalent de cent pixels. Le sol nu et le couvert nival sont exprimés en pourcentage de superficie couverte à l'intérieur de chaque carreau. Ces résultats sont imprimés pour chacun des carreaux entiers sous la forme d'un petit tableau. La figure 5.3 représente la répartition des pourcentages de superficie nivale associés à chacun des carreaux, après la compilation de tous les tableaux (il y a autant de tableaux que de carreaux). Cette figure fut construite à partir des résultats imprimés pour chaque unité de cent pixels.

La transcription des tableaux (1490 au total) pour le LCT-11 du système SCANIQ, requiert énormément de temps et de papier. Ce format nécessite également une compilation manuelle ultérieure, elle-même de longue haleine. Cette situation peu pratique implique la nécessité de développer

ou d'incorporer un appareil ou un programme permettant la création de tableaux ou de matrices binaires¹ directement utilisables. Ce facteur est déterminant pour l'usage opérationnel. Il permettrait de diminuer le temps d'obtention des données et le temps de traitement de ces derniers.

Les valeurs de superficie nivale ont été calculées pour représenter le bassin versant ainsi que la région avoisinante. Les résultats auraient pu être déterminés uniquement pour la zone couvrant le bassin versant de la rivière Nottaway en employant un masque des contours du bassin lors du traitement et de la classification. Toutefois, la représentation des pourcentages de couvert nival selon une zone rectangulaire avait deux avantages au niveau de notre étude. Premièrement, la représentation d'une zone plus vaste que le bassin permettait une meilleure observation de la distribution du couvert nival. Deuxièmement, la zone élargie permettait une meilleure comparaison avec le modèle CEQUEAU. Le calcul d'un pourcentage unique de superficie nivale pour des bassins particuliers pourrait être intéressant pour certains modèles mentionnés dans la littérature.

5.2 Traitement des données issues de SCANIQ

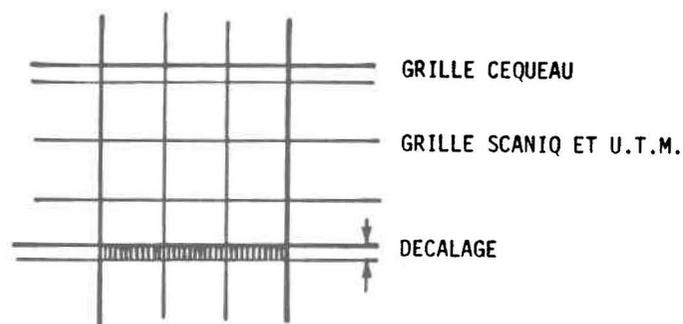
Les données de superficie nivale nécessitent certaines modifications de format et certains traitements afin d'être compatibles pour des fins de comparaison avec les données résultant du modèle CEQUEAU.

5.2.1 Adaptation des données SCANIQ sur la grille CEQUEAU

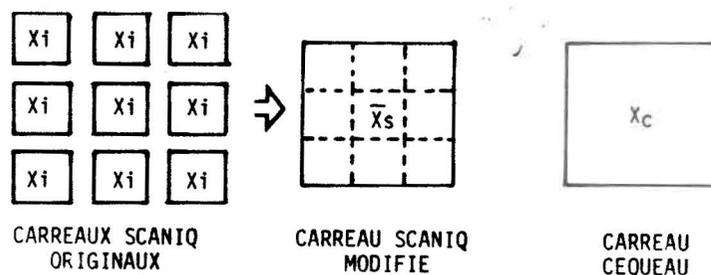
Les données issues de SCANIQ parviennent sous forme de carreaux de 10 km de côté ajustés sur une grille UTM de même taille. Les résultats du modèle CEQUEAU sont associés à des surfaces de 30 km de côté pour le bassin de la rivière Nottaway. Ces carreaux couvrent une superficie de 900 km²

¹ Tableaux ou matrices où les pixels sans neige sont identifiés par la valeur "0" et les pixels avec neige par la valeur "1".

comparativement à 100 km² pour SCANIQ. Cette disparité implique un regroupement de carreaux SCANIQ par groupe de neuf, afin que les zones couvertes par les deux systèmes soient compatibles. La valeur assignée au carreau SCANIQ résultant, est une moyenne des neuf valeurs assignées aux carreaux SCANIQ originaux.



Toutefois, la concordance entre les deux grilles n'est pas parfaite. La grille du modèle CEQUEAU est décalée de près de 2,5 km vers le nord comparativement à la grille SCANIQ et UTM. Ce décalage implique une erreur



de 7,8% sur le carreau. Cependant, cette erreur n'est sensible qu'au niveau de la limite nivale. Elle n'est pas significative sur les carreaux entièrement recouverts de neige ou bien sur les carreaux complètement à découvert. L'erreur probable devrait se situer près de 1% (0,98%) sur un bassin de la taille de celui de la rivière Nottaway. Deux options se présentent afin de contourner le problème. Une première possibilité réside dans la restructuration d'une nouvelle grille sur CEQUEAU ou SCANIQ. Toutefois, la grille SCANIQ ne peut être modifiée aisément. Il reste la possibilité de modifier la grille du modèle CEQUEAU, mais sa correction impli-

que une reprise de tous les calculs qui lui sont rattachés (banque de données à reprendre). Une deuxième possibilité réside dans l'acceptation de l'erreur, sans rien changer aux deux treillis. Le choix s'est finalement porté sur la dernière option en tenant compte du principe que la limite nivale réelle est discontinue et difficilement repérable lorsque l'épaisseur est faible. Ce type d'erreur ne devrait pas influencer outre mesure le volume d'eau de fonte résultant.

5.2.2 Paramètres de mise à jour du modèle CEQUEAU

Les valeurs de mise à jour du modèle CEQUEAU sont les pourcentages de couvert nival par carreau et l'équivalent-eau du couvert nival. Toutefois, le premier paramètre ne peut renseigner sur la valeur du deuxième. Ceci implique l'essai de divers types de correction afin de déterminer une méthode efficace pouvant remplacer l'utilisation de l'équivalent-eau seul. Dans un tel cas, la superficie du couvert nival agit à la façon d'un index de l'équivalent-eau probable.

5.2.3 Méthodes à l'essai

Le choix d'une méthode repose sur l'importance des améliorations apportées aux résultats des simulations du modèle CEQUEAU. Ces améliorations peuvent être détectées au niveau de divers indices, de paramètres statistiques et de l'observation visuelle. Une description plus détaillée de ces facteurs est apportée à l'annexe 3. La description détaillée de chacun des essais n'est pas de mise au niveau du rapport, mais un bref survol peut montrer le cheminement suivi:

1. Méthode de fractionnement de l'équivalent-eau: cette procédure se traduit par le produit du pourcentage de couvert nival (résultats SCANIQ) et de l'équivalent-eau calculé par le modèle CEQUEAU sur le carreau correspondant. Cette valeur d'équivalent-eau provient de la simulation de base (modèle calibré, mais non corrigé). Divers choix sont possibles;

1.1 Multiplication du pourcentage de superficie nivale et de l'équivalent-eau correspondant pour chacun des carreaux possédant un couvert nival partiel;

1.2 Multiplication de l'équivalent-eau et de la valeur représentative des diverses classes de pourcentages de superficie nivale (simplification au niveau de la correction). Plusieurs systèmes de classification ont été testés.

1.2.1: 0-19:10, 20-39:30, 40-59:50, 60-79:70, 80-97:89, 98-100:100.

1.2.2: 0-40:20, 40-70:55, 70-90:80, 90-99:95, 100.

1.2.3: 0-50:25, 50-80:65, 80-95:87, 95-99:97, 100.

1.2.4: 0-20:10, 20-40:30, 40-60:50, 60-80:70, 80-99:90, 100.

2. Méthode binaire: toujours selon les résultats de la simulation de base, cette méthode permet d'assigner une valeur d'équivalent-eau égale à "0" pour tout carreau entier affecté d'une couverture nivale incomplète ou inférieure à 50%. Les valeurs d'équivalent-eau calculées ne changent pas lorsque le couvert nival est complet ou de proportions supérieures à 50%.

3. Méthode de corrections subjectives: cette méthode peut se traduire par l'addition ou la soustraction d'une certaine valeur à l'équivalent-eau calculé. Il peut s'agir également de la multiplication ou de la division de l'équivalent-eau par un facteur particulier. Ces opérations sont appliquées aux carreaux affichant un couvert nival partiel.

L'obtention d'une méthode optimale s'effectue par une procédure d'essais et erreurs.

5.2.4 Limitations

La méthode proposée s'inscrit dans le cadre d'une tentative d'optimisation du procédé de mise à jour. Cette dernière diffère totalement des procédures conventionnelles utilisant des lignes de neige ou d'autres types de données au sol. Celles-ci sont basées sur l'équivalent-eau de la neige. Toutefois, la correction utilisant des données de lignes de neige repose sur des données ponctuelles. Seules sept ou huit stations nivométriques servent à la réalisation d'un index du couvert nival sur le bassin étudié et ce dernier couvre plus de 65 000 km². Les données de surface provenant des images satellites ne peuvent nous renseigner sur l'équivalent-eau, puisque seule la présence nivale est détectable par les capteurs dans le visible et l'infra-rouge. Cependant, cette lacune est compensée par une distribution spatiale et temporelle du couvert nival.

Les données satellites sont très représentatives des conditions au sol, mais certains facteurs peuvent réduire cette précision:

1. potentiel réel du système SCANIQ à déterminer la distribution du couvert nival;
2. l'épaisseur nivale minimale détectable par les capteurs à bord de satellites. Les capteurs sont impuissants à détecter un couvert nival dont l'épaisseur est inférieure à une certaine limite;
3. l'erreur due au décalage de la grille CEQUEAU par rapport à la grille UTM (section 5.2.1);
4. l'erreur due à l'interpolation du fuseau UTM numéro 18 sur la portion du bassin située sur le fuseau UTM numéro 17 (section 5.1.5.1);
5. autres types d'erreurs.

5.3 Simulation hydrologique

La simulation hydrologique constitue l'étape finale dans le développement d'une méthodologie d'amélioration des débits calculés par le modèle CEQUEAU. Le choix du modèle hydrologique ne revêt pas une importance particulière. La méthode a été appliquée au modèle CEQUEAU en raison de l'utilisation de ce dernier par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), mais elle pourrait s'appliquer à tout autre type de modèles hydrologiques. Toutefois, l'application d'une telle méthode est plus avantageuse pour des modèles à maille puisque d'autres types de modèle n'auraient pas pu utiliser pleinement l'information disponible.

5.3.1 Préparation de la banque de données

La préparation de la banque de données constitue la base de l'application du modèle CEQUEAU. Pour ce modèle, il est nécessaire de constituer deux banques de données; une banque de données physiographiques et une banque de données hydrométéorologiques. La banque de données physiographiques utilisée par Morin et al. (1980) pour le complexe NBR¹ fut employée pour la présente étude. Seul le nombre des stations météorologiques et hydrométriques a été légèrement modifié en raison de la simulation du bassin de la rivière Nottaway seul. La deuxième banque s'est montrée un peu plus ardue à constituer en raison de la période à simuler. Cette période couvre les années 1979 à 1981. Ces années diffèrent de celles utilisées par Morin et al. (1980). Cette période s'est avérée nécessaire pour la concordance avec les dates des images satellites. Le problème majeur s'est trouvé au niveau de l'obtention et de la correction du format des données. Un autre type de problème se traduit par un manque de disponibilité des données hydrométriques et météorologiques informatisées de date récente. Ce facteur a nécessité une incorporation manuelle des données non informatisées dans la banque hydrométéorologique.

¹ NBR: Nottaway-Broadback-Rupert.

5.3.2 Préparation du modèle CEQUEAU (calibration)

L'étape de calibration du modèle CEQUEAU fait suite à celle de la constitution de la banque de données. Elle fut facilitée par l'utilisation des paramètres optimaux trouvés dans le rapport de Morin et al. (1980)¹. Une recalibration des paramètres du modèle a été décidée en raison des différentes périodes utilisées. Plusieurs essais ont été tentés avec divers paramètres liés à la neige: seuil de transformation pluie-neige, seuil de température de murissement, température de fonte en clairière et en forêt, etc... Le choix s'est porté sur la simulation permettant le meilleur accord entre les courbes de débits calculés et observés. Les facteurs finaux sont présentés au tableau 5.3. Seul le seuil de température fut modifié par rapport aux valeurs retenues par Morin et al. (1980). La simulation finale s'est avérée très bonne compte tenu du nombre restreint de stations météorologiques (4). Les courbes de débits calculés et observés sont relativement rapprochées (figure 5.4).

Certaines disparités n'ont toutefois pas pu être éliminées avec la calibration. L'une d'elles se situe juste au début de la crue printanière. Les débits observés sont nettement supérieurs aux débits calculés. Cette disparité est probablement reliée aux conditions climatiques extrêmes survenues à l'hiver 1981 ou à l'algorithme de la sous-routine de fonte². L'hiver 1981 fut caractérisé par des températures douces et une grande quantité de précipitations liquides en février. L'autre disparité survient au niveau de la fonte printanière. Cette dernière est surestimée au niveau du maximum de crue et les débits calculés diminuent un peu trop rapidement au mois de juin. Toutefois, il est possible que le couvert de glace sur la rivière soit à l'origine de la disparité observée au printemps.

¹ Ce rapport rapporte les simulations du complexe NBR.

² Problème probablement lié à la température journalière. Le modèle utilise les températures minimales et maximales pour définir une température moyenne (TJE). Par exemple, si le seuil de transformation pluie-neige est inférieur à 0°C, le modèle considère les précipitations sous forme solide malgré qu'elles aient pu tomber sous forme liquide.

TABLEAU 5.3. PARAMETRES OPTIMAUX DU MODELE CEQUEAU CALIBRE.

Paramètres de production	
- Coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE	0,300
- Coefficient de vidange du réservoir LAC et MARAIS	0,010
- Coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange basse)	0,005
- Coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange haute)	0,05
- Coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange basse)	0,0
- Coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange intermédiaire)	0,35
- Seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE	60 mm
- Seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL	70 mm
- Seuil de vidange du réservoir LAC et MARAIS	250 mm
- Seuil de vidange haute du réservoir NAPPE	120 mm
- Hauteur du réservoir SOL	100 mm
Paramètres de la fonte de neige	
- Seuil de transformation pluie-neige	0,0°C
- Taux de fonte en forêt	2,8 mm/°C/J
- Taux de fonte en clairière	3,2 mm/°C/J
- Seuil de température de fonte en forêt	0,0°C
- Seuil de température de fonte en clairière	-1,0°C
- Coefficient de déficit calorifique de la neige	0,70
- Seuil de murissement du stock de neige	1,0°C *
Paramètres de l'évapotranspiration	
- Pourcentage d'évapotranspiration pris dans la nappe	0,0
- Hauteur de prélèvement de l'eau à taux potentiel	40,0 mm
- Exposant de la formule de Thornthwaite (XAA)	0,65
- Valeur de l'index thermique de Thornthwaite	20,0
Paramètres divers	
- Paramètre d'ajustement du coefficient de transfert	0,03
- Temps de concentration du bassin	10 jours
- Coefficient de correction des précipitations avec l'altitude	0,75 mm/m
- Variables décalant la date d'insolation potentielle maximale respectivement pour la neige et pour l'évapotranspiration	80 jours
- Infiltration maximale par jour	20 mm/j
- Latitude moyenne du bassin versant	49° 30'
- Pourcentage de surface imperméable	0,0

* La valeur était de 0,0°C dans le rapport de Morin et al. (1980).

5.3.3 Mise à jour

L'étape finale consiste à la mise à jour des équivalents en eau sur chacun des carreaux entiers du bassin. Deux types de corrections ont été effectuées au niveau de cette étude. Une première réalisée au moyen des données issues de SCANIQ et une seconde avec l'aide de lignes de neige. Cette dernière méthode est couramment employée en hydrologie pour la mise à jour de l'équivalent en eau du couvert nival. Son utilisation avait pour objectif de juger de la valeur véritable de méthodes dérivées de l'imagerie satellite. Une seule mise à jour est effectuée pour chacune des méthodes à l'essai pour l'hiver et le printemps 1981. Ces essais uniques permettent de discerner l'influence spécifique d'une correction sur l'hydrogramme complet.

Le modèle calibré (figure 5.4) sert de base comparative. Plusieurs indices de comparaison sont utilisés lors de l'évaluation des résultats de la mise à jour: la somme du carré des pourcentages des débits journaliers, la somme du carré des différences des débits journaliers, le débit moyen annuel, le débit maximum journalier, l'erreur de Nash, le coefficient de corrélation, l'erreur relative au niveau des débits journaliers, l'erreur relative au niveau des volumes journaliers cumulés, l'erreur absolue journalière et l'écart quadratique moyen de l'estimation. Une description sommaire de chacun de ces indices est présentée à l'annexe 3. Dans le cas d'une amélioration, les divers types d'erreurs sont abaissés (erreur relative, écart quadratique moyen de l'estimation, somme des carrés des pourcentages et somme des carrés des différences) et le coefficient de corrélation ainsi que l'erreur de Nash se rapprochent de l'unité. Ces indices ne revêtent pas tous une importance égale. Certains comme l'erreur absolue, la somme du carré des différences, la somme des carrés des pourcentages s'avèrent plus sensibles au niveau de la détection de l'essai optimal. L'interprétation visuelle des courbes est aussi importante et permet d'observer des comportements que ne peuvent exprimer des critères purement mathématiques.

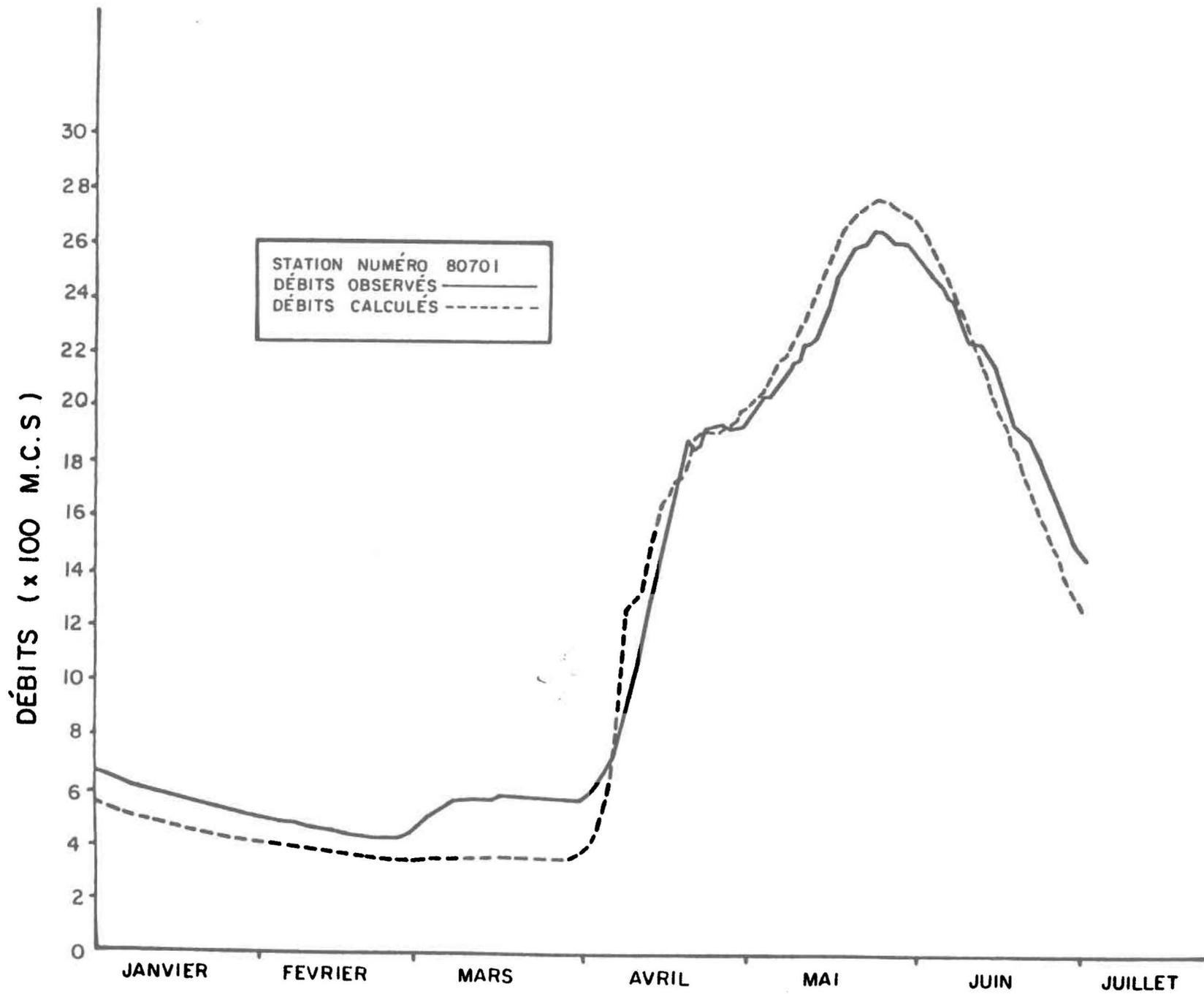


Figure 5.4: Débits observés et calculés sur le bassin versant de la rivière Nottaway : simulation de base sans correction pour l'année 1981 .

5.3.3.1 Simulation avec des données d'équivalent en eau obtenues aux stations nivométriques

Une correction à l'aide de lignes de neige est apportée au modèle de base selon une procédure définie dans le manuel d'utilisation du modèle CEQUEAU. La correction s'opère à partir de lignes de neige échantillonnées à huit stations nivométriques du 13 au 15 avril 1981 (tableau 5.1). Il existe d'autres stations nivométriques dans la région, mais elles n'ont pas été échantillonnées aux dates d'intérêt.

Le résultat (figure 5.5) est nettement moins bon que celui obtenu par le modèle non corrigé (figure 5.4). Il y a un manque d'eau disponible pour la fonte qui ne peut être causé que par des valeurs d'équivalent-eau non représentatives des zones concernées. Il est donc évident que la correction apportée par les lignes de neige n'améliore pas l'hydrogramme calculée et détériore même le résultat original. Toutefois, cette affirmation ne concerne que ce bassin et les dates utilisées.

5.3.3.2 Simulation avec des données de superficie de couvert nival obtenues par télédétection

Plusieurs essais ont été réalisés afin de déterminer une procédure optimale pour l'amélioration de l'hydrogramme calculé. Une brève description des divers types d'essais a déjà été abordée à la section 5.2.3. Seuls les deux essais les plus concluants ont été retenus. Il faut mentionner, toutefois, que les résultats de la plupart des essais furent relativement similaires. Les courbes de débits calculés étaient toutes proches l'une de l'autre et c'est avec l'aide des indices de comparaison décrits à l'annexe 4 qu'un choix fut déterminé.

Essai 1: multiplication de l'équivalent-eau calculé pour chacun des carreaux entiers du modèle CEQUEAU, par le pourcentage du couvert nival estimé à partir de l'image satellite du 21 avril 1981;

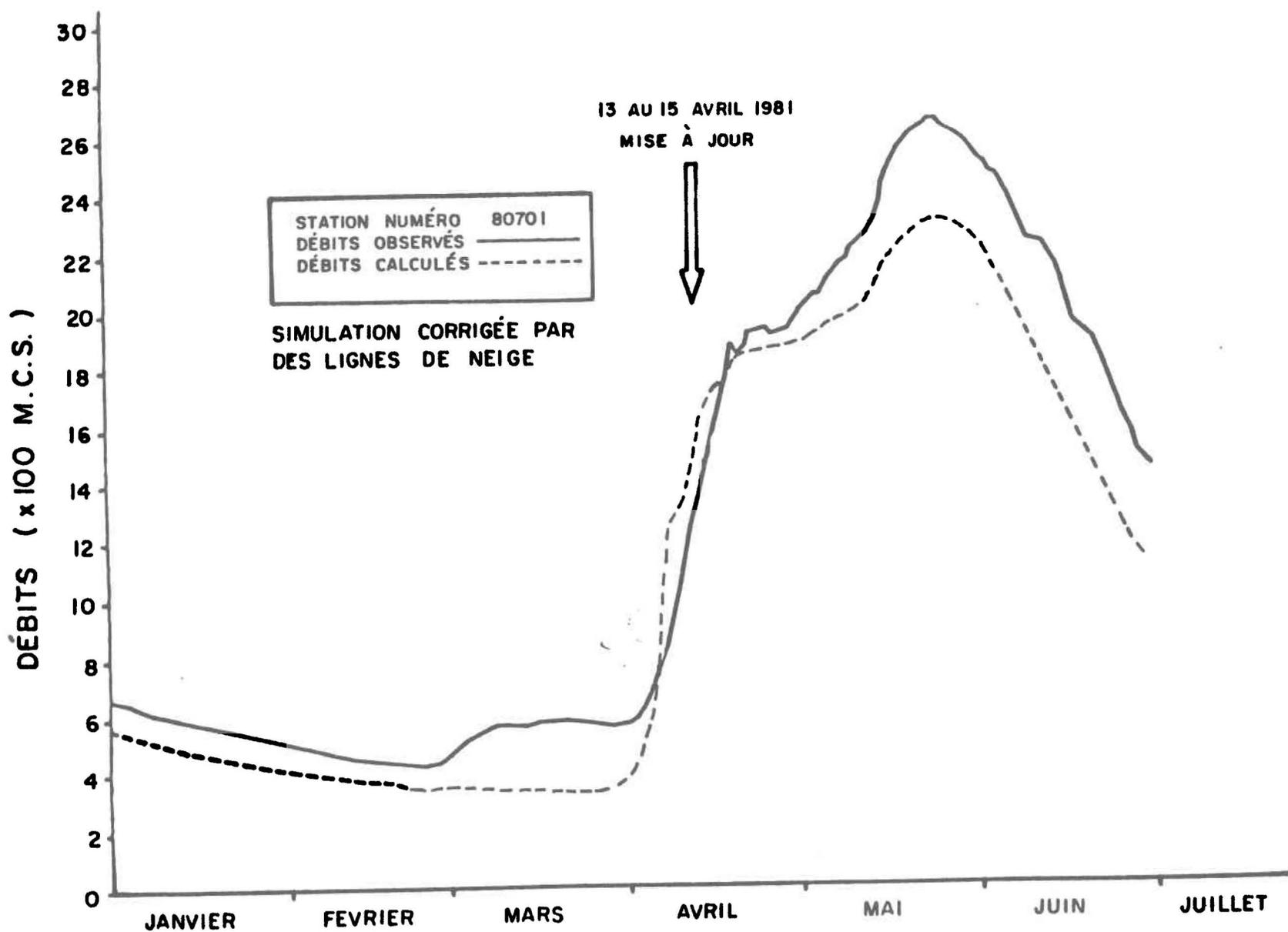


Figure 5.5: Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway : simulation corrigée par des lignes de neige pour l'année 1981.

Essai 2: même type d'approche que l'essai-1, mais les valeurs de pourcentage de couvert nival sont maintenant groupées par classes afin de simplifier l'opération. La classification optimale se présente comme suit:

Classe	Etendue de la classe	Moyenne
6	0,00 - 0,19	0,10
5	0,20 - 0,39	0,30
4	0,40 - 0,59	0,50
3	0,60 - 0,79	0,70
2	0,80 - 0,97	0,89
1	0,98 - 1,00	1,00

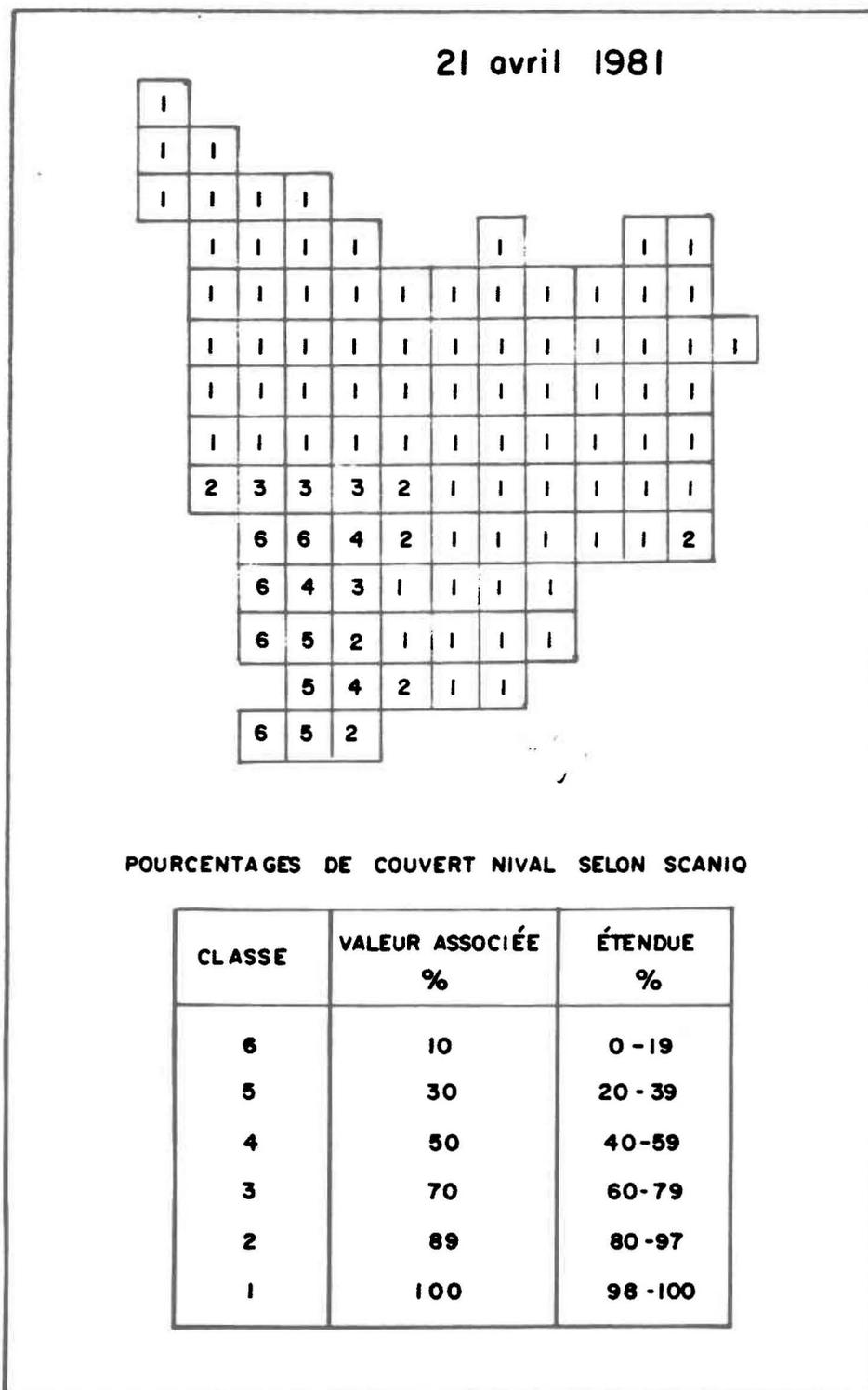
La répartition des pourcentages de couvert nival pour l'essai-1 est affichée à la figure 5.6 tandis que la répartition des classes de couvert nival est présentée à la figure 5.7. Chacun des carreaux entiers composant les figures 5.6 et 5.7 représente une superficie de 30 km x 30 km.

Les deux hydrogrammes de crue sont très semblables et montrent une distribution du même ordre que la simulation de base. Seul l'hydrogramme de l'essai-2 est présenté à la figure 5.8. Il s'agit également du meilleur résultat en tenant compte des divers facteurs présentés au tableau 5.3.

5.3.3.3 Comparaison

Le tableau 5.4 présente les indices comparant la qualité de la simulation de base par rapport aux simulations comportant une mise à jour de l'équivalent en eau de la neige au sol par l'intermédiaire de données de lignes de neige et de données issues du traitement des images satellites. Les résultats montrent tous que la mise à jour avec l'aide de données de lignes de neige conduit à une détérioration de la qualité de la simulation. Toutefois, en regard des valeurs des indices affichés sur ce même tableau, il apparaît que les résultats des simulations corrigées par des données

Figure 5.7. Distribution des classes de pourcentage de couvert nival selon l'essai numéro 2.



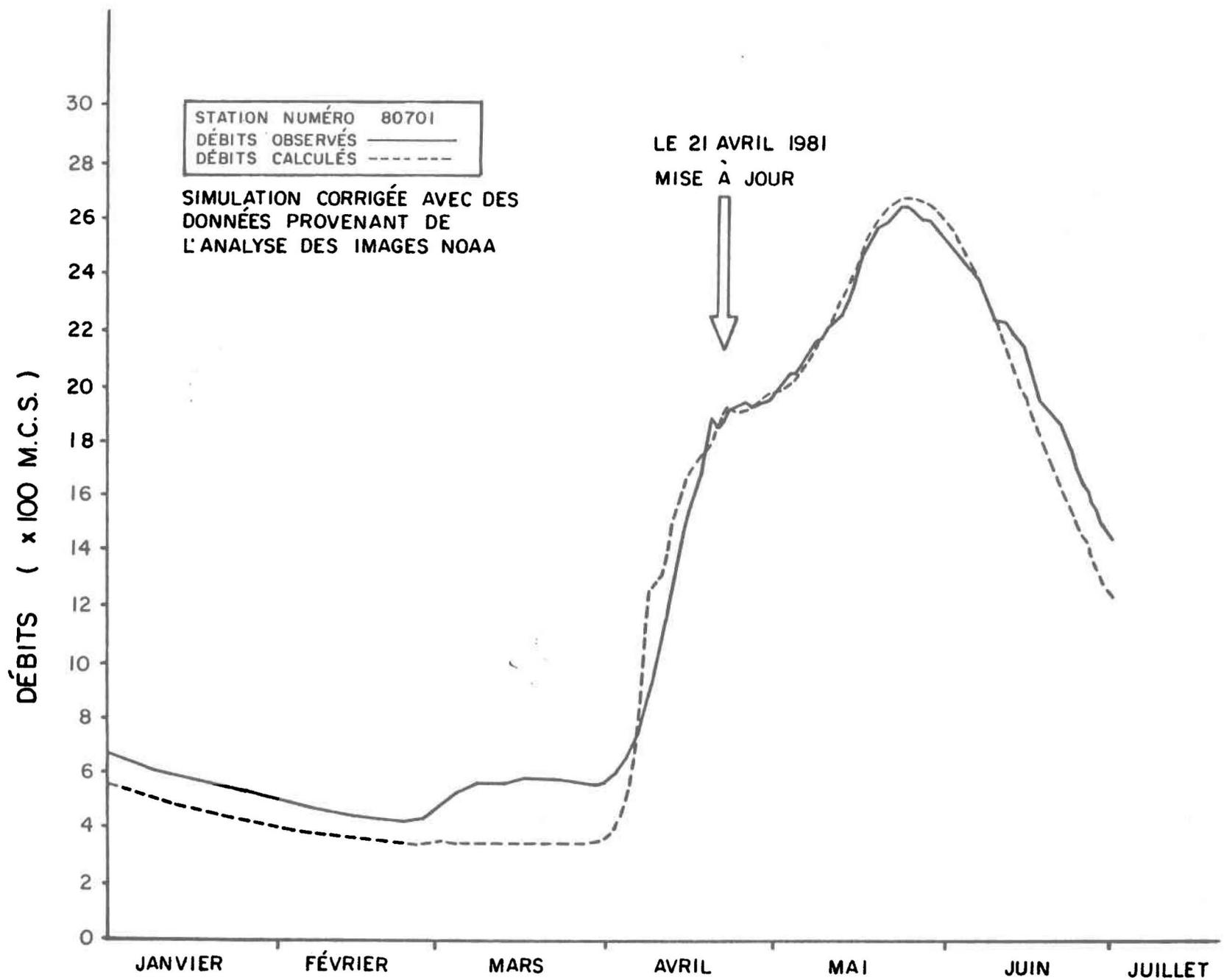


Figure 5.8. Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway : simulation corrigée par des données de superficie nivale provenant de l'analyse des images NOAA pour l'année 1981.

TABLEAU 5.4. COMPARAISON DES SIMULATIONS NON CORRIGÉES, CORRIGÉES AVEC DES LIGNES DE NEIGE ET CORRIGÉES AVEC DES DONNÉES ISSUES DU TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITES

	Simulation de base non corrigée	Simulation corrigée avec les lignes de neige	Simulation corrigée avec des données satellites (classées)	Simulation corrigée avec des données satellites (non classées)
Somme de carrés des pourcentages $\Sigma \left(\frac{Q_0 - Q_c}{Q_0} \right)^2$	0,20670	0,24937	0,20619 *	0,20618 *
Somme de carrés des différences $\Sigma (Q_0 - Q_c)^2$	172,606	578,482	161,128 *	161,187 *
Débit journalier observé maximal (m ³ /s)	2 640,00	2 640,00	2 640,00	2 640,00
Débit journalier calculé maximal (m ³ /s)	2 750,95	2 274,15	2 672,51 *	2 676,15
Erreur de Nash (r ²)	0,97 *	0,92	0,97 *	0,97 *
Coefficient de corrélation (r)	0,99 *	0,98	0,99 *	0,99 *
Erreur relative au niveau du volume de débit journalier	- 21,085 *	- 30,788	- 22,670	- 22,580
Erreur relative au niveau du volume cumulé du débit journalier	- 7,362 *	- 24,912	- 10,272	- 10,108
Ecart quadratique moyen de l'estimation (m ³)	894 305,95	1 458 530,11	862 223,99 *	862 543,93

* Valeur optimale

issues du traitement d'images satellites sont de meilleure qualité que ceux obtenus avec la simulation de base. L'erreur relative semble contredire cette affirmation, mais la représentativité de cet indice est discutable à notre avis. L'observation des hydrogrammes combinés représentant la simulation de base et les simulations mises à jour avec l'aide des lignes de neige et de la télédétection confirme l'amélioration introduite par l'usage de la télédétection (figure 5.9). En fait, on peut noter une meilleure concordance entre l'hydrogramme des débits observés et l'hydrogramme des débits calculés. L'emploi de données classées ou non classées dans le cas de mise à jour avec télédétection permet des hydrogrammes de crues similaires. Toutefois, l'examen des indices de comparaison du tableau 5.4 met en évidence une légère supériorité de la simulation utilisant des données classées, en particulier au niveau de la somme du carré des différences et de l'écart quadratique moyen de l'estimation.

L'amélioration due à l'utilisation des données de télédétection classées est très nette sur les figures 5.10 et 5.11 où l'erreur est réduite de façon significative après la date de mise à jour (21 avril 1981) pendant la période de crue printanière. Ainsi, la figure 5.11 affiche une forte baisse de l'erreur absolue journalière entre les mois d'avril et de juin. La figure 5.10 représentant la variation de l'erreur absolue de l'écart journalier entre les débits calculés et observés exprimés en pourcentage du débit journalier observé est moins représentative de l'hydrogramme puisque l'erreur absolue qui apparaît très élevée pour la période de janvier à mars ne représente que de faibles débits. Cette erreur absolue exprimée en pourcentage du débit observé introduit une forte disproportion entre les périodes de mars et de mai, laquelle est moins importante pour l'erreur absolue journalière exprimée en mètres cubes par seconde.

La figure 5.12 présentant le cumul des débits journaliers possède un pouvoir discriminant moins élevé que les précédentes. Elle marque toutefois la divergence d'une simulation corrigée avec l'aide de lignes de neige. Les différences sont moins évidentes au niveau des autres courbes. Cependant, il semble que la simulation de base correspond à la courbe se

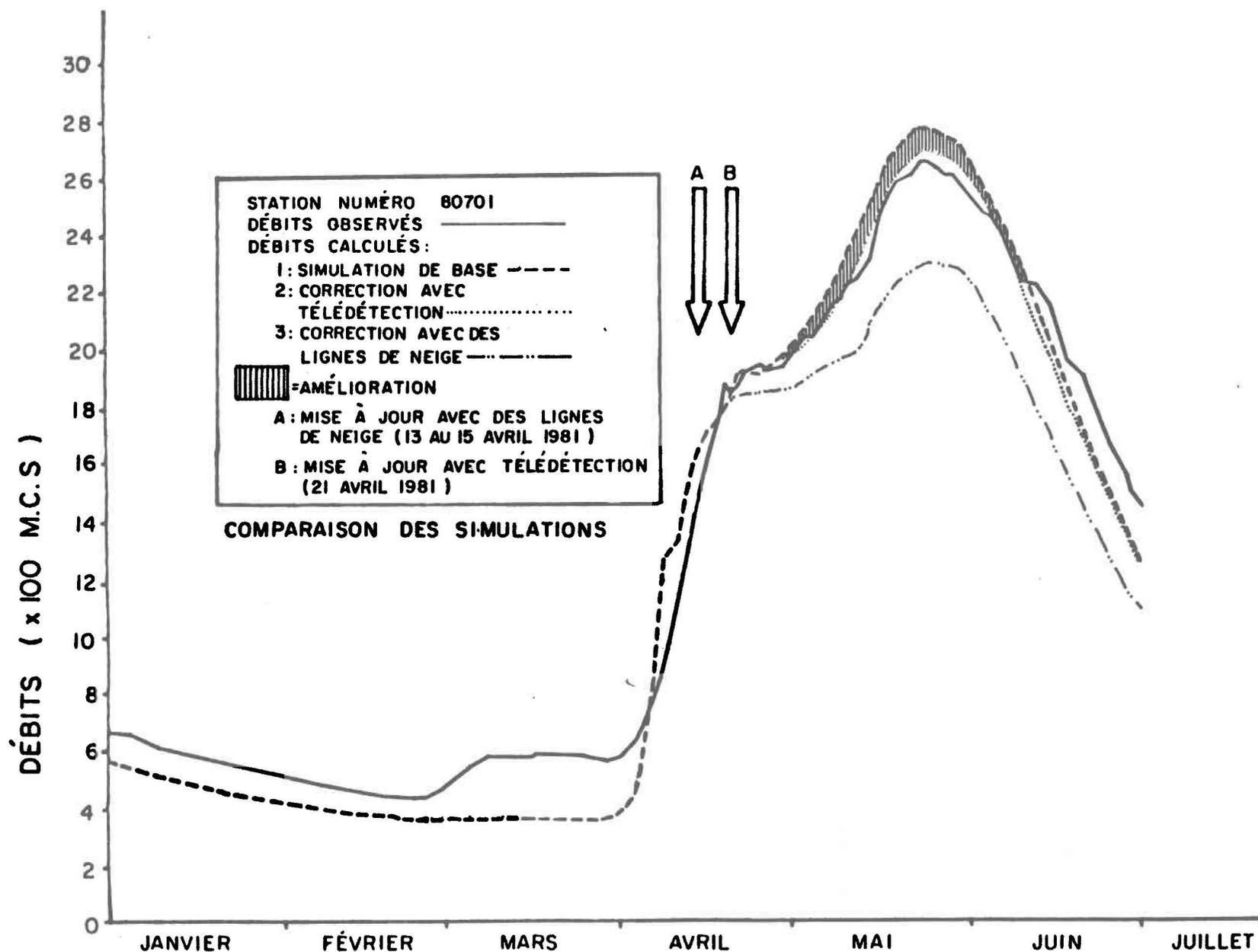


Figure 5.9 : Débits calculés et observés sur le bassin versant de la rivière Nottaway : comparaison de la simulation de base et des simulations corrigées pour l'année 1981 .

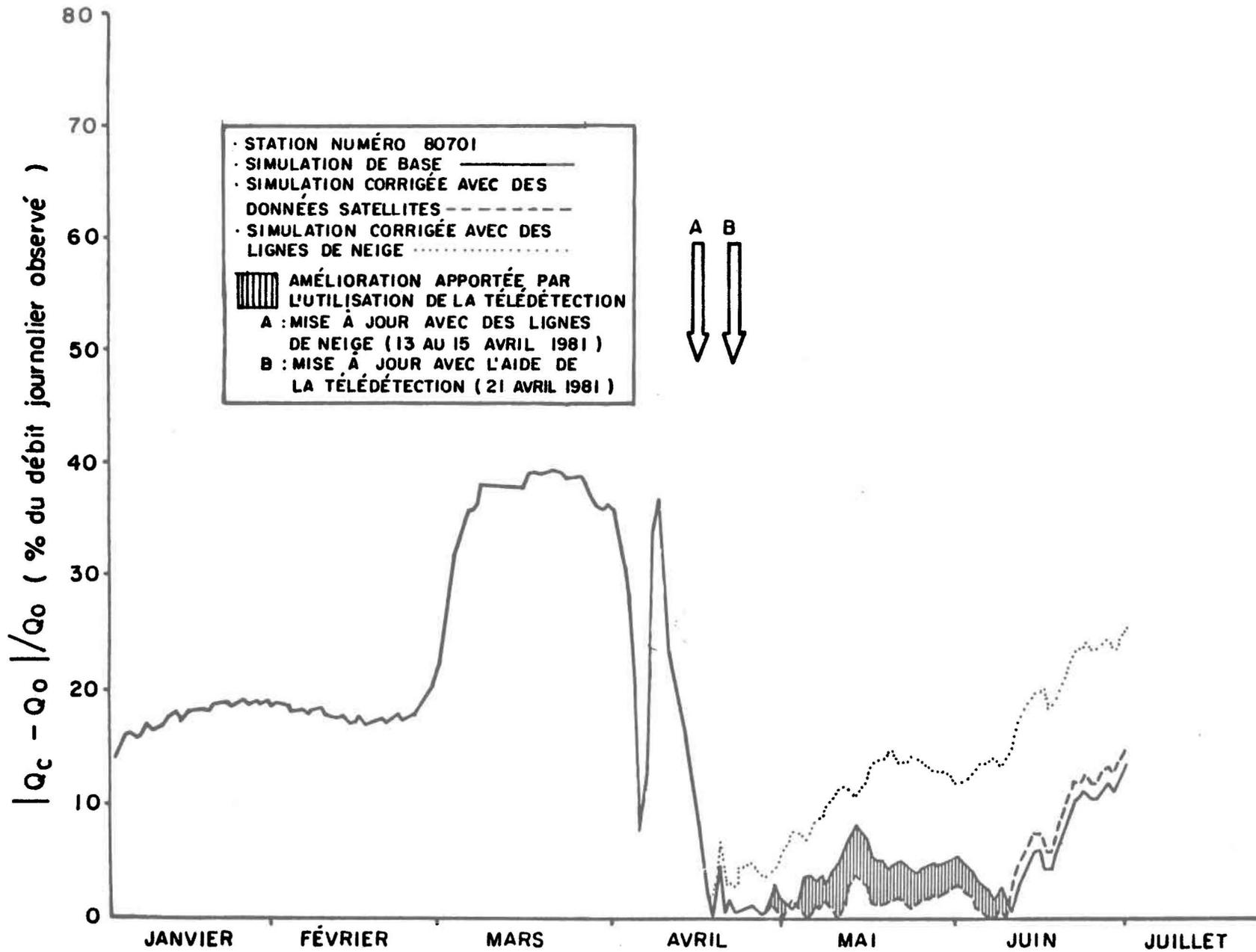


Figure 5.10 . Variation temporelle de la valeur absolue de l'écart journalier entre les débits calculés Q_c et les débits observés Q_o , en pourcentage du débit journalier observé pour l'année 1981.

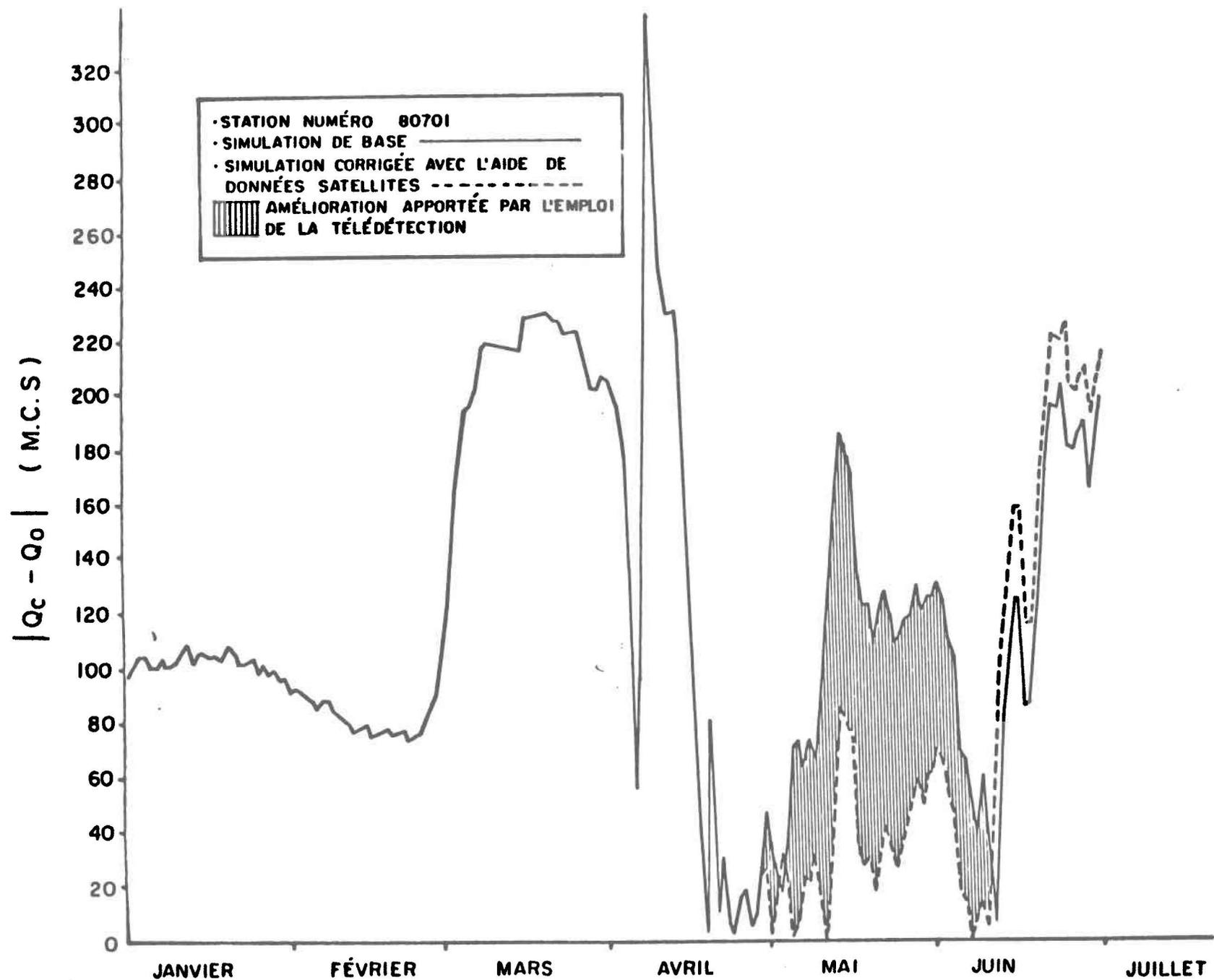


Figure 5.11 : Variation temporelle de la valeur absolue de l'écart journalier entre les débits calculés Q_c et les débits observés Q_o , en M.C.S. pour l'année 1981.

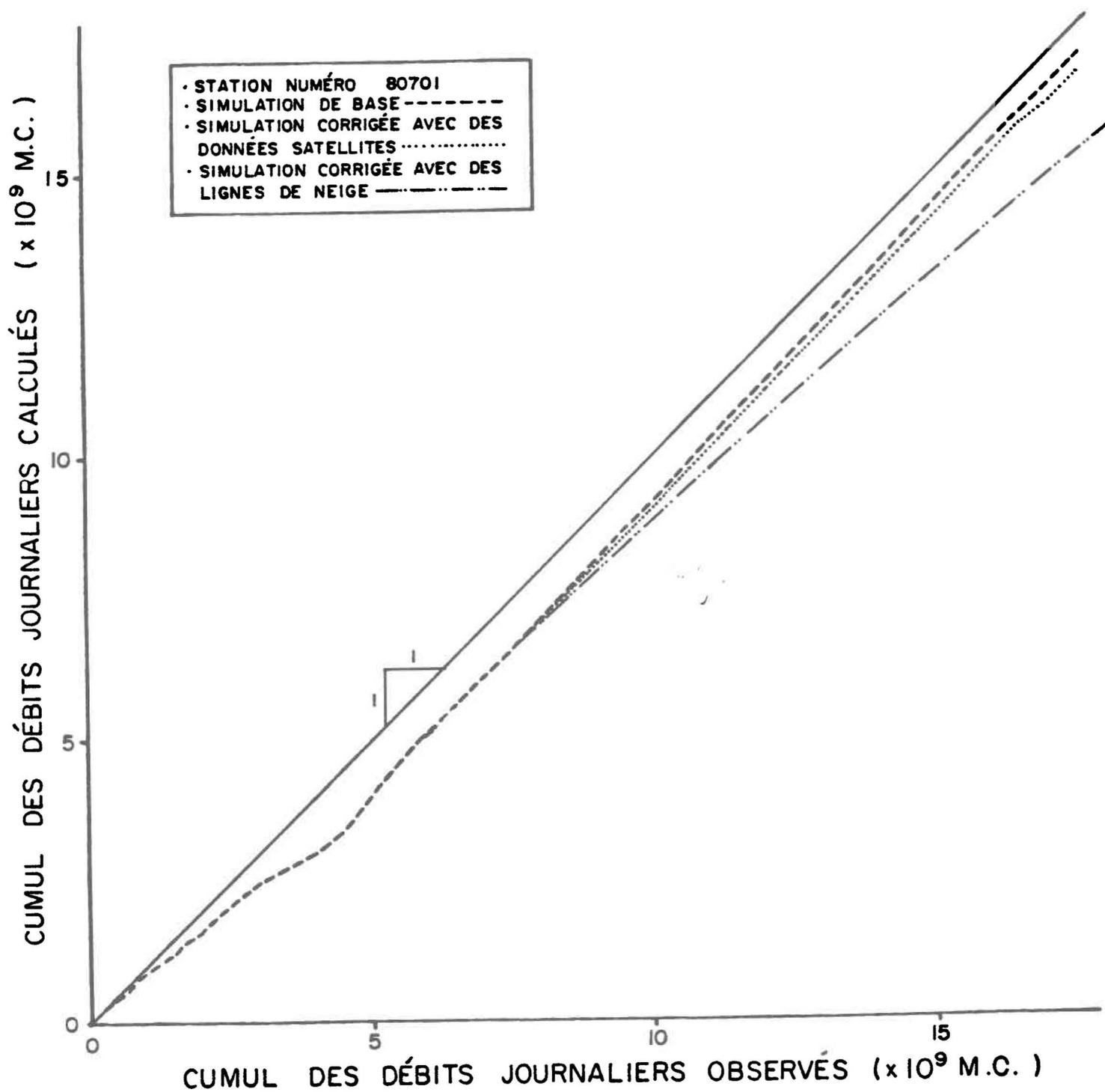


Figure 5.12. Cumul des débits journaliers observés et calculés pour la période du 1^{er} janvier au 30 juin 1981.

rapprochant le mieux de la droite d'équivalence. Il existe une disparité prononcée à la base de toutes les courbes qu'aucune correction ne semble pouvoir effacer. Sa présence peut perturber l'interprétation subséquente. C'est dans le but de vérifier cette hypothèse qu'une deuxième figure fut réalisée. La courbe résultante ne représente que la période de fonte printanière (figure 5.13) où la disparité commune à toutes les courbes a été éliminée. Ce schéma est intéressant malgré son faible pouvoir discriminant. La courbe représentant la simulation corrigée par les données de télédétection se rapproche plus près de la droite d'équivalence que les autres courbes (simulation de base et simulation corrigée par des données nivométriques). Cette remarque tend à confirmer un meilleur accord entre les cumuls de débits calculés et observés pendant la crue printanière pour la simulation corrigée par des données obtenues par télédétection. L'amélioration est également significative au niveau des différences de lames d'eau mensuelles entre le débit observé et le débit calculé (tableau 5.5). Ainsi, les mois d'avril et mai présentent une baisse marquée de la différence des lames d'eau. Toutefois, le mois de juin montre une détérioration de cette valeur comparativement à la simulation non corrigée. Une détérioration est également signalée au niveau de la différence de lame d'eau annuelle, mais elle s'explique en grande partie par une mauvaise concordance des débits calculés et observés avant la date de mise à jour. De plus, cet indice est peu significatif en raison de l'absence de données pendant la dernière partie de l'année.

Une amélioration de 2 à 3% est estimée au niveau de l'erreur absolue de l'écart journalier, entre les débits calculés et observés, exprimée en pourcentage du débit journalier observé pendant la fonte, telle qu'exprimée par la figure 5.10. Une amélioration de ce niveau peut permettre des prévisions plus précises des débits ou des volumes d'eau à venir, ce qui devient un facteur prépondérant au niveau de la gestion.

5.4 Remarques au niveau de la correction

Les résultats montrent l'applicabilité d'une correction réalisée avec l'aide de données issues de l'imagerie satellite lorsque les stocks de

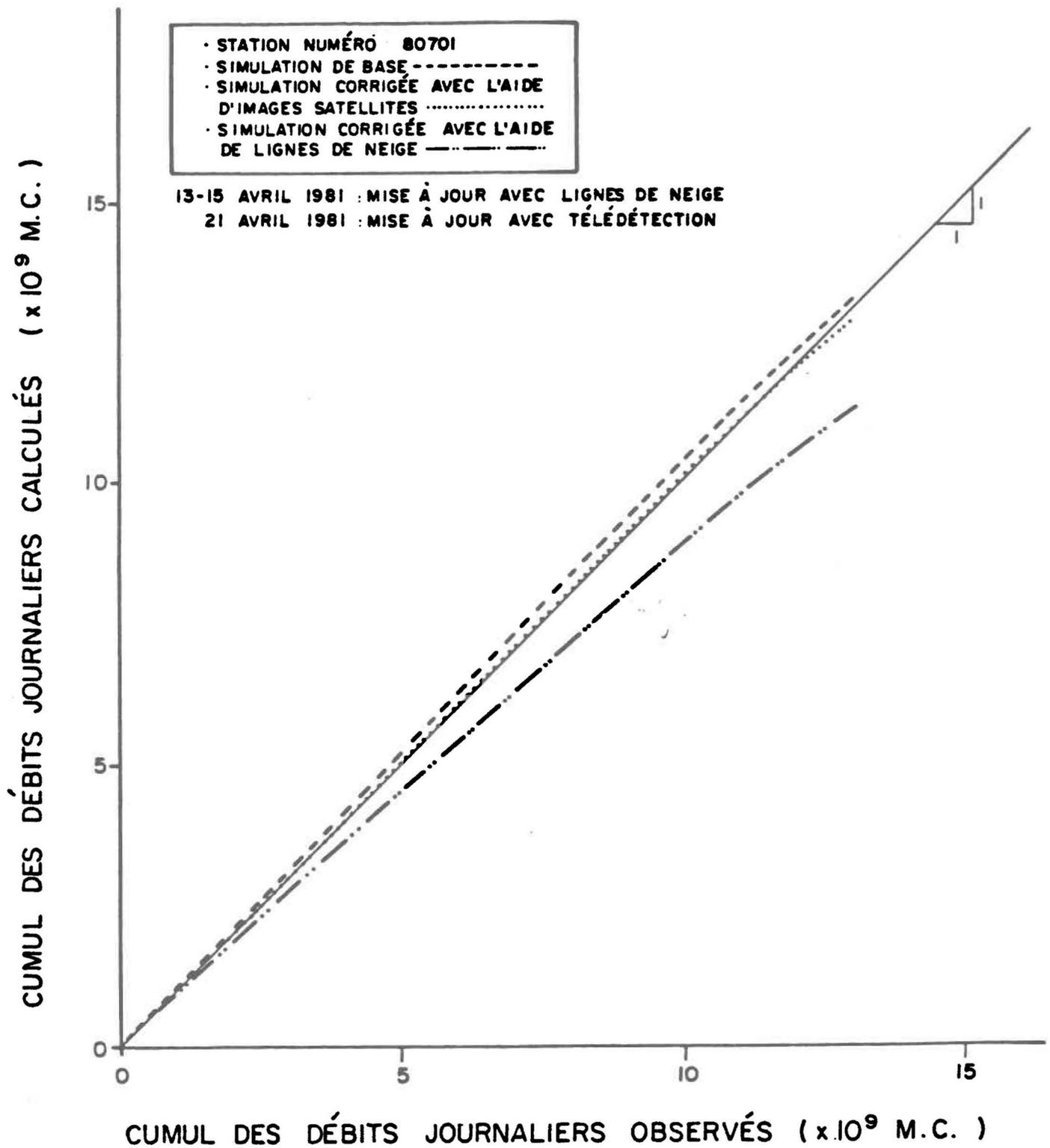


Figure 5.13: Cumul des débits journaliers observés et calculés pendant la crue printanière, du 13 avril au 30 juin 1981.

TABLEAU 5.5. DIFFERENCE DES LAMES D'EAU MENSUELLES (mm) ENTRE LE DEBIT OBSERVE (Qo) ET LE DEBIT CALCULE (Qc) POUR LES QUATRE SIMULATIONS

	Simulations de base	Correction avec lignes de neige	Correction avec données satellites classées	Correction avec données satellites non classées
Janvier	- 4,746	- 4,746	- 4,746	- 4,746
Février	- 3,458	- 3,458	- 3,458	- 3,458
Mars	- 9,684	- 9,684	- 9,684	- 9,684
Avril	2,502	0,881	2,407	2,427
Mai	5,068	- 12,936	1,255	1,476
Juin	- 3,522	- 16,796	- 5,050	- 4,986
Juillet	—	—	—	—
Août	—	—	—	—
Septembre	—	—	—	—
Octobre	—	—	—	—
Novembre	—	—	—	—
Décembre	—	—	—	—
ANNEE	-13,840	- 46,739	- 19,276	- 18,971

neige sont fondus trop lentement par la sous-routine de fonte, comparative-ment à ce qui est observé. Le facteur de correction peut se situer entre 0 et 1,0 selon le pourcentage de superficie couverte de neige sur chaque carreau entier. Cette approche diffère de la méthode de mise à jour par l'utilisation de lignes de neige où le facteur de correction est défini indirectement par le rapport de l'équivalent-eau de la ligne de neige et de la valeur d'équivalent-eau calculée par le modèle CEQUEAU. Dans le cas de la mise à jour avec des données satellites, le facteur de correction est utilisé pour corriger la valeur d'équivalent-eau:

1. Mise à jour par l'utilisation de lignes de neige:

$$EE_{LN} \div EE_C = F_C$$

2. Mise à jour avec l'aide de la télédétection:

$$EE_C \times F_C = EE_{LN}$$

où

EE_C = équivalent-eau calculé par le modèle CEQUEAU;
 F_C = facteur de correction;
 EE_{LN} = équivalent-eau utilisé par la mise à jour. La première équation emploie une valeur d'équivalent en eau mesurée sur le terrain tandis que l'équivalent en eau utilisé dans la deuxième équation est défini par le produit du pourcentage de superficie nivale et de l'équivalent en eau calculé par le modèle CEQUEAU.

L'emploi du pourcentage de couvert nival comme facteur de correction ne permet que la "réduction" de la valeur d'équivalent-eau calculée. Il n'est donc valable que lorsque les équivalents en eau calculés par le modèle CEQUEAU sont surestimés, puisque le facteur de correction ainsi généré ne peut dépasser la valeur de 1,0 (le pourcentage de couvert nival ne peut

dépasser 100%). Or, ceci implique l'emploi d'une méthodologie différente lorsque la fonte calculée par la sous-routine de fonte du modèle s'avère trop rapide comparativement à ce qui est observé dans la réalité.

Une approche pouvant traiter un tel cas s'avère possible en théorie, mais les conditions prévalentes à la période étudiée ont empêché la vérification de la méthode. La base de cette approche repose sur certaines méthodes à l'essai discutées à la section 5.2.3 et sur les résultats des simulations de la section précédente.

La méthode consiste à additionner un certain stock de neige (à déterminer par essais et erreurs) sur les carreaux du modèle CEQUEAU ne se conformant pas à la limite nivale déterminée par le traitement numérique des images. Quatre cas sont alors possibles:

1. présence de neige sur le carreau CEQUEAU et sur le carreau SCANIQ correspondant;
2. présence de neige sur le carreau CEQUEAU et absence de neige sur le carreau SCANIQ correspondant;
3. absence de neige sur le carreau CEQUEAU et présence de neige sur le carreau SCANIQ correspondant;
4. absence de neige sur les carreaux CEQUEAU et SCANIQ.

De ces quatre possibilités, seul le troisième cas pose un problème lorsqu'on applique la procédure élaborée précédemment. Le problème est lié à la présence de neige sur l'image satellite et à la sous-estimation de l'équivalent en eau par le modèle CEQUEAU. Dans un tel cas, le pourcentage de couvert nival ne peut être utilisé pour augmenter le stock de neige puisque le facteur de correction qui lui est associé ne peut dépasser l'unité (1,0). La correction de l'équivalent en eau du couvert nival doit donc être réalisée par l'addition ou la multiplication d'un certain coeffi-

cient à être déterminé par essais et erreurs à la valeur d'équivalent-eau calculée par le modèle. Seul l'hydrogramme des débits et l'interprétation des indices d'évaluation de la qualité de la simulation peuvent nous renseigner sur ce coefficient. Il est alors évident que dans un tel cas, la mise à jour repose sur une base plus qualitative que lorsque la vitesse de fonte est sous-estimée (équivalent en eau trop élevé).

L'intérêt d'une telle approche pourrait s'avérer moins grand que celle utilisant les pourcentages de couvert nival. Malgré cela, il est possible que des résultats significatifs puissent être obtenus si l'hypothèse se confirmait. Toutefois, aucune recherche n'a été effectuée pour vérifier cette approche qui devra faire l'objet d'études complémentaires.

Les méthodes de mise à jour élaborées au niveau de cette étude peuvent s'avérer intéressantes, mais cette mise à jour nécessite l'usage de deux procédures, selon que l'équivalent en eau calculé par le modèle CEQUEAU est surestimé ou sous-estimé. Il devient donc nécessaire de développer une méthodologie globale s'appliquant de façon égale pour tous les cas.

5.5 Répartition du manteau nival

Outre l'amélioration des hydrogrammes de crue, l'introduction de données issues du traitement numérique des images satellites permet de corriger la distribution de l'équivalent en eau sur chacun des carreaux. Ainsi, le modèle CEQUEAU peut générer des cartes de la distribution spatiale de l'équivalent en eau qui peuvent être comparées par la suite aux images satellites. Ce phénomène est représenté sur les figures 5.14, 5.15 et 5.16. La figure 5.14 représente la distribution de l'équivalent-eau avant la mise à jour. Les figures 5.15 et 5.16 affichent la distribution telle que générée après la mise à jour. Toutefois, la concordance entre celles-ci et l'image satellite du 21 avril 1981 (photo 8) ne semble pas évidente au premier abord, mais les valeurs d'équivalent-eau ont été ramenées à des valeurs plus faibles où il y avait absence de neige sur l'image satellite. Il faut retenir que chaque carreau entier affiche un équivalent-eau qui est

le résultat d'une moyenne générale. Ainsi, les valeurs d'équivalent en eau calculées par le modèle CEQUEAU et qui sont supérieures à 0 n'impliquent pas pour autant que le couvert nival couvre 100% de la surface. Par exemple, si le modèle calcule un équivalent en eau de 50 mm et que la superficie du couvert de neige est de 50%, alors l'équivalent en eau véritable devrait être de 100 mm où il y a présence de neige.

5.6 Application de la méthode sur un modèle non calibré

L'essai précédent fut réalisé à partir d'un modèle optimalement calibré selon les simulations effectuées. Nous voulions vérifier si cette méthode s'appliquait également à des modèles non calibrés. Les hydrogrammes n'ont pas été incorporés au rapport. Ils ont été jugés superflus. L'analyse a été faite au niveau des indices de comparaison et de la différence des lames d'eau mensuelles (tableaux 5.6 et 5.7). Le modèle non calibré diffère du modèle calibré par le seuil de transformation pluie-neige. Une valeur de + 2 °C lui a été assignée, contrairement à 0 °C pour le modèle calibré. Les résultats sont évidemment de moins bonne qualité que ceux du modèle calibré.

Le modèle calibré présente des résultats supérieurs au modèle non calibré. En fait, les débits moyens mensuels calculés à partir du modèle calibré se rapprochent davantage des débits moyens mensuels observés et ce surtout au niveau de la fonte printanière. Les différences de lames d'eau mensuelles entre les débits calculés et observés confirment cette remarque. Ainsi, les différences de lames d'eau mensuelles entre les débits observés et les débits calculés par le modèle calibré (tableau 5.5) sont plus faibles comparativement aux débits calculés par un modèle non calibré (tableau 5.7). Toutefois, ce dernier réagit mieux dans les derniers mois du printemps. De plus, la somme du carré des pourcentages, la somme du carré des différences, l'erreur relative au niveau du volume de débit journalier, l'erreur relative au niveau du cumul des débits journaliers et l'écart quadratique moyen de l'estimation sont plus faibles pour le modèle calibré (tableau 5.4) comparativement au modèle non calibré (tableau 5.6).

TABLEAU 5.6. RESULTATS DE L'INTEGRATION DE DONNEES SATELLITES AU NIVEAU D'UN MODELE NON CALIBRE

	Avant correction	Après correction
Somme du carré des pourcentages	0,24415	0,23926
Somme du carré des différences	262,152	207,122
Débit journalier observé maximum	2 640,00	2 640,00
Débit journalier calculé maximum	2 977,21	2 870,06
Erreur de Nash	0,94	0,95
Coefficient de corrélation	0,99	0,99
Erreur relative au niveau des volumes de débit journalier	- 24,002	- 26,253
Erreur relative au niveau des volumes cumulés de débit journalier	- 8,084	- 12,200
Ecart quadratique moyen de l'estimation (m ³)	1 228 159,60	1 113 378,30

TABLEAU 5.7. DIFFERENCE DES LAMES D'EAU MENSUELLES (mm) ENTRE LE DEBIT OBSERVE (Q_o) ET LE DEBIT CALCULE (Q_c) AVANT ET APRES CORRECTION (MISE A JOUR)

	Avant correction	Après correction
Janvier	- 5,049	- 5,049
Février	- 3,608	- 3,608
Mars	- 10,230	- 10,230
Avril	- 7,343	- 7,343
Mai	6,195	0,844
Juin	5,094	2,804
Juillet	—	—
Août	—	—
Septembre	—	—
Octobre	—	—
Novembre	—	—
Décembre	—	—
ANNUEL	- 14,990	- 22,683

On peut noter une amélioration des résultats de la simulation non calibrée après la mise à jour avec l'aide de données provenant du traitement des images satellites. Une telle mise à jour permet d'améliorer la valeur de la plupart des indices de comparaison (tableau 5.6). Une amélioration des différences de lames d'eau mensuelles est également visible.

Ces résultats tendent à confirmer l'hypothèse d'une amélioration possible d'un modèle tel que CEQUEAU, peu importe son ajustement. Cette affirmation s'applique au niveau du bassin présent et de la période utilisée. Des analyses supplémentaires sur d'autres bassins et à d'autres périodes permettront de confirmer cette hypothèse.

5.7 Conclusion

Il semble que l'introduction des données de couvert nival issues des images satellites peut s'avérer une technique intéressante et originale pour la mise à jour de modèles hydrologiques. La méthodologie développée montre également la supériorité de la télédétection sur les relevés nivométriques. Toutefois, cette affirmation nécessite une analyse complémentaire à partir d'autres bassins versants et d'autres années. Le fait que la télédétection puisse être supérieure aux données de lignes de neige implique de nombreuses possibilités pour l'avenir. Une des premières conséquences, serait l'utilisation conjointe de l'imagerie satellite et des relevés nivométriques. De plus, les données issues du traitement des images satellites pourraient servir pour les périodes où aucune donnée nivométrique n'est disponible. Un système utilisant l'imagerie satellite aurait plusieurs avantages: rapidité d'obtention des données (utilisation en temps réel), fréquence d'observation accrue à toutes latitudes et toutes régions, représentativité spatiale et temporelle, absence de risques reliés à l'échantillonnage, etc... Toutefois, certains facteurs peuvent limiter un tel système: impossibilité de déterminer l'équivalent-eau du couvert nival, limitations liées à la nébulosité, etc...

L'utilisation prochaine des capteurs micro-ondes et en particulier les systèmes radars (micro-ondes actifs) améliorera grandement la méthode éla-

borée. Elle éliminera la majorité des contraintes actuelles pour l'utilisation de la technique. Une telle combinaison permettra de suivre la distribution spatiale et temporelle du couvert nival et de son équivalent-eau sans égard aux conditions climatiques et à l'heure du jour.

CHAPITRE 6

SUGGESTIONS POUR L'AVENIR

6. SUGGESTIONS POUR L'AVENIR

Wiesnet (1980) a déjà élaboré une liste d'aspects à développer dans l'avenir, liste qui fut présentée au chapitre 2. Ces axes de recherche concernaient la recherche générale actuelle dans le domaine de l'utilisation de la télédétection en hydrologie. Dans la présente section, l'emphase est portée sur les possibilités d'amélioration du système développé à partir de SCANIQ et du modèle CEQUEAU. Les suggestions font également mention de certaines erreurs à éviter.

6.1 Suggestions au niveau du cadre de l'étude

Il serait très intéressant de réaliser une étude plus détaillée sur un bassin de taille plus petite que le bassin versant de la rivière Nottaway. Ceci afin de suivre plus efficacement la progression et le phénomène de la fonte. Le bassin de la rivière Nottaway était nettement trop grand pour un tel type d'étude. Toutefois, son choix s'est avéré intéressant pour diverses raisons. Il est sans aucun doute, un des plus grands bassins simulés avec l'aide de la télédétection et sa taille ainsi que sa localisation ont nécessité la recherche de solutions à plus d'un problème. Ces solutions pourront simplifier la tâche des chercheurs dans l'avenir. Toutefois, le choix de la région d'étude devrait se porter sur un petit bassin où les images satellites seraient comparées avec des photographies aériennes et des données mesurées au sol à partir de stations de contrôle. Ce bassin devrait posséder un réseau hydrométéorologique et nivométrique dense. Le bassin devrait se situer à l'intérieur d'une même zone UTM et la région concernée devrait être facilement accessible pour le contrôle des stations témoins. La présence de telles stations est requise pour la comparaison et la calibration des images satellites. Des essais aéroportés avec une caméra multibande et d'autres types de capteurs pourraient s'avérer intéressants pour déterminer le potentiel des méthodes à l'essai et permettre l'intercomparaison des systèmes.

6.2 Suggestions au niveau de SCANIQ

En général, ce système d'analyse numérique répond bien aux divers besoins de la méthode. Toutefois, il serait important d'incorporer une imprimante photographique pour obtenir rapidement des copies analogiques des images traitées et une imprimante rapide afin d'obtenir rapidement les statistiques de base calculées sur chacun des carreaux SCANIQ. Cet aspect est de première importance au niveau de la sortie des données statistiques. Présentement cette opération prend près de cinq heures à réaliser, ce qui n'est pas de mise au niveau opérationnel. Une nouvelle procédure devrait également être développée afin d'afficher les résultats sous forme de tableaux ou de matrices binaires où le sol découvert serait représenté par la valeur "0" et le couvert nival par la valeur "1". Ces valeurs pourraient aisément être disposées sous forme de matrices adoptant la forme du bassin afin de permettre une observation immédiate de la limite nivale, ce qui faciliterait grandement la compilation des résultats. Il serait intéressant d'imprimer les résultats au niveau du bassin seul, ce qui n'a pas été fait au niveau de l'étude bien que le système SCANIQ le permette. Cette étape serait aisément réalisée avec l'aide d'une image comportant un masque des contours du bassin. Une méthodologie spéciale pourrait être développée afin de permettre le calcul d'une valeur unique de superficie ou de fraction nivale à l'intérieur de SCANIQ, puisque de nombreux types de modèles hydrologiques ne requièrent pas la division du bassin en carreaux ou éléments séparés.

Un assouplissement des programmes à l'intérieur de SCANIQ serait de mise afin de simplifier et de permettre le traitement des images satellites de type NOAA, TYROS, GOES ou NIMBUS. Actuellement, le système est établi pour traiter principalement l'imagerie Landsat.

6.3 Suggestions au niveau du modèle CEQUEAU

Le cadre du modèle CEQUEAU est déjà bien établi, mais son mode d'utilisation demeure un point d'importance à considérer. De plus, il serait

important que la réalisation de la banque de données physiographiques soit faite conformément à la grille UTM ou SCANIQ. Ce qui n'a pas été fait pour la banque de données du bassin de la rivière Nottaway.

Une autre suggestion intéressante consisterait à développer une technique permettant l'intégration directe des données provenant de SCANIQ dans le modèle, à titre de données de base.

Toutefois, un tel genre d'étude nécessiterait une recherche prolongée et une modification majeure de la sous-routine de fonte.

6.4 Suggestions au niveau de la procédure de mise à jour

L'application de la méthodologie développée pour la correction des stocks de neige a porté fruit lorsque ces derniers étaient surestimés. Il faudrait maintenant porter notre attention sur le comportement de la correction lorsque les stocks de neige sont sous-estimés. Pour ce faire, il faudrait tester la méthodologie soumise à la section 5.4 ou bien mettre au point une procédure globale applicable à tous les cas si les résultats ne s'avèrent pas concluants.

Des corrections supplémentaires pourraient être appliquées afin de déterminer le comportement de mises à jour multiples ou successives sur les résultats de la simulation.

CHAPITRE 7

USAGE OPERATIONNEL

7. USAGE OPERATIONNEL

Le but ultime de cette étude est de discuter les possibilités d'étendre l'application de la méthodologie, développée au cours de la présente étude, au stade opérationnel, au même titre que la gestion d'un réseau nivométrique. Un tel système peut être envisagé dans un proche avenir puisque la technologie et les infrastructures sont actuellement à portée de la main.

Une description sommaire des différentes étapes d'un traitement opérationnel des images satellites est présentée à la figure 7.1:

1. création de l'image satellite: cette étape est actuellement opérationnelle. La fréquence de passage dépend du satellite utilisé (tableau 2.1). Ainsi, NOAA et TYROS permettent la création d'une image par jour dans le visible et de deux dans l'infrarouge thermique. Le satellite SMS/GOES produit même une image à toutes les demi-heures;
2. transmission des images: les images satellites sont retransmises de la plate-forme satellite à la station réceptrice au sol sous forme de code binaire. Les images sont ensuite reconstituées sous forme d'images numériques. Cette étape est actuellement opérationnelle;
3. retransmission des images numériques au centre de traitement: cette étape est actuellement possible et son application est directe et peut s'effectuer en temps réel dès que l'image satellite a été créée à la station réceptrice au sol. Une telle retransmission des images numériques peut s'effectuer par voie des télécommunications. La retransmission des données sous forme numérique possède un avantage certain sur la procédure consistant à transformer l'image numérique dans un format analogique pour l'envoi au centre de traitement. Un tel procédé nécessite la retransformation éventuelle sous forme numérique au centre d'analyse selon le type

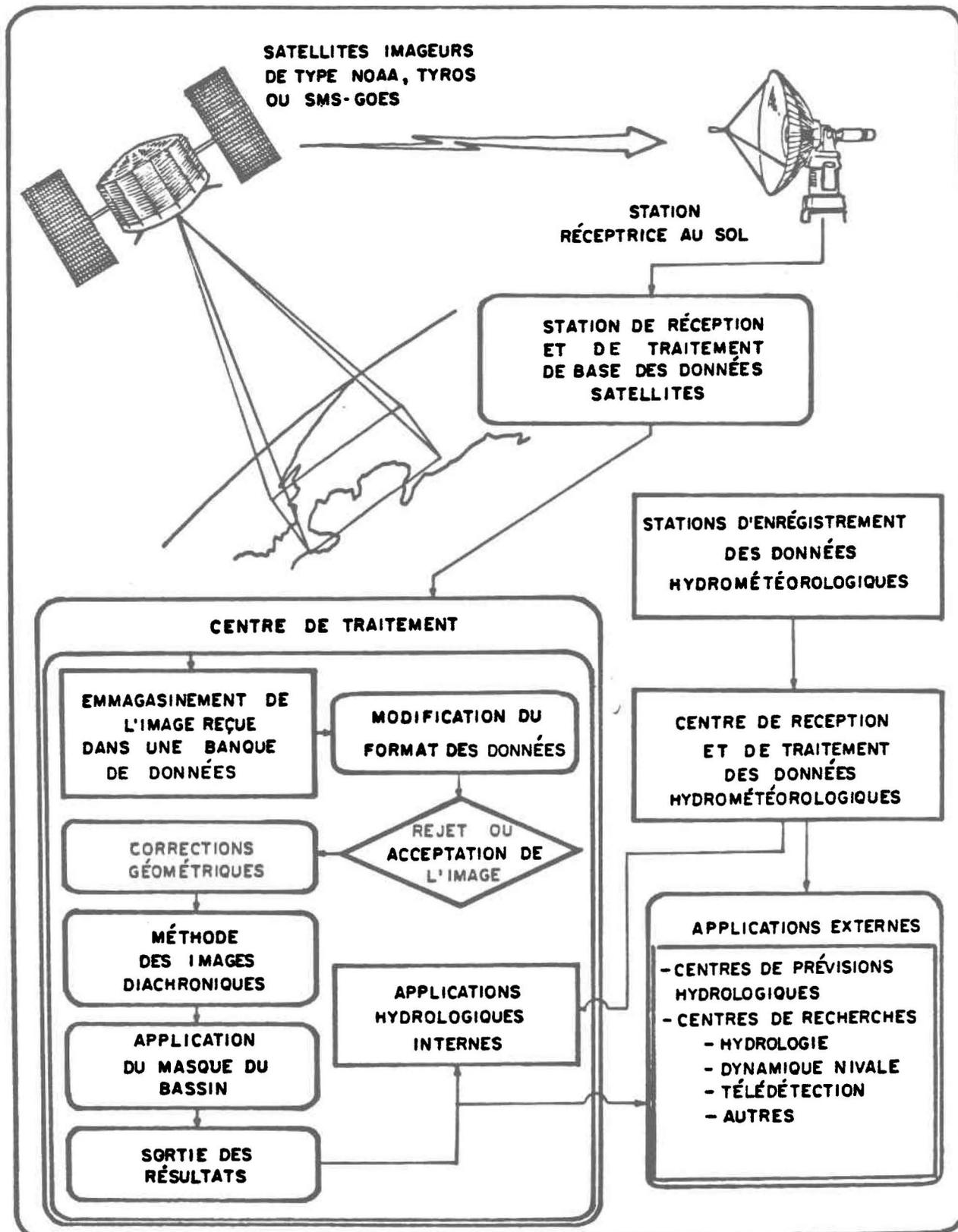


Figure 7.1. Organigramme d'un système de traitements opérationnels des images satellites pour des applications hydrologiques et de recherche .

d'étude désiré, ce qui résulte en une perte d'informations au niveau de l'image;

4. traitement au niveau du centre d'analyse: cette étape nécessite la mise au point d'une infrastructure particulière pour que l'usage opérationnel soit rendu possible. Toutefois, la technologie est actuellement disponible pour rendre cette étape possible. Une première condition concerne la vocation du centre de traitement d'images. Ce facteur est déterminant en raison des coûts associés à l'achat et au fonctionnement d'un système d'analyse numérique tel que SCANIQ. La centralisation des activités de traitement peut s'avérer capitale si elle permet aux opérations d'être économiquement rentables. Une telle responsabilité pourrait incomber à un service privé ou à un organisme gouvernemental pouvant opérer de la même façon qu'un service météorologique:

- les données reçues pourraient être emmagasinées au niveau d'une banque de données de transition. L'existence d'une telle banque de données servirait à conserver les données entre le moment de leur réception et de leur traitement;
- les données pourraient être de type NOAA, TYROS ou GOES si de grandes surfaces doivent être traitées. Ainsi, une telle image peut couvrir la presque totalité du Québec;
- le choix du traitement ou du rejet de l'image peut être effectué à ce niveau, dépendamment de la qualité de celle-ci et du couvert nuageux observé;
- la correction géométrique s'avère une opération nécessaire pour chaque image reçue. Cette opération est la plus longue du traitement. Une procédure de correction géométrique entièrement automatisée serait un atout précieux. Cette dernière pourrait être insérée au niveau de la station réceptrice ou du centre de

traitement. L'opération peut s'avérer plus ou moins longue dépendant de la taille de l'image à traiter;

- un masque représentant chacun des bassins versants requis pourrait être inséré au départ. Il servirait pour toutes les analyses subséquentes;
- l'opération de discrimination du couvert nival peut s'opérer rapidement selon la méthodologie développée au niveau de cette étude. Une même image de référence pourrait servir pour toutes les analyses subséquentes;
- les résultats devraient être imprimés sous la forme de cartes ou de matrices binaires pour chacun des bassins versants analysés. Les résultats pourraient être générés sous la forme de carreaux d'un ou de dix kilomètres de côté. La génération de valeurs uniques pour le bassin pourrait également constituer un choix éventuel;
- les résultats obtenus par un tel système pourraient être expédiés et utilisés par divers centres de prévisions hydrologiques ou par certains organismes tels les universités et les centres de recherche.

La génération d'une valeur unique de superficie nivale sur le bassin versant permettrait l'impression des résultats concernant plusieurs bassins hydrographiques sur un même tableau.

Le traitement simultané de plusieurs bassins ne poserait aucun problème. Une seule correction géométrique peut suffire pour une image couverte par plusieurs bassins versants. Il en serait de même pour le traitement simultané de plusieurs bassins. Les résultats spécifiques à chacun des bassins pourraient être obtenus par l'utilisation d'un ensemble de masques ou d'un super masque comportant les contours de chaque bassin versant. La

création d'un tel masque peut s'avérer quelque peu ardue, mais une fois réalisé et mémorisé, il pourrait servir pour le traitement de multiples images d'une même région.

Un bassin versant situé sur deux réseaux U.T.M. pose un problème au niveau opérationnel. Il est toujours possible d'appliquer la méthode utilisée pour la rivière Nottaway, qui consiste à interpoler le fuseau U.T.M. caractérisant la plus grande partie du bassin versant sur la partie débordant sur le fuseau voisin. Toutefois, il est important de vérifier si l'erreur probable, associée à cette interpolation, ne dépasse pas une certaine valeur, sinon la partie interpolée pourrait être distorsionnée par rapport au reste de l'image.

Le traitement de plusieurs bassins versants situés en tout ou en partie à l'intérieur d'un même fuseau U.T.M. pourrait même être réalisé d'un seul coup. La première étape consisterait à déterminer les bassins versants dont plus de 50% de la superficie est situé sur le fuseau U.T.M. considéré. La deuxième étape consisterait à interpoler le fuseau U.T.M. sur les portions de ces bassins versants situées sur les fuseaux U.T.M. voisins. Par la suite, le traitement pourrait être appliqué d'un seul coup sur tous les bassins considérés sur le fuseau. La figure 7.2 présente un tel scénario. Ainsi, la première partie de cette figure affiche la position de la grille U.T.M. sur le fuseau 18 et les parties des sous-bassins situées sur les fuseaux voisins. La deuxième partie de la figure présente les bassins versants considérés sur le fuseau 18 et les parties interpolées sur les fuseaux 17 et 19.

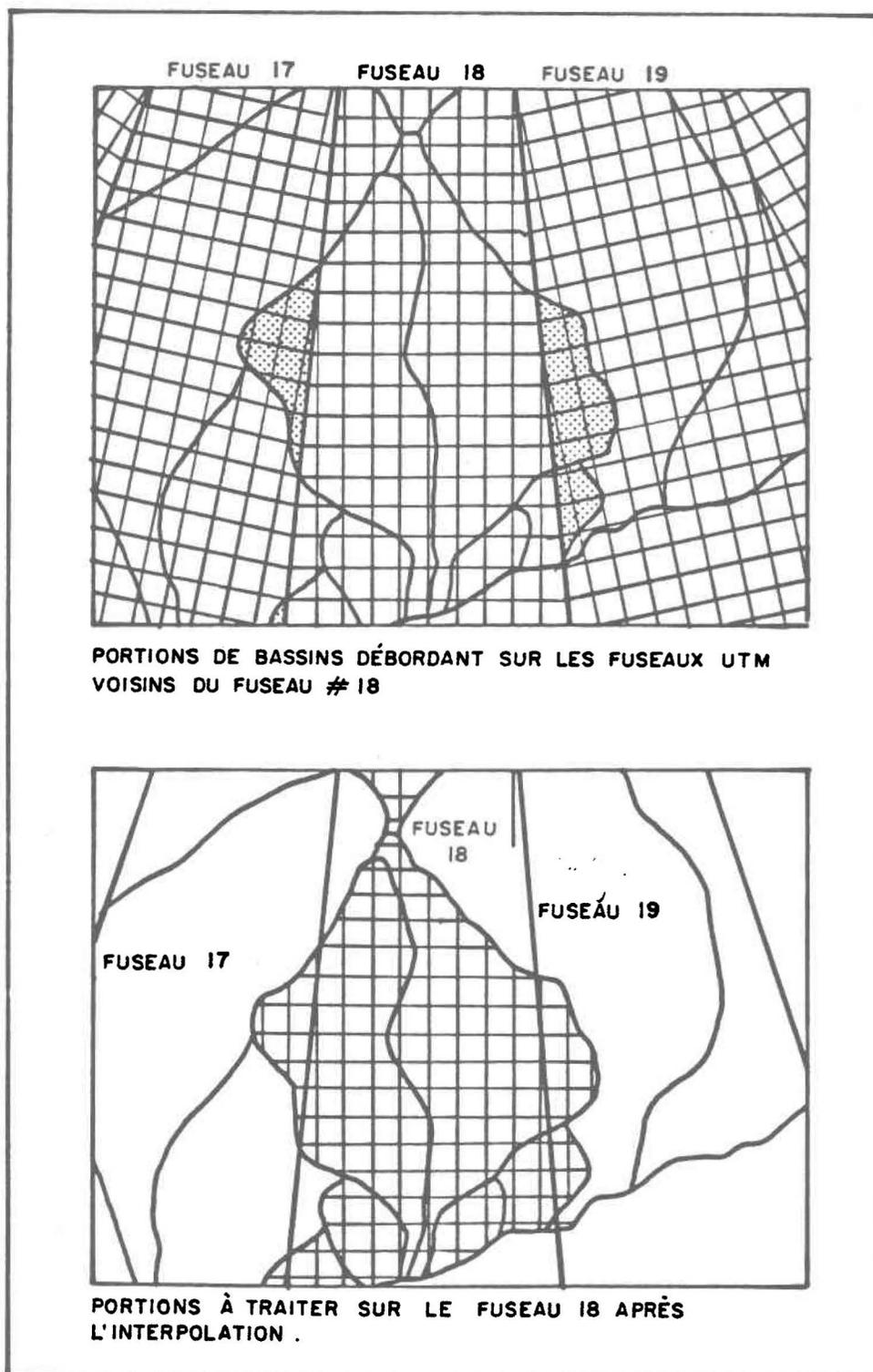


Figure 7.2 . Procédure d'interpolations au niveau des fuseaux UTM pour le traitement opérationnel de plusieurs bassins versants .

CONCLUSION

CONCLUSION

L'utilisation des systèmes de télédétection en hydrologie remonte déjà à plusieurs années. Leurs applications se sont faites principalement dans l'ouest canadien, l'ouest américain et en Europe, à l'exception de quelques bassins versants de l'est de l'Amérique du Nord dont celui de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick. Au niveau du Québec, le sujet s'avère peu exploité, à l'exception de certains travaux réalisés par Morin et al. (1979) et Fortin et al. (1979). C'est sur cette région que le choix de la zone d'étude fut portée. Certaines caractéristiques ont ajouté aux difficultés du traitement des images et des simulations hydrologiques subséquentes; un couvert forestier continu et vaste, une topographie relativement douce, la morphométrie du bassin versant ainsi que son emplacement.

La voie empruntée a montré des résultats pour les moins encourageants, mais certains points ont causé une certaine surprise. Ainsi, l'utilisation de lignes de neige pour la mise à jour du modèle CEQUEAU n'améliore pas du tout l'hydrogramme calculé, mais le détériore nettement. Ceci a mis en lumière la non-représentativité des données ponctuelles à titre d'index du couvert nival dans le cas du bassin de la rivière Nottaway. Toutefois, ce facteur peut s'expliquer par la faible densité du réseau nivométrique qui constitue une caractéristique générale des bassins versants situés dans le moyen et grand nord du Québec.

L'introduction de données de superficie du couvert nival issues d'images satellites montre un potentiel intéressant pour la mise à jour des résultats de simulation, malgré l'incapacité de ces données à fournir une quelconque valeur d'équivalent-eau. Cette lacune est compensée par le caractère spatio-temporel des données satellites. Des améliorations de l'ordre de 2 à 3% ont pu être détectées au niveau de l'erreur absolue journalière exprimée en pourcentage du débit journalier observé pendant la crue printanière. Ceci implique un accroissement de la précision du modèle et une meilleure estimation au niveau des prévisions. Une mise à jour plus

fréquente selon la disponibilité des images satellites sans couverture nuageuse pourrait améliorer grandement les résultats des simulations pendant la période de fonte. Plusieurs modes de correction des résultats de simulation de la fonte nivale sont possibles, mais notre choix s'est porté sur une méthode de mise à jour utilisant des pourcentages classés de superficie nivale. Cette procédure a permis de générer les meilleurs résultats. Ce type de correction permet également d'améliorer la distribution de l'équivalent-eau telle que calculée par le modèle CEQUEAU. Toutefois, ce type de correction n'a été testé que lorsque les stocks de neige étaient surestimés par la sous-routine de fonte du modèle CEQUEAU. Un type de correction légèrement différent serait nécessaire dans le cas d'un stock de neige sousestimé par le modèle, mais ce dernier n'a pu être testé lors de notre étude. La méthodologie pourrait correspondre à celle proposée dans ce rapport ou constituer une approche différente, mais cette hypothèse reste à vérifier.

Les résultats positifs obtenus impliquent une utilisation potentielle de la télédétection au niveau des grands bassins forestiers où la végétation est de type "taïga". En fait, ce domaine forestier est caractérisé par une densité d'arbres assez faible qui permet l'observation partielle de la neige au sol. De plus, la méthode élaborée semble applicable à des bassins hydrographiques possédant des réseaux hydrométéorologiques et nivométriques de faible densité. Toutefois, malgré un succès non négligeable, il serait intéressant de chercher de nouvelles voies ou de tenter d'améliorer celle mise au point au niveau de notre étude. D'autres méthodes pourraient peut-être afficher des résultats supérieurs à ceux présentés dans ce mémoire.

L'étude a également confirmé l'inefficacité des capteurs visibles et infrarouges à déterminer l'épaisseur et l'équivalent-eau du couvert nival. Cette relation peu prometteuse était limitée au départ par l'hétérogénéité de la surface et par le couvert forestier.

En conclusion, la méthodologie développée montre un fort potentiel pour l'usage opérationnel au niveau de la modélisation et des prévisions

hydrologiques. Certains facteurs méritent des études et des développements complémentaires afin de rendre cette situation possible. Les données satellites sont présentement disponibles en temps réel sous la forme d'images numériques. Seule la constitution d'un lien entre la station réceptrice au sol et le centre de traitement doit être réalisée conjointement avec la mise sur pied des éléments de base du système d'analyse numérique.

Un tel système, combiné aux réseaux nivométriques actuels, permettra probablement d'améliorer la précision et d'amoindrir les coûts. Cette tendance sera d'autant plus marquée lorsque les capteurs micro-ondes actifs seront utilisables opérationnellement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ALGAZI, V.R. and SUK, M. (1975). An all digital approach to snow areal mapping and snow modeling. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 249-257.
- ANDERSON, E. (1972). Techniques for predicting snow cover runoff. Banff Symposium of the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept. 1972, Tome 2, 107(2): 841-863.
- AUDET, H. (1981). Description du système SCANIQ. Ministère des Terres et Forêts. Télédétection au Québec, 18: 47.
- AUL, J.S. and FFOLLIOTT, P.F. (1975). Use of areal snow cover measurements from ERTS-1 imagery in snowmelt runoff relationships in Arizona. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 103-112.
- BADGLEY, P.C., MILOY, L. and CHILDS, L. (1969). Oceans from space. Proc. of a Symposium on the Status of Knowledge, Critical Research Needs, and Potential Research Facilities Relating to the Study of the Oceans from Space, Houston, Texas, Gulf Publ. Co., 234 p.
- BAKER, M.B. and CARDER, D.R. (1977). Comparative evaluations of 4 snow models. Proc. of the 45th Annual Meeting, Western Snow Conference, Albuquerque, New-Mexico, April 18-21, p. 58-62.

BARNES, J.C. and BOWLEY, C.J. (1980). The evolution of satellite snow mapping with emphasis on the use of Landsat in the snow ASVT study areas. WOASSO (Workshop on operational application of satellite snow-cover observations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, NASA Conf. Publ. 2116, p. 1-19.

_____ and SMALLWOOD, M.D. (1975). Synopsis of current snow mapping techniques with emphasis on the application of near infrared data. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 199-214.

_____ and BOWLEY, C.J. (1974a). Handbook of techniques for satellite snow mapping. Prepared for NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771. Envir. Research and Tech. Document no 0407-A, 95 p.

_____, BOWLEY, C.J. and SIMMES, D.A. (1974b). Snow studies using visible and infrared measurements from Earth Satellites. In: Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, by H.S. Santeford and H.L. Smith, National Academy of Sciences (ed.), p. 477-486.

_____ and BOWLEY, C.J. (1968). Operational guide for mapping snow cover from satellite photography. Allied Res. Ass. Inc., Virginia Road, Concord, Mass, 01742, no 8648-F, 116 p.

BARTOLUCCI, L.A., HOFFER, R.M. and LUTHER, S.G. (1975). Snowcover mapping by machine processing of Skylab and Landsat MSS data. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 295-312.

- BERGEN, J.D. (1975). A possible relation of albedo to the density and grain size of natural snowcover. Water Resources Research, 11(5): 745-746.
- BISHOP, R. and WATT, W.E. (1975). Simflo - A continuous streamflow simulation model. Comptes rendus du Symposium Canadien d'Hydrologie-75, Winnipeg, 11-14 août, p. 575-584.
- BOWLEY, C.J., BARNES, J.C. and RANGO, A. (1981). Applications Systems Verification and transfer Project. Volume VIII: Satellite Snow Mapping and Runoff Prediction Handbook. NASA Tech. Pap. 1829, 88 p.
- _____ and BARNES, J.C. (1979). Satellite snow mapping techniques with emphasis on the use of Landsat. W.T. Pecora Memorial Symp. on Remote Sensing, Proc. of the 5th Annual held in Sioux Falls, S.D., June 10-15, p. 158-164.
- BROWN, A.J., HANNAFORD, J.F. and HALL, R.L. (1980). Application of snow-covered area to runoff forecasting in selected basins of the Sierra Nevada, Ca. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 185-200.
- _____ and HANNAFORD, J.F. (1975). Interpretation of snowcover from satellite imagery for use in water supply forecasts in the Sierra Nevada. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 39-52.
- BROWN, D.M., MCKAY, G.A. and CHAPMAN, L.J. (1968). The climate of southern Ontario. Dept. of Transport, Meteo. Branch, Climato. Studies, no 5, 50 p.

- CASTRUCCIO, P.A., LOATS, H.L., LLOYD, D. and NEWMAN, P.A.B. (1980). Cost/benefit analysis for the operational applications of satellite snowcover observations. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 239-253.
- CHANG, A.T.C., FORSTER, J.L., HALL, D.K. and RANGO, A. (1980). Monitoring snowpack properties by passive microwave sensors on board of aircraft and satellites. Microwave Remote Sensing of Snowpack Properties. Proc. of a Workshop sponsored by the National Aeronautic and Space Administration (NASA), held at Fort Collins, Co., May 20-22, Rango A. (ed.), NASA Conf. no 2153, p. 235-249.
- CHARBONNEAU, R., LARDEAU, J.P. and OBLED, C. (1981). Problems of modeling a high mountainous drainage basin with predominant snow yields. Bull. Sc. Hydro., 26(4): 345-361.
- _____, MORIN, G. et FORTIN, J.P. (1979). Effet du pourcentage et de la distribution des surfaces boisées sur les crues de fonte de neige, Journal of Hydrology, 41(1-2): 93-103.
- _____, FORTIN, J.P. and MORIN, G. (1977). The CEQUEAU model: Description and examples of its use in problems related to water resource management. Bull. Sc. Hydro., 23(1): 193-202.
- CHATERS, G.C. and SUOMI, V.E. (1975). The applications of McIDAS. IEEE Trans. on Geoscience Electronics, GE-13: 137-146.
- DAHL, J.B. and ODEGAARD, H. (1970). Areal measurement of water equivalent of snow deposits by means of natural radioactivity in the ground. In: Isotope Hydrology 70, Int. Atomic Energy A8, Vienna, Austria, p. 191-210.

- DALLAM, W.C. and FOSTER, J. (1975). Digital snow mapping techniques using Landsat data and General Electric Image-100 system. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 259-278.
- DEY, B., GREGORY, A.F. and MOORE, H. (1979). Snow cover, snowmelt and runoff in the Mackenzie basin. Compte rendu du Symposium Canadien d'Hydrologie-79, Vancouver, 10-11 mai, p. 449-460.
- DMITRIEV, A.V., KOGAN, R.M., NIKIFOROV, M.B. and FRIDMAN, Sh.D. (1971). Aircraft gamma ray survey of snowcover, Nordic Hydrology, 11(1): 47-56.
- DOUGLAS, R.J.W. (1972). Géologie et ressources minérales du Canada. Partie A. Série de la géologie économique no 1, Comm. géol. du Canada, 408 p.
- DUNNE, T., PRICE, A.G. and COLBECK, S.C. (1976). Generation of runoff from subarctic snowpacks, Water Resources Research, 12(4): 677-685.
- ENDESTRØL, G.O. (1980). Principle and method for measurement of snow water equivalent by detection of natural gamma radiation. Bull. Sci. Hydro., 25(1): 77-93.
- ESCHNER, A.R., LILLESAND, T.M. and MEISNER, D.E. (1977). Satellite remote sensing of snowcover in the Adirondack Mountains. Final report to the Nat. Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Natl. Env. Sat. Serv., State Univ. of N.Y., 86 p.
- EVANS, W.E. (1974). Progress in measuring snow cover from ERTS imagery using special viewing/measurement equipment. Western Snow Conference, Proc. of the 42th Symposium, p. 37-45.

- FEDERER, C.A., PIERCE, R.S. and HORNBECK, J.W. (1973). Snow management seems unlikely in northeastern forests. Proc. of the 1973 Eastern Snow Conference, p. 102-113.
- _____ and LEONARD, R.E. (1971). Snowmelt in hardwood forests. Proc. of the 28th Annual Eastern Snow Conference held in Fredericton, N.B., Feb. 4-5, p. 95-109.
- FERGUSON, H.L. and LAPCZAKS, S. (1977). Satellite imagery analysis of snow cover in the Saint John and Souris River basins. Presented to the 4th Symposium on Remote Sensing, Québec, mai, p. 126-142.
- FITZGIBBON, J.E. and DUNNE, T. (1979). Characteristics of subarctic snow-cover. Bull. Sci. Hydro., 24(4): 465-476.
- FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., MORIN, G., SOCHANSKA, W. et RASSAM, J.C. (1979). Comparaison du retrait du manteau nival calculé par le modèle hydrologique CEQUEAU au retrait estimé à l'aide des images du satellite ESSA-8. Comptes rendus du Symposium Canadien d'Hydrologie-79, tenu à Vancouver, 10-11 mai, Comité associé d'hydrologie, p. 424-444.
- GARSTKA, W.V., LOVE, L.D. and GOODELL, B.C. (1958). Factors affecting snowmelt and streamflow. USDI Bureau of Reclamation and USDA Forest Serv. 1946-53, Coop. Snow Invest., U.S. Gov. Print. Off., Wash. D.C., 189 p.
- GIRARD, G., MORIN, G. et CHARBONNEAU, R. (1973). Utilisation d'un modèle de fonte à mailles physiographiques. Bull. Sci. Hydro., 18(3): 27-32.
- GIRD, R.S. (1980). Snow extent measurements from geostationary satellites using an interactive computer system. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 255-265.

- GOODISON, B.E., WATERMAN, S.E. and LANGHAM, E.J. (1980). Application of synthetic aperture radar data to snow cover monitoring. 6th Canadian Symp. on Remote Sensing, Halifax, N.S., May 21-23, p. 263-271.
- GRASTY, R.L. and HOLMAN, P.B. (1972). The measurement of snow equivalent using natural gamma radiation. Proc. of the first Canadian Symposium of Remote Sensing, Ottawa, Feb., p. 633-645.
- HAEFNER, H. (1977). Snowcover monitoring from satellite data under European conditions. In: Proc. of Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology, Ispra-Courses, Part b, Ispra, Italy, p. 339.
- HALL, D.K., CHANG, A.T.C., FOSTER, J.L., RANGO, A. and SCHMUGGE, T. (1978). Passive microwave studies of snowpack properties. Otter Crest, Proc. of the 46th Annual Meeting Western Snow Conference held in Otter Crest, Oregon, p. 33-39.
- HANNAFORD, J.F. and HALL, R.L. (1980). Application of satellite imagery to hydrologic modeling of snowmelt runoff in the Southern Sierra Nevada. WOASSU (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 201-221.
- _____ and BROWN, A.J. (1979). Application of snow cover area to runoff forecasting in the Sierra Nevada, Ca. 5th annual W.T. Pecora Memorial Symposium on Remote sensing, Sioux Falls, S.D., June 10-15, p. 165-172.
- HANSEN, P.L. (1975). Experiences in snowcover mapping in the Saint John River Basin. Third Canadian Symp. on Remote Sensing, Edmonton, Al., p. 315-322.

- HAWLEY, M.E., McCUEN, R.H. and RANGO, A. (1980). Comparaison of models for forecasting snowmelt runoff volumes. Water Resources Bull., 16(5): 914-920.
- HOFER, R. and FULLER, G. (1977). A study of snowmelt from Winnipeg to the Arctic Islands using ERTS photography. 4th Canadian Symposium on Remote Sensing, Québec, May, p. 143-148.
- HOWARTH, P.J. and WOO, M.K. (1975). The influence of scale in remote sensing of snowcover. Proc. of the 23th annual Eastern Snow Conference, Manchester, N.H., p. 90-107.
- IBBITT, R.P. (1973). Representative data sets for comparative testing of conceptual catchment models. UNESCO, Tech. Papers.
- ITTEN, K.I. (1975). Approaches to digital snow mapping with Landsat-1 data. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 236-249.
- JEFFREY, W.W. (1968). Snow hydrology in the forest environment. In: "Snow Hydrology", Proc. of a Workshop Seminar sponsored by the Canadian National Committee for the International Hydrological Decade and by the University of New-Brunswick, Feb. 28-29, p. 1-17.
- KATIBAH, E.F. (1975). Operational use of Landsat imagery for the estimation of snow areal extent. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 129-143.

- KHORRAM, S. (1977). Use of Landsat multispectral imagery in estimating snow areal extent and snow water content cost-effectively. 1977 Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, Proc., W. Lafayette, University of California, Berkeley, June 21-23, p. 218-227.
- KITE, G.W. (1975). Performance of two deterministic hydrological models. In: Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems (Proc. of Bratislava Symp., sept. 75), IASH Publ. no 115, p. 136-142.
- KUNZI, K.F. and STAELIN, D.H. (1975). Measurements of snow cover over land with the Nimbus-5 microwave spectrometer. Proc. of the 10th International Symposium of Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, Oct. 6-10, 2: 1245-1253.
- LANDALE, A.L. and GILL, D. (1972). Differences in volume of surface runoff during the snowmelt period: Yellowknife Northwest Territories. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 927-941.
- LAUER, D.T. and DRAEGER, W.C. (1974). Techniques for determining areal extent of snow in the Sierra Nevada Mountains using high altitude aircraft and spacecraft imagery. In: Advanced Concept and techniques in the Study of Snow and Ice Resources, by Santeford H.S. et H.L. Smith, National Academy of Sciences (ed.), p. 532-540.
- LEAF, C.F. and HAEFNER, A.D. (1971). A model for updating streamflow forecasts based on areal snowcover and a precipitation index. Proc. of the 39th Annual Meeting Western Snow Conference, Billings, Montana, April 20-22, p. 9-15.
- _____. (1969). Aerial photographs for operational streamflow forecasting in the Colorado Rockies. Proc. of the 37th Annual Meeting Western Snow Conference, Salt Lake City, Utah, p. 19-28.

LEMMELA, R. and KUUSISTO, E. (1974). Evaporation from snowcover. Bull. Sci. Hydro., 19(4): 541-548.

LOGAN, L.A. (1972). Basin wide water equivalent estimation from snowpack depth measurements. In: Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 864-884.

LOIJENS, H.S. (1975). Snowcover/runoff models and remote sensing. Water Resources Branch, Env. Canada, Ottawa, 12 p.

LUTHER, S.G., BARTOLUCCI, L.A. and HOFFER, R.M. (1975). Snowcover monitoring by machine processing of multispectral Landsat MSS data. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 279-294.

MARTINEC, J. (1980a). Hydrological basin models. Remote Sensing Application in Agricultural and Hydrological, A.A. Balkema (ed.), Rotterdam, Netherlands, p. 447-459.

_____. (1980b). Limitations in hydrological interpretations of the snow coverage. Nordic Hydrology, 11(5): 209-220.

_____ and RANGO, A. (1980). Discharge forecasts in mountain basins based on satellite snow cover. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 223-232.

_____. (1975). Snowmelt-runoff model for streamflow forecasts. Nordic Hydrology, 6(3): 145-154.

- _____. (1972). Evaluation of air photos for snowmelt runoff forecasts. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept. 1972, Tome 2, 107(2): 915-926.
- _____. (1970). Study of snowmelt runoff process in two representative watershed with different elevation range. Symp. of Wellington, IASH Publ. no 96, p. 29-39.
- _____. (1960). The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting. AISH, Assemblée générale de Helsinki, 25-7 au 6-8, Publ. no 51, p. 468-477.
- McGINNIS, D.F., PRITCHARD, J.A. and WIESNET, D.N. (1975). Determination of snow depth and snow extent from NOAA-2 Satellite Very High Resolution Radiometer data, Water Resources Res., 11(6): 897-902.
- McKAY, G.A. (1968). Problems of measuring and evaluating snowcover. Snow Hydrology, Proc. of a Workshop Seminar Canadian National Committee for the International Hydrological Decade and by the University of New-Brunswick, Feb. 28-29, p. 50-65.
- McMILLAN, M.C. and SMITH, J.L. (1975). Remote sensing of snowpack density using shortwave radiation. Paper no 25, In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 361-373.
- MEIER, M.J. and EVANS, W.E. (1975). Comparaison of different methods for estimating snowcover in forested, mountainous basins using Landsat images. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 215-234.

- _____. (1974a). New ways to monitor the mass and the aerial extent of snowcover. U.S. Geological Survey, Tacoma, Wash., USA, p. 241-250.
- _____. (1974b). Applications of ERTS imagery to snow and glacier hydrology. U.S. Geological Survey, Tacoma, Wash., USA, p. 329-334.
- _____. (1972). Measurement of snowcover using passive microwave radiation. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 739-750.
- MEIMAN, J.R. (1968). Snow accumulation related to elevation aspect and forest canopy. Snow Hydrology, Proc. of a Workshop Seminar sponsored by the Canadian National Committee for the International Hydrological Decade and by the University of New-Brunswick, Feb. 28-29, p. 21-31.
- MEL'CHANOV, V.A. (1973). Snow accumulation and melting in the forest and in clearcut areas in the central Ural. Soviet Hydrology: Selected Papers, 5: 466-472.
- MERRY, C.J., MCKIM, H.M., COOPER, S. and UNGAR, S.G. (1977). Preliminary analysis of water equivalent snow characteristics using Landsat digital processing technique. Proc. of the 1977 Eastern Snow Conf., p. 39-54.
- MORAVEC, G.F. and DANIELSON, I.A. (1980). A graphical method of stream runoff prediction from Landsat derived snowcover data for watersheds in the upper Rio Grande Basin of Colorado. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 171-183.

- MORIN, G., FORTIN, J.P. et SOCHANSKA, W. (1980). Evaluation des crues maximales probables des rivières Nottaway, Broadback et Rupert. INRS-Eau, rapport scientifique no 133, 295 p. (Pour la Société d'énergie de la Baie James).
- _____, FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P. et SOCHANSKA, W. (1979). Nouvelles simulations des débits de la rivière Eaton: utilisation des relevés piézométriques et des photos satellites, influence de la réduction de l'information météorologique et physiographique de base. INRS-Eau, rapport scientifique no 103, 120 p. (Pour Environnement Canada).
- _____, FORTIN, J.P. et CHARBONNEAU, R. (1975). Utilisation du modèle hydrophysiographique CEQUEAU pour l'exploitation des réservoirs artificiels. Applic. of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems Symposium: Proc. of the Bratislava symp., AISH, publ. no 115, p. 176-184.
- MOSHER, F.R. (1977). Composite images using navigated SMS/GOES data; studies of soundings and image measurements. Final report, Space Science and Engineering Centre, Univ. of Wisconsin, Madison, WI.
- O'BRIEN, H.W. and MUNIS, R. (1975). Red and Near-Infrared Spectral Reflectance of Snow. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snow Cover Observations, Proc. the National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 345-360.
- ODEGAARD, H.A., ANDERSEN, T. and OSTREM, G. (1980). Application of satellite data for snow mapping in Norway. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 93-106.
- _____ and OSTREM, G. (1977). Application of satellite data for snow mapping. Hydro investigation in Norway, rapport no 9-77, Oslo, 61 p.

- VERTON, D.E. (1977). Catchment hydrology, reporter's comments. 3rd Inter. Hydro. Symp., Fort Collins, Co.
- PECK, E.L., CARROLL, T.R. and SCOTT, C. (1980). Operational aerial snow surveying in the United States. Hydrol. Sci. Bull., 25(1): 51-62.
- _____ and BISSELL, V.C. (1973). Aerial measurement of snow water equivalent by terrestrial gamma radiation survey. Hydrol. Sci. Bull., 18(1): 47-62.
- _____, BISSELL, V.C., JONES, E.B. and BURGE, D.L. (1971). Evaluation of snow water, equivalent by airborne measurement of passive terrestrial gamma radiation. Water Research Res., 7(5): 1151-1159.
- POULIN, A.O. (1974). Hydrologic characteristics of snow covered terrain from thermal infrared imagery. In: Advanced Concept and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources by Santeford H.L. and Smith H.S., National Academy of Sciences (ed.), p. 494-503.
- QUICK, M.C. (1972). Forecasting runoff, operational practices. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 943-955.
- _____ and PIPES, A. (1972). Daily and seasonal runoff forecasting with a water budget model. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 1017-1033.
- RAGAN, R.M. (1977). Utilization of remote sensing observations in hydrological models. Proc. 11th Symposium of Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, April 25-29, p. 87-99.
- RANGO, A. (1980). Remote sensing of snow covered areas for runoff modeling hydrological forecasting. Proc. of the Oxford Symp., avril 1980, AIHS, Publ. no 129, p. 291-297.

- _____, CHANG, A.T.C. and FOSTER, J.R. (1979). The utilisation of spaceborn microwave radiometers for monitoring snowpack properties. Nordic Hydrology, 10(1): 25-40.
- _____. (1978). Pilot tests of satellite snowcover/runoff forecasting systems. Proc. of the 46th Annual Meeting Western Snow Conference, Otter Crest, Oregon, April 18-20, p. 7-14.
- _____, HANNAFORD, J.F., HALL, R.L., ROSENZWEIG, M. and BROWN, A.J. (1977). The use of snow covered area in runoff forecasts. NASA, Goddard Spaceflight Center, Greenbelt, Md, Document X-913-77-48, 29 p.
- _____. (1977). Remote sensing: Snow monitoring tool for today and tomorrow. Goddard Spaceflight Center, Greenbelt, Md, Preprint X-913-77-57, 10 p.
- _____ and SALOMONSON, V.V. (1977a). Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological satellite snowcover observations., Water Resources Res., 13(1): 109-112.
- _____ and SALOMONSON, V.V. (1977b). The utility of short wavelenght (< 1 mm) remote sensing techniques for the monitoring and assessment of hydrologic parameters. Proc. 11th Symposium of Remote Sensing of Environment, p. 55-66.
- _____ and ITTEN, K.I. (1976). Satellite potentials in snowcover monitoring and runoff prediction. Nordic Hydrology, 7(4): 209-230.
- _____, SALOMONSON, V.V. and FORESTER, J.L. (1975). Employment of satellite snowcover observations for improving seasonal runoff estimates. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 157-174.

- RILEY, J.P., ISRAELSEN, E.K. and EGGLESTON, K.O. (1972). Some approaches to snowmelt prediction. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, sept., AISH, Tome 2, 107(2): 956-971.
- ROCKWOOD, D.M. (1972). New techniques in forecasting runoff from snow. Banff Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, AISH, sept., Tome 2, 107(2): 1058-1072.
- SALOMONSON, V.V. and HALL, D.K. (1980). A review of Landsat-D and other advanced systems relative to improving the utility of space data in water resources management. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 281-296.
- SCHMUGGE, T.J. (1980). Microwave approach in hydrology. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(4): 495-507.
- SCHNEIDER, S.R. (1980). The NOAA/NESS program for operational snowcover mapping preparing the 1980's. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 21-40.
- _____ and MCGINNIS, D.R. (1977). Spectral difference between VHRR and VISSR data and their impact on environmental studies. Proc. of the Amer. Soc. of Photogram., Wash. D.C., p. 470-480.
- _____, WIESNET, D.R. and McMILLAN, M.C. (1976). River basin snow mapping at the National Environmental Satellite Service. NOAA Tech. Memo NESS-83, U.S. Dept. of Commerce, Wash. D.C., 19 p.
- SCHUMANN, H.H., KIRDAR, E. and WARSKOW, W.L. (1980). Satellite snowcover and runoff monitoring in central Arizona. U.S. NASA, Scientific and Technical Information Office, Wash. D.C., p. 107-126.

- _____. (1978). Satellite snowcover observations in Arizona. Proc. of the Am. Soc. of Photogrammetry, Fall Tech. Meet., Albuquerque 1978, p. 480-489.
- SHAFER, B.A. and LEAF, C.F. (1980). Landsat derived snowcover as an input variable for snowmelt runoff, forecasting in south Central Colorado. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 151-169.
- SHARP, J.M. and RANDALL, W.T. (1975). A cost-effectiveness comparison of existing and Landsat aided snow water content equivalent systems. Proc. of the 10th Int. Symp. of Remote Sensing of Environment, 2: 1255-1262.
- _____ and THOMAS, R.W. (1975). A comparison of operational and Landsat aided snow water content estimation systems. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 325-344.
- SITTNER, W.T. (1976). WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting. Bull. Sci. Hydro., 21(1): 201-213.
- SMITH, E.A. (1975). The McIDAS system. IEEE Transactions on Geosciences Electronics, GE-13: 123-136.
- SOCIETE D'ENERGIE DE LA BAIE JAMES (1978). Connaissance du milieu des territoires de la baie James et du Nouveau-Québec. SEBJ, Montréal, 297 p.

- SOLOMON, S.I., DENOUEVILLIEZ, T.P., CADOU, C. and CHART, E.J. (1968). The use of a square grid system for computer estimation of precipitation, temperature and runoff in a sparsely gauged area. Water Resources Res., 4(5): 919-930.
- STAENZ, K. and HAEFNER, H. (1981). Spectral reflectance of snow in the Landsat MSS bands. Can. J. of Remote Sensing, 7(1): 41-60.
- STEINHOFF, H.W. and BARNES, A.H. (1976). Determination of snow depth and water equivalent by remote sensing. Completion report, Env. Resources Center, Co., State Univ. of Fort Collins, Co., Series no 76, 16 p.
- STEPHUN, H. and DICK, G.E. (1974). Estimating true basin snowcover. In: Advanced Concept and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources by Santeford H.S. and H.L. Smith, National Academy of Sciences (ed.), p. 314-327.
- STILES, W.H., ULABY, F.T. and RANGO, A. (1981). Microwave measurements of snowpack properties. Nordic Hydrology, 12(3): 143-166.
- TARPLEY, J.D. and SCHNEIDER, S.R. (1980). An all digital approach to snow mapping using geostationary satellite data. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 267-279.
- THOMPSON, A.G. (1975). Utilization of Landsat monitoring capabilities for snowcover depletion analysis. In: Rango, A. (ed.), Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, Proc. The National Aeronautics and Space Administration and the University of Nevada, Reno, Publ. no NASA SP-391, p. 113-127.

- TUELLER, P.T. (1978). Preliminary runoff and streamflow predictions in the Humbolt River basin, based on snow distribution measurements from sequential satellite imagery. Coop. Rep. Series, Publ. no AG-2, Renewable Nat. Res. Div., Univ. of Nevada, Reno and Water Resources Centre, Desert Res. Inst., 27 p.
- TWEDT, T.M., SCHAAKE, J.C. and PECK, E.L. (1977). National weather service extended streamflow prediction. Proc. of the 45th Annual Meeting Western Snow Conference, Albuquerque, New-Mexico, April 18-21, p. 52-57.
- ULABY, F.T. and STILES, W.H. (1980). Microwave radiometric observations of snowpacks. Microwave Remote Sensing of Snowpack Properties, Proc. of a Workshop sponsored by the National Aeronautic and Space Administration (NASA), Fort Collins, Co., May 20-22, Rango, A. (ed.), NASA CP-2153, p. 187-201.
- _____. (1977). Microwave remote sensing of hydrological parameters. Proc. 11th Symp. of Remote Sensing of Environment, p. 67-86.
- UNESCO-IASH-WMO (1970). Seasonal snowcover; a contribution to the International Hydrological Decade. Tech. pap. in Hydro: 2, 38 p.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1960). Runoff from snowmelt, engineering and design. U.S. Gov. print. Off., Wash. D.C., 75 p.
- _____. (1956). Snow Hydrology. North Pacific Division, Portland, Or., 437 p.
- VALOVICIN, F.R. (1976). Snow/cloud discrimination. Meteorology Div., Project 6698, Air Force Geophysics Lab., Air Force Syst. Com., USAF, Hanscom, AFB, Mass., 16 p.

- WATERMAN, S.E. (1980). Investigation of multispectral remote sensing of snowcover using a solar radiation model. 6th Can. Symp. on Remote Sensing, Halifax, N.S., 21-23 May, p. 525-540.
- _____, HOGG, W.D., HANSEN, A.J. and POLAVARAPU, V.L. (1980). Computer analysis of Tiros-N/NOAA-6 satellite data for operational snowcover mapping. 6th Can. Symp. on Remote Sensing, Halifax, N.S., 21-23 May 80, p. 435-442.
- WEISS, L.L. and WILSON, W.T. (1958). Snowmelt degree day ratios determined from snow-lab data. Trans. Am. Geoph. Union, 38(4): 681-688.
- WIESNET, D.R. (1980). New goals for snow monitoring by satellite. WOASSO (Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations), Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116, p. 41-51.
- _____ and MCGINNIS, D.F. (1974). Snow extent mapping and lake and ice studies using ERTS-1 MSS together with NOAA-2 VHRR. Third Earth Res. Tech. Sat. Symp., 11-14 Dec. 73, Goddard Spaceflight Centre, Wash. D.C., p. 995-1009.
- WILSON, C.V. (1971). Le climat du Québec. 1^o partie; Atlas climatique, Serv. Météo. du Canada, 44 figures.
- ZOTIMOV, N.V. (1968). Investigation of a method of measuring snow storage by using the gamma radiation of the Earth. Soviet Hydrology: Selected Papers, 3: 254-266.
- ZUZEL, J.F. (1981). Conditional flow simulation: A stochastic forecast model. Water Resources Res., 17(3): 595-601.

_____ and COX, L.M. (1978). A review of operational water supply forecasting techniques in areas of seasonal snowcover. Proc. of the 46th Annual Meeting Western Snow Conference, Otter Crest, Oregon, April 18-20, p. 69-77.

ANNEXE I

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS COURAMMENT UTILISES
POUR LE TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITES

ANNEXE I

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS COURAMMENT UTILISES POUR LE TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITES

1. Zoom Transfer Scope de Bausch et Lomb (ZTS):

C'est probablement l'instrument le plus populaire, le plus rentable et celui nécessitant le moins d'apprentissage. Il permet de rectifier les distorsions, d'agrandir et de projeter une image corrigée sur des cartes topographiques du bassin. C'est l'outil de base pour les méthodes 1, 2 et 3 à la section 2.1.4.3.

2. Equidensitomètre:

Cet appareil permet de traduire en plages de couleurs variées les échelles de réflectance des images. Les seuils choisis sont ajustables et permettent de calculer la superficie de chacune des plages par le comptage automatique des pixels dans chacune des classes (plages). Il permet d'approcher avec une précision de 4% la valeur réelle de la surface (Meier, 1974b). L'emploi d'un masque est également possible. Cet appareil est surtout indispensable à la quatrième technique présentée à la section 2.1.4.3.

3. Appareils numériques:

Les appareils numériques sont des appareils de traitement informatique automatisé travaillant au niveau des pixels, selon un algorithme défini. Il existe deux types de traitement numérique. Le premier type consiste en un traitement numérique couplé avec une console interactive où l'analyste peut suivre le traitement et apporter certaines modifications ou incorporer certaines données spécifiques sur l'algorithme ou sur l'environnement physique de la zone étudiée (exemple: la console interactive LCT-11 du système SCANIQ). L'autre type de traitement est

entièrement automatisé. Il permet le même type de traitement que le type précédent à l'exception du fait que l'analyste ne peut intervenir au niveau de l'analyse.

ANNEXE 2

DESCRIPTION DES RELATIONS DE BASE
SERVANT A L'EDIFICATION DE MODELES

2. DESCRIPTION DES RELATIONS DE BASE SERVANT A L'EDIFICATION DE MODELES DE FONTE

1. Méthode basée sur les degrés-jours: la méthode des degrés-jours représente la forme de modélisation la plus couramment employée pour les simulations en raison de sa simplicité et de la facilité d'obtenir les données de température. Elle peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$R = a (T - T_b) \left[\frac{H}{24} \right]$$

- où R = fonte (mm);
a = taux de fonte (mm/degré-jour)
T = température (degrés Celsius);
T_b = température de base (degrés Celsius);
H = durée en heures.

2. Modèle de régression linéaire multiple: ce type d'approche est également très populaire en modélisation en raison de sa simplicité. Il adopte la forme suivante:

$$R = b + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + \dots + a_nx_n$$

- où b, a_i = coefficient de régression;
x_i = variables entrant dans la régression.

Cette méthode permet, grâce à diverses méthodes de calibration, de déterminer les variables influençant la variable dépendante.

3. Bilan hydrique: selon cette méthode, la différence entre les précipitations hivernales accumulées (P) et l'écoulement hivernal accumulé

(R_c) donnent une estimation de l'emmagasinement. L'équation de base se présente comme suit:

$$R = a (P - R_c) + b$$

où a, b = coefficients de régression.

4. Modèle d'index de précipitation: il se retrouve normalement sous la forme:

$$R = aP + b$$

où R = volume d'écoulement de fonte;
 P = précipitation saisonnière accumulée;
 a, b = coefficient de régression.

Il peut parfois inclure l'évaporation ou autres variables.

5. Méthode basée sur des équations générales de fonte: ces équations proviennent principalement du recueil Snow Hydrology et Runoff from Snowmelt du U.S. Corps of Engineer (1956 et 1960) ainsi que des travaux de plusieurs auteurs. Ces équations générales expliquent les divers mécanismes de fonte, du transfert radiatif, de l'accumulation et de l'écoulement. Ils nécessitent la calibration et l'optimisation de certains paramètres.

ANNEXE 3

DESCRIPTION DES INDICES DE COMPARAISON
DES DEBITS UTILISES AVEC LE MODELE CEQUEAU

3. DESCRIPTION DES INDICES DE COMPARAISON DES DEBITS UTILISES AVEC LE MODELE CEQUEAU

1. Somme du carré des pourcentages des débits journaliers

La valeur diminue avec le rapprochement des courbes calculées et observées, mais l'importance du débit influence la valeur de l'indice:

$$S = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qc_i - Qo_i}{Qo_i} \right)^2$$

où

Qc_i = débit journalier calculé

Qo_i = débit journalier observé.

2. Somme du carré des différences des débits journaliers

Cet indice s'apparente à l'écart quadratique moyen de l'estimation. La valeur de l'indice diminue avec le rapprochement des courbes calculées et observées. L'importance du débit journalier influence moins la valeur que l'indice précédent:

$$Sc = \sum_{i=1}^N (Qc_i - Qo_i)^2$$

où

Qc_i = débit journalier calculé

Qo_i = débit journalier observé.

3. Le débit moyen annuel calculé et le débit moyen annuel estimé d'après les débits journaliers observés.

4. Le débit maximum journalier calculé et le débit maximum journalier observé, pour une période donnée.
5. L'erreur de Nash:

Une simulation montrant des débits calculés et observés similaires est caractérisée par une erreur de Nash se situant près de 1:

$$N = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}$$

où

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2$$

Q_{o_i} = débit journalier observé

Q_{c_i} = débit journalier calculé

$\overline{Q_o}$ = débit moyen journalier observé.

6. Coefficient de corrélation

Ce coefficient exprime la dépendance linéaire entre une variable dépendante et une variable indépendante (en l'occurrence, le débit calculé et le débit observé). Une forte dépendance se caractérise par un coefficient se rapprochant de la valeur 1.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Qc_i - \bar{Qc}) (Qo_i - \bar{Qo})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (Qc_i - \bar{Qc})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Qo})^2 \right)}}$$

où

Qc_i = débit journalier calculé

Qo_i = débit journalier observé

\bar{Qc} = débit journalier calculé moyen

\bar{Qo} = débit journalier observé moyen.

7. Erreur relative au niveau des volumes journaliers

L'importance du débit influence grandement la valeur de l'indice. Une amélioration se définit par une diminution de la valeur de l'indice.

$$Er_J = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Vo_i - Vc_i}{Vc_i} \right)^2$$

où

Vo_i = volume journalier observé

Vc_i = volume journalier calculé.

8. Erreur relative au niveau des volumes journaliers cumulés

Même interprétation que pour l'indice précédent.

$$Er_c = \sum_{i=1}^N \left(\frac{VCo_i - VCc_i}{VCc_i} \right)$$

où

VCo_i = volume journalier observé cumulé

VCc_i = volume journalier calculé cumulé.

9. L'écart quadratique moyen de l'estimation

Cet indice est moins influencé par l'importance du débit comparative-ment à l'erreur relative. Une amélioration se traduit par une diminu-tion de l'écart quadratique moyen de l'estimation au niveau de la simulation.

$$E_s = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Qc_i - Qo_i}{N} \right)^2}$$

où

Qc_i = volume journalier calculé

Qo_i = volume journalier observé

N = nombre de jours.

10. L'erreur absolue journalière

C'est un indice similaire à l'écart quadratique moyen de l'estimation. La différence réside au niveau du nombre d'éléments utilisés pour le calcul de l'indice. L'erreur absolue est calculée pour chaque jour et ne compte qu'une valeur observée et qu'une valeur calculée, contrairement à l'écart quadratique moyen qui compte 181 paires d'observations.

Toutefois, l'interprétation reste similaire. Une amélioration de la simulation se répercute par une baisse de cette valeur.

$$E_q = \left| Q_{c_i} - Q_{o_i} \right|$$

où

Q_{c_i} = débit journalier calculé

Q_{o_i} = débit journalier observé.

Cet indice est utilisé pour la réalisation des figures 5.10 et 5.11.