

RÉHABILITATION DE L'ÉCOSYSTÈME DU
SAINT-LAURENT
LAC SAINT-FRANÇOIS: LES BASES DE LA
MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE

RÉHABILITATION DE L'ÉCOSYSTÈME DU SAINT-LAURENT

**LAC SAINT-FRANÇOIS:
LES BASES DE LA MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE**

par

**Jean Morin
Paul Boudreau
Michel Leclerc**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7**

en collaboration avec :

**l'Institut de Recherche en Environnement et Économie (IREE),
Université d'Ottawa**

Rapport de recherche No R-412

Octobre 1994

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	v
Liste des figures	vii
Remerciements	ix
Résumé	xi

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte	1
1.2. Modélisation	1
1.3. Contenu du rapport	2

2. BATHYMÉTRIE

2.1. Description générale	5
2.2. Données disponibles et modèle numérique de terrain	5

3. OUVRAGES DE GÉNIE

3.1. Utilisation de ces données en modélisation	7
3.2. L'aval du lac Saint-François	7
3.3. L'amont du lac	12
3.4. Le centre du lac	12

4. RÉGIME HYDROLOGIQUE

4.1. Rôle de ces données en modélisation	17
4.2. Données disponibles	17
4.3. Apports de l'amont - l'effet des Grands Lacs	17
4.4. Transfert à l'exutoire - le régime d'exploitation	21
4.5. Bilan hydrologique	24
4.6. Tributaires du lac	25

5. NIVEAUX D'EAU

5.1. Rôle de ces données	29
--------------------------------	----

5.2. Données disponibles	29
5.3. Historique des niveaux d'eau: de plus en plus de contrôle	29
5.4. Dénivellation du plan d'eau	31
5.5. Relation dénivellation-débit	33

6. VENTS

6.1. Rôle de ces données dans la modélisation	35
6.2. Données disponibles	35
6.3. Analyse	35

7. SUBSTRATS

7.1. Rôle des données de substrats dans la modélisation	39
7.2. Données disponibles et description	39

8. GLACE

8.1. Rôle de ces données dans la modélisation	41
8.2. Données disponibles	41
8.3. Analyse	41

9. CONCLUSION

Bibliographie	47
Annexes	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1:	Surface et volume dragué dans le lac Saint-François depuis la mise en service de la voie maritime.	16
Tableau 4.1:	Sommaire des débits entrant et sortant du lac Saint-François.	19
Tableau 4.2:	Débit moyen et superficie de drainage des tributaires à leur embouchure au lac Saint François.	26
Tableau 8.1:	Variation des épaisseurs moyennes de la glace le long de la voie maritime dans le lac Saint-François entre 1973 et 1992.	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Géographie politique de la région du lac Saint-François.	3
Figure 1.2:	Limites du modèle hydrodynamique projeté du lac Saint-François.	3
Figure 2.1:	Bathymétrie du lac Saint-François	6
Figure 3.1 :	Section des rapides de Soulanges à l'état naturel.	9
Figure 3.2 :	Section des rapides de Soulanges vers 1900.	10
Figure 3.3 :	Section des rapides de Soulanges vers 1960.	11
Figure 3.4 :	Région de Cornwall vers 1900.	13
Figure 3.5 :	Région de Cornwall vers 1960.	14
Figure 3.6 :	Modifications à l'intérieur du lac Saint-François.	15
Figure 4.1 :	Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit du fleuve Saint-Laurent à Cornwall entre 1958 et 1990.	20
Figure 4.2 :	Variations du débit moyen annuel du fleuve Saint-Laurent à Iroquois (1919-1958) et à Cornwall (1959-1990).	20
Figure 4.3 :	Variations des débits moyens mensuels et annuel du fleuve Saint-Laurent à Cornwall entre octobre 1958 et juin 1993.	21
Figure 4.4 :	Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit turbiné et déversé entre 1963 et 1992 à Beauharnois.	22
Figure 4.5 :	Variation de la moyenne journalière interannuelle débit total (turbiné et déversé) entre 1963 et 1992 à Les Cèdres ainsi que le nouveau régime minimum d'exploitation à Coteau (depuis déc. 1993).	23
Figure 4.6 :	Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit total en aval du lac Saint-François entre 1963 et 1992 et de sa répartition entre Les Cèdres et Beauharnois.	23
Figure 4.7 :	Comparaison entre les débits moyens journaliers interannuels sortant (Valleyfield) et entrant (Cornwall) dans le lac Saint-François entre 1963 et 1992.	25
Figure 4.8 :	Bassins de drainage des tributaires du fleuve se jetant dans le lac Saint-François.	27
Figure 4.9 :	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Raquette entre 1976 et 1992 ainsi que l'intervalle de confiance à 95% de Student.	28
Figure 5.1 :	Comparaison entre le débit du Saint-Laurent à Cornwall-Iroquois et le niveau du lac Saint-François à Coteau-Landing entre 1919 et 1990.	30
Figure 5.2 :	Variation de la moyenne journalière de la pente et du débit au lac Saint-François entre 1962 et 1990.	32

Figure 5.3 :	Vue détaillée de la pente entre Summerstown et Coteau-Landing, ce qui représente les parties lacustre et chenalisée (peu profonde) du lac Saint-François.	32
Figure 5.4 :	Variation, entre 1962 et 1990, des niveaux d'eau moyens typiques à chaque saison selon les stations de mesure du niveau au lac Saint-François.	33
Figure 5.5 :	Relation dénivellation-débit (données journalières) pour les différentes périodes de pentes typiques à l'intérieur des limites du modèle hydrodynamique.	34
Figure 6.1 :	Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) durant une année moyenne établie avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.	36
Figure 6.2 :	Variation journalière moyenne de la vitesse horaire moyenne des vents à Cornwall entre 1969 et 1990 selon les saisons.	37
Figure 7.1 :	Distribution du substrat dans le lac Saint-François.	40
Figure 8.1 :	Chronologie de la fonte de la glace sur le lac Saint-François.	43
Figure A1.1:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1 ^{er} octobre) entre 1963 et 1990.	50
Figure A1.2:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.	50
Figure A1.3:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.	51
Figure A1.4:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.	51
Figure A1.5:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1 ^{er} octobre) entre 1963 et 1990.	52
Figure A1.6:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.	52
Figure A1.7:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.	53

Figure A1.8:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.	53
Figure A1.9:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et Beauharnois (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1 ^{er} octobre) entre 1963 et 1990.	54
Figure A1.10:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.	54
Figure A1.11:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.	55
Figure A1.12:	Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.	55
Figure A2.1:	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Saint-Régis entre 1976 et 1992, ainsi que les courbes de l'intervalle de confiance à 95% de Student.	58
Figure A2.2:	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Grasse entre 1967 et 1976.	58
Figure A2.3:	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Aux Saumons entre 1976 et 1992.	59
Figure A2.4:	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Raisin entre 1985 et 1990.	59
Figure A2.5:	Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Beaudette entre 1985 et 1990.	60
Figure A3.1:	Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) au printemps établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.	62
Figure A3.2:	Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en été établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.	63
Figure A3.3:	Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en automne établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.	64

Figure A3.4: Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en hiver établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990. 65

REMERCIEMENTS

Nous remercions les organismes subventionnaires suivants, Ecorecherche-Trois-Conseils du Conseil national de la Recherche du Canada (Subvention au Projet de "Réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent") et le Conseil de Recherche en Sciences naturelles et en Génie du Canada (Bourse doctorale à Jean Morin).

Nous tenons à remercier M. Philippe Crabbé de l'Institut de Recherche en Environnement et Économie de l'Université d'Ottawa ainsi que nos collaborateurs de l'Institut national de la Recherche scientifique - Eau: José Bechara, Yves Secretan, Marc Hugues et Emmanuelle Quentin, et tout particulièrement Sylvain Robert (Hydro-Québec), Gord McKercher (Voie Maritime), David Fay (Environnement Canada) pour leur collaboration.

RÉSUMÉ

L'analyse des problèmes environnementaux d'un milieu tel que le lac Saint-François nécessite une connaissance précise des courants et de la distribution des masses d'eau. La modélisation hydrodynamique est le moyen privilégié pour documenter ce facteur dans le cadre du projet Écorecherche. Cette démarche ne peut être entreprise sans une analyse préliminaire détaillée de chacun des facteurs qui influencent l'écoulement fluvial. C'est dans ce contexte que l'évolution historique des ouvrages de génie, la bathymétrie, l'hydrologie du fleuve et des tributaires, les niveaux d'eau, la glace, le substrat et les vents sont décrits et analysés. Par ailleurs, il est démontré que dans un tel milieu les plantes aquatiques ont un effet extrêmement important sur la distribution spatiale des écoulements; toutefois l'insuffisance des données actuelles ne permet pas une modélisation hydrodynamique suffisamment précise pour les fins de ce projet. Il sera donc nécessaire d'accorder une attention spéciale à cet aspect dans le futur.

Il est bien connu et documenté que les modifications anthropiques du lac Saint-François ont été nombreuses et très significatives. En conséquence, l'écoulement à l'intérieur du lac Saint-François a été considérablement altéré. Ces modifications du régime naturel du fleuve ont atteint leur paroxysme vers 1958 avec l'aménagement d'ouvrages hydroélectriques et de la voie maritime. Parmi les effets les plus importants de ces modifications, on compte l'augmentation du niveau moyen du lac et une stabilisation drastique des niveaux. Une telle combinaison de facteurs est de nature à favoriser l'accumulation des sédiments fins et des contaminants qui y sont adsorbés, ainsi que l'établissement et la prolifération des macrophytes.



1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le lac Saint-François est le premier lac fluvial du Saint-Laurent en aval des Grands Lacs. Comme les lacs fluviaux Saint-Louis et Saint-Pierre, le lac Saint-François constitue un élargissement important du fleuve. Il atteint presque 8 km dans sa partie la plus large et s'allonge sur près de 50 km (Fig. 1.1), couvrant une superficie totale de 233 km² (Allan, 1986; Lorrain *et al.*, 1993). Le débit moyen est de 7 500 m³/s, ce qui crée des courants forts qui sont responsables de l'absence de stratification thermique dans le lac (SLRT, 1992).

Politiquement, le lac Saint-François sert de frontière territoriale; il est partagé entre le Québec, l'Ontario, l'état de New York et la réserve d'Akwéasné. La réserve de la nation mohawk occupe la portion sud-ouest des rives du lac ainsi que toutes les îles adjacentes, couvrant une région à cheval sur les frontières internationale et interprovinciale (Fig. 1.1).

Les deux municipalités les plus importantes du secteur, soit Cornwall qui regroupe une population d'environ 53 500 personnes, et Massena qui compte 14 860 habitants, se retrouvent à la tête du lac. Du côté québécois, les neuf municipalités bordant le lac Saint-François totalisent environ 12 000 âmes. La réserve d'Akwéasné serait habitée par environ 6 000 citoyens "canadiens" et 4 500 "américains" (SLRT, 1992). L'économie locale est principalement industrielle et le taux de chômage est élevé. Dans l'optique des autorités locales, l'avenir de la région passe par un développement durable. Cette approche implique une amélioration et une réhabilitation partielle de l'écosystème.

1.2 Modélisation

La modélisation hydrodynamique jettera un éclairage nouveau sur tous les problèmes environnementaux qui ont une composante reliée aux mouvements de l'eau, dont la dispersion des eaux contaminées et le transport des sédiments. La modélisation effectuée à l'INRS-Eau, s'insère dans un programme de recherche multidisciplinaire sur l'écosystème, "Projet de réhabilitation de l'écosystème du Saint-Laurent", parrainé par l'Institut de Recherche en Environnement et Économie (IREE) de l'Université d'Ottawa et financé conjointement par le Plan Vert et par les institutions de la région d'étude.

1.3 Contenu du rapport

Ce rapport se veut un guide d'introduction à la problématique du tronçon fluvio-lacustre du lac Saint-François, et particulièrement à l'analyse des données nécessaires à la modélisation. Ce travail comporte la description et l'analyse des facteurs susceptibles d'influencer l'écoulement de l'eau dans le tronçon. L'analyse de ces facteurs permettra dans une étape ultérieure de caractériser les événements de référence (i.e. les plus probables) pouvant servir à construire un atlas des conditions hydrodynamiques représentant le mieux l'écoulement dans le lac. Les macrophytes ont un effet extrêmement important sur la structure de l'écoulement dans le lac, toutefois la faible qualité de l'information disponible ne permet pas une description valable dans le cadre de ce rapport. Une recherche exhaustive sur les plantes et leurs effets sur l'écoulement devra être effectuée. Une campagne de terrain sera nécessaire pour établir la répartition spatiale des macrophytes dans la zone modélisée. Les limites du modèle ont été fixées en amont, aux barrages Moses-Saunders et Long Sault, et en aval, aux ouvrages de Coteau et à l'entrée du canal de Beauharnois (Fig. 1.2).

Dans ce qui suit, nous allons présenter les facteurs qui influencent l'écoulement à l'intérieur des limites du modèle projeté, soit: les ouvrages, la bathymétrie, l'hydrologie, les niveaux d'eau, les vents et le substrat.

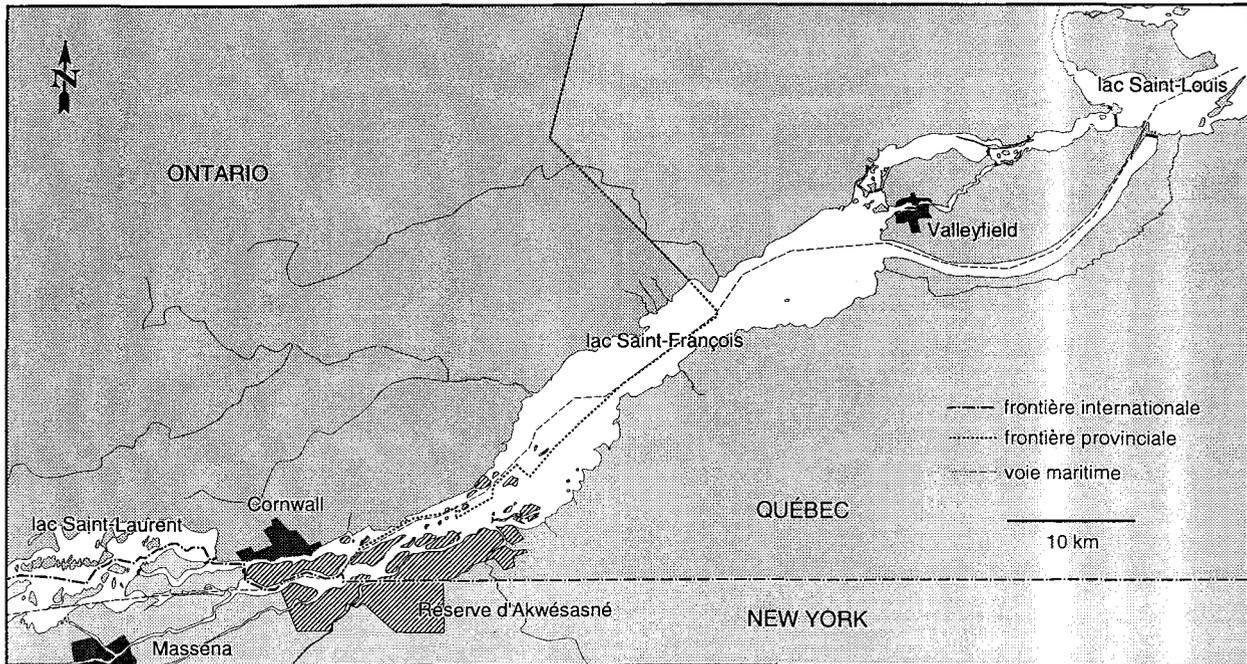


Figure 1.1: Géographie politique de la région du lac Saint-François. Le territoire mohawk, la réserve d'Akwéasné, se trouve à cheval sur les trois frontières. La réserve inclut la très grande majorité des îles du lac Saint-François. Les eaux du fleuve se jettent dans le lac Saint-François en passant par le lac artificiel Saint-Laurent, et puis aboutissent dans le lac Saint-Louis en aval.

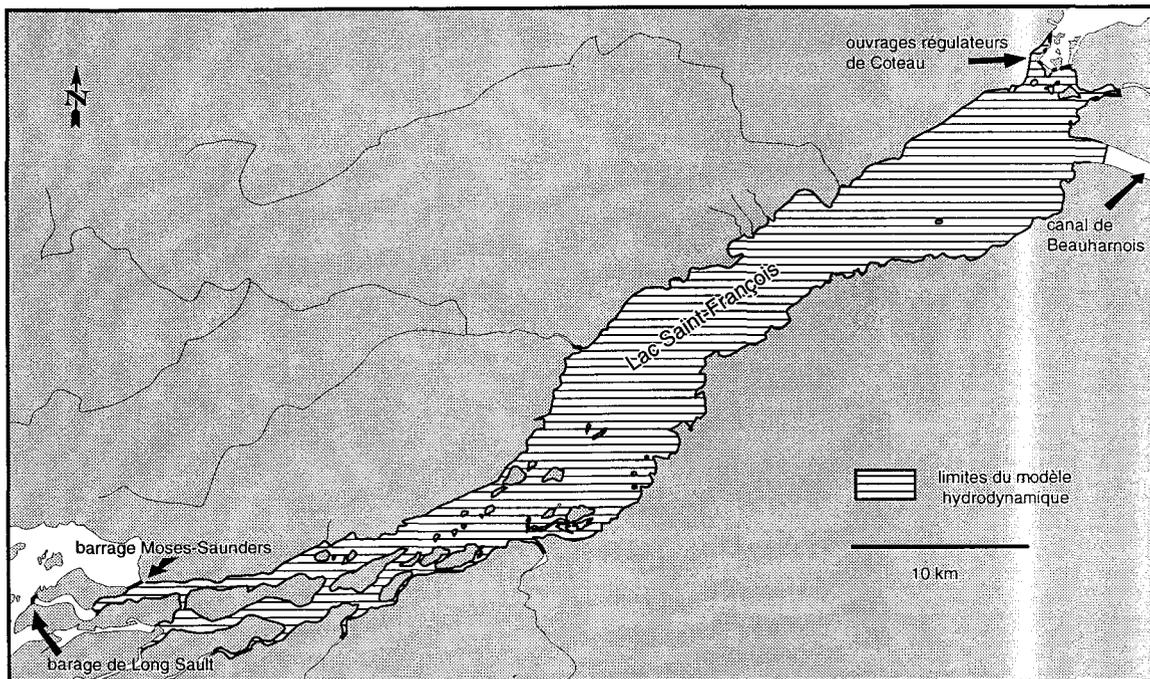


Figure 1.2: Limites du modèle hydrodynamique projeté du lac Saint-François.

2 BATHYMÉTRIE

2.1 Description générale

Selon la morphologie des fonds, le lac Saint-François peut être subdivisé en trois parties distinctes: fluviale, chenalisée et lacustre (Fig. 2.1). La partie fluviale s'étend entre le barrage de Moses-Saunders et le village de Summerstown; cette zone est caractérisée par un petit nombre de chenaux larges et profonds, entrecoupés par des îles de grande taille. La partie chenalisée est située entre Summerstown et South Lancaster: elle est caractérisée par des zones peu profondes (0 à 10 m) traversées par un réseau complexe de chenaux anastomosés relativement profonds (jusqu'à 26 m). Ces zones peu profondes comprennent des îles et des hauts-fonds de moins de 1,5 m de profondeur (Fig. 2.1). La partie lacustre occupe l'est du lac Saint-François, soit entre South Lancaster et Valleyfield. Cette partie comporte un fond régulier de moins de 10 m de profondeur, couvert de macrophytes, qui est coupé par un chenal central profond de plus de 21 m. On y retrouve également cinq sous-bassins d'environ 10 m de profondeur (Lorrain *et al.*, 1993).

2.2 Données disponibles et modèle numérique de terrain

La bathymétrie utilisée par le modèle hydrodynamique doit être d'une grande précision. Nous utiliserons les sondages effectués par le Service Hydrographique du Canada qui servent à construire les cartes maritimes. Ces cartes contiennent environ 235 000 points de sondage, sous format numérique et sous forme de cartes, sur le lac Saint-François. Le modèle numérique de terrain qui représentera cette information sur un support d'éléments finis (maillage triangulaire), servira d'ossature au modèle hydrodynamique. Il est le résultat de la discrétisation (découpage) du domaine d'écoulement tel que défini par les nombreux points de sondage. Le modèle numérique de terrain sera constitué d'environ 15 000 noeuds.

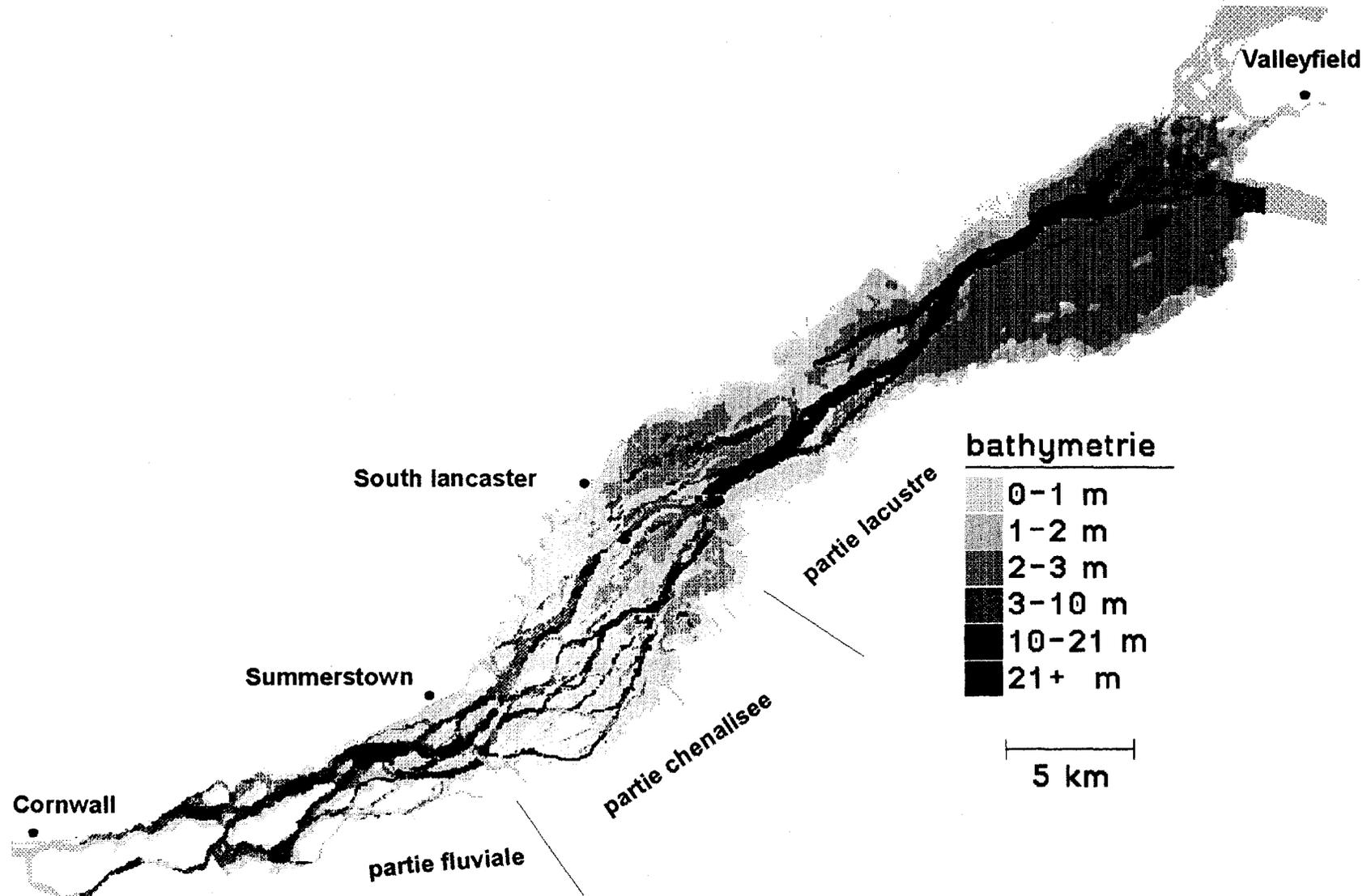


Figure 2.1: Bathymétrie du lac Saint-François. La bathymétrie du lac se subdivise en trois parties : fluviale, chenalisée et lacustre. La partie fluviale est caractérisée par des chenaux larges profonds et des îles de grande taille. la partie chenalisée se compose de zones peu profondes entrecoupées par de nombreux chenaux anastomosés, tandis que la partie lacustre est constituée d'un chenal central profond coupant une plaine à macrophytes étendue.

3 OUVRAGES DE GÉNIE

3.1 Utilisation de ces données en modélisation

La connaissance des ouvrages de génie présents au sein d'un tronçon à modéliser est essentielle. Un modèle numérique de terrain fidèle à la réalité ne pourrait être réalisé sans une bonne connaissance du dragage et par le fait même de la bathymétrie existante du tronçon à ces endroits. Les limites du modèle sont déterminées de façon précise aux endroits où il existe des digues ou des barrages. Une description de la forme et de la position des ouvrages est donc essentielle à la conception du maillage. Les divers ouvrages de contrôle des eaux ont une influence sur l'hydrologie et les niveaux d'eau du tronçon. La connaissance des ouvrages est un pré-requis à une bonne compréhension de ces deux aspects. Enfin, les ouvrages de génie peuvent également déterminer le type de conditions aux limites à employer dans le modèle.

Depuis la fin du XVIII^e siècle, le lac Saint-François a été l'objet de nombreux travaux d'aménagement reliés à la production d'énergie et au transport maritime. Nous allons considérer successivement les tronçons en aval du lac, en amont du lac et enfin, au centre du lac.

3.2 L'aval du lac Saint-François

Les rapides de Soulanges, une section de 29 km située entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis, comportent quatre zones de rapides (Fig. 3.1): rapides de Coteau, des Cèdres, du Rocher Fendu et des Cascades. Ces rapides, caractérisés par une dénivellation totale de 25 m (Chevrier, 1955), ont été l'objet de nombreuses modifications par des interventions humaines.

Entre 1779 et 1783, quatre canaux de six pieds de largeur et deux pieds et demi de profondeur, comprenant des écluses, furent construits par des ingénieurs de l'Amirauté britannique. Ces ouvrages permettaient aux grands canots de traverser l'ensemble des rapides de Soulanges. En 1807, un canal de dérivation fut aménagé entre le lac Saint-François et la rivière Saint-Louis afin de fournir un débit plus régulier à un moulin à scie du village de Beauharnois (Fig. 3.2). Le canal de Beauharnois, maintenant connu sous le nom "d'ancien canal de Beauharnois" fut construit sur la rive sud du Saint-Laurent entre 1842 et 1845. Ce canal navigable de 11½ milles de long par neuf pieds de profondeur, contenant neuf écluses, permettait de passer du lac Saint-François au lac Saint-Louis en évitant les rapides de la section de Soulanges. Ce canal fut remplacé en 1899 par le canal de Soulanges, comptant 14 pieds de profondeur, construit du côté nord du fleuve, et qui fut en opération jusqu'en 1959. L'ancien canal de Beauharnois servit entre 1911 et 1949 à

alimenter en eau la petite centrale de Saint-Timothée (Hydro-Québec, 1970). Le canal de Soulanges fut également utilisé pour produire de l'électricité à la centrale "Provincial" entre 1901 et 1930 (McNaughton, 1962). Un pont ferroviaire a été construit entre Valleyfield et Coteau-Landing vers la fin du XIX^e siècle (Fig. 3.2). Le passage entre l'île aux Chats et l'île de Salaberry est un enrochement qui bloque complètement l'écoulement.

En 1853, une compagnie de papier construisit une usine à Valleyfield, juste à l'entrée de la rivière Saint-Charles (bras du Saint-Laurent au sud de l'île de Salaberry aussi connu sous le nom de chenal Perdu et de chenal Beauharnois), profitant des 280 m³/s et des 3 m de chute pour fournir de l'énergie à l'usine (McNaughton, 1962). L'usine fut achetée par une compagnie de textile en 1900; le débit passa à 370 m³/s en 1901. Cette branche du Saint-Laurent fut presque comblée vers 1930; il ne subsiste qu'un faible débit d'entretien.

Le chenal principal du fleuve Saint-Laurent, à la hauteur des rapides des Cèdres fut aménagé en 1914 dans le but de faire fonctionner la centrale Les Cèdres qui est toujours en opération, puis les barrages de l'île Juillet furent ajoutés en 1932 pour concentrer le débit à la centrale des Cèdres (Fig. 3.3). Enfin, de nombreux ouvrages ont été ajoutés entre 1959 et 1963 en aval du barrage des Cèdres afin de maintenir un niveau d'eau convenable pour les propriétés riveraines (Hydro-Québec, 1970).

Les travaux de construction de l'actuel canal de Beauharnois ont été entrepris en 1929, et terminés en 1932. Le canal de 26 km de long par 1 km de large (Fig. 3.3) détourne la majeure partie du débit du Saint-Laurent vers la centrale de Beauharnois qui fut construite en trois étapes: en 1932, 2 350 m³/s furent détournés pour la première phase alors que les deuxième et troisième phases furent respectivement terminées en 1952 à 4500 m³/s, et 1961 avec un débit turbiné actuel d'environ 6500 m³/s. À la sortie du lac Saint-François, il fallut ériger des digues afin d'élever le niveau du lac Saint-François et de permettre le détournement de l'écoulement vers le canal. Les ouvrages hydroélectriques de cette section du fleuve turbinent au fil de l'eau, soit un régime directement proportionnel aux débits reçus de l'amont (voir Régime hydrologique).

Les ouvrages de retenue de Coteau sont constitués de quatre barrages distincts: Coteau #1, 2, 3 et 4 (Fig. 3.3). Trois sont équipés de vannes qui contrôlent le débit et le dernier est un enrochement. Le premier fut construit en 1933 et les autres furent terminés en 1942 (Hydro-Québec, 1970).

La voie maritime du Saint-Laurent fut achevée en 1959; on utilisa désormais le canal de Beauharnois. Un chenal de 3 km de long fut dragué dans le lac Saint-François à l'entrée du canal et une écluse fut construite près de la centrale.

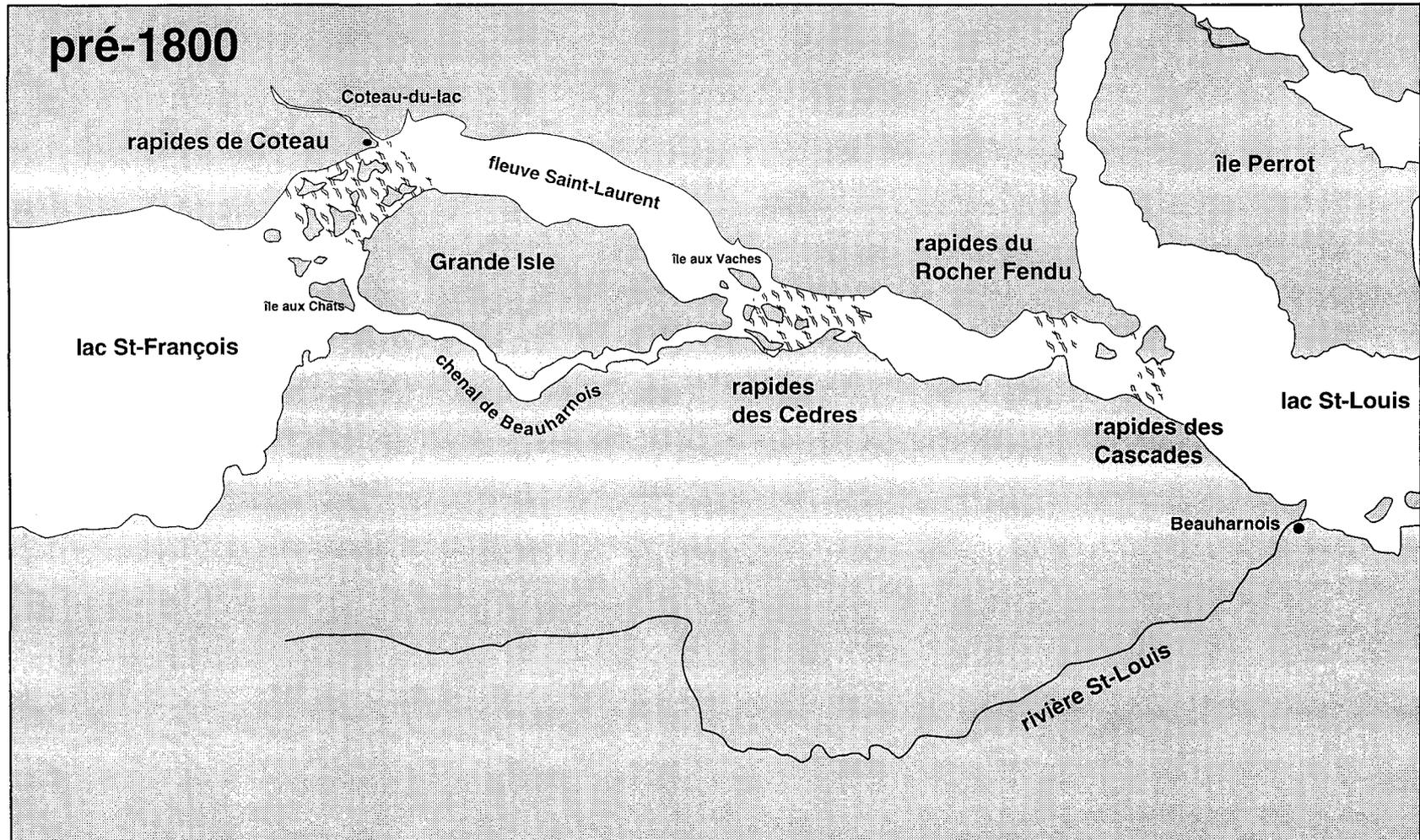


Figure 3.1: Section des rapides de Soulanges à l'état naturel. Le passage du fleuve entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis se caractérise par une dénivellation de 25 mètres.

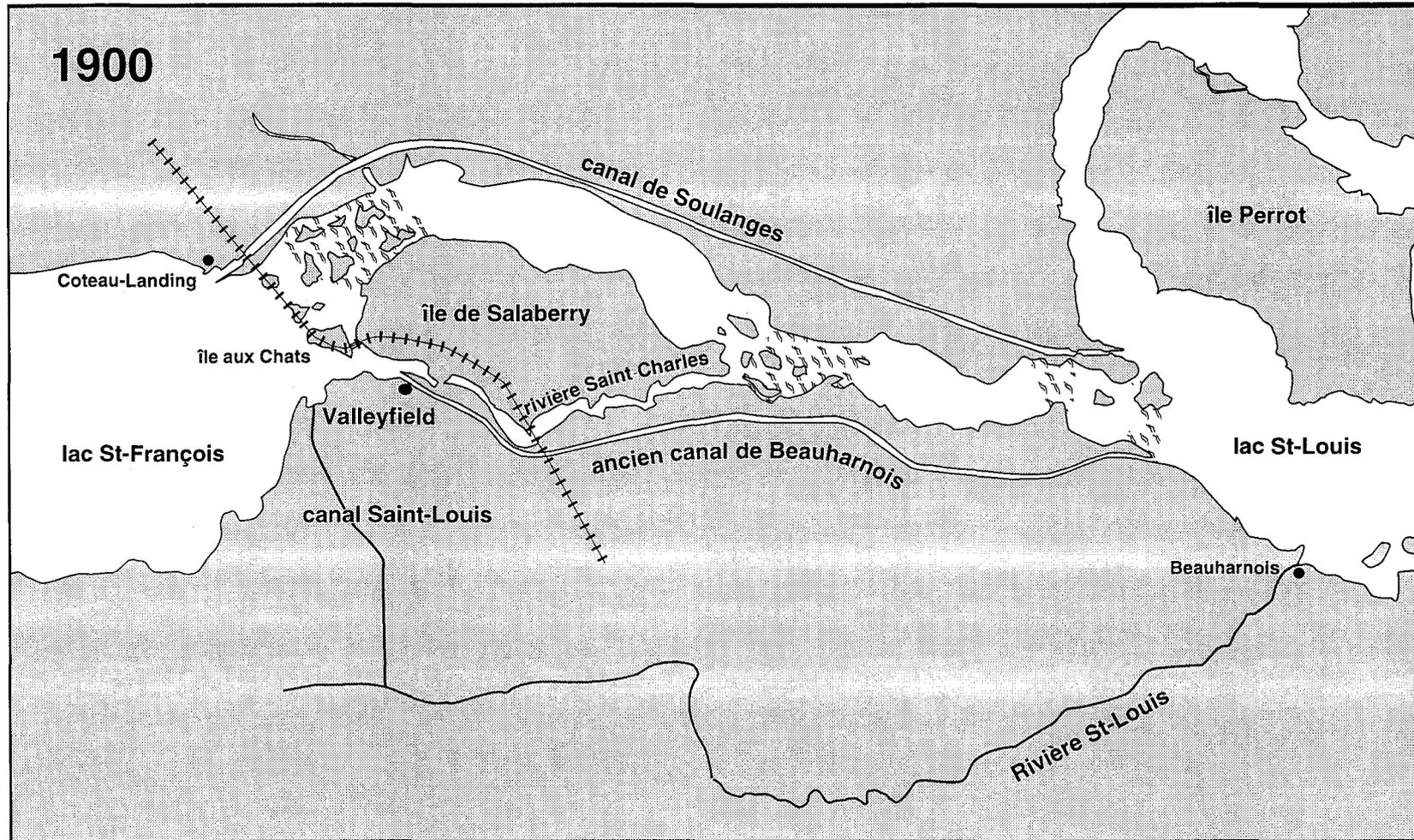


Figure 3.2 : Section des rapides de Soulanges vers 1900. L'ancien canal de Beauharnois a été remplacé par le canal de Soulanges. Le chenal du fleuve au sud de l'île de Salaberry est utilisé à des fins industrielles à Valleyfield. Le canal Saint-Louis fournit un débit plus constant au moulin de Beauharnois

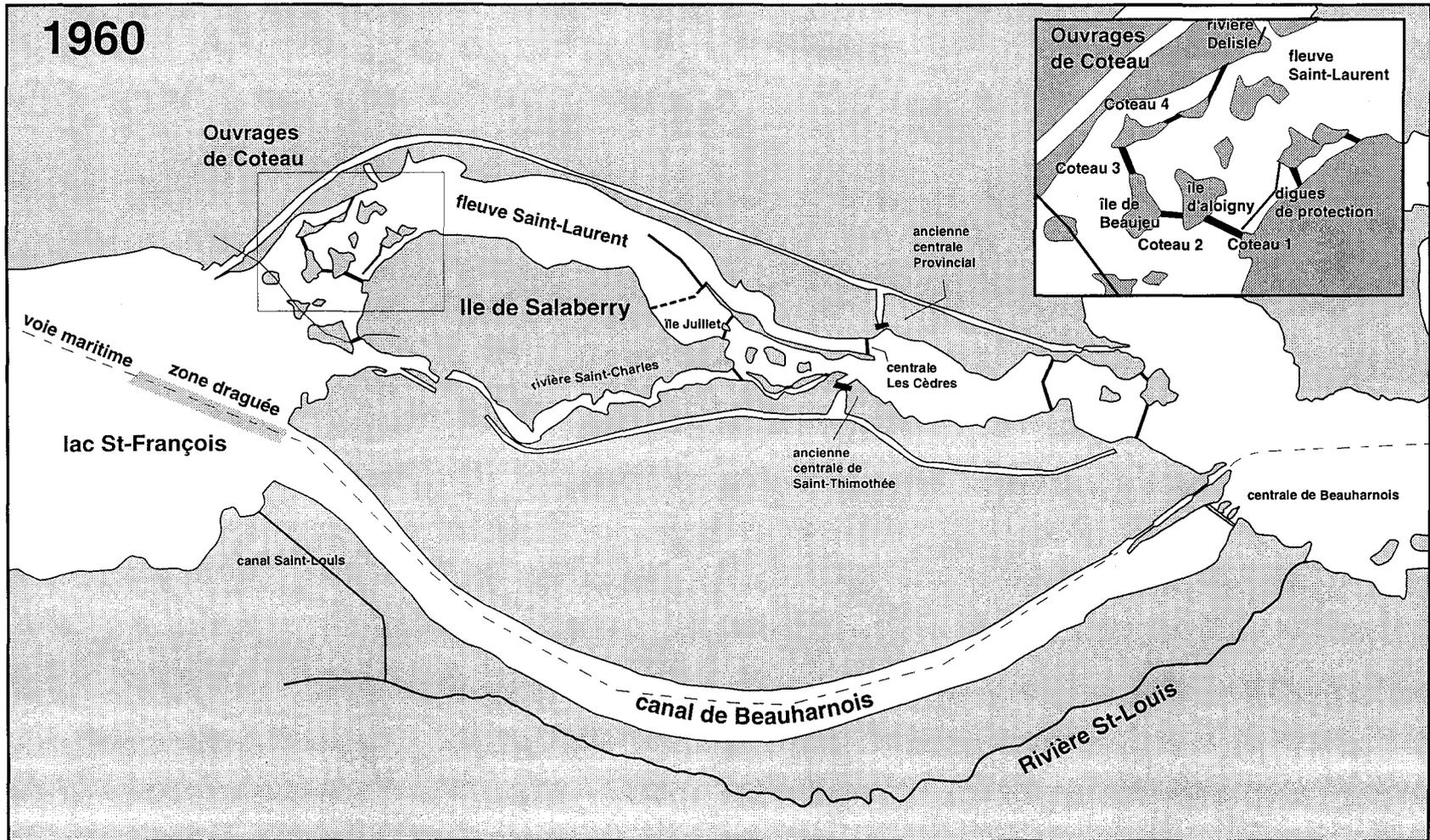


Figure 3.3 : Section des rapides de Soulanges vers 1960. Les grands travaux sont terminés. Le canal de Soulanges est abandonné en faveur du canal de Beauharnois. La voie maritime emprunte les écluses près de la centrale de Beauharnois. De nombreux ouvrages de régularisation sont installés sur le fleuve

3.3 L'amont du lac

Dans la partie amont du lac Saint-François, les modifications de l'écoulement sont reliées à une autre zone de rapides, les rapides internationaux, qui comprennent les rapides du Galop, Plat et du Long Sault. Ces rapides représentent une chute de plus de 25 m échelonnée sur environ 60 km.

La première intervention majeure d'aménagement à la tête du lac Saint-François fut la construction (Fig. 3.4), entre 1834 et 1842, du canal de Cornwall (Chevrier, 1955). Cet ouvrage de 18 km de long et de 9 pieds de profondeur longeait la rive nord du Saint-Laurent, permettant de passer les rapides du Long Sault et les autres zones de forts courants autour de l'île Barnhart; il fut approfondi à 14 pieds entre 1897 et 1901. Du côté américain, le canal de Massena qui amenait l'eau du fleuve jusqu'à la rivière Grasse, fut utilisé entre environ 1900 et 1959 pour produire de l'électricité à la centrale hydroélectrique de l'usine de l'Alcoa (Fig. 3.5).

Dans la région en amont de Cornwall, les derniers travaux d'aménagement ont considérablement modifié l'écoulement naturel: deux barrages, de nombreux chenaux navigables, deux écluses, d'importantes surfaces draguées, plusieurs kilomètres de digues ainsi que deux ponts joignant l'île de Cornwall aux rives (Fig. 3.5) ont été établis entre 1954 et 1959 (NYPA, 1992). La centrale hydroélectrique Moses-Saunders est gérée par la "New York Power Authority" et par l'Hydro-Ontario. Elle est installée entre l'île Barnhart et la rive nord du fleuve (Fig. 3.5). Elle fonctionne au fil de l'eau, soit en fonction du régime hydrologique reçu du lac Ontario (voir Régime hydrologique). Le barrage Moses-Saunders et l'évacuateur de Long Sault ont été bâtis sur les rapides de Long Sault, maintenant inondés par un lac de réservoir connu sous le nom de lac Saint-Laurent. La formation du lac Saint-Laurent a modifié radicalement l'écoulement et la morphologie du fleuve jusqu'à Iroquois, à 50 km en amont, et a inondé plusieurs petits villages. Plusieurs kilomètres de digues ont été nécessaires pour contenir la réserve à proximité du barrage. Deux jetées (Fig. 3.5) faites de boulders ont été installées à la sortie de l'écluse Snell à l'embouchure de la rivière Grasse, probablement pour éviter de forts courants perpendiculaires et l'ensablement de la zone draguée pour la navigation.

3.4 Le centre du lac

Dans le lac Saint-François, les modifications de l'écoulement naturel ont été surtout causées par le dragage de la voie maritime (Fig. 3.6). Des dragages d'entretien ont été effectués à partir de 1979, de façon intensive à la barre Lancaster et de façon sporadique à quelques autres endroits (Tab. 3.1). Entre 1989 et 1990, on a effectué un nivellement du fond de la voie navigable immédiatement à l'est de l'île de Cornwall à l'aide d'une poutre d'acier. Le personnel de la voie maritime examine actuellement la possibilité d'un dragage sur une faible superficie dans la partie est de la barre Lancaster (pour l'été 1994), à l'endroit où la voie maritime bifurque franc est.

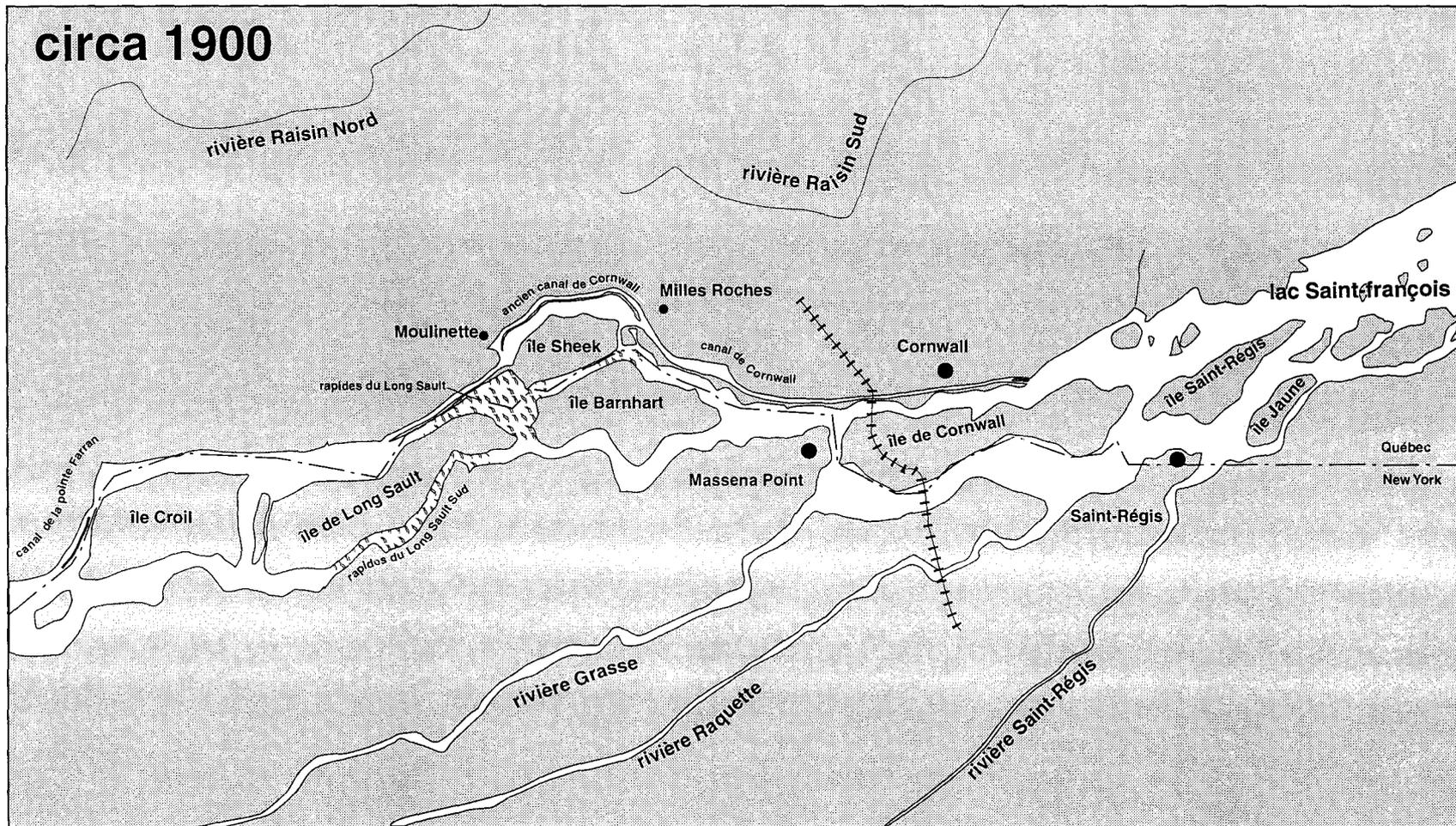


Figure 3.4 : Région de Cornwall vers 1900. Les embarcations évitent les rapides du Long Sault en passant par le canal de Cornwall

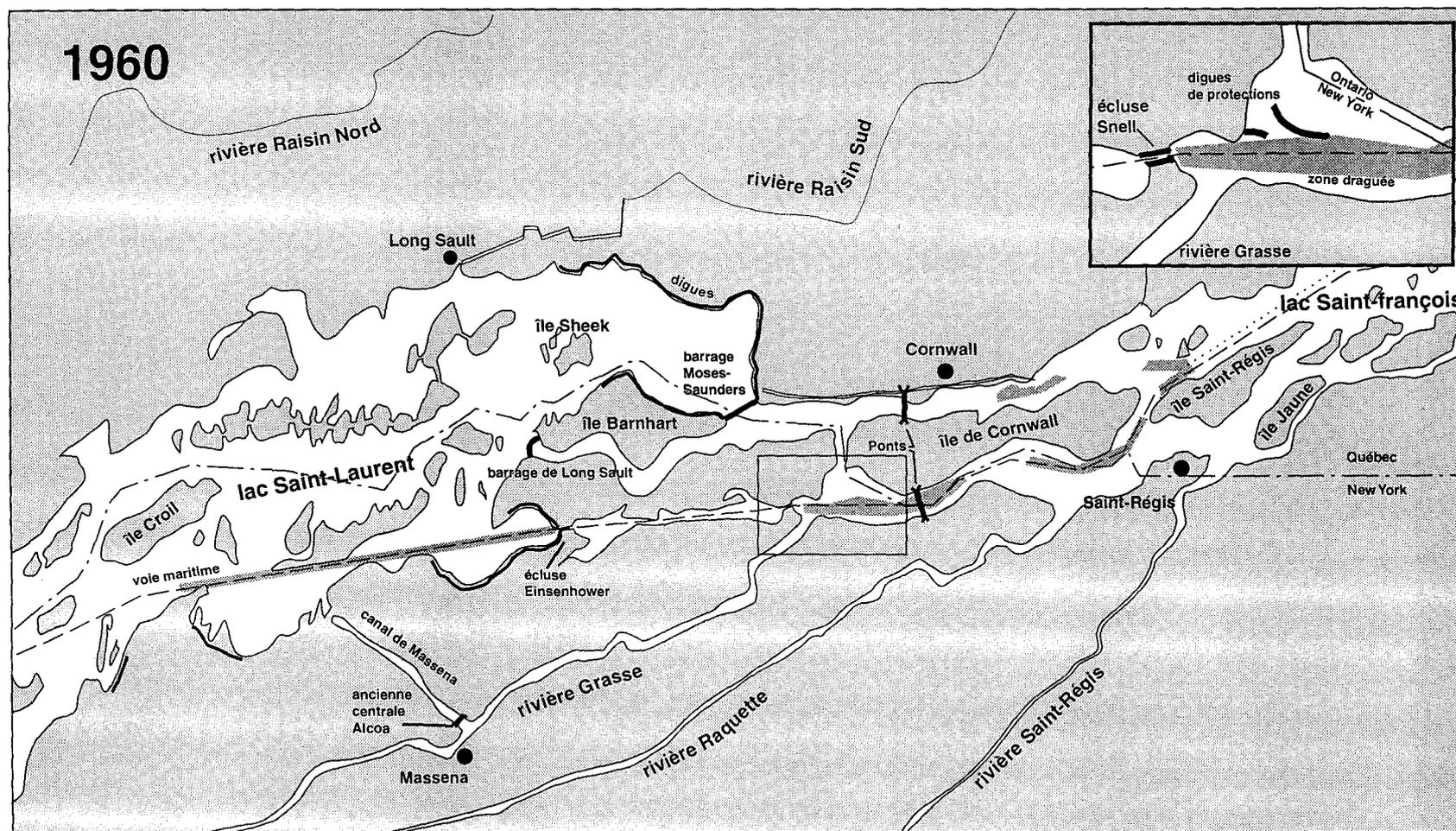


Figure 3.5 : Région de Cornwall vers 1960. Les rapides ont été aménagés à des fins hydroélectriques au barrage Moses-Saunders. Le réservoir, appelé "lac Saint-Laurent", s'étend sur plus de cinquante km jusqu'au barrage Iroquois qui sert d'exutoire au lac Ontario.

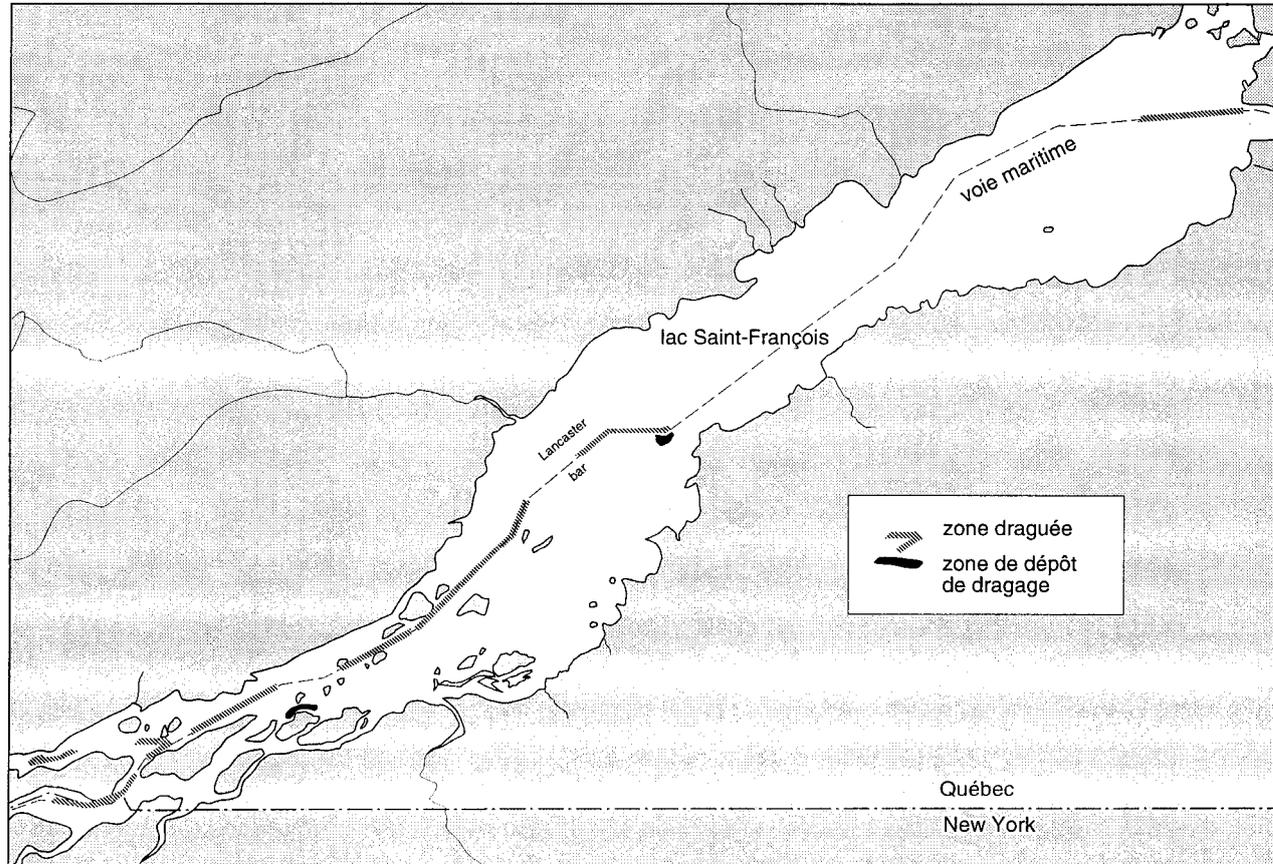


Figure 3.6 : Modifications à l'intérieur du lac Saint-François. Ces modifications ont été causées par les travaux de dragages de la voie maritime

Tableau 3.1: Surface et volume dragué dans le lac Saint-François depuis la mise en service de la voie maritime. (Sources: Voie Maritime du Saint-Laurent et SLRT, 1992)

Région	Année	Surface/volume
barre Lancaster	1979	63 000 m ² / 50 000 m ³
	1981	25 000 m ² / 30 000 m ³
	1984	25 000 m ² / 50 000 m ³
	1985	terminé en 1988
	1988	25 000 m ² / 50 000 m ³
Rivière Beaudette	1978	8 585 m ³
Baie Saint-François	1980	aucune donnée
Port de Valleyfield	1986	5 400 m ³

4 RÉGIME HYDROLOGIQUE

4.1 Rôle de ces données en modélisation

L'analyse hydrologique est un des principaux facteurs permettant de déterminer les événements simulés dans une optique d'événements de référence. Elle permet également de déterminer quelles sont les entrées et les sorties qui seront prises en compte par la modélisation. Les entrées et les sorties qui, en raison de leurs faibles débits, ont peu d'influence sur l'hydrodynamique ou qui sont dans l'ordre d'imprécision du modèle seront négligées. Cette démarche doit évidemment considérer les buts de la modélisation dans le choix des entrées et sorties retenues pour le modèle. De plus, la connaissance des débits détermine les valeurs à imposer comme conditions aux limites à certains endroits et/ou permet de contrôler le bon fonctionnement du modèle, notamment dans les étapes de calibration et de validation.

4.2 Données disponibles

Les données de débit moyen journalier du Saint-Laurent proviennent de la base de données HYDAT du gouvernement fédéral. La série de 1963 à 1992 a été utilisée pour le calcul des moyennes journalières annuelles. Les stations de mesures employées sont celles de Cornwall, de Beauharnois et Les Cèdres, et comprennent les débits turbinés et déversés. Les débits historiques du Saint-Laurent entre 1919 et 1958 sont ceux d'Iroquois et après 1958, ce sont ceux de Cornwall. Le USGS (United States Geological Survey) a fourni les débits des rivières américaines se jetant dans le lac Saint-François, tandis que les débits des tributaires canadiens proviennent de la base de données HYDAT.

4.3 Apports de l'amont - l'effet des Grands Lacs

Le lac Saint-François est délimité à l'amont par le barrage Moses-Saunders et par le barrage évacuateur de Long Sault, et en aval par le barrage de Beauharnois et les évacuateurs de Coteau (Fig. 3.3 et 3.5). Le débit moyen du Saint-Laurent à Cornwall est d'environ 7 500 m³/s, dont 95 % provient directement du lac Ontario (SLRT, 1992). Le niveau d'eau et le débit à l'exutoire du lac Ontario sont contrôlés par le barrage Iroquois, situé à environ 50 km en amont de Cornwall; ce dernier est utilisé pour régulariser le débit du fleuve, surtout durant les périodes d'étiage et lors de la formation de couverts de glace stables en amont des barrages (NYPA, 1992). A cause du contrôle du niveau du lac Saint-François, il n'y a pas de possibilité d'emmagasinement; le débit en aval est donc ajusté en fonction du débit en provenance de l'amont.

A l'entrée du lac Saint-François, presque tout le débit du Saint-Laurent est turbiné au barrage Moses-Saunders. Durant les périodes de très forte hydraulité, soit un débit de plus de 9 500 m³/s, l'évacuateur de crue de Long Sault est mis à contribution; ce dernier n'a cependant été utilisé que quelques fois depuis 30 ans.

Le débit à la hauteur de Cornwall varie peu durant l'année; il est à son minimum en janvier et à son maximum au mois de juillet, ce qui est une des caractéristiques de la forte régularisation naturelle exercée par les Grands Lacs. La capacité régularisatrice des Grands Lacs est liée à leur immense superficie qui permet d'accumuler de très grande quantité d'eau avec un marnage relativement faible. Le débit annuel moyen est de 7 500 m³/s, tandis que les débits maximums et minimums mensuels moyens sont respectivement d'environ 7 900 m³/s au mois de juillet, et de 6 500 m³/s au mois de janvier (Fig. 4.1). En moyenne, durant une année, le débit fluctue de 1 400 m³/s, ce qui ne représente que 18% du débit moyen annuel. Le graphique de l'année typique (Fig. 4.1), qui représente la moyenne interannuelle des débits journaliers entre 1963 et 1992, montre que le débit est relativement constant entre la mi-avril et le mois de novembre, qu'il diminue rapidement entre décembre et le début de janvier, atteignant un plancher durant ce mois, puis qu'il augmente graduellement jusqu'à la mi-avril. La fin du mois de décembre est caractérisée par une diminution brusque du débit. Le débit est ainsi réduit afin de favoriser la formation d'un couvert de glace stable en amont des barrages, puis est rétabli à un niveau normal. La figure 4.1 montre également l'intervalle de confiance à 95% basé sur la loi de Student: ces courbes indiquent que les variations du débit sont importantes en mai et faibles en janvier.

Le débit maximum en été et les faibles fluctuations du débit observés à Cornwall sont causés, comme nous l'avons mentionné, par l'action régularisatrice naturelle des Grands Lacs, et aussi mais plus faiblement par l'effet des barrages d'Iroquois, de Moses-Saunders et de Long Sault. L'absence de tributaire majeur dans la région en amont (Frenette *et al.*, 1989) ne permet pas de modifier cette régularité, comme c'est le cas par exemple avec l'Outaouais à la hauteur du lac Saint-Louis. Les directives portant sur le contrôle des niveaux d'eau de la Commission Mixte Internationale permettent la réduction du débit du Saint-Laurent au printemps, afin d'éviter les inondations dans la région de Montréal, pouvant être causées par les crues de la rivière Outaouais (Yee *et al.*, 1990).

Contrairement aux fluctuations à court terme, les variations de débit à long terme sont relativement grandes. Entre 1933 et 1936 ainsi qu'entre 1962 et 1965, le débit moyen annuel était particulièrement faible, à près de 5 500 m³/s, tandis qu'entre 1972 et 1974, il était à près de 8 500 m³/s (Fig. 4.2). Les débits mensuels extrêmes durant la période s'étendant de 1962 à 1993 sont de 10 012 m³/s (enregistré en mai 1993), et de 4 999 m³/s en mai 1965 (Fig. 4.3).

Une faible portion du débit total du Saint-Laurent emprunte d'autres voies que les barrages (David Fay, comm. pers.) (Tab. 4.1). Selon le trafic aux écluses Snell et Eisenhower, la Voie Maritime utilise entre 0 et 20 m³/s pour le transit des navires. De 5 à 6 m³/s servent comme débit d'entretien dans le canal de Cornwall. L'Alcoa utilise moins de 1 m³/s passant

par le canal de Massena, et rejette ce débit dans la rivière Grasse. Finalement, un faible débit de $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ peut être détourné dans la rivière Raisin au village de Long Sault (Fig. 3.5) comme débit d'entretien en période d'étiage (SLRT, 1992).

Tableau 4.1: Sommaire des débits entrant et sortant du lac Saint-François.

Débit d'entrée: amont du lac Saint-François	
Barrage Moses-Saunders	moyenne annuelle de $7\,500 \text{ m}^3/\text{s}$
Barrage de Long Sault	Rarement utilisé : environ 3 fois en trente ans, seulement si le débit du fleuve dépasse $9\,500 \text{ m}^3/\text{s}$
Ecluses Eisenhower-Snell	entre 0 et $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en saison
Canal de Massena (via rivière Grasse)	Moins de $1 \text{ m}^3/\text{s}$
Rivière Raisin (canal)	Moins de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en saison
Canal de Cornwall	5 à $6 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit de sortie: aval du lac Saint-François	
Fleuve Saint-Laurent (pertuis de Coteau)	moyenne de $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$
Chenal perdu (rivière Saint-Charles)	moins de $5 \text{ m}^3/\text{s}$
Canal de Beauharnois	moyenne de $6\,500 \text{ m}^3/\text{s}$
Rivière Saint-Louis (canal)	incertain mais très faible
Canal de Soulanges	moins de $1 \text{ m}^3/\text{s}$

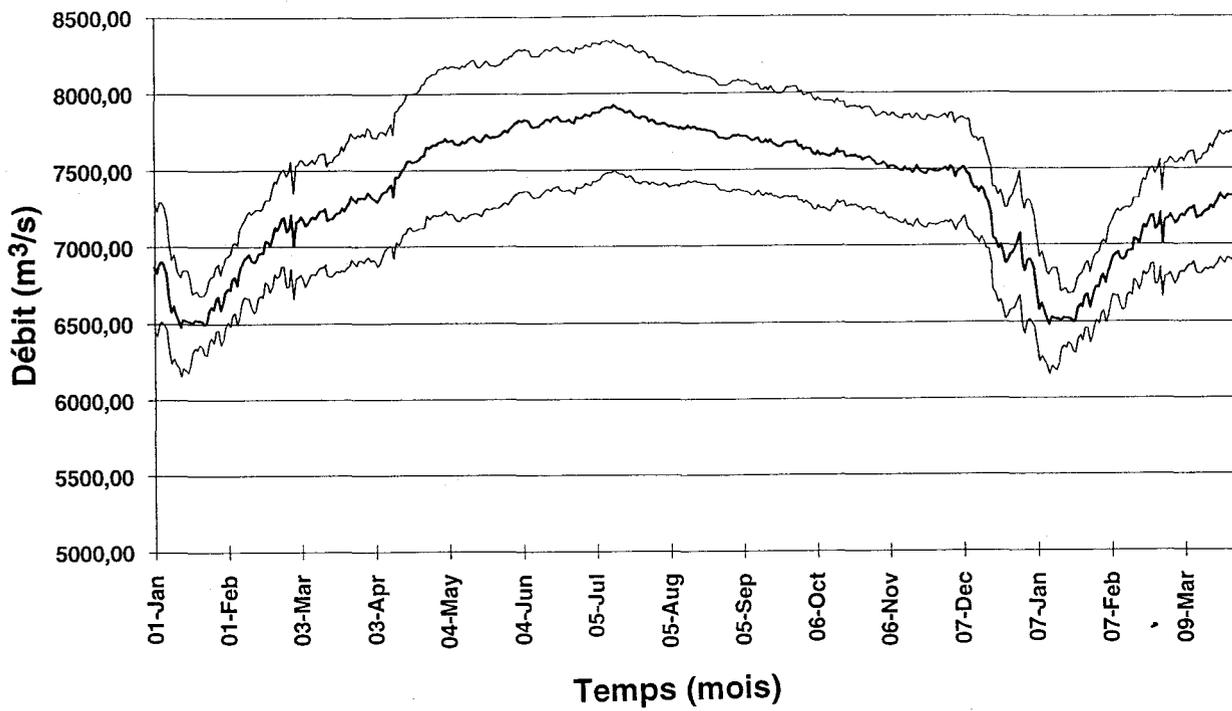


Figure 4.1 : Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit du fleuve Saint-Laurent à Cornwall entre 1958 et 1990.

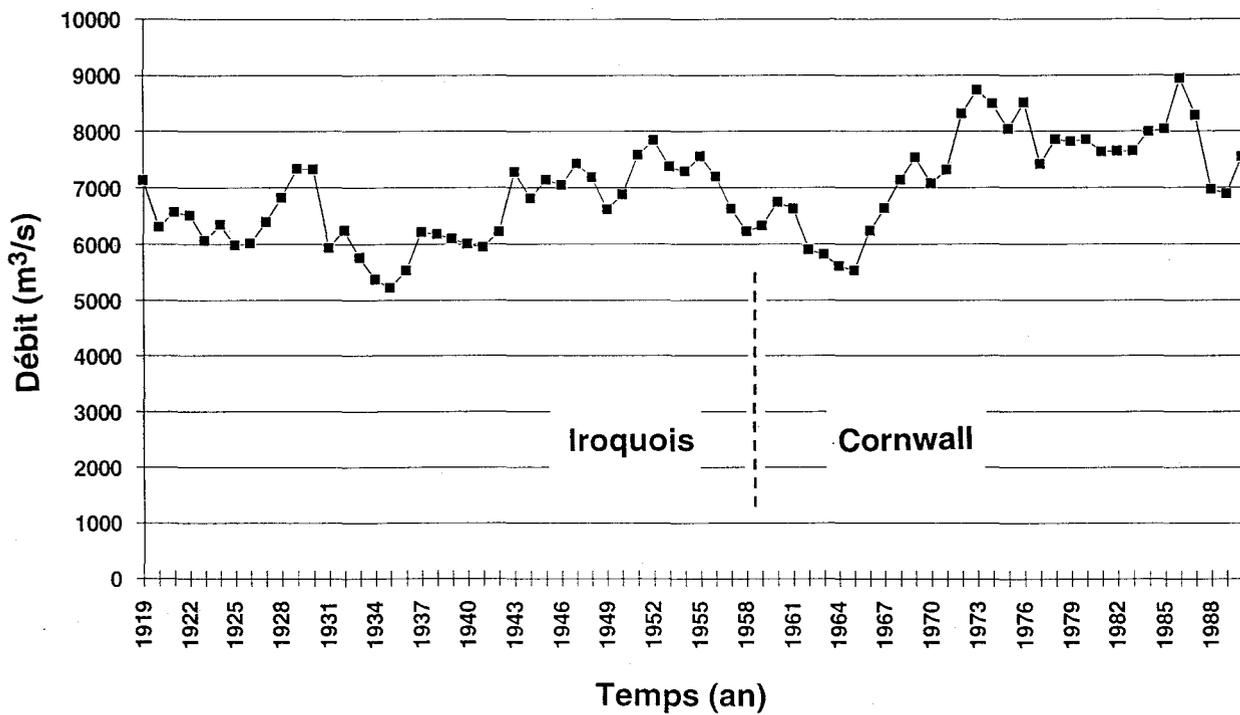


Figure 4.2 : Variations du débit moyen annuel du fleuve Saint-Laurent à Iroquois (1919-1958) et à Cornwall (1959-1990).

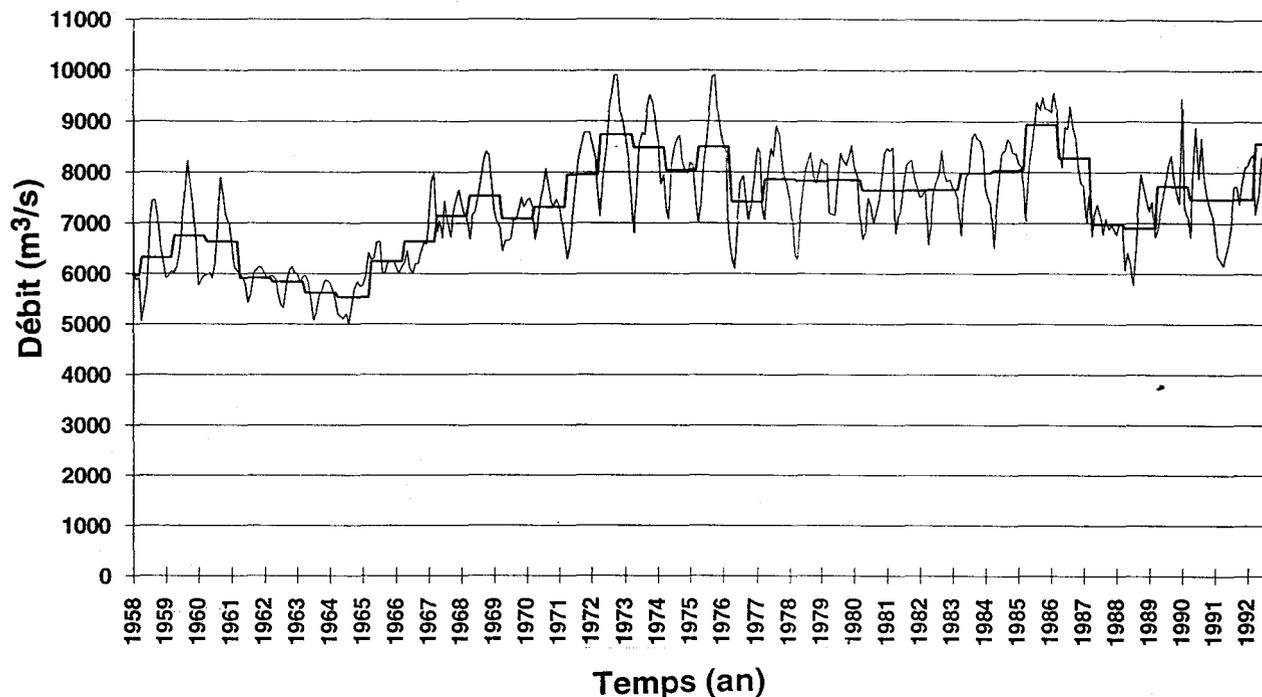


Figure 4.3 : Variations des débits moyens mensuels et annuel du fleuve Saint-Laurent à Cornwall entre octobre 1958 et juin 1993.

4.4 Transfert à l'exutoire - le régime d'exploitation

L'exutoire du lac Saint-François comprend deux sorties: le canal de Beauharnois et les pertuis de Coteau. Le canal de Beauharnois amène la plus grande partie du débit du Saint-Laurent, soit 87 %, tandis que seulement 13 % emprunte le chenal naturel, soit des débits respectifs d'environ 6 500 m³/s et de 1 000 m³/s. De façon générale, le régime du canal de Beauharnois est relativement stable et conditionné par la capacité installée des ouvrages hydroélectriques. Le chenal naturel sert donc de trop plein pour les débits en provenance des Grands Lacs car la réserve utile (marnage) du lac Saint-François n'est d'aucune utilité pour absorber les variations hydrologiques en raison de la stabilité de niveau qu'on lui impose.

Le débit du canal de Beauharnois est utilisé pour produire de l'énergie hydroélectrique et alimenter l'écluse adjacente au barrage. La production d'hydroélectricité s'effectue habituellement à la capacité installée de l'ouvrage, sauf en certaines périodes où il est nécessaire de tenir compte de la contrainte de formation du couvert de glace. Il s'agit donc d'un débit fortement régularisé. La courbe des débits moyens journaliers annuels sur 30 ans (Fig. 4.4), qui comprennent les débits turbinés, déversés et éclusés, montre un débit moyen variant entre 5 600 m³/s en hiver, durant la période de formation de la glace, et 6 800 m³/s en automne, soit une variation maximale moyenne de 1 200 m³/s. Cette variation représente 18% du débit moyen annuel. La courbe typique de débit (Fig. 4.4) est stable

entre le début de mai jusqu'au début de décembre, à 6 700 m³/s. Le débit diminue brusquement au commencement de décembre, afin de favoriser la formation d'un couvert de glace stable en amont du barrage. Les débits augmentent progressivement jusqu'au début de mars, puis diminuent jusqu'au début d'avril. La distribution des débits autour de la moyenne est uniforme pendant presque toute l'année, à l'exception du début de l'hiver.

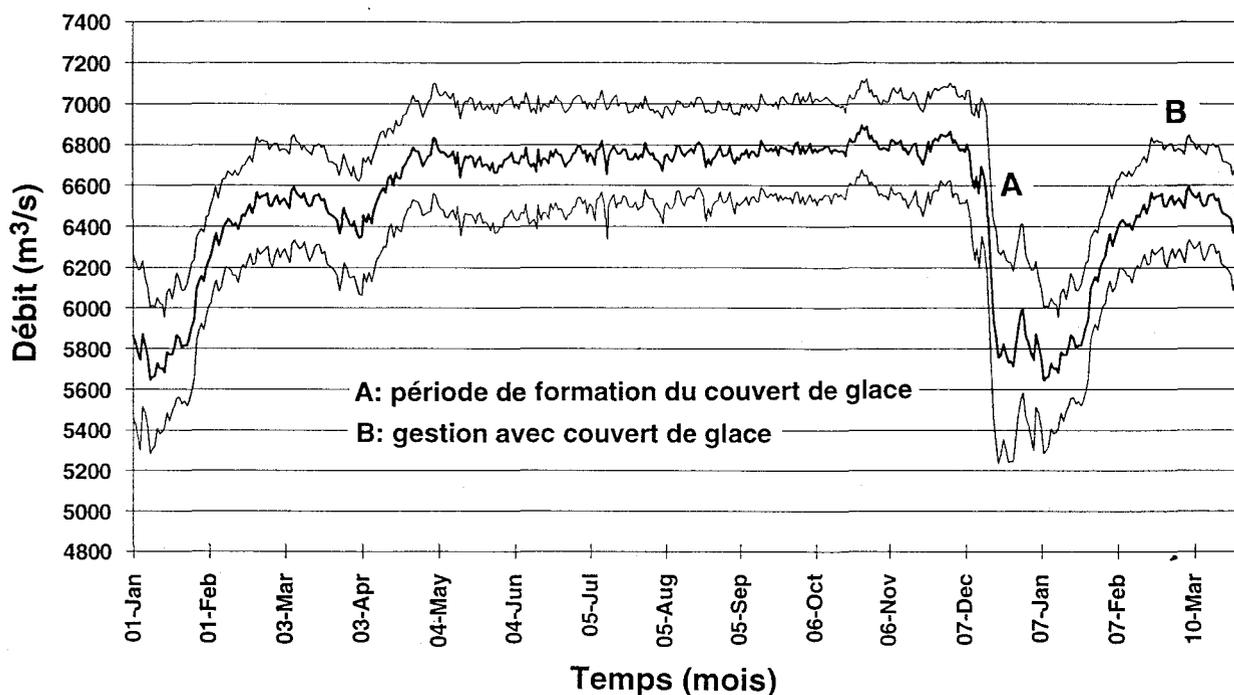


Figure 4.4 : Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit turbiné et déversé entre 1963 et 1992 à Beauharnois.

Le débit passant aux vannes de Coteau est mesuré à la centrale et au déversoir de Les Cèdres, situés à quelques kilomètres en aval. La courbe de débit de Les Cèdres (Fig. 4.5) comprend les débits qui sont turbinés et déversés ainsi que ceux de la rivière Delisle (débit moyen annuel de 6 m³/s, 23 m³/s au printemps et 2 m³/s en été) entrant près de Coteau-du-lac (Fig. 3.1). La courbe laisse voir un débit maximum de près de 1 600 m³/s au début de mai, valeur qui diminue progressivement jusqu'au début de décembre. Cet abaissement graduel est suivi d'un second sommet au début de l'hiver, puis d'un minimum en février. Le débit qui est déversé à Coteau vers Les Cèdres constitue l'excédent qui n'est pas turbiné à Beauharnois (Fig. 4.6). Durant la période sans glace, le débit à Les Cèdres diminue graduellement, condition nécessaire pour maintenir un débit régulier à Beauharnois. Pendant la période de formation de la glace, le débit est diminué dans le canal de Beauharnois et augmenté à Les Cèdres; c'est l'inverse lorsque le couvert de glace est stable. Vers le début d'avril, à la fonte des glaces, le débit est diminué temporairement dans le canal afin de réduire les vitesses de courant et donc faciliter la manoeuvre des navires à travers les glaces flottantes. Ces réductions de débit ne durent que le temps du passage des navires (Sylvain Robert, comm. pers.).

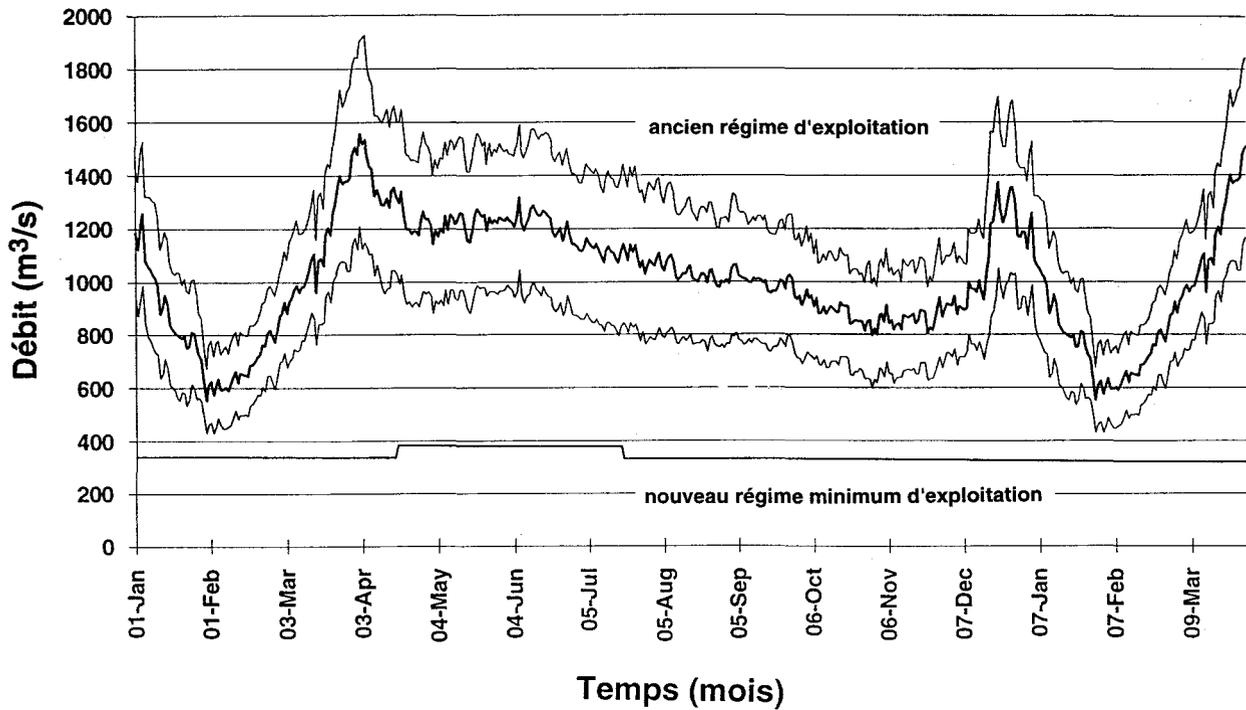


Figure 4.5 : Variation de la moyenne journalière interannuelle débit total (turbiné et déversé) entre 1963 et 1992 à Les Cèdres ainsi que le nouveau régime minimum d'exploitation à Coteau (depuis déc. 1993).

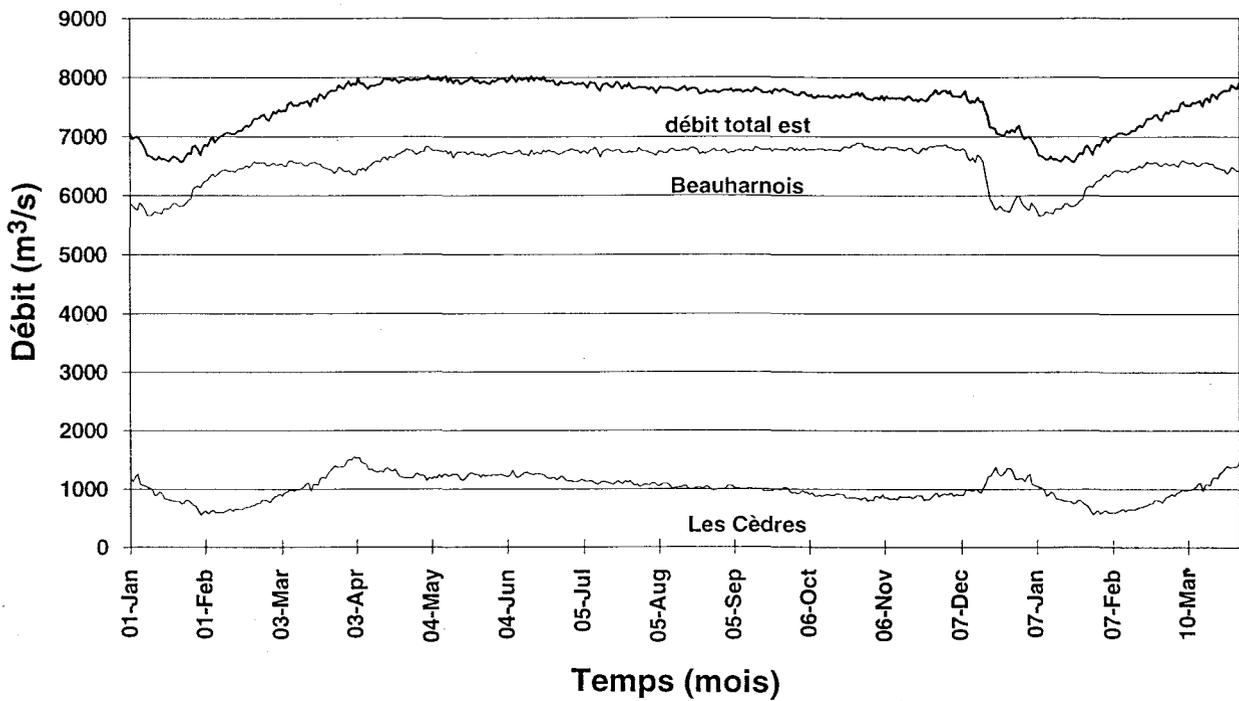


Figure 4.6 : Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit total en aval du lac Saint-François entre 1963 et 1992 et de sa répartition entre Les Cèdres et Beauharnois.

Comme il a été mentionné, les ouvrages de Coteau (Fig. 3.3) sont utilisés pour régulariser les débits dans le canal de Beauharnois; les ouvrages sont gérés en vue de minimiser la mortalité des poissons et l'érosion des berges immédiatement à la sortie des vannes. Seulement les ouvrages 1 et 3 sont utilisés opérationnellement; le débit à Coteau 3 est maintenu stable tandis que Coteau 1 est utilisé pour absorber les variations de débit du fleuve. Depuis décembre 1993, Hydro-Québec applique le régime d'exploitation suivant :

- les débits minimums ont été fixés à 200 m³/s et 300 m³/s à Coteau 3 pour les périodes respectives du 16 juillet au 14 avril et du 15 avril au 15 juillet; ces débits sont généralement ceux utilisés (Fig. 4.5);
- à Coteau 1 pour les mêmes périodes, les débits minimums sont respectivement de 90 m³/s et de 140 m³/s;
- tant que les débits totaux sont inférieurs à 1 440 m³/s, le débit à Coteau 3 reste à 200 ou 300 m³/s tandis que Coteau 1 sert à évacuer l'excédant;
- lorsque les débits totaux dépassent 1 440 m³/s, le débit supplémentaire est partagé également entre les deux ouvrages et ce, en employant d'abord les vannes centrales.

Ce régime d'exploitation est en application depuis trop peu de temps pour que des statistiques puissent être établies. Avec le nouveau régime d'exploitation, le débit à Coteau étant plus faible, le débit transitant dans le canal de Beauharnois devrait être plus grand d'environ 500 à 1000 m³/s.

Une très faible quantité d'eau emprunte d'autres voies que celles que nous venons de décrire; il s'agit du chenal perdu du fleuve (rivière Saint-Charles), du canal Saint-Louis qui amène l'eau du lac à la rivière Saint-Louis et du canal de Soulanges (Tab. 4.1).

4.5 Bilan hydrologique

Les débits entrant dans le lac Saint-François (Fig. 4.7) sont légèrement plus faibles que les débits qui en sortent, la différence atteignant un maximum moyen d'environ 700 m³/s au printemps et 300 m³/s en automne. Cet écart est bien sûr dû aux apports intermédiaires des sous-bassins entre Cornwall et Valleyfield.

L'apport d'eau des principaux tributaires au printemps est de l'ordre de 450 m³/s; il y aurait donc un apport d'environ 250 m³/s provenant du ruissellement de surface des petits ruisseaux et de la nappe phréatique. L'incertitude sur les mesures de débit aux barrages amont et aval du lac est de l'ordre de 2% (Sylvain Robert, comm. pers.). Les mesures effectuées à l'été 1994 l'aide d'un courantomètre à effet Doppler dans le canal de Beauharnois ont montré que les mesures de débits à la centrale de Beauharnois étaient sous-évaluées d'environ 250 m³/s.

4.6 Tributaires du lac

L'apport d'eau par les tributaires dans le lac Saint-François est relativement faible. Les tributaires les plus importants sont situés du côté sud, à la tête du lac, sur les territoires américain et québécois (Fig. 4.8). D'ouest en est, ce sont les rivières Grasse, Raquette, Saint-Régis et aux Saumons qui ont respectivement des débits moyens de 32 m³/s, 67 m³/s, 31 m³/s et 19 m³/s. Les rivières Beaudette, Raisin et à la Guerre ont des débits de moins de 5 m³/s (Tab. 4.2). De façon générale, le débit de ces tributaires est plus fort de la fin mars au début d'avril, avec une autre pointe de moindre importance à la fin novembre. Les conditions d'étiage se manifestent aux mois de juillet et d'août. La rivière Raquette, le plus important tributaire, a un débit maximum moyen interannuel de 120 m³/s au printemps et un minimum de 40 m³/s en été (Fig. 4.9). Les courbes de débit moyens journaliers interannuels de chacun des tributaires sont présentés à l'annexe 2 (Figures A2.1 à A2.5).

Les rivières Raisin, Beaudette et à la Guerre drainent des zones essentiellement agricoles tandis, que les rivières Grasse, Raquette, Saint-Régis et aux Saumons prennent leur source dans les zones forestières des montagnes Adirondacks et drainent également des zones agricoles plus au nord (Fig. 4.8).

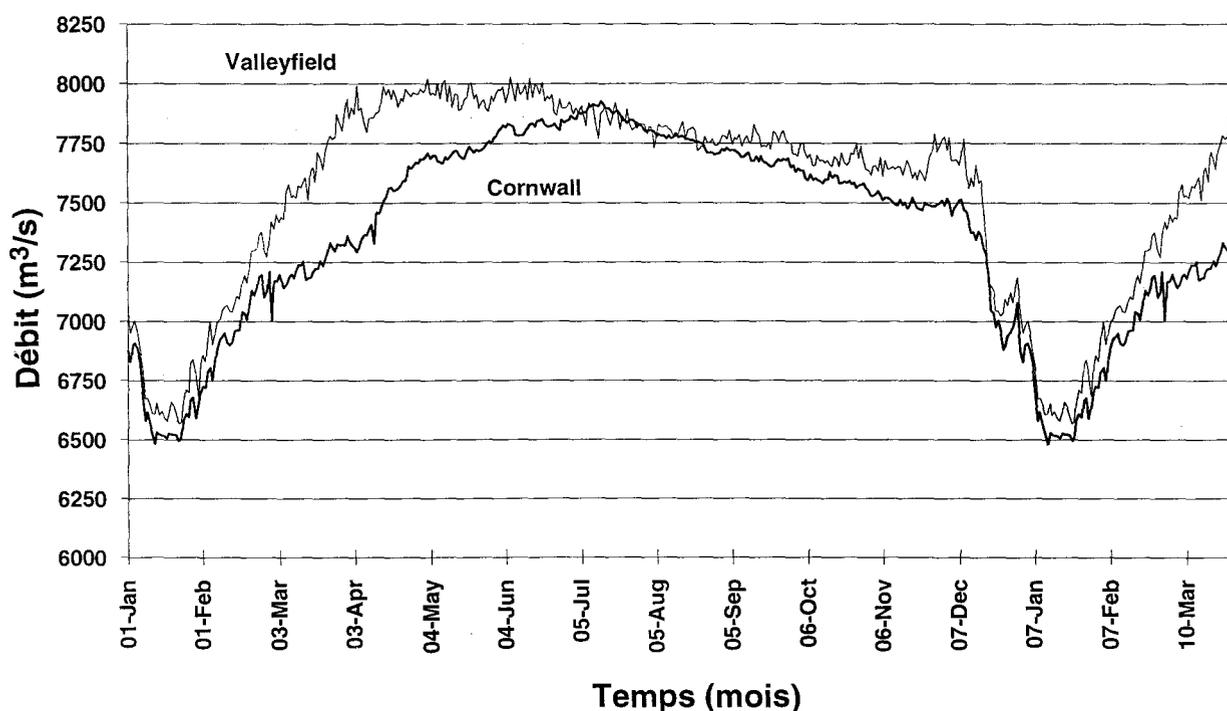


Figure 4.7 : Comparaison entre les débits moyens journaliers interannuels sortant (Valleyfield) et entrant (Cornwall) dans le lac Saint-François entre 1963 et 1992.

Tableau 4.2: Débit moyen et superficie de drainage des tributaires à leur embouchure au lac Saint François. Modifié de SLRT (1992) de Cornwall - lac Saint-François.

Tributaires	débit moyen (m³/s)	superficie de drainage (km²)
Raquette	59,7	3 257
Grasse	31,9	1 667
Saint-Régis	29,8	2 357
Aux Saumons	18,5	1 070
Raisin	4,3	404
Beaudette	3,3	189
À la Guerre	1,4	83

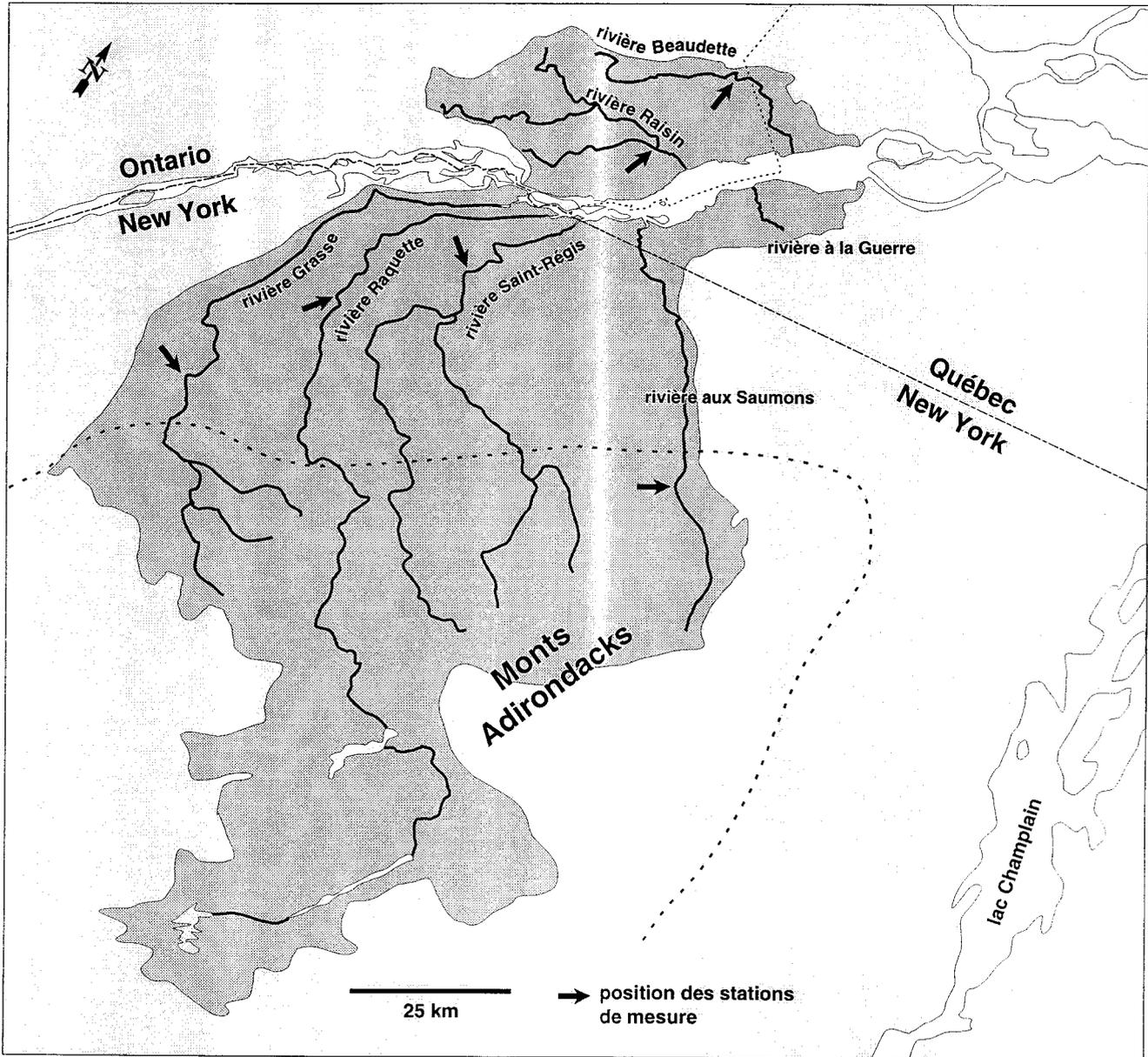


Figure 4.8 : Bassins de drainage des tributaires du fleuve se jetant dans le lac Saint-François. Les tributaires du versant méridional sont les plus importants. Ils prennent leur source dans les monts Adirondacks

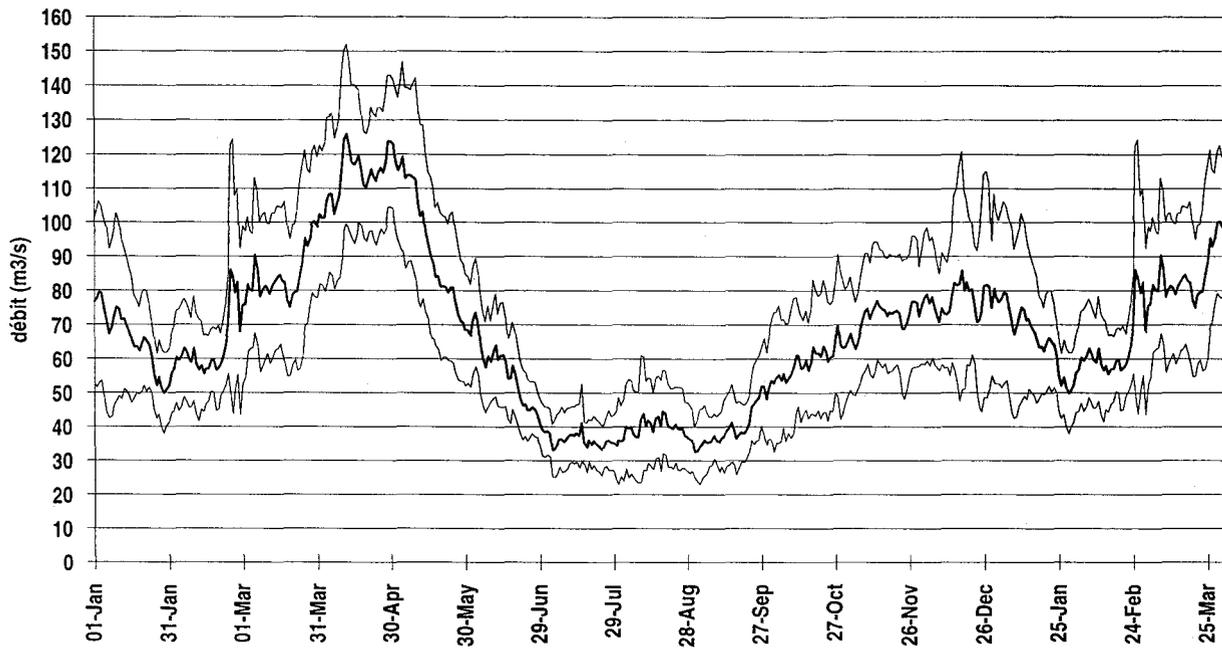


Figure 4.9 : Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Raquette entre 1976 et 1992 ainsi que l'intervalle de confiance à 95% de Student. Les mesures du USGS ont été prises à Raymondville, N.Y. et représentent une superficie de drainage de 2913 km². Le module est 67 m³/s.

5 NIVEAUX D'EAU

5.1 Rôle de ces données

L'étude des niveaux d'eau en association avec les débits permet de connaître les relations dénivellation-débit ou niveau-débit caractérisant le tronçon. Ces relations servent à établir les conditions aux limites du niveau d'eau lors des différentes modélisations. Ces relations ne sont pas nécessairement univoques et peuvent présenter un aspect saisonnier dû principalement à la présence de la glace ou des macrophytes. La connaissance des niveaux d'eau au sein du domaine de simulation pour certains événements est également très utile pour les phases de calibration et de validation du modèle.

5.2 Données disponibles

Les données de niveaux d'eau sont obtenues à quatre stations sur le lac, soit à Cornwall, Summerstown, Coteau-Landing et Beauharnois. Les niveaux moyens journaliers utilisés, soit entre 1962 et 1990, proviennent de la base de donnée HYDAT. Les données de la station de Coteau-Landing entre 1919 et 1990 ont été utilisées pour décrire les variations du niveau à long terme.

5.3 Historique des niveaux d'eau: de plus en plus de contrôle

Le niveau d'eau dans le lac Saint-François est contrôlé et ne varie plus que d'une dizaine de centimètres annuellement. Le niveau est influencé par les ouvrages depuis 1932, c'est-à-dire depuis la mise en fonction du canal et de la centrale de Beauharnois. La figure 5.1 montre une relation évidente entre les variations du niveau et celles du débit au seuil de Coteau-Landing avant 1932; la même relation est difficilement détectable après cette date. Les variations annuelles de niveau sont d'environ 60 cm dans les années 20 et demeurent du même ordre de grandeur jusque dans les années 50, à environ 50 cm. Toutefois, suite à la construction du barrage Iroquois qui contrôle le niveau au lac Ontario en 1958 et à la construction de la voie maritime en 1959, la variation annuelle du niveau passe à 25 cm au début des années 60 et à environ 12 cm depuis 1988. Ces faibles amplitudes de variation sont le résultat de pressions qui durent depuis plusieurs années de la part de l'administration de la voie maritime, des résidents des rives et d'Hydro-Québec. L'administration de la voie maritime demande des variations faibles et un niveau moyen le plus élevé possible afin de pouvoir faire transiter en toute sécurité des bateaux à fort tirants d'eau. Les résidents veulent un niveau le plus constant possible entre autres pour leurs embarcations de plaisance et leur prise d'eau. Hydro-Québec favorise le maintien d'un niveau stable et le plus élevé possible afin de maintenir au maximum le potentiel de production énergétique.

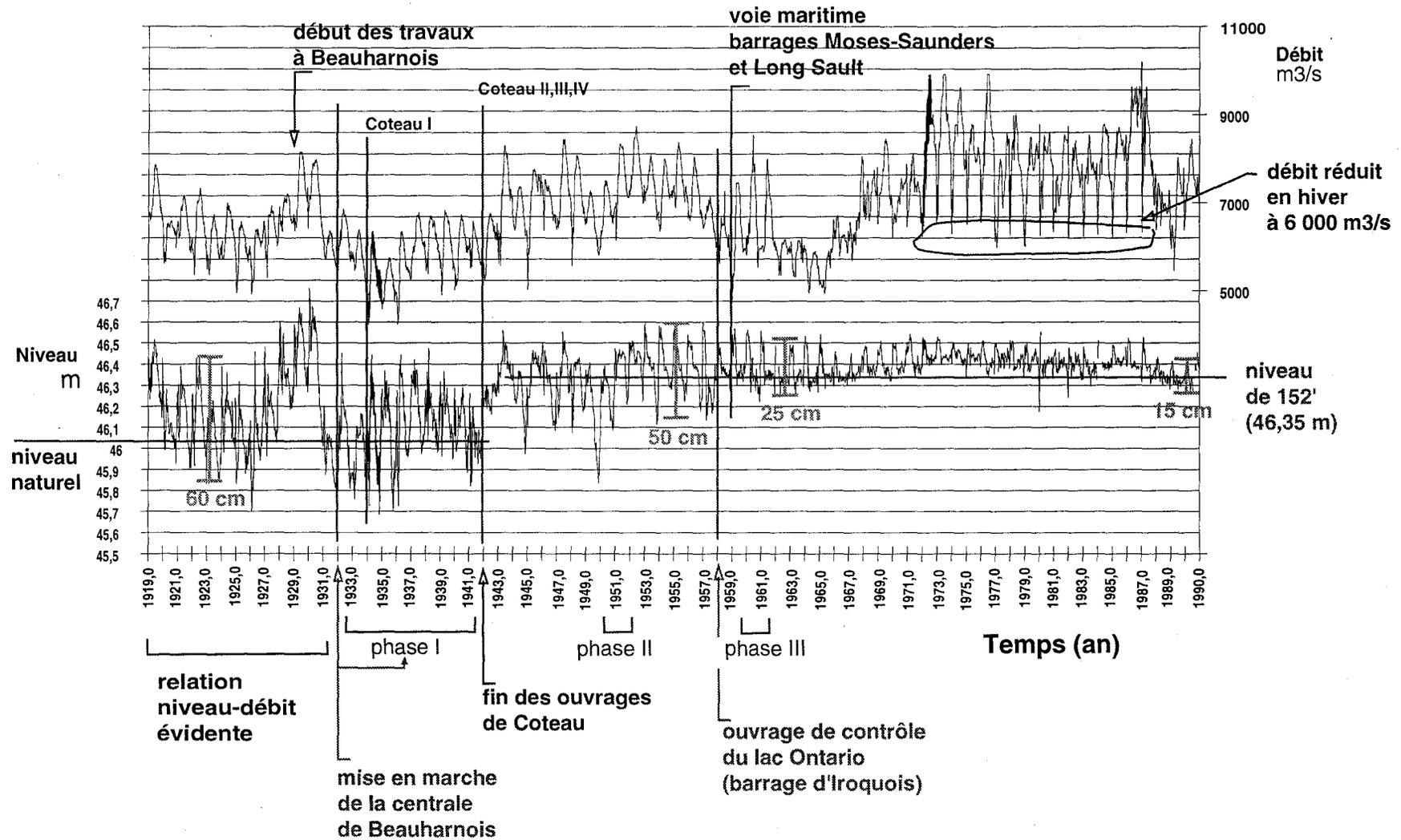


Figure 5.1 : Comparaison entre le débit du Saint-Laurent à Cornwall-Iroquois et le niveau du lac Saint-François à Coteau-Landing entre 1919 et 1990. La partie inférieure présente les principales modifications de l'écoulement et montre ainsi les effets sur la relation niveau-débit au lac Saint-François.

Toutefois, il est à noter que la centrale de Beauharnois a été conçue pour tenir compte des variations de niveau du début du siècle (Sylvain Robert, comm. pers.). Un autre changement important dans la gestion des niveaux, a été le rehaussement du plan d'eau à un niveau moyen de 152 pieds (46,3 m). Ce dernier a été fixé durant la guerre, afin d'augmenter la production de la centrale de Beauharnois et n'a jamais été ramené à la valeur moyenne naturelle soit à près de 151 pieds (46,0 m).

5.4 Dénivellation du plan d'eau

Pour mettre en évidence le comportement de la ligne d'énergie, donnée essentielle pour la modélisation hydrodynamique à cause de la nature gravitationnelle des écoulements, nous devons établir la dénivellation du plan d'eau entre divers points de contrôle. Dans le cas présent, Beauharnois (centrale), Coteau-Landing, Summerstown et Cornwall sont les points retenus pour l'analyse. L'information sur les dénivellations permet d'observer directement les effets respectifs de la glace et des plantes aquatiques se superposant à la friction du substrat du lit du fleuve.

En moyenne, les pentes (Fig. 5.2) sont fortes entre Cornwall et Summerstown ainsi que dans le canal de Beauharnois, et relativement faibles dans les parties lacustre et chenalisée, soit entre Summerstown et Coteau-Landing. De façon générale, les pentes dans le lac sont plus fortes en présence de glace en hiver, plus faibles au printemps et en automne, et sont moyennes en présence de plantes aquatiques durant l'été. En conséquence, les variations annuelles moyennes de niveau au lac Saint-François établies sur 28 ans, entre 1963 et 1990, sont d'environ 10 cm à Coteau-Landing alors qu'elles sont de 20 cm à Cornwall. Cette différence de variation de niveau entre l'amont et l'aval est causée par la friction due aux plantes aquatiques en été et à la glace en hiver, qui augmente la pente du niveau de surface.

Entre Summerstown et Coteau-Landing, l'influence des plantes aquatiques et celle de la glace sur la pente sont du même ordre de grandeur. La figure 5.3 montre sur une échelle amplifiée la variation de la pente au cours de l'année. Les effets de la glace en hiver et des plantes aquatiques en été y sont marqués; la pente est forte à la fin du mois d'août, et est sensiblement la même que celle due à la glace en mars.

Les pentes observées dans le lac Saint-François en hiver et au printemps sont comparables avec celles du lac Saint-Pierre pour les mêmes périodes. Cependant, les pentes durant la période de croissance des macrophytes sont plus faibles au lac Saint-François. Dans le lac Saint-Pierre (Leclerc *et al*, 1992), l'effet de la glace est le même que celui causé par les macrophytes en été. La différence entre le lac Saint-Pierre et la partie "lacustre" du lac Saint-François peut être reliée à leur bathymétrie. Le lac Saint-Pierre est très peu profond (3-4m), comparé à la partie "lacustre" du lac Saint-François (3-10 m) et ceci laisse supposer que les plantes aquatiques exercent leur influence sur une plus grande proportion de la colonne d'eau au lac Saint-Pierre ou encore, que le couvert de végétation aquatique est moins dense ou occupe relativement moins d'espace au lac Saint-François.

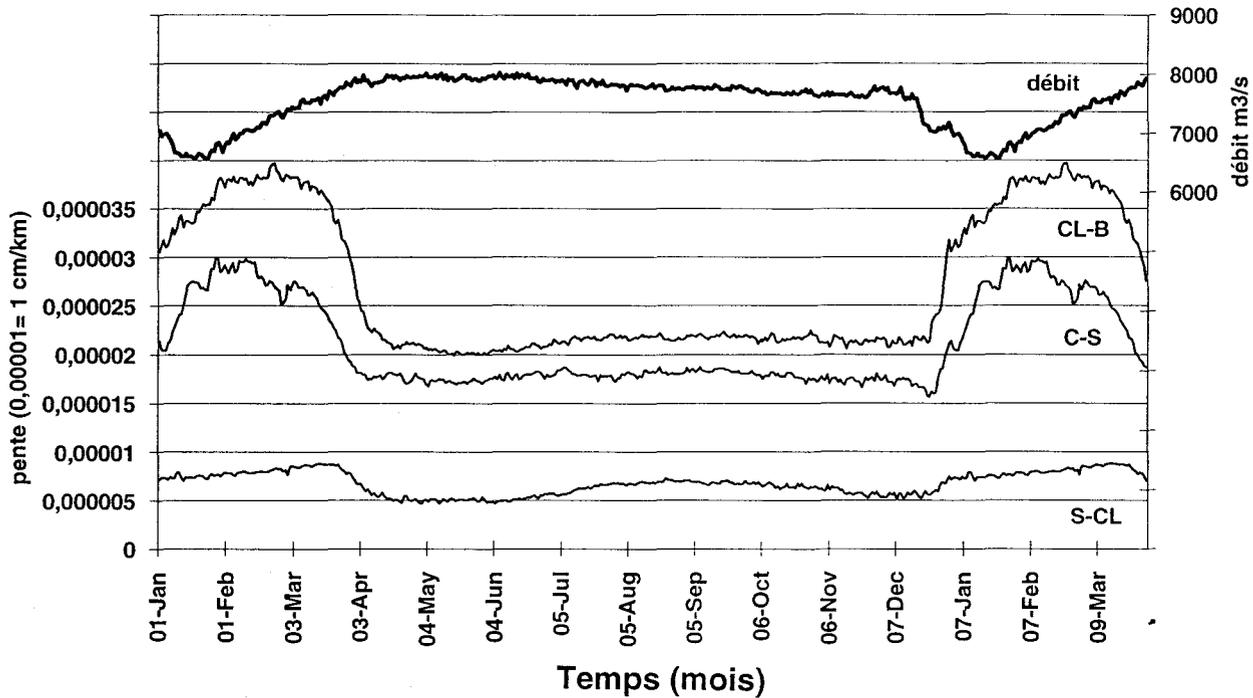


Figure 5.2 : Variation de la moyenne journalière de la pente et du débit au lac Saint-François entre 1962 et 1990. Il n'existe pas ou peu de relation entre le débit et la pente. CL-B = pente entre Coteau-Landing et la centrale de Beauharnois; C-S = pente entre Cornwall et Summerstown; S-CL = pente entre Summerstown et Coteau-Landing

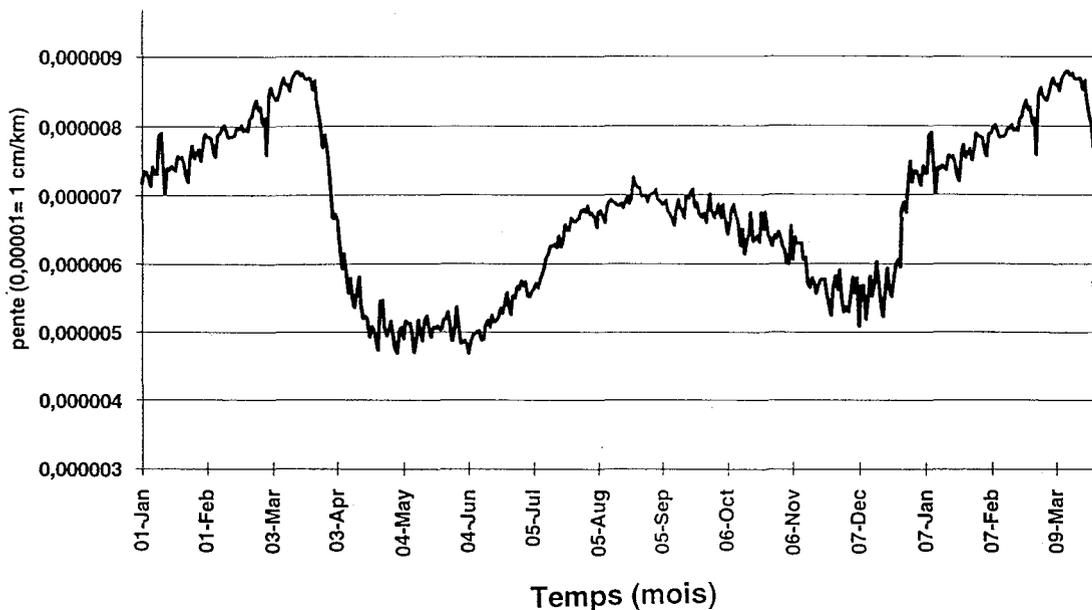


Figure 5.3: Vue détaillée de la pente entre Summerstown et Coteau-Landing, ce qui représente les parties lacustre et chenalisée (peu profonde) du lac Saint-François. La courbe montre une forte pente en hiver causée par la glace et une pente forte en été. L'augmentation de la pente en été, alors que le débit est presque constant, est causée par la croissance des macrophytes qui sont très abondants dans les parties profondes du lac.

5.5 Relation dénivellation-débit

On retrouve dans les courbes de variation annuelle de pentes quatre périodes caractérisées par des valeurs relativement stables (Fig. 5.2). Il s'agit des périodes de couvert de glace stable (15 janvier-15 mars), d'absence de macrophytes (15 avril-15 juin), de maximum de croissance des macrophytes (20 juillet-1 octobre) et de la période de sénescence des macrophytes (15 novembre-15 décembre). Les lignes d'eau aux périodes caractéristiques sont présentées à la figure 5.4. La dénivellation est au plus faible en l'absence de glace et de macrophytes, et très forte en présence de glace. On remarque également que le niveau du lac est augmenté à Coteau-Landing en hiver, afin de faciliter l'écoulement sous le couvert de glace dans le canal de Beauharnois; la dénivellation doit être plus forte pour compenser la friction du couvert et faire passer un débit donné.

Une relation distincte relie la dénivellation entre Cornwall et l'entrée du canal de Beauharnois et le débit pour chaque période de pente stable. La figure 5.5 indique que ces relations sont grossièrement linéaires. Celles-ci étant très utiles lors de la calibration et de la validation du modèle hydrodynamique, les mêmes graphiques ont été produits pour les différents segments séparant les quatre stations limnimétriques du lac (voir l'Annexe 1).

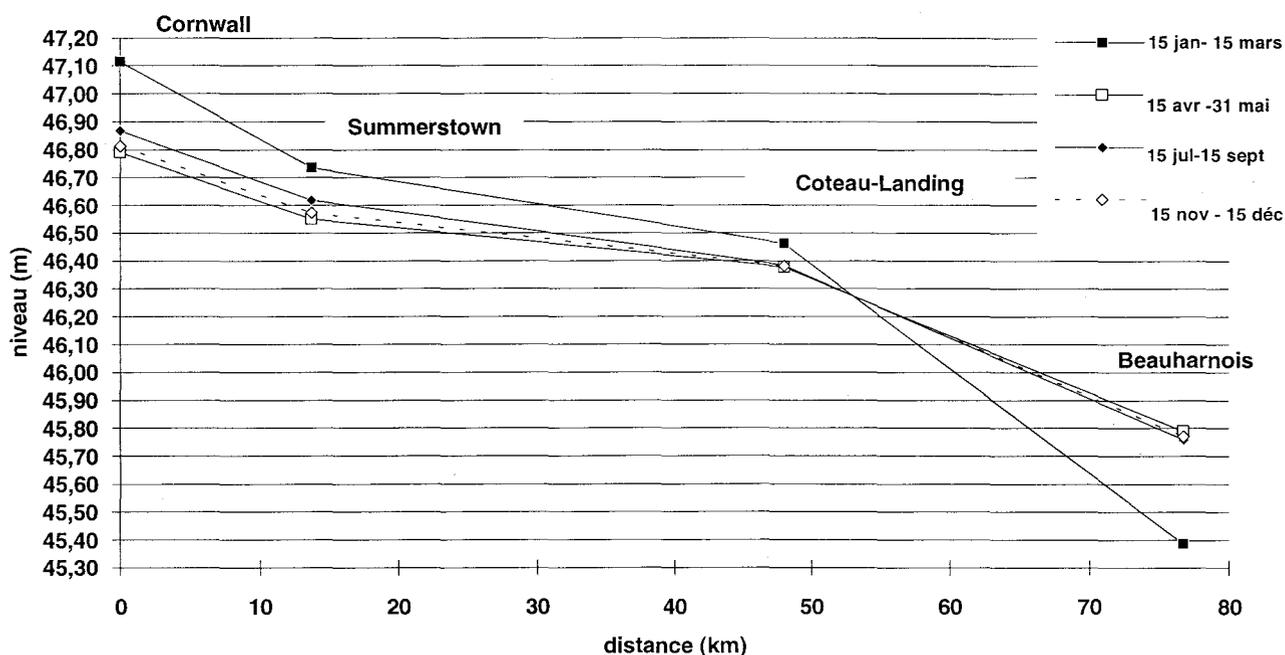


Figure 5.4 : Variation, entre 1962 et 1990, des niveaux d'eau moyens typiques à chaque saison selon les stations de mesure du niveau au lac Saint-François. 15 janvier - 15 mars = période de couvert de glace; 15 avril - 31 mai = période d'absence de glace et de macrophytes; 15 juillet - 15 septembre = période de croissance maximale des macrophytes; 15 novembre - 15 décembre = période de sénescence des macrophytes.

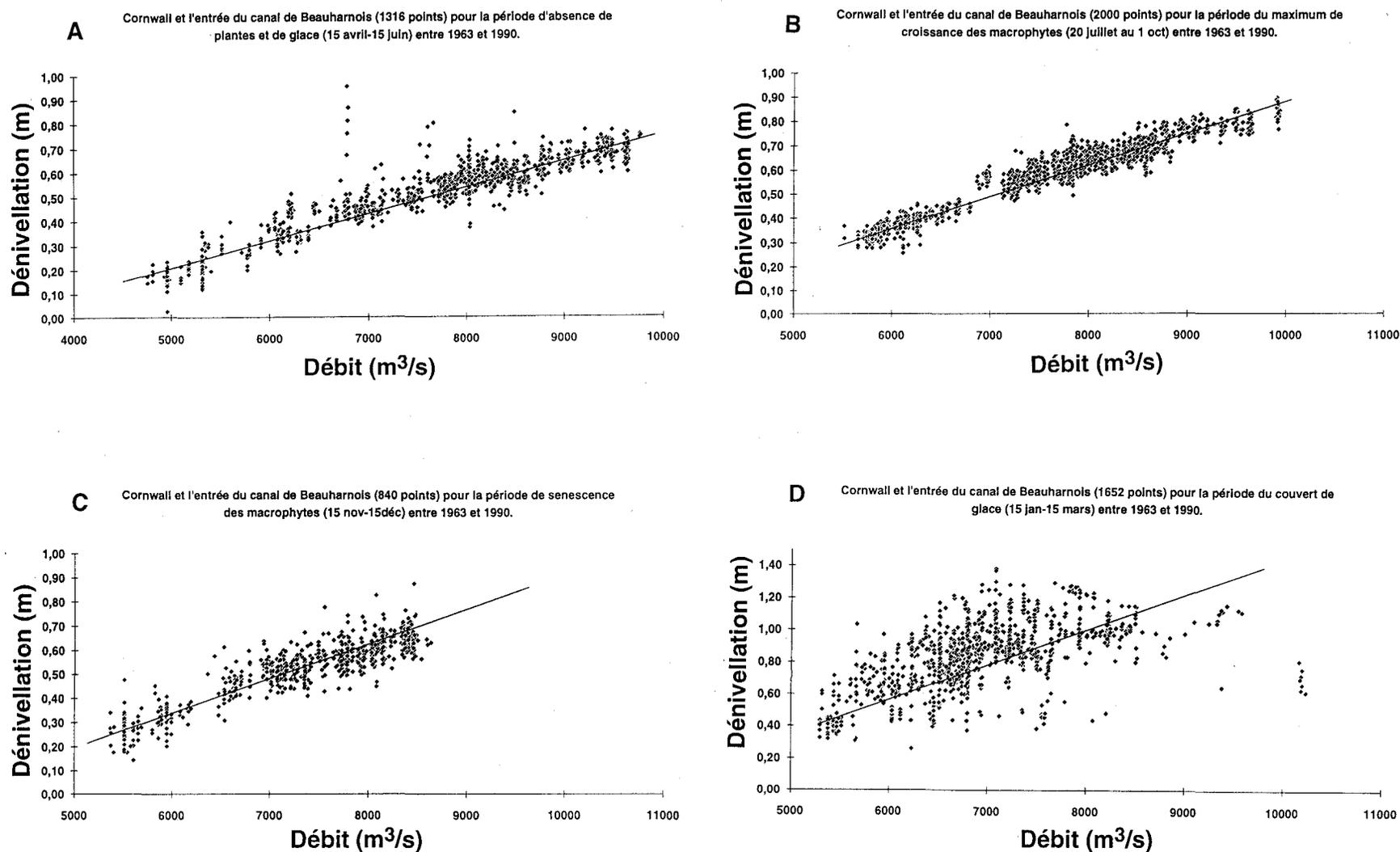


Figure 5.5 : Relation dénivellation-débit (données journalières) pour les différentes périodes de pentes typiques à l'intérieur des limites du modèle hydrodynamique. A: 15 avril - 31 mai = période d'absence de glace et de macrophytes (N=1300); B: 15 juillet - 15 septembre = période de croissance maximale des macrophytes (N=2000); C: 15 novembre - 15 décembre = période de sénescence des macrophytes (N=840); D: 15 janvier - 15 mars = période de couvert de glace (N=1650).

6 VENTS

6.1 Rôle de ces données dans la modélisation

Le vent est la seconde sollicitation en importance après la gravité pour mettre les masses d'eau en mouvement ou pour influencer leur trajectoire. Sa connaissance est donc importante, particulièrement pour les milieux lacustres qui peuvent être fortement influencés par le vent. Le vent est un des facteurs pouvant être utilisés afin de déterminer les événements simulés dans une optique d'événements de référence.

6.2 Données disponibles

Les données climatiques proviennent d'Environnement Canada et ont été mesurées à Cornwall. Nous avons utilisé pour les analyses les données horaires d'intensité et de direction des vents sur cinq ans, soit entre 1986 et 1990.

6.3 Analyse

Les vents dominants dans la région du lac Saint-François soufflent principalement selon l'axe ouest-est. Toutefois, la seule station de mesure des vents dans la région est située à Cornwall; il est possible que les vents diffèrent légèrement dans la partie orientale du lac.

Au cours d'une année moyenne, l'intensité journalière des vents varie en fonction de la saison. Les vents sont faibles en été, moyens au printemps et en hiver, et forts en automne. Durant cette même année moyenne, les vents proviennent principalement de l'ouest (25%), du sud-ouest (18 %) du nord-ouest (18%) et de l'est (16%). Selon les moyennes horaires mesurées entre 1986 et 1990, l'intensité des vents varie entre 0 et 54 km/h avec une moyenne de 15,4 km/h. Les intensités sont divisées en quatre classes: faible (0-10 km/h), moyen (10-25 km/h), fort (25-45 km/h) et extrême (45 km/h et plus). Près de 70% des vents sont moyens (Fig. 6.1). Les vents faibles proviennent de plusieurs directions, mais en règle générale, plus les vents sont forts plus ils ont tendance à provenir de l'ouest. Le printemps fait exception; les vents moyens, forts et extrêmes viennent alors plus fréquemment de l'est. Les vents d'été sont surtout moyens et faibles; il n'y a que très peu de vents extrêmes. La proportion des vents faibles, moyens et forts est semblable; il est à noter, toutefois, que les vents forts et extrêmes sont légèrement plus fréquents en automne et en hiver. Les vents pour chacune des saisons sont présentés à l'Annexe 3.

Les vents ont un patron de variation journalier. En moyenne, ils sont maximaux vers 14h00, minimaux le matin vers 08h00 et en soirée entre 17h00 et 20h00, selon la saison (Fig. 6.2). Durant la nuit, les vents sont relativement stables.

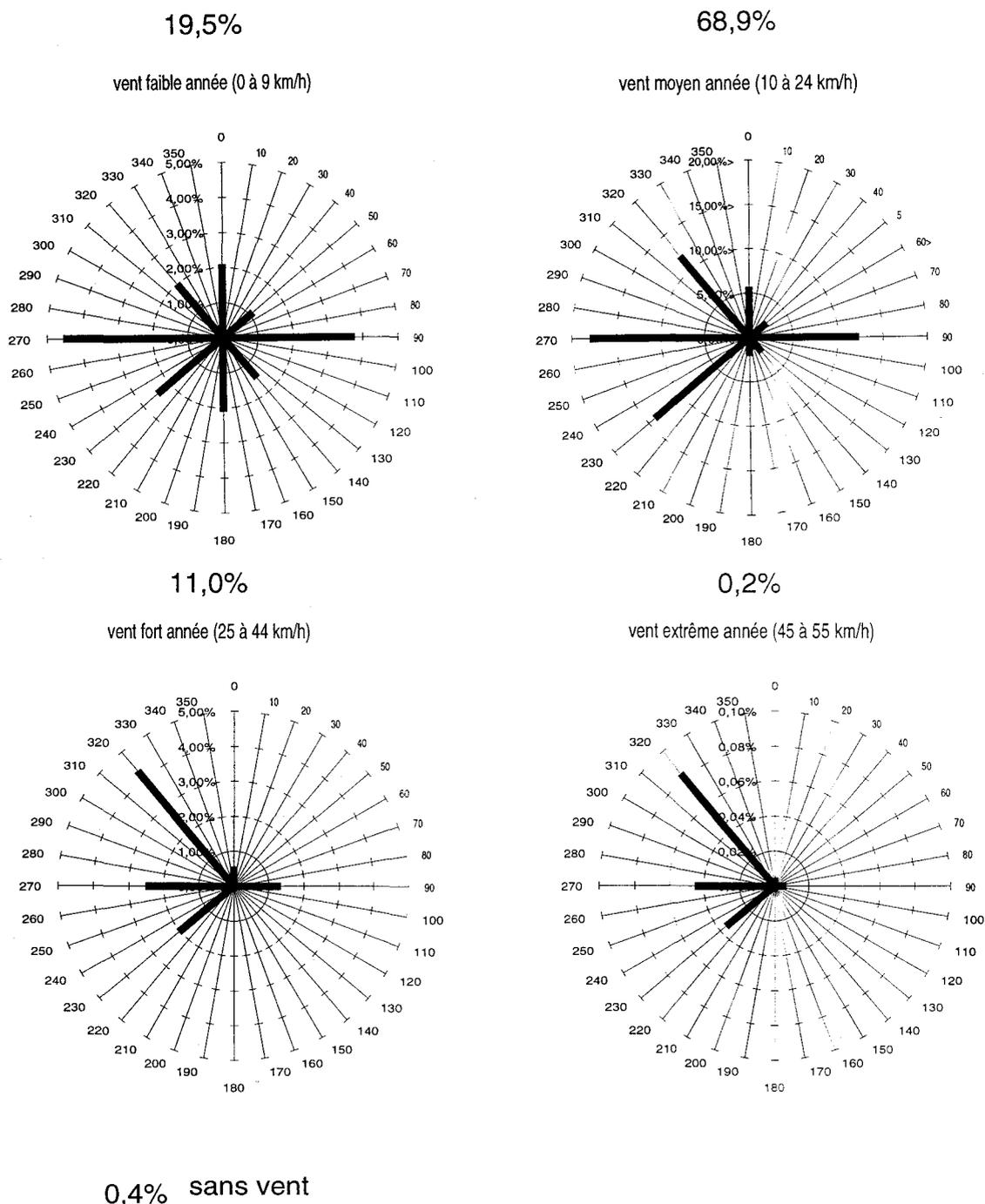


Figure 6.1 : Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) durant une année moyenne établie avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.

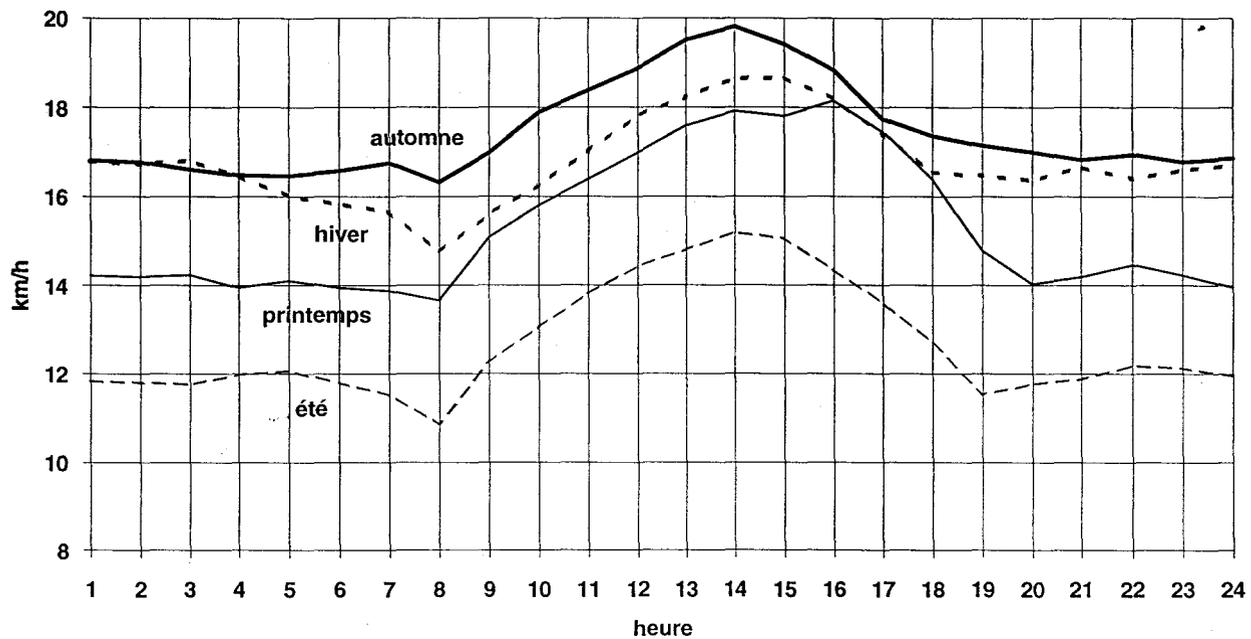


Figure 6.2 : Variation journalière moyenne de la vitesse horaire moyenne des vents à Cornwall entre 1969 et 1990 selon les saisons.

7 SUBSTRATS

7.1 Rôle des données de substrats dans la modélisation

La nature du substrat est habituellement le principal facteur déterminant la résistance à l'écoulement au sein d'un domaine fluvial. Le frottement étant introduit localement, le modèle de terrain doit bien représenter la variation spatiale des substrats. Pour les fins de modélisation hydrodynamique, seule la texture des sédiments du fond, lorsque traduite en coefficients de frottement, a un impact sur les résultats du modèle. L'origine et l'âge des sédiments n'ont pas d'influence sur l'écoulement. Ces informations peuvent toutefois être utiles lors d'une validation "sédimentologique" du modèle hydrodynamique. Une connaissance de la dynamique saisonnière des sédiments du fond permettrait d'incorporer ce phénomène dans le processus d'ajustement des paramètres de frottement du modèle.

7.2 Données disponibles et description

La cartographie du substrat provient d'un rapport du Centre Saint-Laurent (Lorrain *et al.*, 1993). La distribution des sédiments a été établie à partir d'un échantillonnage effectué à l'été 1989.

Les zones localisées en bordure du lac (Fig. 7.1) et dans les chenaux sont souvent caractérisées par une absence d'argile et de limon (silt), correspondant à des zones de fortes énergies dues aux vagues ou aux courants. Les hauts-fonds sont constitués de limon argileux en amont et passant à des sables boueux vers l'aval. La forte concentration de sable dans la partie centrale du lac (Fig. 7.1) serait due à des sources locales (Lorrain *et al.*, 1993). La rivière Raisin serait responsable en temps de crue de l'apport local de sable du côté nord du lac, tandis que du côté sud, la présence de fortes quantités de ce substrat serait reliée à l'érosion des dépôts meubles sablonneux près de la pointe Dupuis (Lorrain *et al.*, 1993). De plus, cinq sous-bassins où il y a une accumulation nette de sédiments ont été identifiés à l'intérieur du lac Saint-François (Lorrain *et al.*, 1993). Trois de ces zones d'accumulation sont situées dans la partie centrale du lac et deux dans la partie est.

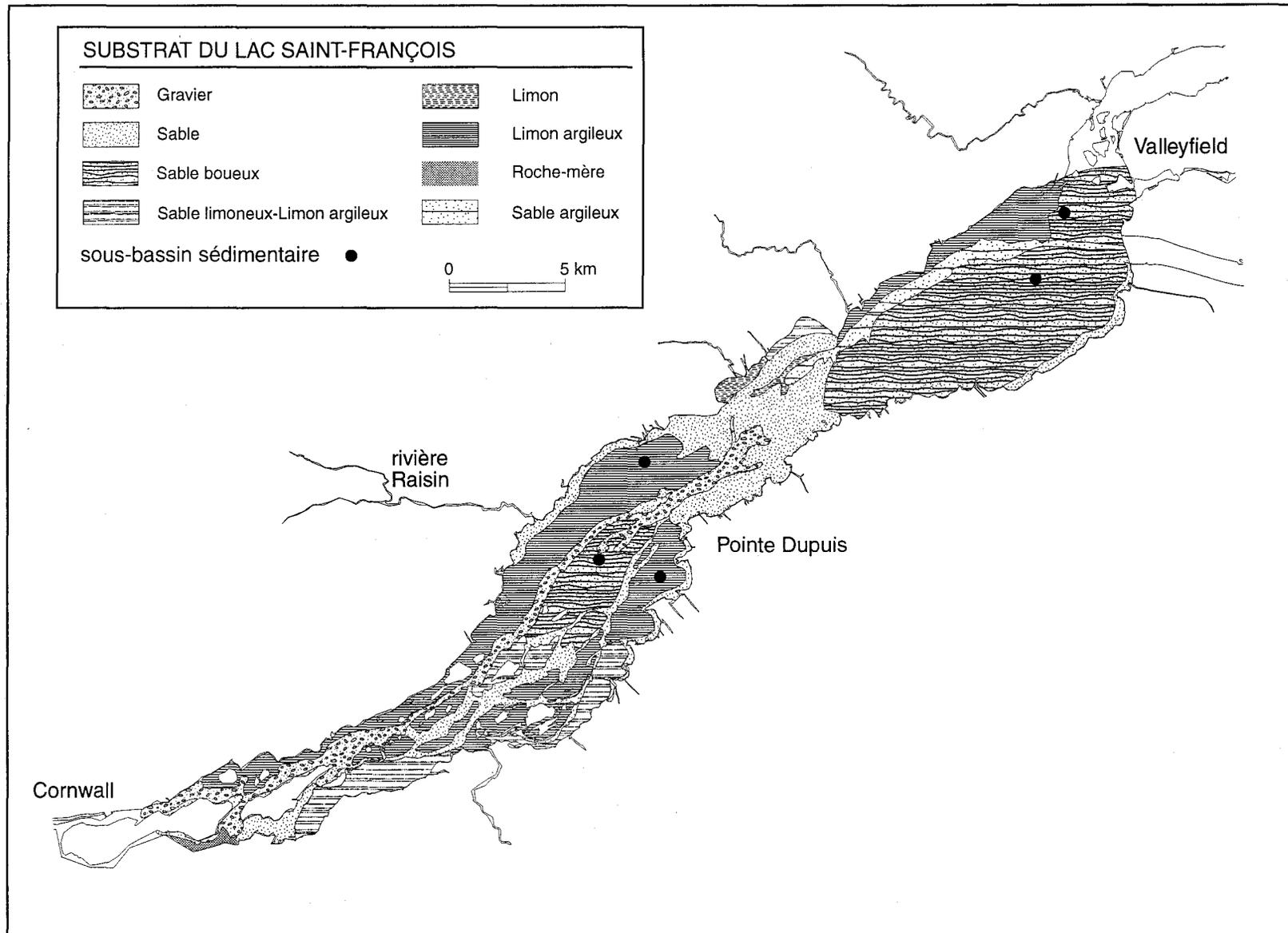


Figure 7.1 : Distribution du substrat dans le lac Saint-François. Adapté de Lorrain *et al* (1993)

8 GLACE

8.1 Rôle de ces données dans la modélisation

Comme mentionné précédemment, la présence de glace, tout comme celle des macrophytes ou des substrats, est un facteur influençant le frottement local au sein de l'écoulement. L'importance du frottement local de la glace dépend du type et de l'âge de la glace. En plus d'influencer le frottement, la présence d'un couvert partiel de glace entraîne une réduction de la section d'écoulement aux endroits où la glace est présente. Il est donc très important de connaître le type, l'épaisseur et la répartition spatiale du couvert de glace en vue d'une modélisation hydrodynamique en conditions hivernales.

8.2 Données disponibles

La cartographie de la glace a été effectuée par la Voie Maritime du Saint-Laurent. Les cartes de glace décrivent principalement la période de dégel. Les données de trois années de surveillance ont été utilisées par la synthèse de la fonte; les moyennes des mesures d'épaisseur de glace ont également été considérées.

8.3 Analyse

Généralement, de la fin décembre à la mi-mars, le lac Saint-François est presque complètement recouvert de glace. Depuis 1959, on compte en moyenne 78 jours de glace par année. Toutefois en 1983, les températures plutôt clémentes ont maintenu le lac en eau libre une grande partie de l'hiver.

Au lac Saint-François, la formation du couvert de glace débute dans la partie est, soit la partie lacustre, entre la pointe Beaudette et l'estacade à l'entrée du canal de Beauharnois. La glace se forme par l'agglomération de glace provenant de l'amont et par le gel sur place. Généralement, la glace recouvre presque tout le lac en moins de deux semaines (Gord McKercher, comm. pers.).

La glace atteint son maximum d'épaisseur à la mi-février avec une moyenne de 48 cm le long du chenal maritime, puis s'amincit graduellement jusqu'à la fonte complète (Tab. 8.1). De façon générale et ce pour tout l'hiver, la glace est plus épaisse en aval qu'en amont et plus mince au centre du lac qu'en bordure. À la mi-février, la glace recouvre toute la surface du lac sauf les zones immédiatement en aval du barrage Moses-Saunders et en aval de l'estacade, qui restent en eau libre (Fig. 8.1). La glace se caractérise alors par une banquise côtière très épaisse et continue dans la partie lacustre et chenalisée, tandis que la

partie orientale du fleuve se compose de grands et de moyens floes (fragments de glace entre 100 m et 2 000 m de diamètre).

L'amorce de la fonte, entre le début de mars et le début d'avril, est mise en évidence par l'apparition de fractures perpendiculaires à l'allongement du lac. Selon les observations de la Voie Maritime entre 1990 et 1992, le processus de fonte est complété en moins de 3 semaines. La glace s'amincit et disparaît d'abord de l'amont en suivant le chenal principal (Fig. 8.1), mais persiste plus longtemps sur les hauts-fonds de la partie chenalisée. Le patron de fonte dévie ensuite légèrement au nord du chenal principal. Lorsque la fonte tarde, le chenal de navigation est ouvert par un brise-glace; la glace fragmentée s'évacue partiellement dans le canal de Beauharnois. La fonte est alors plus rapide et suit préférentiellement le canal de navigation. Toutefois, la glace n'est pas évacuée du canal de Beauharnois par les ouvrages. Elle fond donc sur place.

Tableau 8.1: Variation des épaisseurs moyennes de la glace le long de la voie maritime dans le lac Saint-François entre 1973 et 1992.
(Source: Voie Maritime du Saint-Laurent, Cornwall).

date	épaisseur (cm)
1-7 février	42
8-14 février	48
15-21 février	47
22-28 février	46
1-6 mars	44
7-13 mars	44
14-20 mars	38
21-27 mars	27

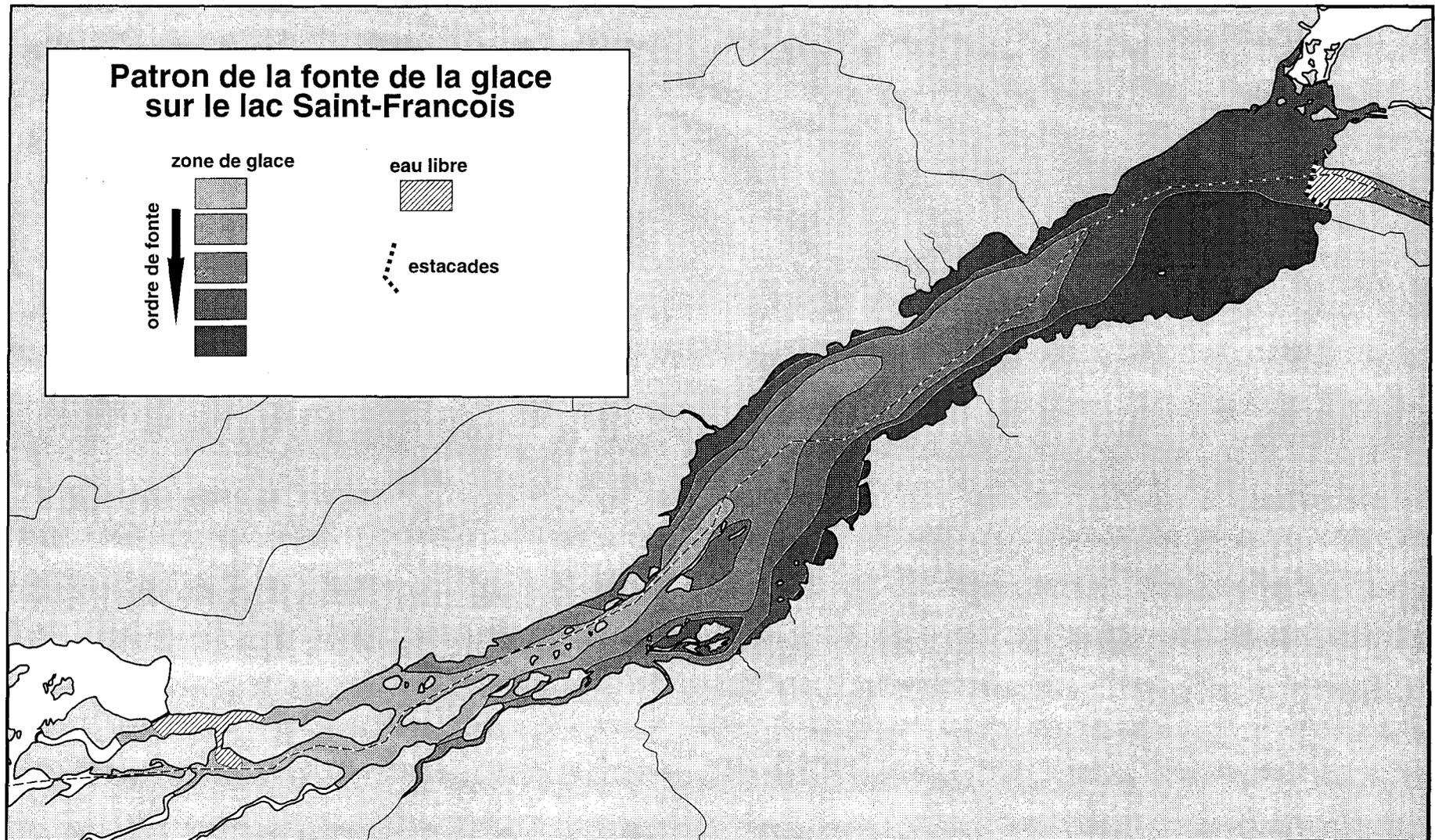


Figure 8.1 : Chronologie de la fonte de la glace sur le lac Saint-François. La fonte commence entre le début de mars et le début d'avril, et dure environ deux semaines. Les lignes isochronologiques représentent les étapes successives de la fonte. Celle-ci débute à l'amont, tarde quelque peu sur les hauts-fonds et finit dans la partie lacustre.

9 CONCLUSION

Ce document se veut une analyse préparatoire à la modélisation hydrodynamique. Un historique des transformations physiques du milieu par l'homme a été effectué et la plupart des facteurs qui influencent l'écoulement dans la section du fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Beauharnois ont été analysés. Ce sont la bathymétrie, les ouvrages de génie, le régime hydrologique, les niveaux d'eau, les vents, le substrat et la glace. Dans une prochaine étape, ces informations seront préparées en vue de leur insertion dans le modèle numérique de terrain, et les événements de référence les plus communs, c'est-à-dire les combinaisons les plus fréquentes de conditions de vent, de débit, de distribution des plantes aquatiques et de glace, seront simulées en vue de produire un *"atlas numérique des courants"*.

La distribution des plantes aquatiques aurait dû être analysée dans ce rapport, puisque nous avons vu qu'ils ont un effet important sur les niveaux d'eau. Cependant, la rareté des renseignements sur les macrophytes du lac Saint-François n'a pas permis leur description. L'obtention des données sur la distribution spatiale des macrophytes nécessitera des travaux de terrain appropriés à cette tâche assortis éventuellement d'une modélisation prédictive visant à les représenter. De plus, la calibration et la validation du modèle hydrodynamique nécessitent des mesures de courants qui devront également faire l'objet d'une campagne de terrain.

À la lumière de ce rapport, il apparaît évident qu'en ce qui concerne l'hydraulicité du lac Saint-François, les conditions naturelles (i.e. préindustrielles) ont été considérablement altérées. Ces modifications du régime naturel du fleuve ont débuté au milieu du XIX^{ième} siècle et ont atteint leur paroxysme en 1960 avec la construction de centrales hydroélectriques et la construction de la voie maritime du Saint-Laurent. Le principal changement a été la perte de relation entre les niveaux et le débit du Saint-Laurent, due au contrôle du niveau du lac Saint-François; cet état de fait est lié à des pressions de la part de la Voie Maritime et des résidents du lac, et même d'Hydro-Québec, qui favorisent un niveau stable et élevé. Les conséquences de ce changement sont sérieuses, en particulier à l'égard des milieux humides.

BIBLIOGRAPHIE

- Allan, R.J. (1986).** The limnological units of the Lower Great Lakes St-Lawrence corridor and their role in the source and aquatic fate of toxic contaminants. *Water Poll. Res. Journal Canada*. 21(2): 168-186.
- Chevrier, L. (1955).** La voie maritime du Saint-Laurent. Administration de la Voie Maritime du Saint-Laurent. 16 p.
- Fay, David (1994).** Environment Canada. Great Lakes- St-Lawrence Regulation Office. Cornwall.
- Frenette, M., C. Barbeau et J-L. Verrette (1989).** Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Environnement Canada et Environnement Québec. 168 p.
- Hydro-Québec (1970).** Beauharnois. 33 p.
- Leclerc, M., P. Boudreau, G. Fortin et J.F. Cantin (1992).** Fleuve Saint-Laurent: Modélisation intégrée du suivi de la qualité de l'eau du tronçon Traçy - lac Saint-Pierre. INRS-Eau No R-317. Pour le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 143 p.
- Lorrain, S., V. Jarry et K. Guertin (1993).** Répartition spatiale et évolution temporelle des biphényles polychlorés et du mercure dans les sédiments du lac Saint-François; 1979-1989. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 63 p.
- McKercher, Gord (1994).** Administration de la Voie maritime du Saint-Laurent. Cornwall.
- McNaughton, W.J.W. (1962).** Beauharnois: la réalisation d'un rêve - a dream come true. Hydro-Québec, 27 p.
- NYPA (1992).** The St-Lawrence-FDR Power Project. The New-York Power Authority, 20 p.
- Robert, Sylvain (1994).** Division Exploitation, Région Maisonneuve, Hydro-Québec. Montréal
- SLRT (St-Lawrence Rap Team) (1992).** The St-Lawrence area of concern remedial action plan for the Cornwall-Lake St-Francis Area, stage 1 Report: environmental conditions and problem definitions. Environment Canada and Environment Ontario.
- Yee, P., R. Edgett et A. Eberhardt (1990).** Régulation des Grands lacs et du fleuve Saint-Laurent. Environnement Canada et U.S. Army Corps of Engineers. 12 p.

Annexe 1

Relation dénivellation-débit entre les différentes stations de mesure du niveau du lac Saint-François pour quatre périodes (maximum de croissance des plantes aquatiques, sénescence des macrophytes, couvert de glace, absence de glace et de macrophytes).

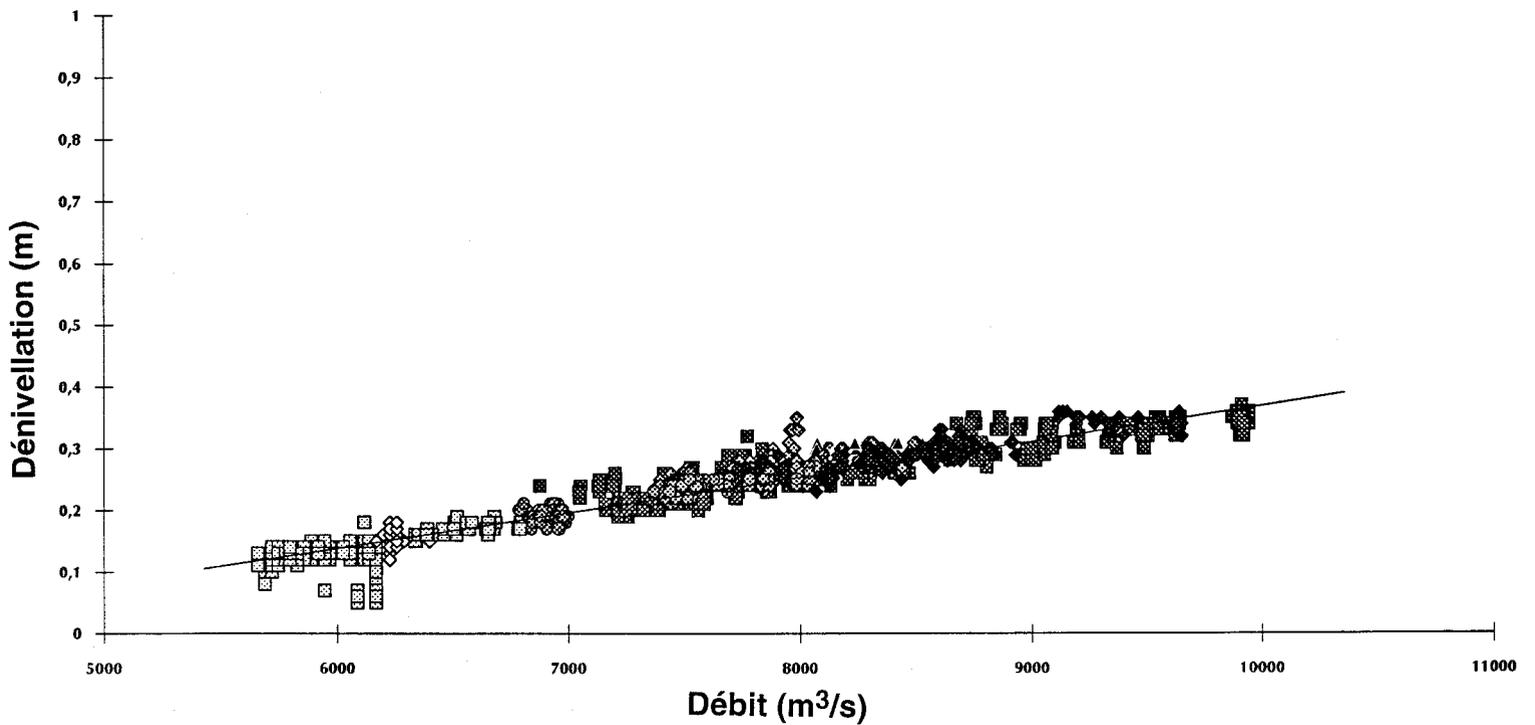


Figure A1.1: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1^{er} octobre) entre 1963 et 1990.

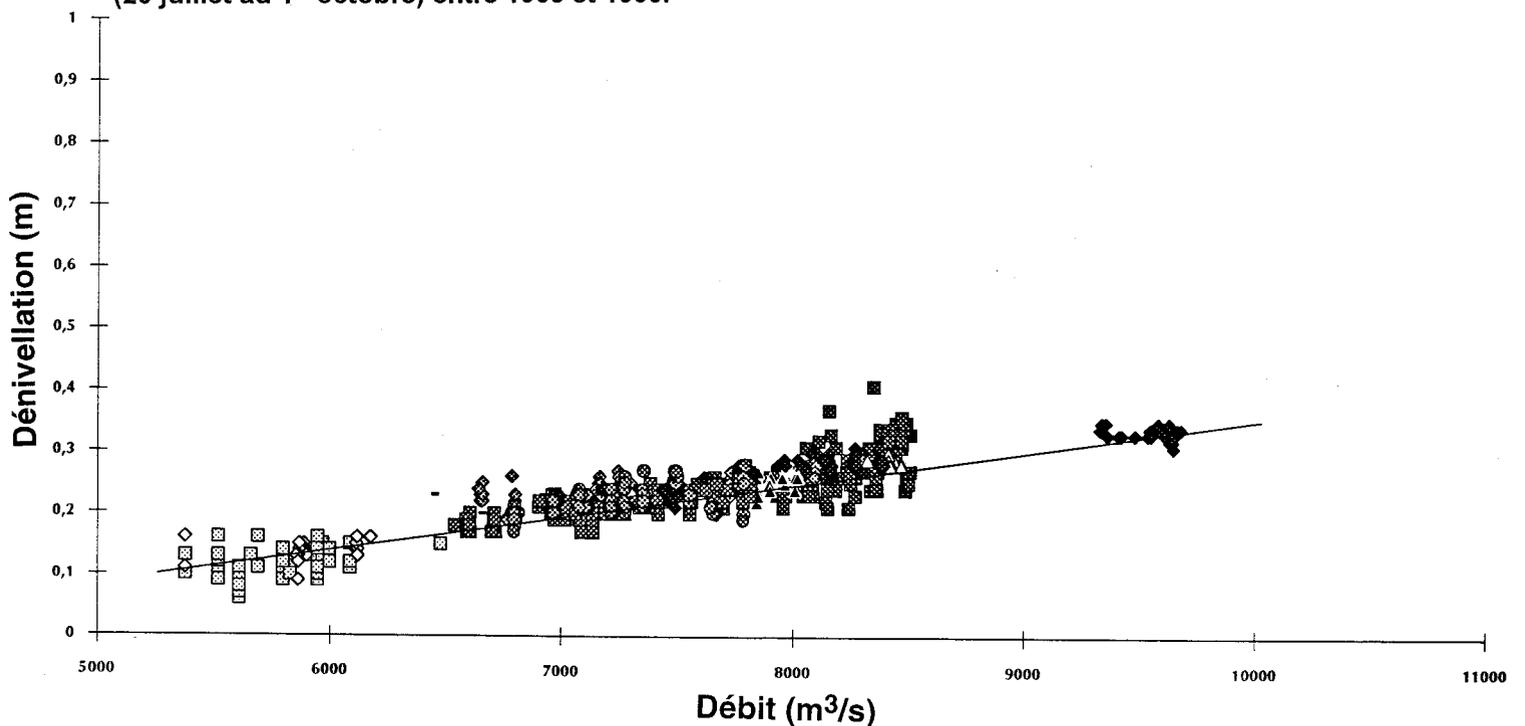


Figure A1.2: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.

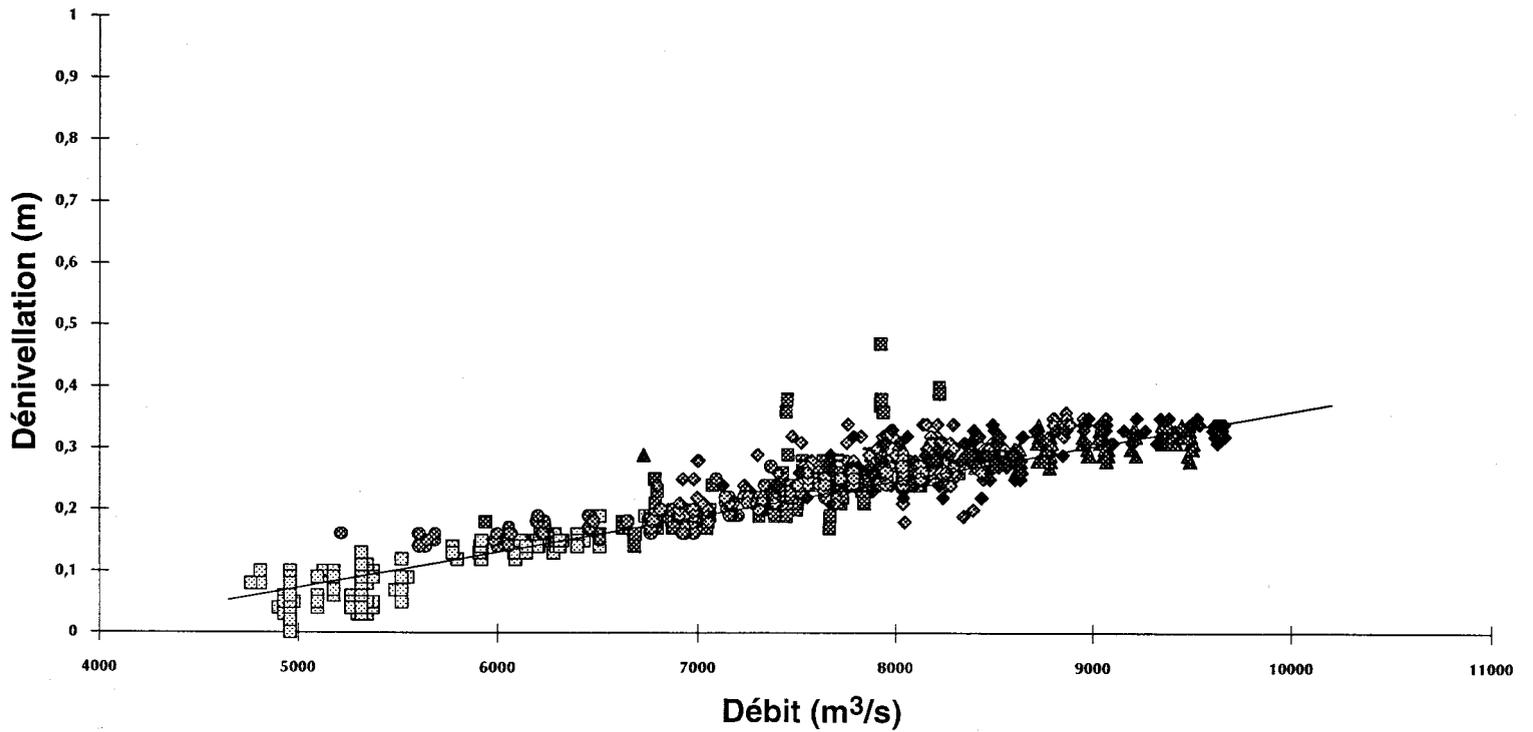


Figure A1.3: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.

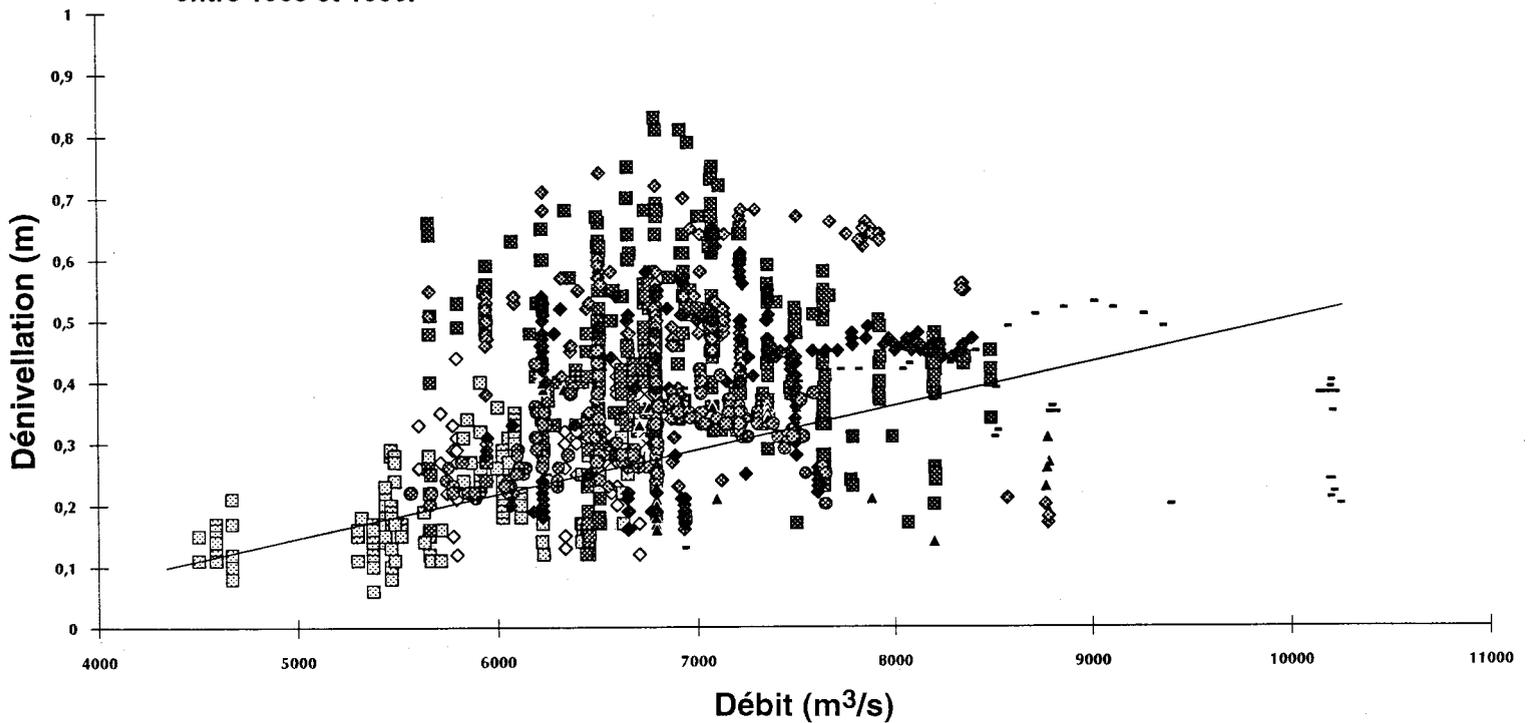


Figure A1.4: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Cornwall et Summerstown (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.

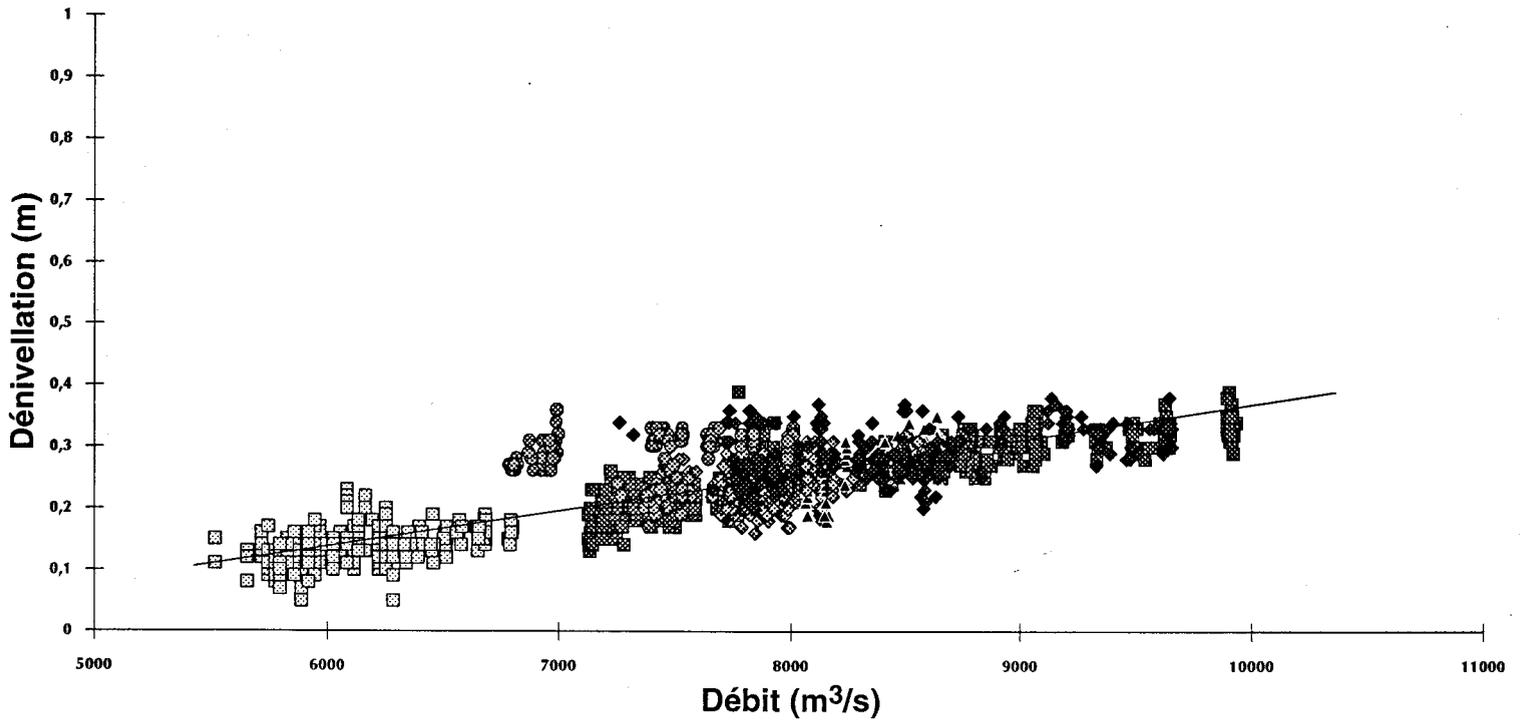


Figure A1.5: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1^{er} octobre) entre 1963 et 1990.

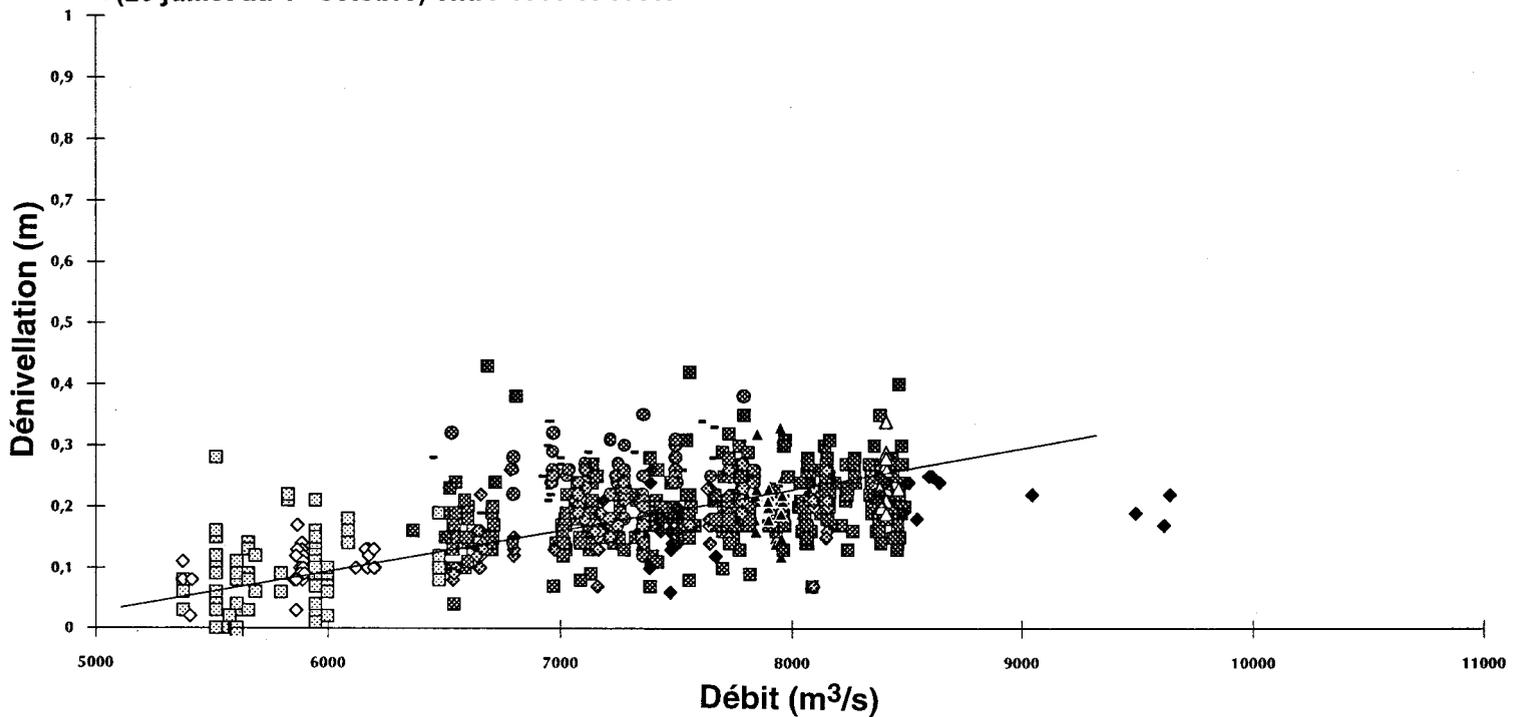


Figure A1.6: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.

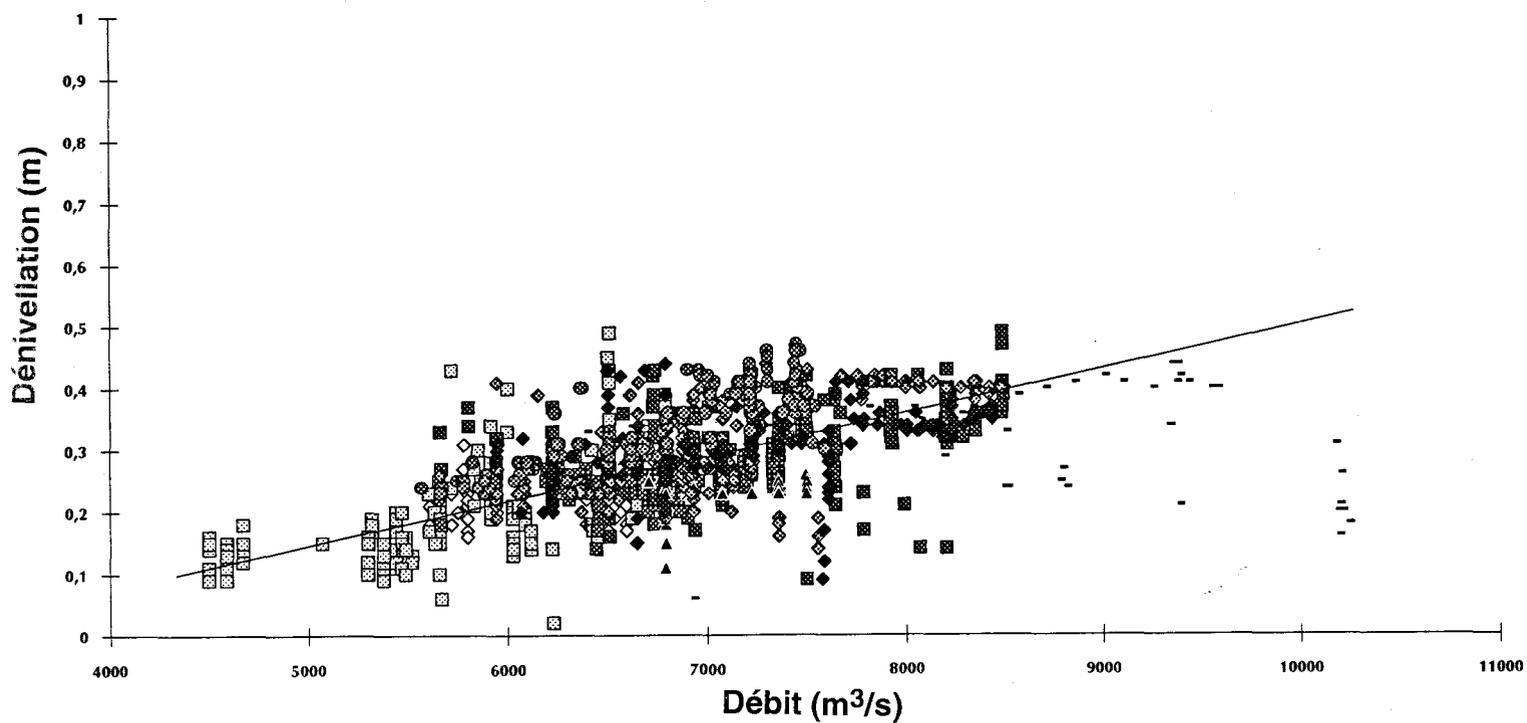


Figure A1.7: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.

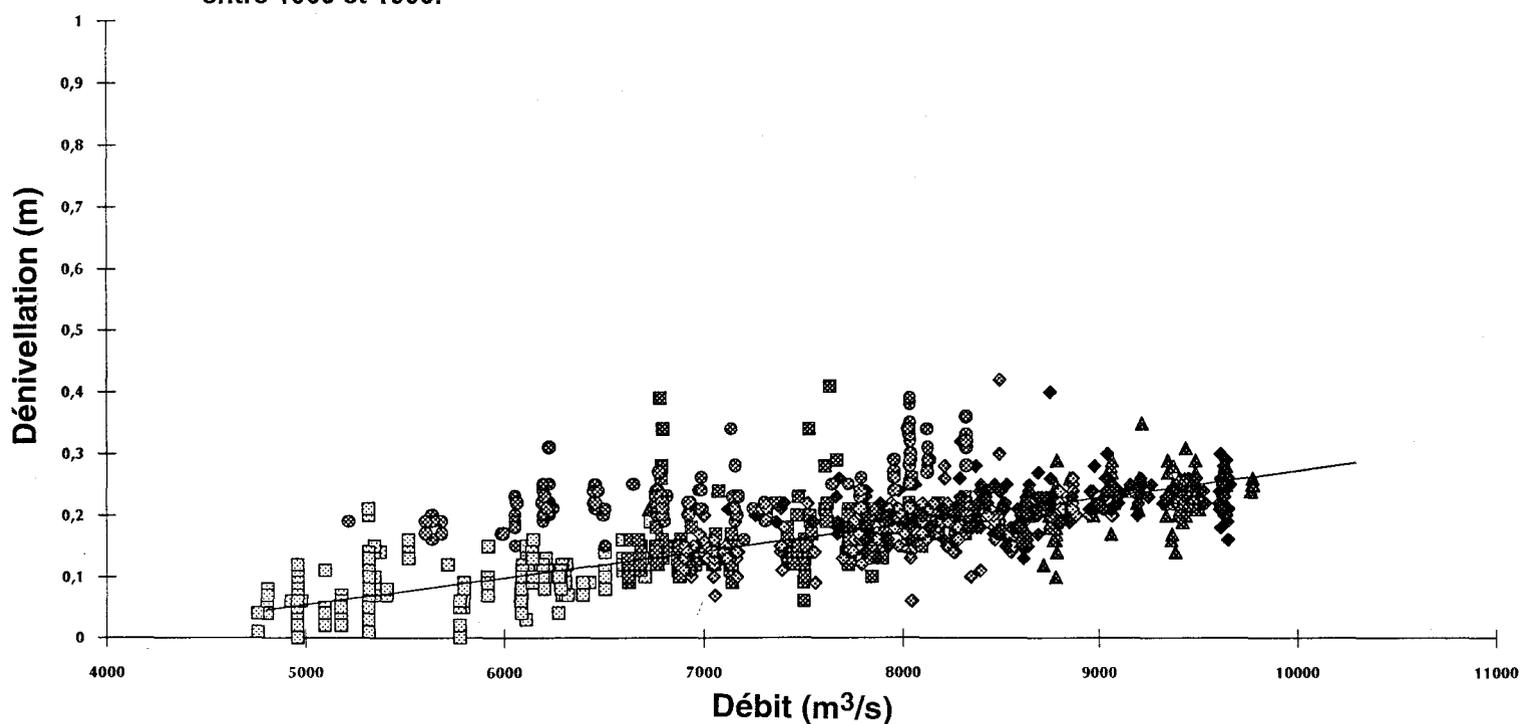


Figure A1.8: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Summerstown et Coteau-Landing (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.

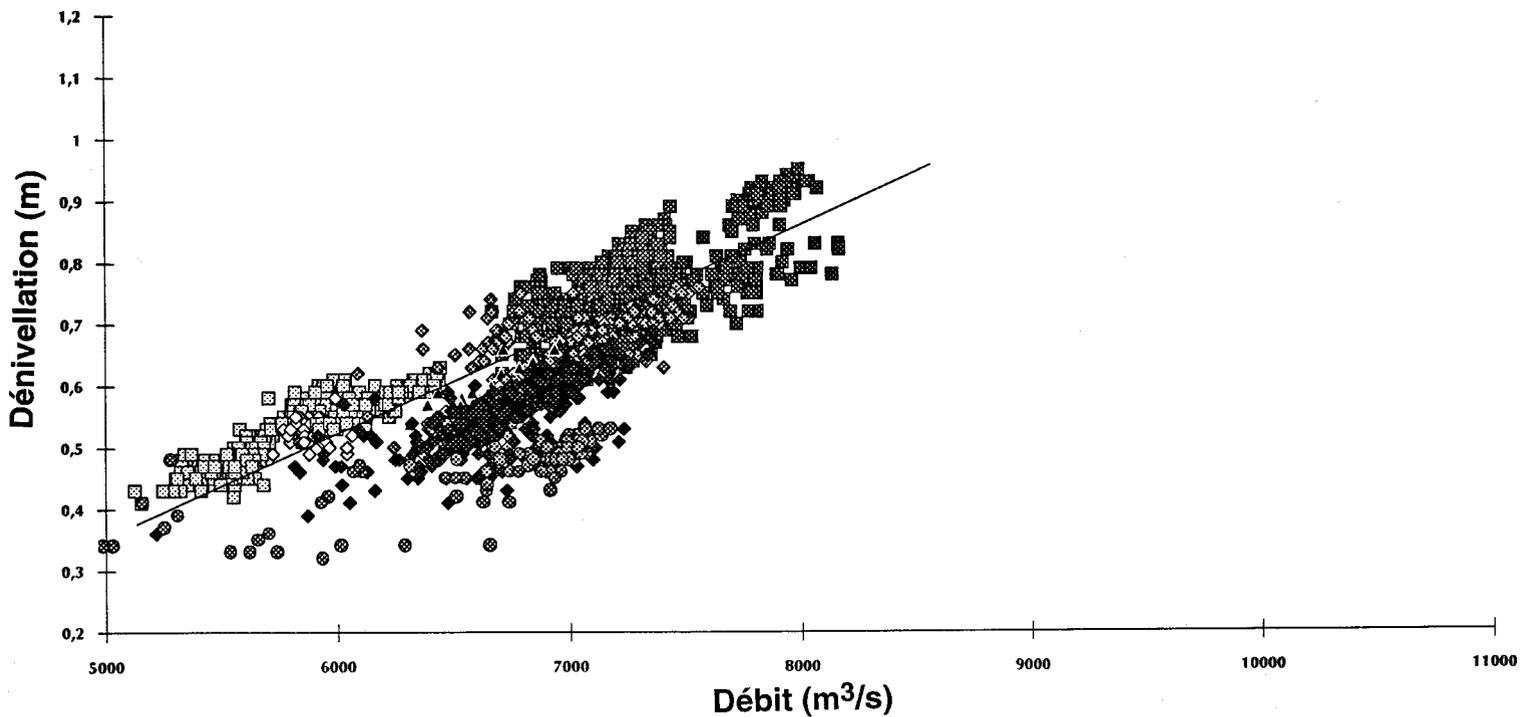


Figure A1.9: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (2000 points) pour la période du maximum de croissance des macrophytes (20 juillet au 1^{er} octobre) entre 1963 et 1990.

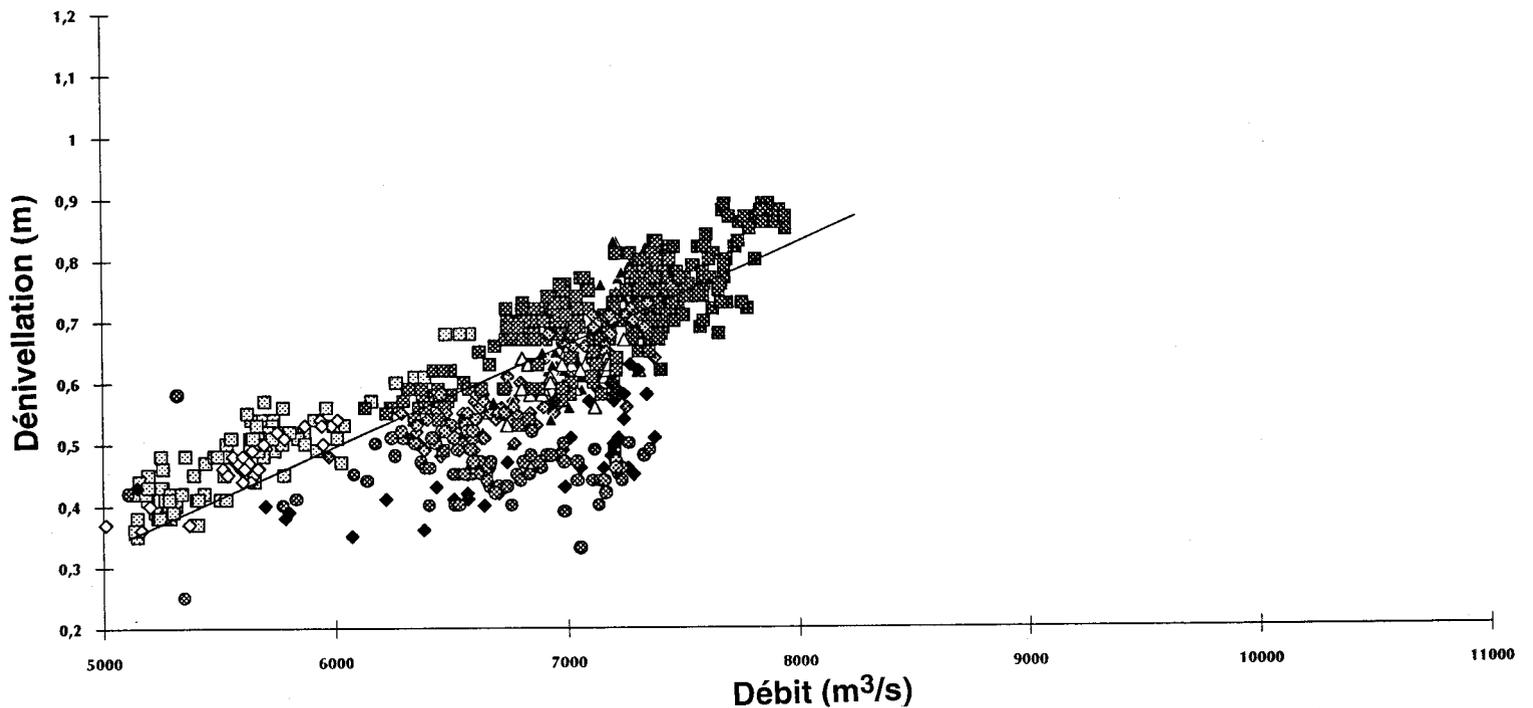


Figure A1.10: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (840 points) pour la période du maximum de sénescence des macrophytes (15 novembre au 15 décembre) entre 1963 et 1990.

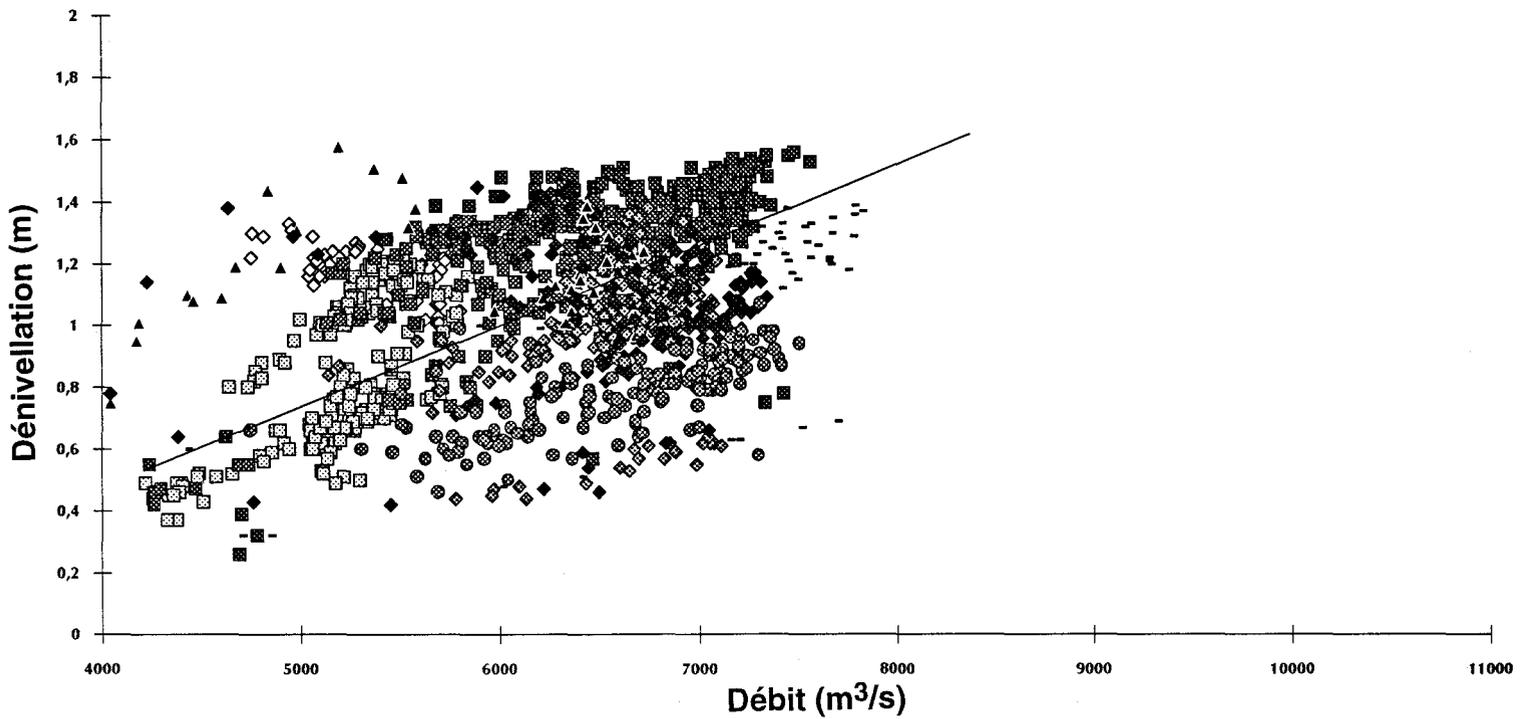


Figure A1.11: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (1652 points) pour la période de couvert de glace (15 janvier au 15 mars) entre 1963 et 1990.

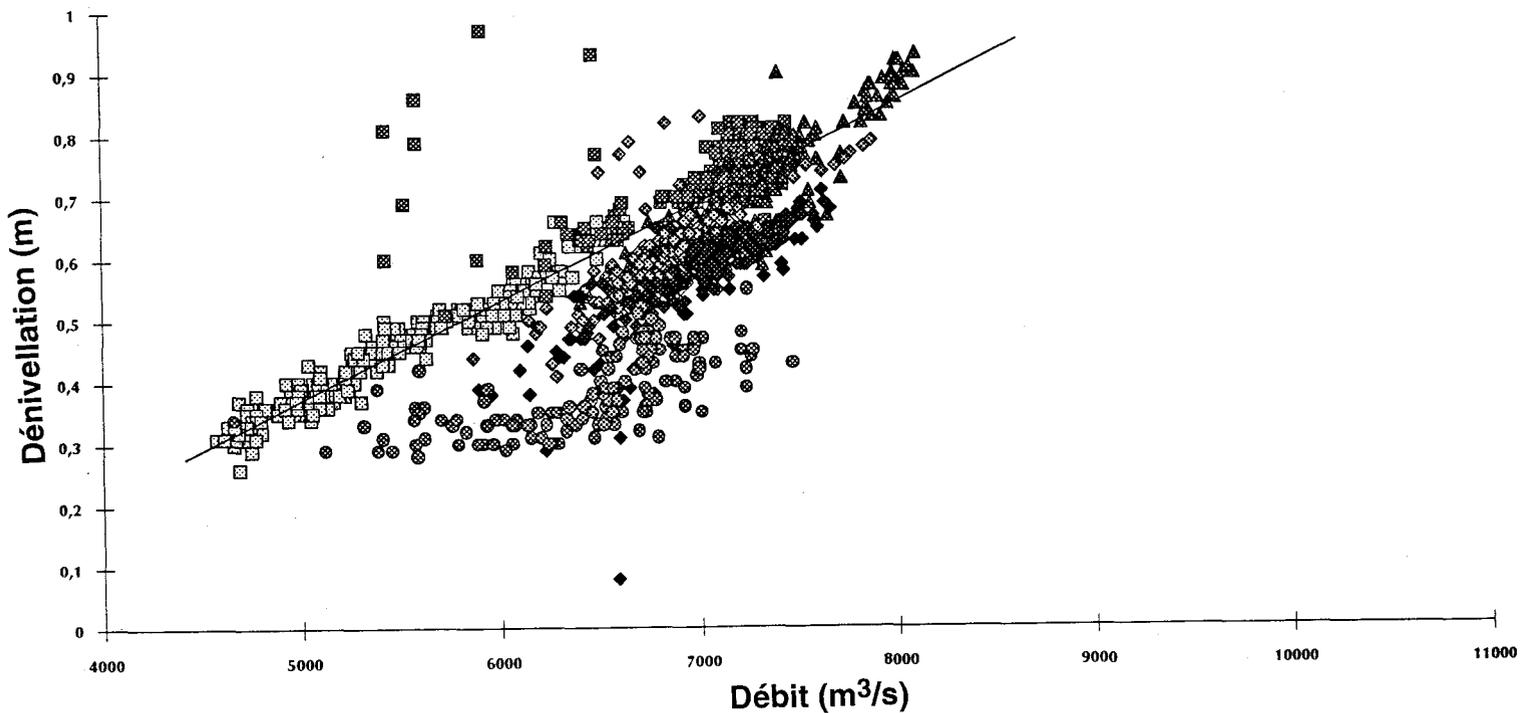


Figure A1.12: Relation dénivellation-débit (données journalières) entre Coteau-Landing et beauharnois (1316 points) pour la période d'absence de plantes et de glace (15 avril au 15 juin) entre 1963 et 1990.

Annexe 2

Variation de la moyenne journalière interannuelle du débit de cinq tributaires du lac Saint-François: rivières Grasse, Saint-Régis, aux Saumons, Raisin et Beaudette. La position des stations de mesure de débit est indiquée sur la figure 4.8.

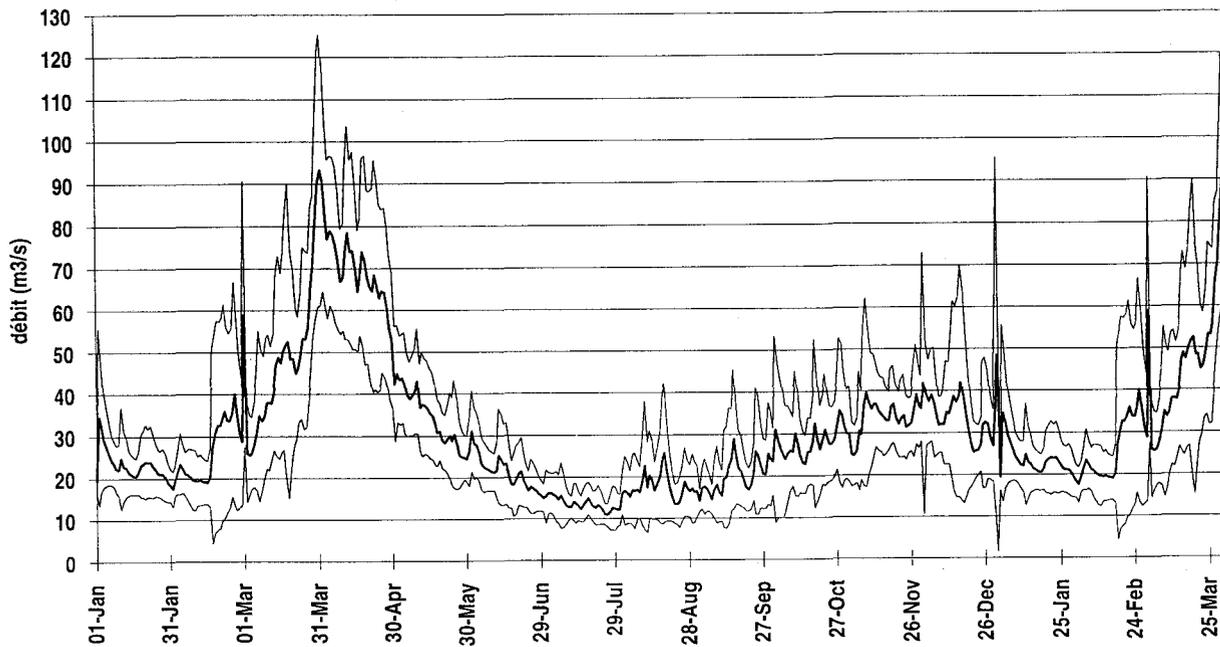


Figure A2.1: Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Saint-Régis entre 1976 et 1992, ainsi que les courbes de l'intervalle de confiance à 95% de Student. Les mesures du USGS sont prises à la hauteur de Brasher Center, N.Y. et représentent un bassin de 2300 km². Le module interannuel est de 31 m³/s.

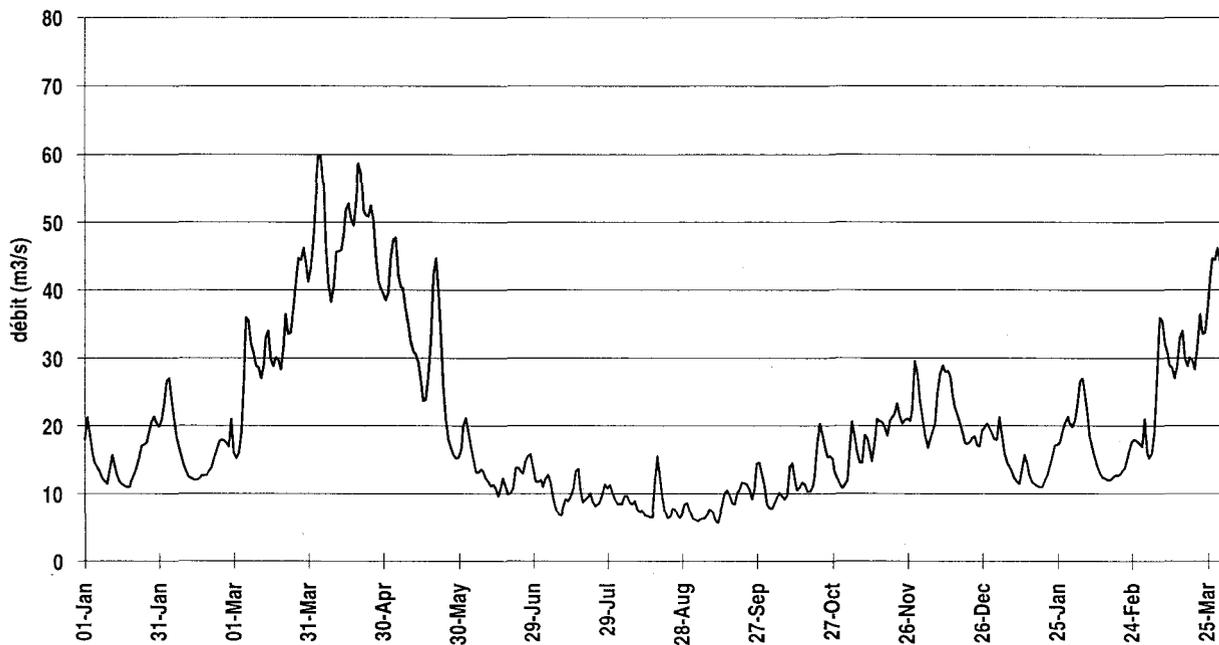


Figure A2.2: Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Grasse entre 1967 et 1976. Les mesures du USGS sont prises à Pyrites, N.Y. et représentent un bassin de 860 km². Le module interannuel est de 20 m³/s.

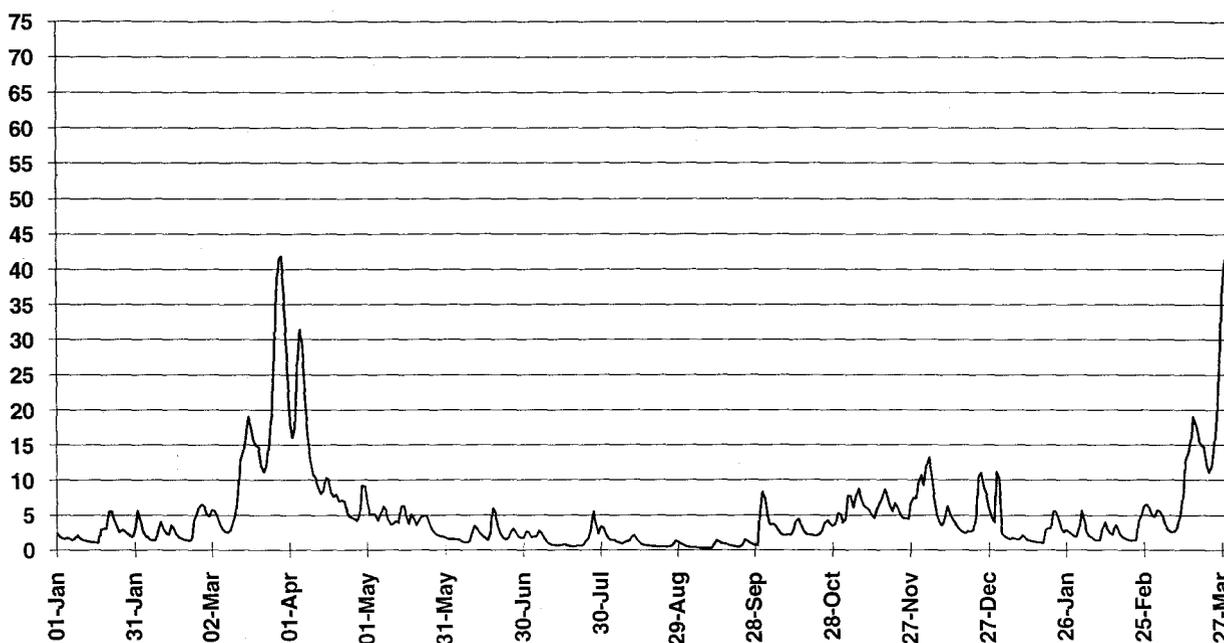


Figure A2.3: Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Aux Saumons entre 1976 et 1992. Les mesures du USGS sont prises à la hauteur de Chasm Fall, N.Y. et représentent un bassin de 341 km². Le module interannuel est de 7 m³/s.

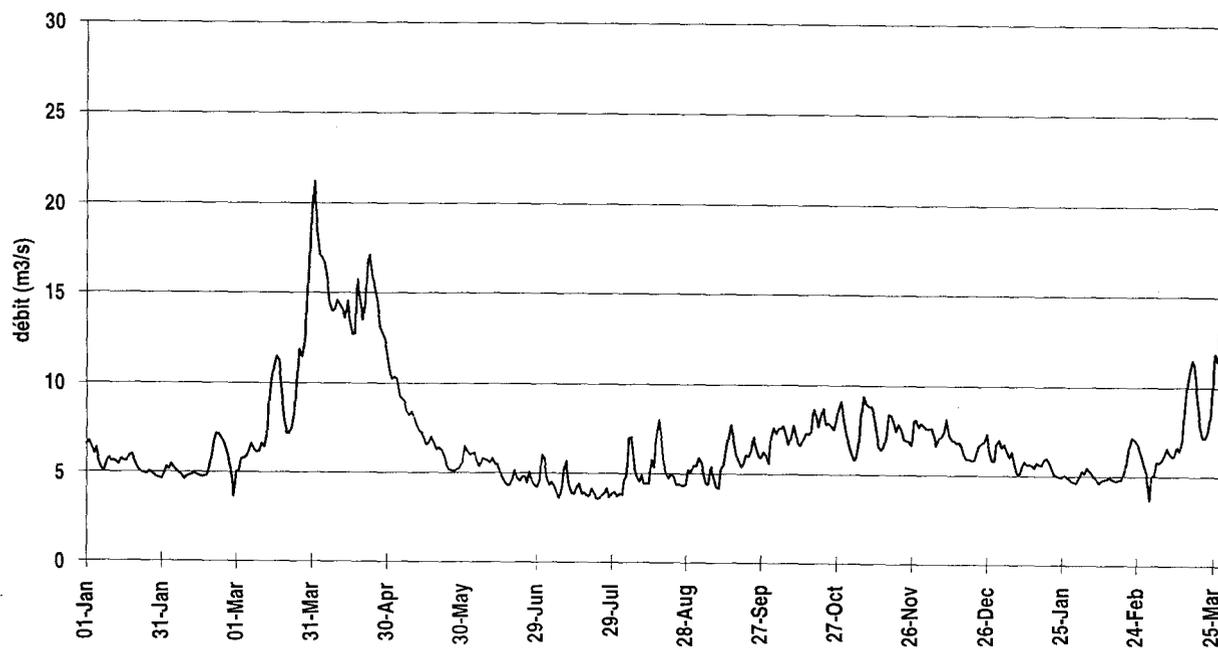


Figure A2.4: Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Raisin entre 1985 et 1990. Les mesures du USGS sont prises à Williamstown, Ont. et représentent un bassin de 400 km². Le module interannuel est de 5 m³/s.

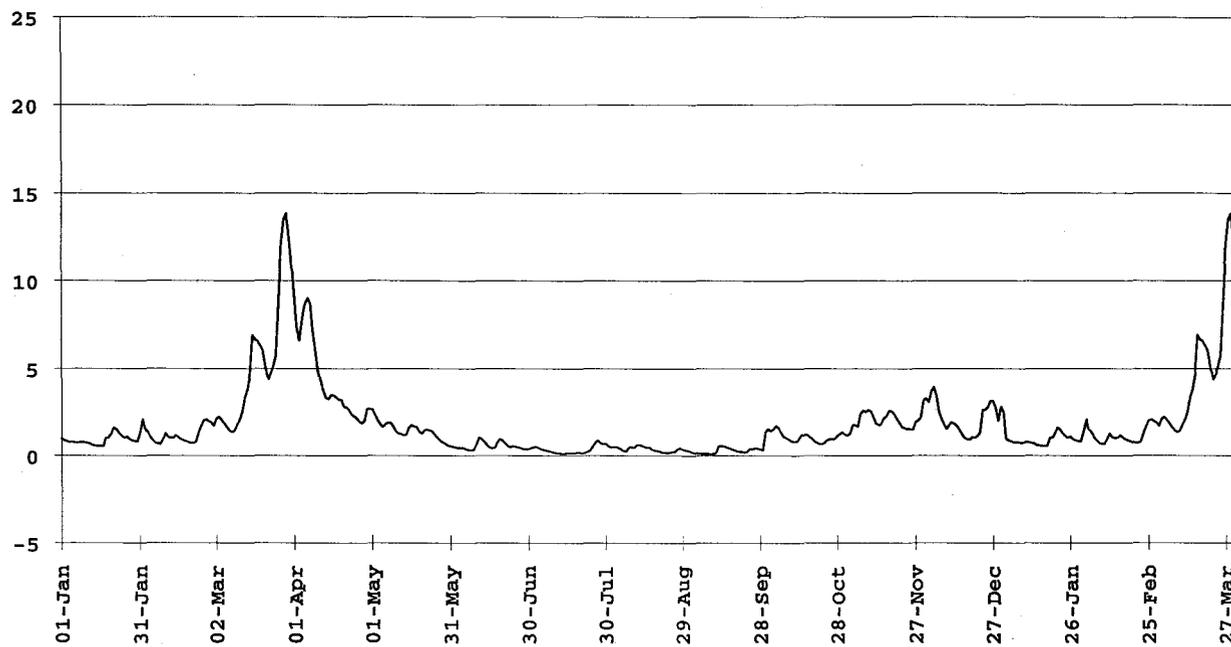


Figure A2.5: Variation de la moyenne journalière interannuelle des débits de la rivière Beaudette entre 1985 et 1990. Les mesures du USGS sont prises à Glen Nevis, Ont. et représentent un bassin de 124 km². Le module interannuel est de 2 m³/s.

Annexe 3

Compilation des vitesses et des directions des vents en fonction des saisons. Les vitesses sont regroupées en quatre catégories: faible (0-10 km/h) , moyen (10-25 km/h), fort (25-45 km/h) et extrême (45 km/h et plus).

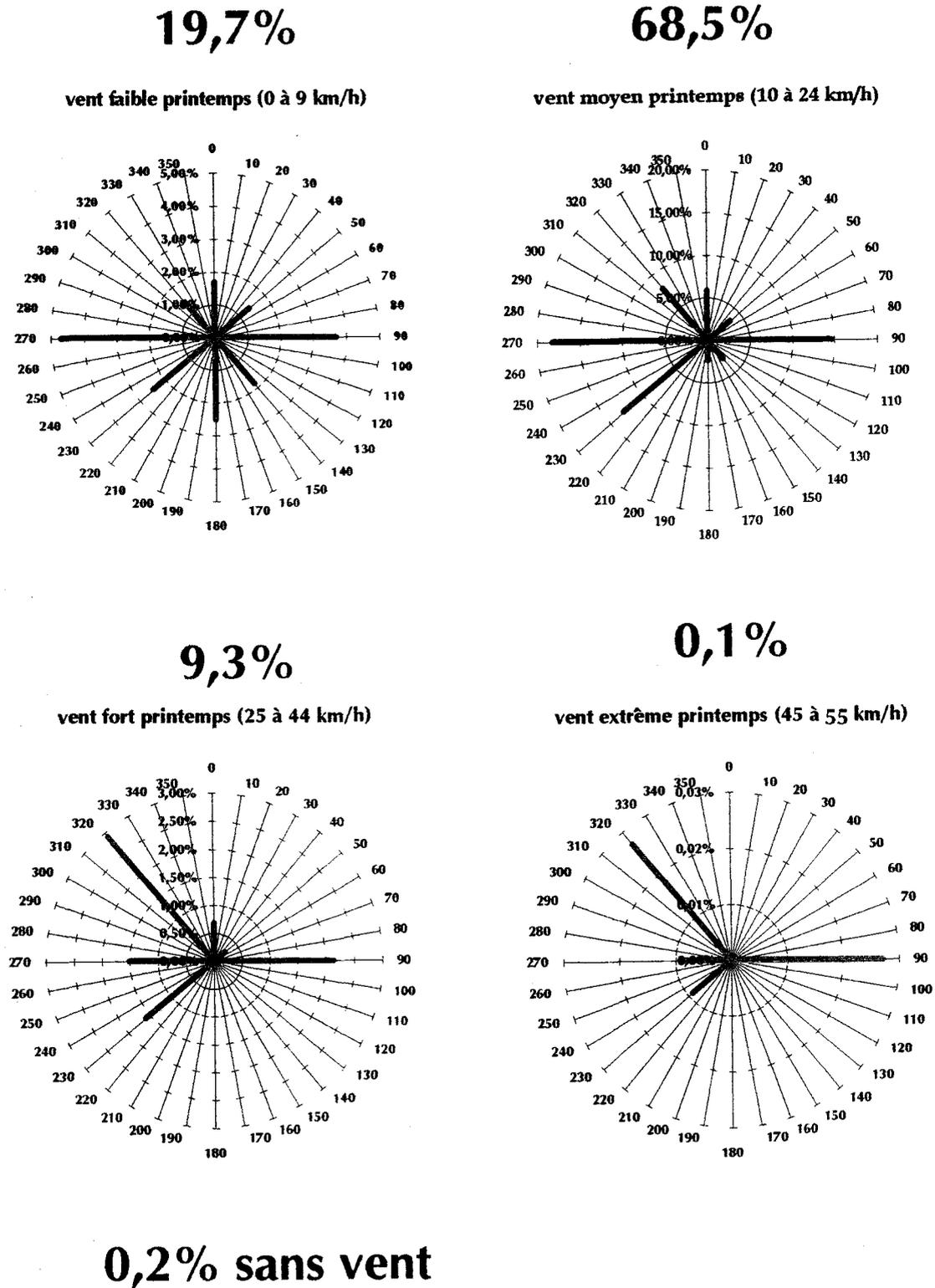


Figure A3.1: Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) au printemps établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.

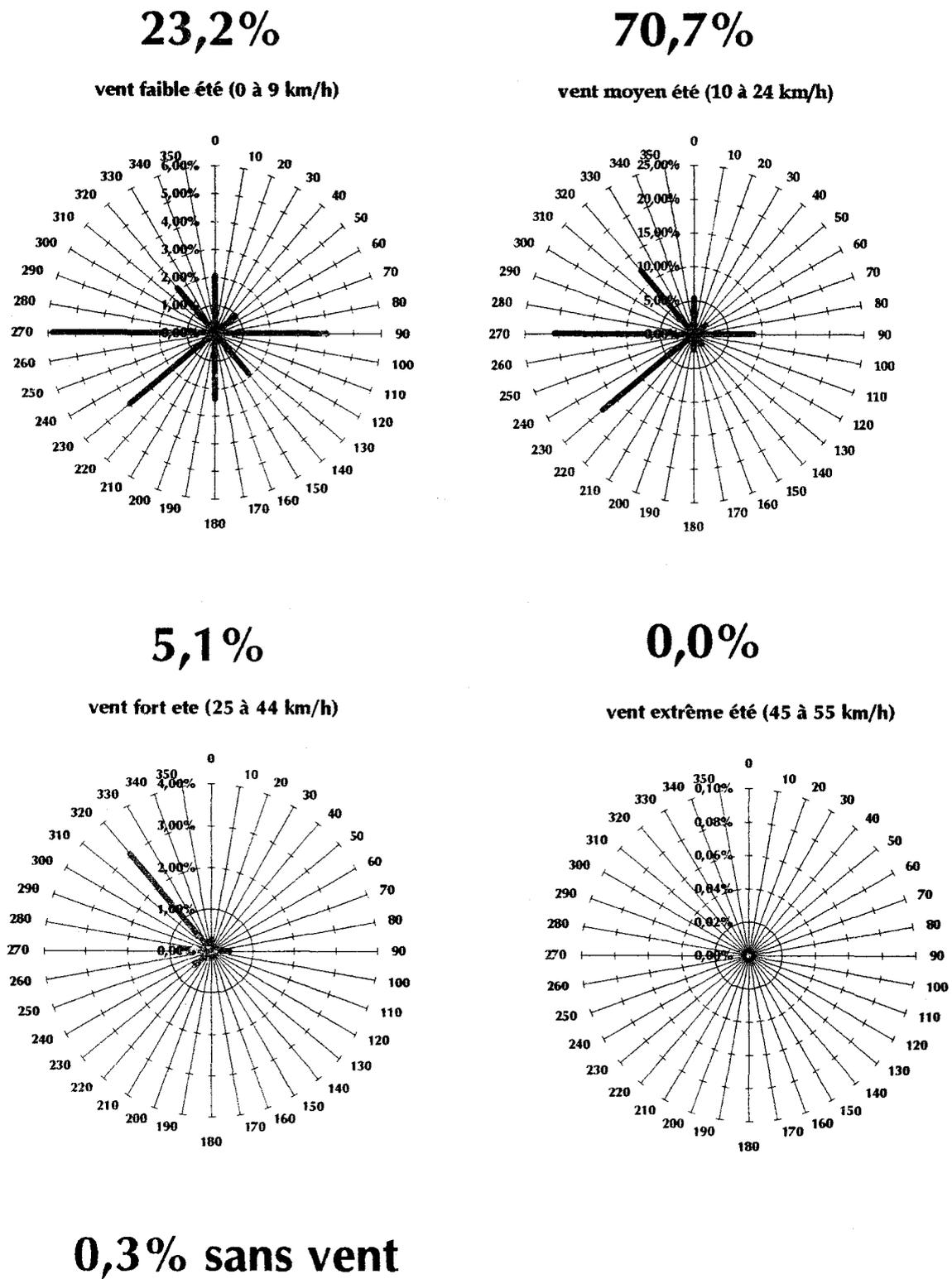


Figure A3.2: Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en été établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.

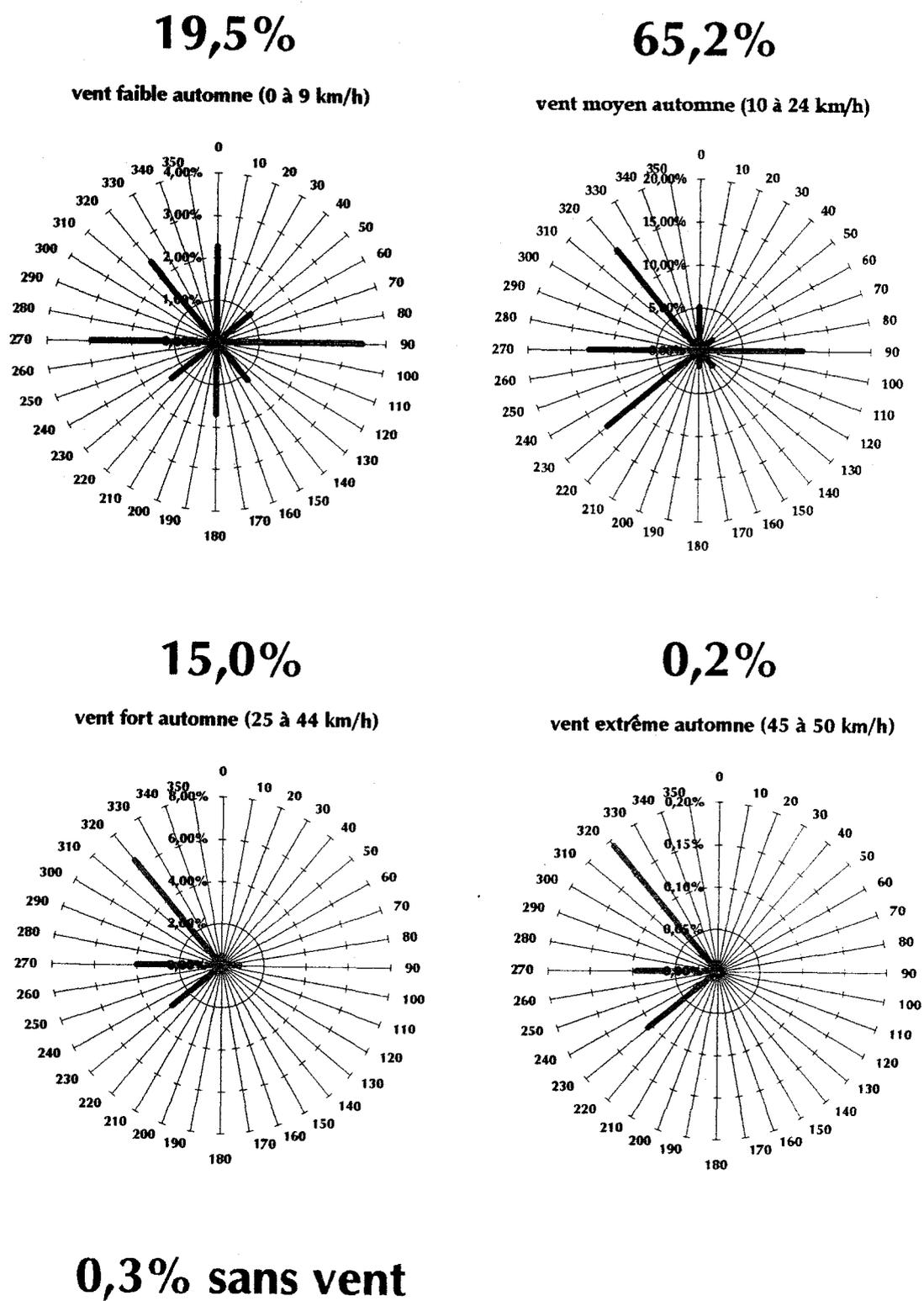
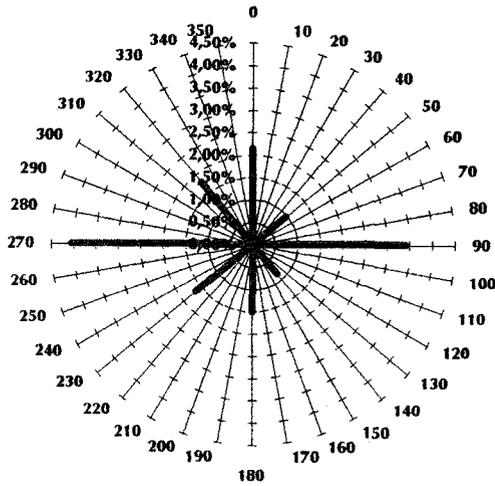


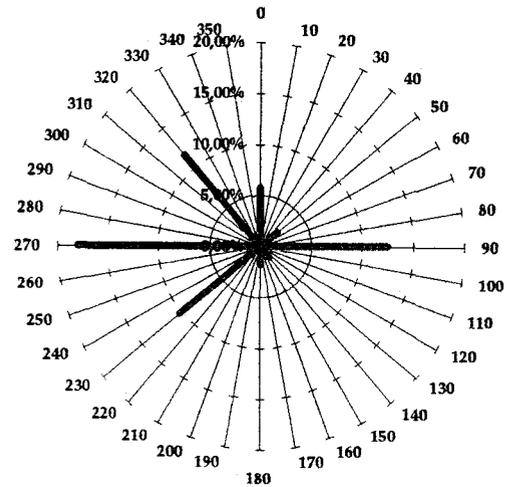
Figure A3.3: Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en automne établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.

16,4%

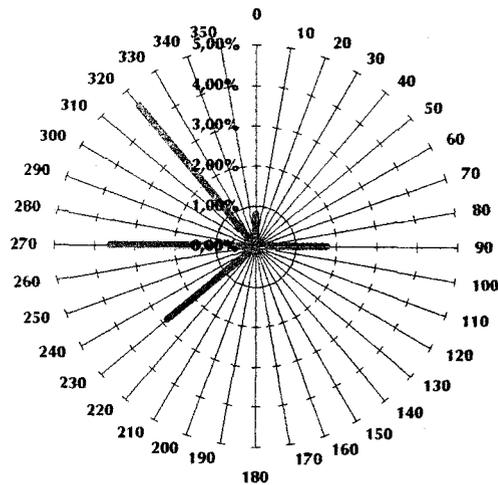
vent faible hiver (0 à 9 km/h)

**63,4%**

vent moyen hiver (10 à 24 km/h)

**13,8%**

vent fort hiver (25 à 44 km/h)

**0,2%**

vent extrême hiver (45 à 55 km/h)

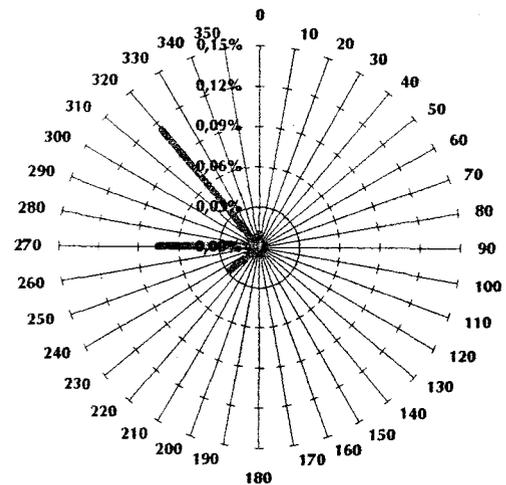
**0,6% sans vent**

Figure A3.4: Direction et fréquence des vents en fonction de leur intensité (faible, moyen, fort et extrême) en hiver établies avec les données horaires à Cornwall de 1986 à 1990.