MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES DU QUÉBEC

RENÉ LÉVESQUE, MINISTRE

P.-E. AUGER, SOUS-MINISTRE

PLAN D'ENSEMBLE DES TRAVAUX REMÉDIATEURS DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

CONTRÔLE DES INONDATIONS A LA DÉBACLE

QUÉBEC
1965

R-1A

MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES DU QUÉBEC

NÉ LÉVESQUE, MINISTRE

P.-E. AUGER, SOUS-MINISTRE

DIRECTION DES SERVICES HYDRAULIQUES

C.-E. DESLAURIERS, DIRECTEUR

PLAN D'ENSEMBLE DES TRAVAUX

EMÉDIATEURS DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

CONTRÔLE DES INONDATIONS A LA DÉBACLE

Annexe "A"

OBSERVATIONS CRYOLOGIQUES SUR LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

par

Claude Triquet, ing.

QUÉBEC

1965

INTRODUCTION

Deux hivers consécutifs d'observation des glaces ont permis d'étudier le processus de formation des glaces sur la Chaudière. De ce processus de formation, on peut tirer certaines connaissances quant au processus de destruction du champ de glace lors de la débâcle.

Des sondages du champ de glace durant l'hiver ont fourni des indications intéressantes quant à l'état d'accumulation des glaces sous le champ. Cet état d'accumulation est l'une des causes majeures d'embâcle lors de la destruction du champ au printemps.

Il est extrêmement difficile de prendre des mesures quantitatives à la débâcle. L'analyse du processus de destruction des glaces a été presque uniquement qualitative: ce genre d'observation fournit quand même des indications précieuses et essentielles. Grâce à un embâcle formé prématurément quelques semaines avant la débâcle générale, on a pu réaliser quelques mesures qui ont donné des résultats d'utilisation très pratique.

Ces observations, mesures et sondages se poursuivent. Avec le temps, les moyens et les méthodes de procéder s'amélioreront, permettant une étude meilleure et plus complète.

Ce travail d'observation des glaces a servi de sujet de thèse pour l'obtention d'une maîtrise en sciences appliquées.

CHAPITRE I

NOMENCLATURE DE LA GLACE EN RIVIERE

Plusieurs auteurs, dans la littérature, se sont intéressés au problème de la nomenclature de la glace. Malheureusement, la plupart ont abordé globalement la question, et ont compilé une série de termes s'appliquant à la glace de glaciers, à la glace en mer, à la glace en rivière, etc. Bien que, dans chaque cas, il s'agisse toujours de glace, des différences marquées existent, à cause des processus différents de formation et d'évolution.

Nous nous efforcerons ici d'énumérer et de définir les termes s'appliquant à toute forme et phénomène de glace en rivière, à l'aide de ces auteurs, à l'aide aussi des écrits et directives de ceux sous lesquels nous avons travaillé, et enfin de quelques données tirées de notre expérience personnelle.

Cet essai de nomenclature se base sur les caractéristiques extérieures de la glace en rivière, et non sur sa structure interne. L'ordre dans lequel sont exposés les termes se conforme à l'ordre naturel de formation, d'évolution et de destruction des glaces en rivière.

1) Période de formation:

Glace de surface: terme général indiquant toute glace formée à partir de la cristallisation de la couche de surface.

Glace de rive: glace formée en certains endroits le long des rives, où l'eau est calme; cette glace s'amorce à la rive, où le froid du sol se communique aux particules d'eau adjacentes; elle s'étend vers la rivière et se forme par cristallisation de la couche de surface, jusqu'en un point où l'écoulement est suffisamment turbulent pour empêcher une telle formation. (8) (9) (6)

Frasil: ensemble des cristaux de glace formés dans un écoulement turbulent par surefroidissement de l'eau. Le frasil se forme et est dit actif seulement durant la période de surefroidissement de l'eau. L'ensemble des cristaux déjà formés, et qui continuent d'exister et d'évoluer dans l'eau revenue à la température normale, est dit frasil inactif. (1) (4) (10)

Flocons de frasil: agglomérations des spicules et disques en flocons très vaporeux, qui sont transportés et dans l'eau et à la surface de l'eau. (1) (4) (10)

Glace de verre (ou glace noire): plaques de glace de dimensions en plan variées, minces et transparentes comme du verre: elles se forment en zone d'eau très calme et sont détruites sitôt qu'elles atteignent une zone d'eau un peu plus rapide. Leur transparence laisse voir la couleur de l'eau, ce qui leur donne à première vue une couleur foncée.

Plaques de glace: morceaux de glace arrachés à la glace de rive, et quelquefois aussi formés en zone d'eau très calme. (3) (2) (9)

Glace de fond: glace formée sur le fond de la rivière par du frasil qui s'y forme ou des flocons de frasil qui s'y accrochent: la cristallisation s'y poursuit pour donner une couche de glace continue. (2) (8) (9)

Sorbets de glace ou glace visqueuse: amas spongieux de neige saturée d'eau qui sont transportés en surface; ils sont formés par les précipitations solides tombant dans l'eau et sont beaucoup plus compacts que les flocons de frasil. (2) (3)

Glaçons: terme très général indiquant tout morceau de glace continue.

Glace en assiette: galettes de glace circulaires de diamètre variable, au rebord surélevé: cette forme particulière est causée par le fait qu'elles se cognent entre elles et aux berges, pendant qu'elles sont transportées par le courant.

2)- Période d'évolution:

Pont de glace: des glaçons, voyageant en surface de l'écoulement, s'arrêtent sur les berges à certains endroits de la rivière, par exemple aux points d'inflexion des méandres. D'autres glaçons s'accrochent à ceux-là et la section d'écoulement devient tellement rétrécie en surface, qu'elle empêche le passage de plusieurs glaçons arrivant ensemble: la section se bloque complètement en surface pour former un pont à partir duquel d'autres glaçons viennent se juxtaposer. (en language courant un pont de glace est: toute section de rivière recouverte de glace assez résistante pour permettre le passage de personnes et de véhicules). (2) (5) (11)

Champ de glace: (on emploie aussi l'anglicisme couvert de glace): étendue de glace couvrant la rivière d'une rive à l'autre et s'étendant sur une certaine longueur. (4) (6) (8) (9) (11)

Champ de glace morcelé: formé par juxtaposition et amoncellement de glaçons individuels, et contenant par conséquent des interstices d'eau.

Champ de glace continu: constitué d'une couche de glace continue. Il peut provenir de la formation de glace de surface, du gel de l'eau dans les interstices d'un champ de glace morcelé, ou d'une combinaison des deux.

Barrage suspendu: excroissance, sous un champ de glace, de flocons de frasil, de sorbets, de glaçons, qui diminue plus ou moins la section d'écoulement, et se développe sur une longueur parfois relativement grande. (2) (9) (11)

Embâcle de prise: se produit quand, à cause des conditions hydrauliques de l'écoulement, les glaçons culbutent sous le bord frontal du champ au lieu de s'y juxtaposer. L'épaississement du bord frontal provoque un rehaussement du niveau d'eau à cet endroit. (11)

Glace solide: glace continue d'apparence uniforme, de teinte bleuâtre, transparente, très résistante; cette glace est formée, par transport de chaleur vers l'atmosphère, à l'interface glace-eau sous le champ. Elle peut aussi se former, sur le champ, par gel d'une couche d'eau provenant de la fonte de la neige. Il peut y en avoir plusieurs sortes, dont l'intensité de la teinte, le degré de transparence et la résistance varient, suivant les conditions plus ou moins rapides de formation. (2) (3)

Strates de glace: couches de glace de structures différentes composant le champ.

Fausse glace: glace d'apparence granulaire contenant des inclusions d'air, de teinte blanchâtre, opaque, de densité et de résistance très inférieures à celle de la glace solide. Elle est formée soit par la congélation d'un mélange neige-eau sur le champ, soit par solidification partielle du mélange

sorbets et flocons de frasil qui était initialement sous le champ, et dont l'eau s'est retirée en partie lors d'une diminution de débit, ou parce que le champ a été soulevé sous l'effet de la flottabilité du mélange sorbets et flocons de frasil. (2)

Glace de neige: autre terme pour la fausse glace formée par la congélation d'un mélange neige-eau sur le champ. (2).

Glace de regel: glace formée par le dégel et le regel d'une certaine épaisseur de glace solide dans la partie supérieure du champ. (2)

Glace granulaire: glace en forme de grains individuels de diamètre approximatif 0.1 pouce, provenant de la métamorphose des dépôts de frasil sous le champ. (4)

Lentilles de glace: minces couches de glace séparées du champ de glace principal, se trouvant sous le champ, dans l'accumulation de sorbets et de frasil: ces couches sont formées lors de variations brusques du niveau d'eau.

3) - Période de destruction:

Glace pourrie: glace devenue poreuse par suite d'une fonte partielle non seulement en surface, mais aussi à l'intérieur même de la glace; elle est très peu résistante et ressemble un peu à la fausse glace. (6)

Glace en chandelle: cas particulier de la glace pourrie, où les liens verticaux entre les cristaux de glace sont détruits; cette glace est donc sous forme de minces colonnes verticales ayant l'allure de chandelles.

Glace de dérive: blocs de glace solide ou pourrie d'épaisseur variable, avec dimensions et formes en plan variables, mais en général plus ou moins rectangulaires; ils proviennent du bris du champ et sont transportés par le courant. (6) (3)

Débâcle: destruction du champ par des causes mécaniques provoquées par d'importantes fluctuations journalières de débit, le printemps. Se dit aussi du transport des glaces de dérive par le courant. (7).

Embâcle printanier: arrêt et accumulation des glaces de dérive, à une singularité ou un obstacle dans la rivière. (7)

Embâcle statique: cas d'embâcle printanier où les glaces de dérive ont pris une position stable et ne bloquent pas complètement la section d'écoulement, laissant sous l'accumulation un passage pour l'eau.(5)

Embâcle dynamique: cas d'embâcle printanier en évolution, où les glaces de dérive s'accumulent jusqu'à bloquer complètement la section d'écoulement, forçant le niveau de l'eau amont à s'élever jusqu'à débordement de l'embâcle ou dérivation des eaux. (5)

Dégorgement: désigne le phénomène par lequel l'embâcle, sous l'effet de la poussée de l'eau qui le sollicite, cède; il se crée ainsi un couloir permettant le passage de l'eau accumulée derrière. (5) (2)

Murailles de glace: murs verticaux de glace formant les côtés du couloir créé par le dégorgement de l'embâcle.

CHAPITRE II

THEORIES DE FORMATION ET D'EVOLUTION

DES CHAMPS DE GLACE EN RIVIERE

La littérature scientifique fournit de nombreuses publications sur le phénomène de formation et d'évolution des glaces. Cependant, dans ce cas-ci comme dans celui de la nomenclature des glaces, un grand nombre de ces écrits traite ce sujet en rapport avec les glaciers, les lacs, la mer; d'autres en traitent au niveau moléculaire, en laboratoire. Bien que ces recherches peuvent fournir des apports intéressants et précieux, elles ne donnent pas directement de théories explicatives du processus. Parmi les autres, la majorité attaque une étape particulière de la formation et de l'évolution des glaces en rivière; enfin, quelques rares auteurs abordent la question dans son ensemble.

1)- Dans un article du "Canadian Engineer", en août 1895 (12), un auteur anonyme présente les croyances communes de l'époque sur la formation de la glace. Il y déclare d'abord que le processus de gel, en rivière, est un problème non encore résolu et, qu'en général, on suppose que l'épaississement d'un champ continu de glace se fait à l'interface glace-eau. Il présente aussi une théorie soutenue par un nommé Thomas Pringle, selon laquelle la glace épaissit par le dessus, à l'interface glace-air: pour appuyer ses dires, monsieur Pringle affirme que la glace est poreuse et que l'eau, attirée dans les pores et remontant en surface par capillarité, y gèle. L'auteur écrit ensuite, à propos de la glace de fond et du frasil: ces deux formes de glace sont de même nature, et à l'origine sont de fines aiguilles de glace apparaissant à la surface de l'eau, dans les rapides, quand la température extérieure est inférieure à $0^{o}C$: ces aiguilles sont attirées vers le fond de la rivière sous l'effet de quelque magnétisme inconnu. Ces théories sont depuis longtemps dépassées.

2) - W.J. Altberg (13), de 1915 à 1935, s'est intéressé à la formation de la glace sous la surface de l'eau, ce qu'il appelle "underwater ice". Le refroidissement des eaux courantes, contrairement à ce qui se passe dans les lacs, s'effectue à la fois dans leur masse totale, car les molécules d'eau refroidies en surface, à cause du mouvement hélicoïdal de l'eau occasionné par les sinuosités du lit et de la turbulence, se mélangent dans toute la section: on obtient ainsi, plus ou moins, la même température dans tous les points du profil transversal.

Après un surefroidissement de quelques 0.1 ou 0.01 degrés centigrades au-dessous de 0, la formation de cristaux de glace se met en train dans le profil entier. Les conditions de cristallisation sont les suivantes:

a) état de surefroidissement de l'eau.

b) écoulement turbulent facilitant les échanges thermiques.

c) présence de germes de cristallisation (particules solides se trouvant en suspension dans l'eau, faibles inégalités du fond du lit ou surfaces d'objets se trouvant dans l'eau).

d) conduction constante de la chaleur par l'air froid en contact avec la surface de l'eau.

La glace de fond se forme par la croissance de cristaux sur les matériaux formant le lit de la rivière. Pour ce qui est de leur formation et de leur structure, les cristaux qui se forment sur le fond sont entièrement identiques à ceux qui se forment dans le profil transversal et qui composent ce qu'on appelle le frasil; ces cristaux formés dans le profil, bien que plus légers que l'eau, ne remontent pas sitôt formés à la surface, car la viscosité retarde leur mouvement ascensionnel et le courant les entraîne. Bref, les observations de W.C. Altberg l'amènent à conclure que la formation des cristaux composant la glace de fond suit exactement les mêmes lois que la formation des cristaux composant le frasil.

Altberg est l'un des pionniers dans le domaine de la formation de la glace dans les cours d'eau. Plusieurs années d'observations de ce phénomène lui ont permis de formuler de précieux principes de base. L'un de ceux-ci nous semble cependant par trop gratuit: les faibles inégalités du fond du lit et les surfaces d'objets se trouvant dans l'eau servent peut-être de germes de cristallisation, mais ce n'est pas directement évident. De plus, les particules de frasil ne remontent pas directement en surface, non en raison de la viscosité de l'eau, mais en raison de la turbulence de l'écoulement.

3) - Des règles relatives à l'écoulement des glaçons furent exprimées sous forme mathématique par M. Schoklitsch en 1930 (14). Pour une section transversale donnée, soient B la largeur du plan d'eau en surface, v la vitesse moyenne de l'eau en surface, et $\sigma \leqslant 1$ la partie du plan d'eau occupée en surface par les glaçons: voir fig. II-3) (1).

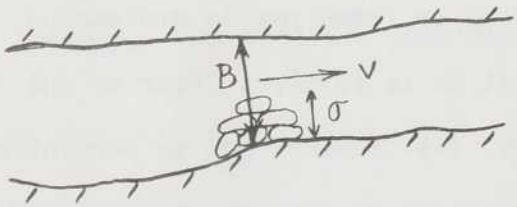


Figure II-3) (1)

Schoklitsch établit l'équation de continuité:

$$\sigma_1 B_1 v_1 = \sigma_2 B_2 v_2 .$$

C'est-à-dire que d'une section à une autre le produit des trois valeurs est constant, en supposant qu'il n'y a pas d'apport de glaçons entre les deux sections considérées et en supposant aussi que tous les glaçons se tiennent à la surface, car il faut bien noter que l'équation ne vaut que dans ce cas. De cette équation découlent les lois suivantes:

a) pour B et v diminuant, σ augmente.

b) pour B constante, σ varie inversement avec la vitesse d'écoulement en surface.

c) pour v constante, σ , ou le degré de couverture de glace, varie inversement avec la largeur de l'écoulement en surface.

Les règles de Schoklitsch sont très intéressantes en ce qu'elles fournissent un moyen simple d'analyser les caractéristiques d'un tronçon de rivière en rapport avec l'écoulement des glaçons. Cette méthode devrait cependant être employée avec précaution; il ne faut pas oublier de tenir compte, en l'employant, de la glace de rive. Celle-ci diminue la largeur d'écoulement en surface.

4)- Dans un article paru en 1948, dans la Houille Blanche (8), M. W. Laszloffy traite de la formation de la glace en rivière. Il présente d'abord la théorie d'Altberg sur la formation du frasil et de la glace de fond, et il élabore ensuite l'explication du processus de formation des glaces dans son ensemble. L'importance, selon lui, de la glace formée par cristallisation de la couche d'eau en surface est minime en rivière; il s'en forme en général le long des rives, où l'écoulement est calme et lent, et dans quelques tronçons à écoulement lent. "Plus l'écoulement est rapide, plus la quantité de chaleur qui se développe par friction est grande. En supposant des conditions thermométriques analogues, le refroidissement et la congélation des glaces se produisent plus lentement sur les tronçons de fleuve à forte pente et à courant rapide que sur les secteurs à faible vitesse se trouvant dans la plaine."

"Le rythme de formation des glaces dans le même tronçon est plus rapide au commencement de l'hiver que plus tard, alors que les eaux se clarifient et qu'ainsi le pourcentage de particules solides servant de germes à la cristallisation diminue."

"Le champ de glace qui se développe sur la rivière diminue également le rythme de formation des glaces, en jouant le rôle d'un isolateur."

"La formation des glaces est facilitée par la présence de divers objets et constructions établies dans l'eau."

Laszloffy étudie ensuite l'écoulement de ce qu'il appelle les glaçons, et qui correspondent à la définition "glace en assiette" citée au chapitre I ci-inclus. "Des paquets transparents composés de cristaux congelés, ainsi que des masses de glace se détachant du fond du lit, montent à la surface pour former des glaçons; ces derniers s'écoulent sur la surface de l'eau, se cognent sans cesse les uns contre les autres, deviennent ronds, et il se forme sur leur pourtour un rebord qui joue un rôle important dans le processus de renforcement des glaces. En effet, en raison de ce rebord, tous les glaçons épousent la forme d'une assiette plate. Or ces assiettes se heurtent les unes contre les autres, s'enfoncent dans l'eau, se remplissent d'eau laquelle, une fois gelée, renforce les glaçons. D'autre part, par suite des dits rebords, la surface de contact entre les glaçons devient plus grande, facilitant leur congélation, de sorte que le diamètre des glaçons en marche s'accroît brusquement."

Se basant sur les règles relatives à l'écoulement des glaçons exprimées par Schoklitsch, l'auteur en déduit quelques lois: "Dans les rétrécissements, si la vitesse de l'eau en surface demeure à peu près égale à celle existant en amont, le degré de couverture de glace augmente."

" Si le débit diminue, les eaux baissent et, en général, il s'ensuit une diminution de la largeur d'écoulement en surface et aussi une diminution de vitesse: le degré de couverture de glace augmente donc."

" La pente diminuant, donc la vitesse diminuant et la largeur d'écoulement à peu près constante, le degré de couverture de glace augmente. Donc de façon générale, la formation des glaces va en s'accroissant de la source vers l'embouchure."

"Le degré de couverture de glace se modifie également par suite de la configuration du lit. Les glaçons en marche dans les courbes aiguës de la rivière, n'étant pas à même, par suite de leur inertie, de suivre le courant passant au point d'inflexion d'un côté à l'autre, restent le long du côté de leur cheminement. En raison de cela, ils piétinent sur le haut-fond (côté convexe) de la courbe suivante, tout en retrécissant le plan d'eau en surface: le degré de couverture s'accroît donc brusquement". Voir fig. II-4) (1a, 1b)

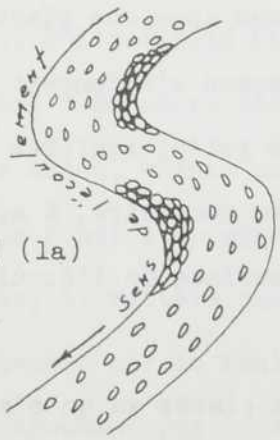


Figure II-4) (1a)

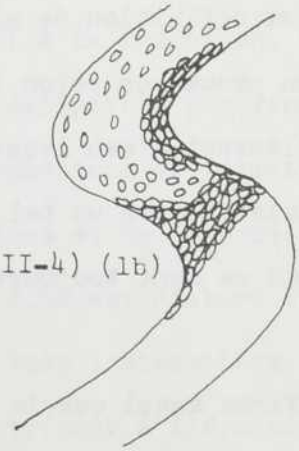


Figure II-4) (1b)

"Les glaçons, s'arrêtant aux pointes des hauts-fonds et des îles, contribuent aussi à rétrécir la voie de passage.

En raison du rétrécissement de la voie des glaçons aussi bien que de la diminution de la profondeur et de la vitesse due à la bifurcation du lit en amont de la pointe de l'île, une augmentation locale du degré de couverture de glace se produit".

Laszloffy a tiré, de ses observations du phénomène de formation des glaces sur le Danube, plusieurs remarques d'ordre qualitatif. Quelques-unes de ces remarques nous semblent assez gratuites. Ainsi il affirme que le rythme de formation des glaces est plus rapide au commencement de l'hiver que plus tard parce que les eaux se clarifient: c'est une affirmation difficile à vérifier. Il remarque aussi que la formation des glaces est facilitée par la présence d'objets et constructions établies dans l'eau: cela ne nous semble pas très clair. Il veut sans doute dire que cette formation est facilitée par la présence de constructions ralentissant l'écoulement.

Dans sa définition de glaçons, que nous appelons glace en assiette, il parle d'un processus selon lequel les glaçons s'enfoncent dans l'eau et ainsi se remplissent d'eau laquelle, une fois gelée, renforce les glaçons. Nous n'avons jamais observé un tel phénomène: au contraire, à notre connaissance, les glaçons se sont toujours tenus à la surface de l'écoulement.

Il affirme aussi que la formation des glaces va en s'accroissant de la source vers l'embouchure: d'après le contexte d'où est tirée cette

affirmation, il veut fort probablement parler de la formation du champ de glaces. En pratique cela ne se réalise pas, du moins de façon aussi catégorique: les sections d'amorce du champ sont réparties un peu partout dans le cours d'eau et la formation du champ se fait simultanément en plusieurs endroits.

5) - H. T. Barnes (15), en 1906, publie un volume dans lequel, entre autres, il traite de la formation du frasil et de la glace de fond. Il appelle frasil les amas spongieux de cristaux de glace voyageant dans et sur l'eau, qu'il désigne aussi sous le nom de "slush ice". Selon lui, la glace de fond se forme par extraction de chaleur du fond de la rivière, dû au phénomène de radiation vers l'atmosphère. Il élabore aussi une méthode de calcul donnant le taux d'épaississement d'un champ continu de glace, en fonction du taux d'extraction de chaleur par conduction à l'interface glace-eau.

En 1928, il publie un autre volume (16), où il traite d'une méthode de calcul d'épaississement d'un champ continu de glace, plus élaborée que la première, en fonction des pertes de chaleur dues à la conduction, à la convection, à l'humidité atmosphérique et à la radiation. Il trouve que l'influence des 3 derniers facteurs y est négligeable par rapport au premier. Il y présente aussi, encore une fois, les questions de formation de frasil et de glace de fond; s'appuyant d'observations et de théories tirées de diverses sources, il réitère que la glace de fond est d'abord formée sur le fond de la rivière par la chaleur irradiée vers l'atmosphère, et que du frasil s'y accrochant par la suite peut contribuer à l'épaissir. Il désigne toujours, sous le terme frasil, les amas spongieux de cristaux agglomérés.

A la fin de sa vie, Barnes se rétracte en ce qui concerne la formation de la glace de fond et se rallie à la théorie de W.J. Altberg.

Les études de Barnes sur la formation des glaces en rivière sont assez restreintes et comprennent surtout la compilation de nombreuses observations faites par d'autres. Il s'en est très longtemps tenu à une théorie sur la formation de la glace de fond qu'il a par la suite abandonnée. Il désigne sous le terme frasil les amas spongieux de cristaux agglomérés; il s'agit plutôt de flocons de frasil, le frasil lui-même désignant les particules qui composent ces flocons.

6) - Un article sur la formation des barrages suspendus fut présenté, en 1959, par Hans R. Kivisild (17). Une fois un champ de glace formé en un endroit d'une rivière, d'autres glaçons descendant d'amont sont arrêtés au bord frontal du champ si certaines conditions hydrauliques sont favorables; ces dernières déterminent également si le champ se développera rapidement vers l'amont en couche mince ou si les glaçons s'entasseront pour former une couche épaisse.

Des considérations lui indiquent que la valeur du nombre de Froude, au bord frontal du champ, est un critère valable pour déterminer si l'apport de glaçons progressera ou si les glaces glisseront sous le champ. La figure II-6) (1), ci-après, vérifie bien la valeur de ce critère, et montre aussi que la valeur moyenne du nombre de Froude est d'environ:

$$F = V/(gD)^{1/2} = 0.08$$

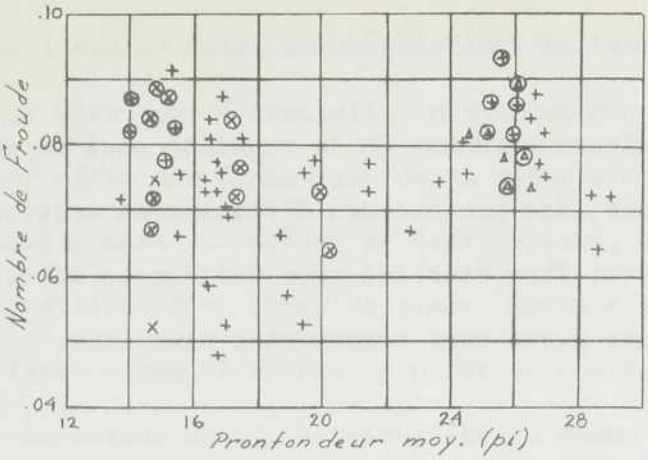


Figure II-6) (1)

Les points sur la fig. II-6) (1) représentent des cas observés, en nature, à une section où un champ de glace s'est arrêté de progresser vers l'amont, ou bien au moment où le champ dépassait une section choisie d'avance comme point d'observation. Les différents symboles indiquent différents lieux d'observation: ceux entourés d'un cercle signifient que la glace est transportée sous le champ, les autres qu'elle s'entasse au bord frontal.

Pour un nombre de Froude inférieur à 0.08, la glace s'accumule et le champ progresse: à mesure que l'on approche de cette valeur, le bord frontal a tendance à s'épaissir. Pour des valeurs supérieures à 0.08, il dit que la glace est transportée sous le champ jusqu'à une section où la contrainte tangentielle est inférieure à une certaine valeur critique.

Là elle s'accumule en profondeur, rétrécissant la section d'écoulement; la vitesse y augmente jusqu'au point où la contrainte tangentielle atteint la valeur critique. Toute glace arrivant par la suite est transportée plus en aval, à une autre section où la contrainte tangentielle est inférieure à la valeur critique.

Partant de valeurs moyennes de la rugosité sous le champ et de la contrainte tangentielle, des profondeurs d'écoulement critiques, pour une section donnée, peuvent être établies pour différents débits: à partir de cette profondeur, toute glace sera transportée plus loin.

Kivisild a déterminé au moyen d'essais expérimentaux un critère par lequel on peut déterminer si l'apport de glaçons venant d'amont progressera ou glissera sous le bord frontal d'un champ de glaces déjà formé. Ce critère nous paraît très valable pour déterminer la progression du champ.

Pour un débit donné, à une section donnée, il détermine une profondeur d'écoulement critique, c'est-à-dire une profondeur minimum à partir de laquelle toute glace sera transportée plus en aval. Pour ce faire, il part de valeurs moyennes de la rugosité et de la contrainte tangentielle sous le champ. Aucune valeur ni des contraintes tangentielles, ni de la rugosité, ni des profondeurs minimum ne semble avoir été mesurée. Il semble difficile d'admettre cette partie de son travail.

7) - J.E.Cousineau (18) présente en 1959 dans la revue "Engineering Journal"un article donnant les résultats de plusieurs années d'expérience en ce qui concerne la formation et l'évolution des champs de glace en rivière.

Partant d'observations faites pendant 10 ans sur la prise des glaces dans le fleuve St.-Laurent, il donne une description complète et claire du phénomène. Il arrive de plus à la conclusion que la vitesse moyenne maximum contre laquelle un champ de glace peut progresser, établie à 2.25 pi/sec, n'est valable que dans conditions idéales de formation du champ, c'est-à-dire:

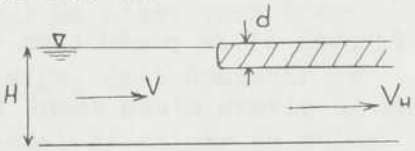
température de l'eau au point de congélation, et température de l'air au moins aussi basse que zéro degré Farenheit. Un changement quelconque dans ces conditions aura pour effet une diminution de la vitesse moyenne maximum établie.

Il établit aussi la notion de degrés-jours, au moyen desquels on peut déterminer la stabilité d'un champ de glace. Lorsque la moyenne des degrés-jours cumulés (avec comme référence le point de congélation dans l'échelle Farenheit) est au-dessus de 15, la stabilité du champ est très bonne; pour une valeur au-dessous de 12, la destruction du champ est propable.

8) - Pariset et Hausser, en 1961 (11), publient un article sur le mécanisme de progression des champs de glace.

Le champ peut progresser par juxtaposition de glaçons: ces derniers peuvent s'arrêter au bord frontal du champ et s'y maintenir en équilibre stable, si leur épaisseur est adéquate. Une analyse mathématique vérifiée par des essais montre que les glaçons seront stables si:

$$(1)\quad Vu \leq K \sqrt{2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} d}$$



Vu: vitesse moyenne sous le glaçon.

d: épaisseur du glaçon.

ρ et ρ' : poids spécifiques de l'eau et de la glace.

K: facteur dépendant de la forme du glaçon.

Il arrive souvent qu'en rivière un champ progresse avec des glaçons d'une épaisseur de l'ordre de 0.1 pied, contre des vitesses d'écoulement de 1.5 à 1.8 pi/sec. L'application de la formule (1), dans ce cas, donne une vitesse maximum de 0.5 pi/sec: donc la progression d'un champ par juxtaposition de glaçons n'est pas le seul cas possible.

Les glaçons peuvent aussi basculer et s'empiler sous le champ jusqu'à ce que ce dernier devienne suffisamment épais pour être stable et

progresser vers l'amont. Des calculs et essais des auteurs permettent de démontrer que l'épaisseur minimum "t" du bord frontal du champ, à condition que ce dernier ne soit pas submergé, est donnée par:

$$(2) \quad V/\sqrt{2gH} = \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho} \frac{t}{H}} \quad (1 - t/H)$$

H: profondeur moyenne de l'écoulement:

ρ et ρ': poids spécifiques de l'eau et de la glace.

v: vitesse de l'écoulement au bord frontal du champ.

Pour chaque valeur de V, il y a deux solutions à l'équation: seule celle donnant la plus petite valeur de "t" est physiquement possible.

Deux facteurs limitent la progression du champ de glace vers l'amont. Le premier se déduit de la formule (2), qui donne une vitesse critique Vc au-delà de laquelle le champ ne peut plus progresser.

$$Vc = 0.109 \sqrt{2gH}$$

Lorsque le champ atteint une section où la vitesse est 0.109 $\sqrt{2gH}$, il arrête de progresser: tous les glaçons basculent sous le bord frontal il se produit un embâcle de prise, ce dernier se développe et le niveau d'eau amont s'élève jusqu'à ce que la vitesse diminue assez pour permettre au champ de continuer à progresser.

L'autre facteur limitant la progression provient de ce que le champ ne peut atteindre son épaisseur minimum, quand l'écoulement transporte toutes les glaces venant d'amont sous le champ. Cette condition dépend non seulement de l'état de l'écoulement, mais aussi du débit de glaces fournies par la rivière et de la dimension moyenne des glaçons.

En ce qui concerne le transport de la glace sous le champ, les auteurs ont adopté une loi similaire à celle utilisée pour le transport de sédiments en suspension dans l'écoulement. Estimant le rayon hydraulique égal à la moitié de la hauteur moyenne d'écoulement, la formule de Meyer-Peter donne:

$$1{,}000 \ \frac{Vu^2}{C^2} = 3.75\ d + 5\ q_{sl}^{2/3}$$

q_{sl}: débit de glace sous le champ en lb (poids submergé, densité apparente 0.08) par pi.

C: coefficient de rugosité.

Vu: vitesse moyenne sous le champ, en pi/sec.

d: épaisseur des glaçons.

En résumé, la progression du champ est arrêtée soit parce que la vitesse critique est atteinte, soit parce que la quantité de glace transportée sous le champ est supérieure au débit de glace fourni au bord frontal: cette dernière considération revient à dire que la progression du champ est fonction en grande partie des conditions météorologiques, puisque ces conditions déterminent la quantité de glace fournie.

Une fois le champ de glace formé, son épaisseur varie sous l'influence de plusieurs facteurs. Le transport de chaleur de l'eau vers l'atmosphère, en passant par les couches de glace et de neige, fait épaissir le champ de glace; différentes méthodes de calcul permettent d'évaluer au moins approximativement l'épaississement du champ; sauf sur les lacs ou les tronçons de rivière à écoulement très lent, cet effet n'est pas important.

Les poussées que subit le champ en augmentent aussi l'épaisseur. La glace, matériau plastique, ne peut supporter une contrainte continue: sous l'effet d'une telle contrainte, le champ de glace épaissit par déformation plastique ou, si la contrainte dépasse le point du rupture, l'épaississement se produit par bris et écrasement. Les forces externes agissant sur le champ sont:

1. Poussée hydrodynamique au bord frontal (f_1 par pied linéaire).
2. Coefficient de traînée de l'eau coulant sous le champ (f_2 par unité de surface).
3. Composante du poids du champ (f_3 par unité de surface)
4. Coefficient de traînée dû au vent: cet effort étant variable en intensité et en direction, il n'est pas considérer ici.
5. Réaction formée par la cohésion et la friction de la glace aux berges.

Leur analyse montre que la force résultante par unité de largeur est:

$$f = \frac{B}{2\mu}(f_2 + f_3) - \frac{\tau_1 t}{\mu} - \left[\frac{B}{2\mu}(f_2 + f_3) - \frac{\tau_1 t}{\mu} - f_1\right] e^{-\frac{2\mu L}{B}}$$

B: largeur de la rivière.

τ_1: cohésion de la glace aux berges, par unité de surface.

μ: friction de la glace aux berges.

L: longueur du champ en amont de la section analysée.

Dans le cas de valeurs des variables rendant le terme entre crochets négatif, la rivière est dite "étroite". La valeur de f ($f = f_1$) sera obtenue à L = 0, et il n'y aura pas épaississement du champ, dans le tronçon considéré, après sa formation.

Si le terme entre crochets est positif, la valeur de f augmentera avec celle de L, et progressivement atteindra la valeur:

$f = B/2\mu\ (f_2 + f_3) - \tau_1 t/\mu$. La rivière est dite "large".

Dans les deux cas, l'équilibre sera atteint lorsque f égalera la réaction du champ $R = g\rho'(1 - \rho'/\rho)\ t^2/2$.

Donc, dans le cas d'une rivière dite "étroite"; l'épaisseur finale du champ est gouvernée par $f_1 = \rho' g \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \frac{t^2}{2}$

Explicitant f_1:

$$f_1 = \frac{1}{2}\rho' g \left(\frac{\rho}{\rho - \rho'}\right) \frac{Vu^4}{(2g)^2}$$

et combinant les termes, on trouve:

$$Vu = \sqrt{2g\ \frac{\rho - \rho'}{\rho}\ t}$$

équation déjà dérivée auparavant, dans l'étude de la progression du champ par juxtaposition de glaçons.

Dans le cas d'une rivière "large", l'épaisseur finale du champ est gouvernée par:

$$B/2\mu\ (f_2 + f_3) - \frac{\tau_1\ t}{\mu} = \rho' g\ \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \frac{t^2}{2}$$

En résumé:

1- L'épaisseur du champ, en rivière étroite, est déterminée par la vitesse de l'écoulement au bord frontal.

2- L'épaisseur du champ, en rivière "large", est déterminée par la poussée de glaces venant du champ en progression.

3- Le taux de progression du champ dépend de son épaisseur, et de la différence entre le débit de glaces fourni à l'amont et celui pouvant être transporté sous le champ.

4- La progression peut être arrêtée:

a.) quand le débit de glaces fournies d'amont est inférieur à celui pouvant être transporté sous le champ.

b.) quand la vitesse au bord frontal est trop grande (rivière "étroite"). Un embâcle se forme.

c.) quand l'épaisseur du champ n'est pas suffisante pour équilibrer la poussée due au champ lui-même (rivière "large"). Un embâcle se forme.

L'article de Pariset et Hausser sur la formation et l'évolution des champs de glace est la première approche mathématique complète sur le sujet; c'est un travail d'une très grande valeur. Cependant, il y a quelques imprécisions dans le développement de certaines formules et dans l'exposé de certains mécanismes d'équilibre des champs de glace.

La formule donnant la relation entre la vitesse à l'amont du champ et l'épaisseur de ce dernier ne tient pas compte de la porosité du champ lors de la prise: à ce moment, le champ est une accumulation de glaçons contenant un certain pourcentage d'interstices.

La formule de Meyer-Peter s'applique pour le calcul du transport de particules en suspension distribuées dans l'écoulement. Nos observations nous montrent qu'il s'agit plutôt d'un transport concentré en surface de flocons de frasil et de glaçons,se rapprochant beaucoup plus du mécanisme de transport par charriage.

Dans l'élaboration de la formule donnant la force résultante par unité de largeur agissant sur le champ, les auteurs emploient la notion de

cohésion (τ_1) telle que développée dans la formule de Coulomb. On peut difficilement parler de cohésion dans le cas d'une surface de glace continue soudée par gel à une rive. Il s'agit plutôt d'un matériau continu plastique: les méthodes de la mécanique des sols ne s'appliquent pas à ce genre de matériau.

9)- Dans son cours de "Mécanique des glaces" (5), où il traite entre autres de la formation d'un champ de glace en rivière, B. Michel élabore la formule donnant la relation entre la vitesse à l'amont du champ et l'épaisseur de ce dernier, en tenant compte de la porosité (ε).

La formule, une fois développée, est:

$$V = \sqrt{2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} (1-\varepsilon)t \quad (1-t/H)}$$

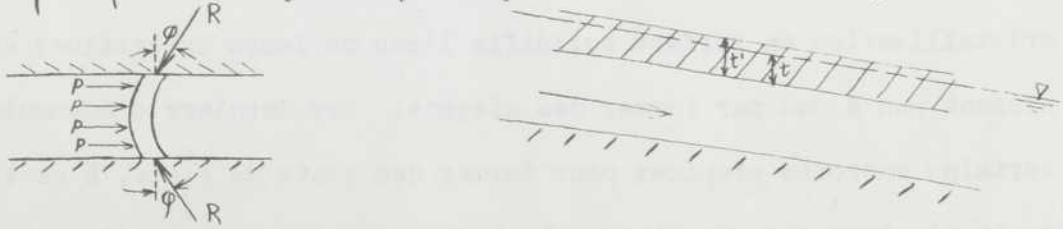
D'où on obtient, comme vitesse critique:

$$V_c = 0.109 \sqrt{2gH\,(1-\varepsilon)}$$

Dans une étude sur la destruction du champ de glace (33), B. Michel élabore une formule donnant la résistance d'un amoncellement de glaces lors de la destruction du champ. Cette formule s'applique aussi au cas de la prise et tient compte de la porosité (ε) de l'amoncellement. Il obtient:

$$R = \frac{1}{2} \tan^2 (45^\circ - \varphi/2) \; (1-\varepsilon) \; \frac{\gamma\,(\gamma - \gamma')}{\gamma'} t^2$$

où γ et γ' sont les poids spécifiques de l'eau et de la glace.



10)- En 1963, B. Michel présente une théorie sur la formation et le dépôt du frasil (1), théorie déduite de plusieurs essais effectués sur un canal situé en plein air, opéré l'hiver, et simulant l'écoulement d'une rivière. Il déduit des essais que la quantité de frasil formé est en majeure partie fonction du taux de refroidissement de l'eau. Le frasil se forme uniquement dans le cas où l'eau, initialement au dessus de 0°C, subit un taux de refroidissement suffisant pour la faire descendre au-dessous de 0°C: l'eau revient ensuite à 0°C et la production de frasil se fait seulement durant la période surefroidie.

Il distingue entre frasil actif et inactif. Le frasil est actif seulement durant la période de surefroidissement, c'est-à-dire pendant que la cristallisation a lieu: dans ce laps de temps, les particules peuvent adhérer, mais sur une certaine catégorie de matériaux seulement. Le frasil inactif n'est que l'ensemble des cristaux formés en période active et qui continuent d'évoluer dans l'eau revenue à 0°C. Ces particules peuvent former des dépôts, mais n'adhèrent pas fortement aux objets.

Dans un autre article (4), qu'il présente en 1964, B. Michel parle des transformations que subit le frasil au cours de l'hiver. Il y expose aussi une théorie d'ensemble sur la formation et l'évolution des champs de glace en rivière, en relation avec son étude sur le frasil. Les flocons de frasil, une fois formés, ont tendance à remonter en surface: là, une cristallisation en surface solidifie l'eau de leurs interstices et ils finissent peu à peu par former des glaçons: ces derniers s'accumulent en certains endroits propices pour former des ponts de glace, à partir desquels d'autres glaçons s'accumulent pour former un champ discontinu de gla-

ces; les interstices d'eau libre de ce champ gèlent par cristallisation de surface et l'on obtient finalement un champ continu. L'apport de glaçons peut aussi provenir de morceaux de glace arrachés à la glace de rive, de plaques de glace formées en écoulement visqueux, et de glaçons formés par la neige en sorbet, c'est-à-dire des flocons produits par les précipitations solides tombant dans l'eau.

L'article de B. Michel, sur la formation du frasil, est le premier travail du genre donnant des valeurs quantitatives du phénomène. Malheureusement, à cause des limitations imposées par le canal d'essai, les taux de refroidissement obtenus sont tous supérieurs à ceux qui se produisent en cours d'eau naturel.

Son article sur les métamorphoses du frasil en rivière fournit une synthèse complète de l'évolution de ce type de glace et des problèmes qu'il peut causer.

CHAPITRE III

PROBLEMES DE LA GLACE EN HYDRAULIQUE FLUVIALE

Plusieurs phénomènes, dérivant des processus de formation, d'évolution et de destruction de la glace en rivière, entraînent des dommages représentant des sommes pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers de dollars. Les poussées développées par la glace, les embâcles et débâcles, le soulèvement d'objets ou de constructions pris dans un champ de glace, le bloquage d'ouvertures par le frasil, la buée et le givre qui en résulte, le gel des pièces d'usines et appareils fonctionnant en rivière, la réduction du volume d'emmagasinement dans les réservoirs, l'interruption de la navigation, l'accroissement de la pente de la ligne d'eau et les pertes de charge, sont les principaux problèmes de la glace en hydraulique fluviale.

1) - Poussées développées par la glace: Ces poussées peuvent être statiques ou dynamiques: les poussées statiques sont développées par un champ de glace continu ou, par un champ de glaces morcelées appuyé sur un obstacle, et les poussées dynamiques par des morceaux de glace en dérive se butant à un obstacle.

a - Les champs continus de glace, appuyés sur des constructions en rivière, en particulier sur les barrages, développent des poussées parfois considérables, dues au changement de volume de la glace causé par les variations de température. Plusieurs facteurs entrent en jeu dans la détermination de la valeur de cette poussée: résistance de la glace, taux de changement de la température, épaisseur du champ de glace, capacité plus ou moins grande des berges d'empêcher l'expansion latérale du champ. Les valeurs adoptées vont, en général, de 5,000 à 50,000 livres par pied linéaire: il semble que cet écart disproportionné provienne d'une connaissance imparfaite et incomplète du comportement rhéologique de la glace. (9)

b - La poussée qu'exerce un champ de glaces morcelées, constitué de blocs de glace individuels, est la somme des forces agissant sur chacun des blocs et transmise par le champ à la construction sur laquelle il s'appuie. La longueur de champ qui exerce une pression sur l'obstacle est limitée; à une certaine distance de cet obstacle toute la poussée est prise par les berges, un effet d'arc-boutement se transmettant

de bloc en bloc jusqu'à celles-ci. Les forces en jeu sont la poussée hydrodynamique au bord frontal du champ, la force de friction que l'eau exerce sur le dessus et la composante du poids des blocs parallèle à l'écoulement. Les forces dues au vent et au poids des blocs se calculent assez facilement, celle de la poussée hydrodynamique s'évalue avec une assez grande précision et est habituellement négligeable. La force de friction que l'eau exerce sur le dessous des blocs est très difficile à évaluer, car il faut connaître le coefficient de rugosité sous le champ de glaces; la connaissance de ce coefficient est encore imprécise à cause des difficultés physiques qui empêchent une recherche effective de sa valeur. En cours d'eau naturel, la topographie est aussi un facteur important à considérer. Un meandre à l'amont de la construction diminuera beaucoup la poussée sur cette dernière; une convergence aura le même effet, augmentant la partie de la poussée prise par les berges alors qu'une divergence produira l'effet contraire. (26)

c - Les forces dynamiques développées par des champs de glace transportés en eau rapide, ou poussés par des vents forts, peuvent développer des contraintes supérieures aux poussées statiques dues à l'expansion de la glace. Il s'agit de contraintes instantanées, produites par l'impact des blocs de glace se cognant aux structures. (9)

2) - Les embâcles dynamiques ou statiques et les débâcles: sont d'une importance majeure en hydraulique fluviale. Ce sont des phénomènes com-

plexes et il est très difficile de les analyser quantitativement.

a - Les embâcles, produits par l'arrêt et l'accumulation des glaces de dérive à certaines singularités d'une rivière, peuvent s'empiler avec des épaisseurs allant jusqu'à une cinquantaine de pieds. Ces masses considérables de blocs de glace s'étendent dans la plaine d'inondation. Durant leur accumulation, elles détruisent ou détériorent les terres riveraines et les bâtiments qui s'y trouvent: une fois stabilisées, elles obstruent la voie d'écoulement: le rehaussement du niveau d'eau à l'amont produit des inondations parfois très étendues avec une eau chargée d'une quantité plus ou moins grande de blocs de glace. Une bonne partie des glaces accumulées demeurent échouées en permanence sur les rives, bloquant les routes et les entrées de bâtiments: il faut alors procéder à des travaux de déblayage coûteux et onéreux. (7)

b - Les débâcles, surtout celles produites par le dégorgement subit d'un embâcle, sont dévastatrices. Transportés par la crue, des blocs de glace pouvant atteindre des dimensions considérables (on a déjà vu des blocs de forme à peu près cubique, mesurant une vingtaine de pieds de côté, ces blocs étant composés de blocs plus petits soudés ensemble) fauchent tout sur leur passage. En plus de détruire, complètement ou partiellement, les routes, les bâtiments et les champs cultivés, les glaces en dérive peuvent affecter considérablement les conditions

d'écoulement. Elles détruisent la végétation sur les rives, changeant ainsi le coefficient de rugosité du cours d'eau; elles brisent et parfois même arrachent les arbres favorisant ainsi l'érosion d'été. Elles peuvent aussi enlever ou modifier de façon appréciable certains obstacles naturels en rivière, par exemple en arrachant une pointe de terre qui s'avance dans le cours d'eau. Les glaces en dérive s'attaquent aussi aux structures artificielles et causent le bris ou l'endommagement des barrages, des seuils submergés, des murs de protection latéraux: le choc répété des blocs de glace peut, à la longue, disloquer ou du moins affaiblir certaines parties de ces constructions. (7)

3) - Soulèvement d'objets et de constructions par la glace.

a - les constructions en rivière peuvent subir de la part de la glace, non seulement des efforts horizontaux, mais aussi des efforts verticaux. Les quais, les piliers, les caissons, enfin toutes constructions relativement petites et isolées peuvent être soulevées par un champ de glace continu lorsque le niveau d'eau s'élève. A cause du manque de connaissance quant au comportement rhéologique de la glace, aucune donnée précise n'est fournie dans la littérature en ce qui concerne ce phénomène: on a cependant observé, dans le Nord de la Suède, des cas où quelques caissons ont été soulevés de 20 centimètres et plus. (9) (27)

b - La glace de fond quelquefois se détache et entraîne avec elle des masses de terre, de roc, de béton brisé, de morceaux de métal. Ces objets sont ainsi transportés ailleurs sur le fond de la rivière. Des modifications très accentuées du coefficient de rugosité du lit peuvent en résulter. Quelquefois aussi des objets sont transportés jusqu'aux usines hydro-électriques, où ils endommagent les treillis et les vannes et parfois bloquent le passage de l'eau. (9)

4) - Bloquage des ouvertures: Quand des treillis métalliques, à fleur d'eau où en partie hors de l'eau, sont exposés à des températures inférieures à 0°C, dans des rivières propices à la formation du frasil, la probabilité qu'ils se bloquent complètement est grande. Si de grandes quantités de frasil sont formées à l'amont de l'usine, comme c'est le cas si un rapide existe à l'amont du réservoir, il devient pratiquement impossible de fournir aux barres du treillis suffisamment de chaleur pour faire fondre la glace et empêcher le bloquage. Certains cas ont été rapportés où les barres étaient tenues à une température d'environ 100°C et, malgré tout, le frasil n'était pas fondu assez rapidement pour l'empêcher de s'accumuler devant le treillis. (9) (28)

Le frasil est aussi attiré vers le fond, aux prises d'eau, par l'action du vortex qui souvent s'y développe. Les particules de frasil s'accumulent sur les treillis en commençant par le haut et s'étendant graduellement vers le bas. Des observateurs ont noté que les barres de treillis ayant une section transversale en forme de V à leur

face amont, à cause d'usure ou de détérioration par la rouille, favorisaient beaucoup moins l'accumulation de frasil que les barres de section rectangulaire. (9) (28) (29) (30).

5) - La buée et le givre: Au pied d'une chute, l'air est saturé de vapeur d'eau formée par la chaleur développée dans la masse liquide, et aussi de fines gouttelettes d'eau qui s'échappent par énergie cinétique. Cette vapeur et ces gouttelettes sont rapidement cristallisées, durant l'hiver, et vont se coller aux objets environnants. Il y a ainsi production constante de givre, durant la période hivernale; ce givre s'accumule de façon continue et finit par représenter un poids mort suffisant pour provoquer le bris de certaines parties des constructions, surtout dans le cas des fils électriques. Cette condition se produit en particulier aux centrales hydro-électriques: au pied des déversoirs il y a production ininterrompue de buée.

6) - Gel des pièces d'usines et appareils de mesure.

a - Lorsque l'eau, à une température voisine du point de congélation, s'écoule dans une conduite soumise à une température atmosphérique inférieure à $0^{0}C$, des particules de frasil adhèrent à la surface du métal; les couches successives de glace qui se développent ainsi produisent souvent un bloquage complet. Dans le cas de turbines opérant dans les mêmes conditions, la glace se forme sur les

parties stationnaires: en général, cependant, le passage pour l'eau étant relativement grand, une obstruction totale est improbable et l'eau entraînera une partie de la glace avant qu'elle ne puisse se former dans toute la section d'écoulement. Mais pour des turbines opérant avec de faibles ouvertures de vanne pour une période prolongée, il arrive que la glace se forme de façon assez solide pour empêcher le mouvement des vannes. (9) (25) (23) (31)

b - Il est très difficile, à cause des problèmes engendrés par la glace, d'installer efficacement des appareils, comme dans le cas d'échelles limnimétriques verticales plantées dans le cours d'eau. Le frasil peut se coller aux parties submergées des appareils et empêcher le mouvement des parties mobiles, créer un poids mort supplémentaire ou former une isolation qui éliminent toute possibilité de lecture précise, comme par exemple dans le cas de la mesure des températures de l'eau au moyen d'un appareil enregistreur: lorsque le bulbe thermométrique est entouré de frasil, il n'enregistre plus la température de l'eau ambiante, mais se tient de façon constante au 0°C. Durant la débâcle, il est pratiquement impossible de maintenir l'installation d'appareils de mesure: les glaces en dérive les arrachent et les emportent, ou l'embâcle les écrase. (24)

7) - <u>Réduction du volume d'emmagasinement dans les réservoirs</u>: Au tout début de la prise, alors que la rivière est encore à l'eau libre, il se forme d'abord de la glace de rive et du frasil: les deux

contribuent à former un champ de glace. Le champ se forme plus rapidement là où l'eau est calme et où existe un obstacle à partir duquel il se construit. D'autres zones, plus rapides, restent encore ouvertes longtemps après la prise des zones calmes, elles continuent à former du frasil qui, en grande partie, se glisse sous le champ existant et s'accumule dans les endroits où l'eau est profonde et la vitesse réduite. Un des endroits les plus propices pour l'accumulation en profondeur du frasil est le réservoir d'un barrage, surtout s'il existe un tronçon de rapides à l'amont du réservoir. Dans le réservoir, un champ de glace se forme très rapidement: la vitesse de l'eau en surface est très faible et le barrage sert d'obstacle où les glaces commencent à se juxtaposer. A l'amont, du frasil continue à se former. Les particules qui se glissent sous le champ s'accumulent dans le réservoir: l'eau y est très lente, la section large et profonde, et le barrage lui-même empêche le frasil de descendre plus en aval. A la longue, dans certains cas, le réservoir devient presque complètement rempli de frasil; il ne reste qu'une section d'écoulement permettant de passer le débit qui existe à ce moment dans la rivière: l'usine, privée de toute réserve d'eau, doit être fermée pour l'hiver. (9) (18)

(8)- <u>Interruption de la navigation:</u> Un autre problème, causé par les champs continus de glace, est l'interruption de la navigation sur les cours d'eau importants, tel le fleuve St-Laurent. On y remédie par l'emploi de brise-glace, procédé onéreux et qui n'élimine que partiellement et temporairement le problème: pour tenir un chenal ouvert

dans le cours d'eau, le brise-glace doit y passer périodiquement durant l'hiver. La partie avant du navire est construite avec une forme très arrondie, de sorte qu'elle se glisse sur le champ de glace: le poids du navire brise en morceaux la surface continue de glace. Par contre, après le passage du navire, les morceaux de glace se soudent de nouveau ensemble, les interstices d'eau libre gelant rapidement. Cette partie du navire servant à briser la glace est renforcie en prenant un facteur de sécurite remarquablement élevé; une étude du procédé permettrait de calculer les efforts développés et de projeter de façon économique cette partie du navire.

9) - Accroissement de la pente de la ligne d'eau et pertes de charge. Des irrégularités existent dans le champ de glace, provoquées par de fortes vitesses de l'eau et aussi du vent, qui forcent les glaçons à basculer sous le bord frontal: le coefficient de rugosité sous le champ en est ainsi augmenté et par le fait même les pertes de charge. De même, les fortes vitesses de l'eau provoquent des accumulations sous le champ, ou barrages suspendus: ces derniers réduisent considérablement la section d'écoulement; l'accroissement de la vitesse de l'eau qui s'ensuit augmente les pertes de charge. Dans les usines à faible tête d'eau un point critique peut être atteint au-delà duquel une augmentation du débit, à l'usine, causera une telle diminution de charge que le rendement total en sera réduit. Dans les usines à grand réservoir, où les berges du réservoir

sont composées de glaise, une grande diminution du niveau provoquée par une demande accrue de débit peut causer des glissements de terrain. (9) (22)

Une accumulation de glace se produisant à l'aval d'une centrale peut y augmenter de façon importante la hauteur d'eau, diminuant ainsi la charge effective. Cette condition peut être due à la présence d'affluents à l'aval de la centrale, lesquels peuvent fournir un apport de glaçons y causant des embâcles qui rehaussent le niveau de l'eau: elle peut aussi être due à la présence d'un évacuateur servant à faire passer les glaces venant d'amont à l'aval de la centrale, où il y a danger qu'elles s'accumulent. (9) (27) (28)

CHAPITRE IV

FORMATION DES GLACES SUR LA RIVIERE CHAUDIERE

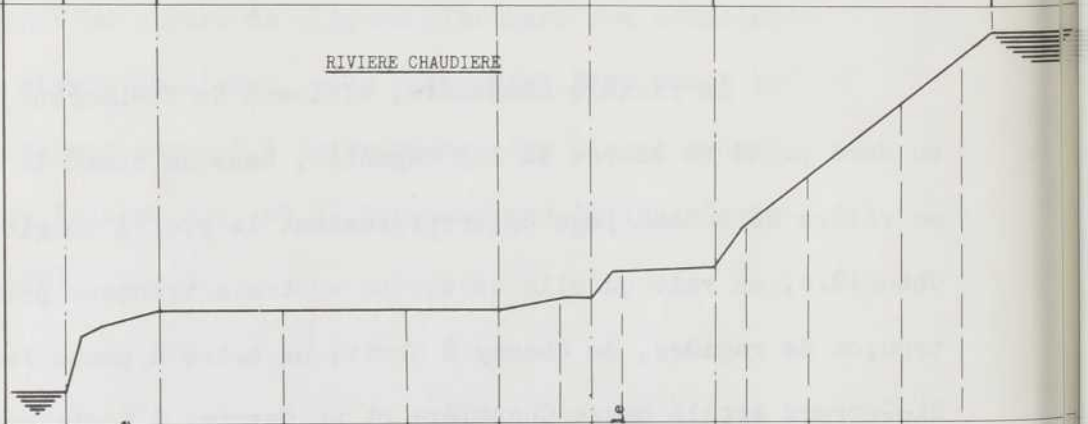
La rivière Chaudière, affluent du St-Laurent, qui coule du Sud au Nord prend sa source au lac Mégantic, dans le comté de Frontenac. Si on se réfère au schéma page 42, représentant le profil longitudinal de la Chaudière, on voit qu'elle se divise en trois tronçons principaux: un tronçon de rapides, de Charny à Scott; un autre à pente faible de Scott à St-Georges appelé Basse-Chaudière et un dernier à forte pente de St-Georges au Lac Mégantic appelé Haute-Chaudière. Ces trois tronçons ont des caractéristiques de formation de glaces différentes.

RIVIERE CHAUDIERE - TRAVAUX REMEDIATEURS - PLAN D'ENSEMBLE

Caractéristiques et facteurs principaux

Tronçon No	4	3		2	1	
Longueur en milles	24	27		13	66	
Dénivellation en pieds	278	20		81	711	
Pente moyenne en pi. par mil.	11.6	0.375	1.38	6.2	14.6	
Régime hydraulique	rapide	lent (Eaux Mortes)		transitoire	torrentiel	
Maux prépondérants	nil	← inondations →		← débâcles →	nil	régularisation artificielle
Fréquence et valeur moy. des dommages	nil	1 dans 10 ans ($33,250)	1 dans 4 ans ($84,200)	1 dans 4 ans ($84,200)	nil	
Eléments principaux de la remédiation	négligeables	dragages plus certains endiguements	travaux majeurs de régularisation		travaux secondaires de stabilisation de la glace	
Coût figuratif de la remédiation d'après hypothèses sommaires	négligeable	$600,000 (Voir renvoi "a" ci-dessous)	$2,000,000 (voir renvoi "b" ci-dessous)		$400,000 (voir renvoi "c" ci-dessous)	Total $3,000,000 (voir renvoi "d")

Profil en long schématique



Lieux hydrauliques singuliers	Localités
Fl. St-Laurent	Charny
Chute Chaudière	Scott
	Ste-Marie
	Vallée-Jonction
	St-Joseph
Le Rocher	Beauceville
Rapide-du-Diable	N.-D.-des-Pins
Site Lessard	St-Georges
	St-Martin
Gayhurst	St-Ludger
LAC MEGANTIC	LAC MEGANTIC

"a": pourrait être supérieur si endiguements latéraux s'avéraient nécessaires;

"b": pourrait être moindre si la coupure du Rocher peut être évitée; pourrait être supérieur si certains endiguements doivent être constr

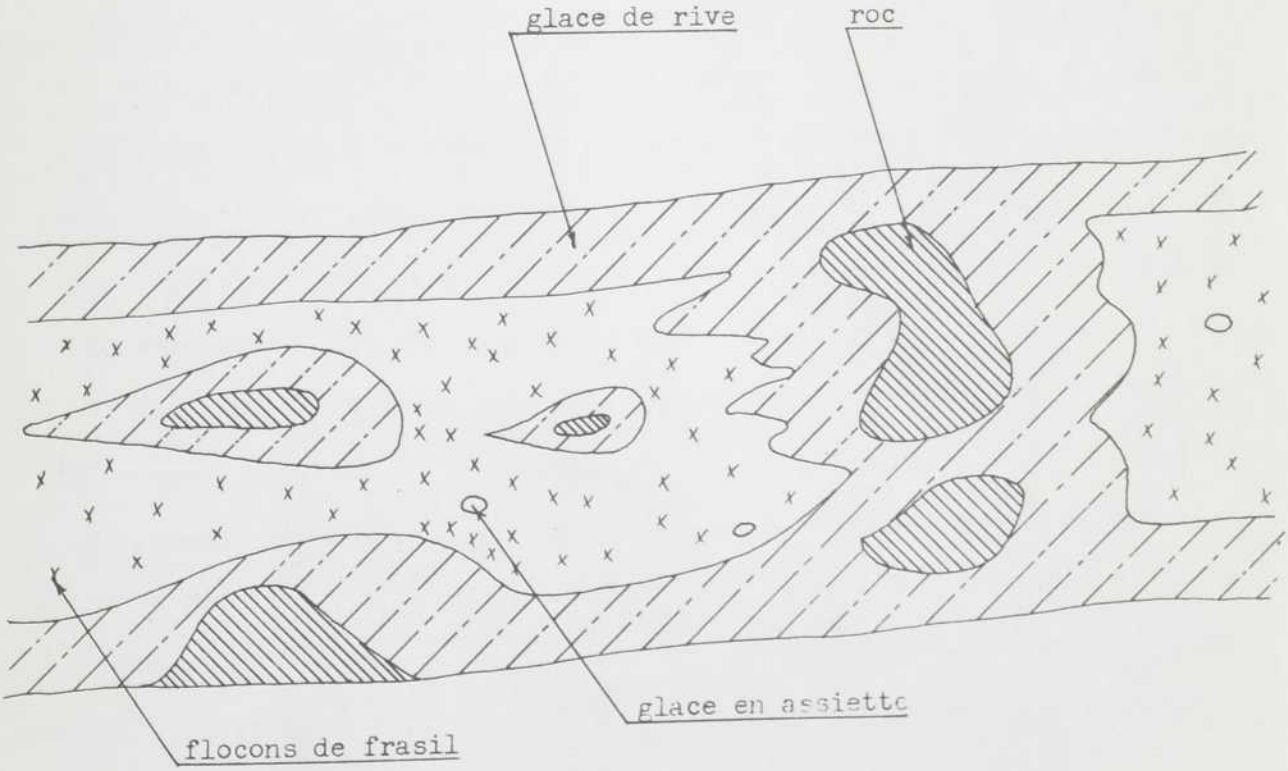
"c": pourrait être moindre si la stabilisation des couverts de glace de la Haute Chaudière pouvait suffire; pourrait être supérieur s'il lait considérer chacun des tributaires et s'il fallait inclure des programmes de reboisement;

"d": ne correspond qu'à des hypothèses primaires; est assujetti aux aléas mentionnés aux alinéas "a", "b" et "c" ci-dessus; ne tient pas te des dépenses autres que les coûts de construction ou d'exécution des ouvrages.

1) - Formation des glaces dans le tronçon Charny-Scott.

Une zone de nombreux rapides existe entre Charny et Scott. Dans ces rapides, beaucoup de pointes et d'écrans rocheux émergent ou sont à fleur d'eau. Les quelques rares zones d'eau calme, les méandres, les sections très rétrécies, se prennent d'un champ de glace par formation de glace de rive sur les bords et accumulation de flocons de frasil dans le chenal central.

Dans les rapides, le processus est différent:



tel que montré dans le schéma et la photo ci-dessus, il se forme autour des pointes et écrans rocheux de la glace de surface sur une étendue plus ou moins grande, qui affecte des contours hydrodynamiques. Sur le pourtour immédiat du roc, la glace se forme comme sur les rives: la surface de glace augmente par les flocons de frasil qui s'y accrochent, s'y soudent et y gèlent en surface pour former une couche de glace mince, semi-transparente. La glace en assiette, ainsi que les flocons de frasil qui ne s'accrochent pas, contournent ces surfaces de glace ou passent dessous. Le pourcentage de glace en assiette qui circule dans cette zône est très faible, car la plupart de celle formée dans le tronçon précédent est arrêtée avant de l'atteindre; la zone elle-même est en général trop rapide pour en former, le frasil y demeurant à l'état de flocons. A la longue, ces surfaces se rejoignent et le plan d'eau est entièrement recouvert, sauf en quelques points à écoulement trop rapide et turbulent qui restent libres de glace tout l'hiver.

A Charny, extrémité aval de ce tronçon de rapides, se trouve une usine hydro-électrique. Le réservoir se couvre rapidement d'un champ de glaces, au tout début de l'hiver; la majeure partie du frasil formé à l'amont s'accumule sous le champ dans ce réservoir.

2) - Formation des glaces dans la Basse-Chaudière.

a - Généralités

Le processus de la prise du champ de glaces dans ce tronçon-ci se poursuit de façon plus progressive que dans le précédent. De façon générale, la prise se fait de la façon suivante (voir plans et photos pages 67 à 76): une partie des flocons de frasil formés à l'amont voyagent en surface: plusieurs aspérités de ces paquets de flocons émergent légèrement de l'eau.

Cette condition favorise une cristallisation supplémentaire à la partie supérieure des flocons et s'y forme peu à peu une pellicule de glace continue. Le rebord de la partie supérieure des paquets, en train de former une couche de glace, devient surélevé par rapport à la partie centrale, dû à ce qu'ils se frappent entre eux et aux berges durant leur transport à la surface de l'écoulement: ce phénomène, plus le fait que dans les zones rapides l'écoulement les force à tournoyer sur eux-mêmes, contribue à leur donner une forme à peu près circulaire. On obtient finalement des glaçons plus ou moins ronds, au rebord surélevé, constitués d'une couche de glace surmontant une certaine quantité de frasil, que l'on appelle glace en assiette. Le diamètre de ces glaces peut varier de 1 à 3 pieds environ, mais dépasse très rarement ce maximum approximatif. Les flocons de frasil ne s'agglomèrent pas en quantité suffisante pour former des paquets ayant des surfaces de diamètre supérieur à trois pieds, car la turbulence de l'écoulement empêche qu'une aussi grande masse ne se forme, ou la brise presque aussitôt formée.

Les glaces en assiette, après avoir voyagé un certain temps en eau calme, finissent par se souder entre elles et former des plaques approximativement circulaires de surface importante, pouvant aller jusqu'à une cinquantaine de pieds de diamètre. Quelques unes de ces plaques, arrivant à une singularité du cours d'eau (par exemple rétrécissement de section), se coincent et forment un pont de glace à partir duquel s'amorce un champ de glace par juxtaposition d'autres plaques. Vu leur grande dimension, les interstices entre

ces plaques sont considérables; en partie parce qu'il s'y insère des flocons de frasil, en partie parce que la couche d'eau de surface s'y trouvant est pratiquement stagnante, il s'y forme rapidement une couche de glace.

Plaques formées de glaces en assiette.

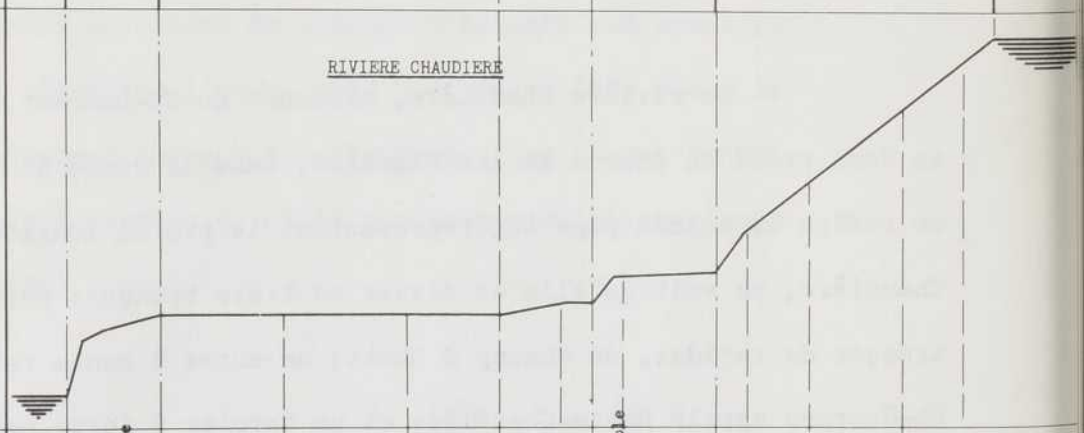
Formation d'une couche de glace dans les interstices entre les plaques de glaces en assiette.

RIVIERE CHAUDIERE - TRAVAUX REMEDIATEURS - PLAN D'ENSEMBLE

Caractéristiques et facteurs principaux

Tronçon No	4	3		2	1	
Longueur en milles	24	27		13	66	
Dénivellation en pieds	278	20		81	711	
Pente moyenne en pi. par mil.	11.6	0.375	1.38	6.2	14.6	
Régime hydraulique	rapide	lent (Eaux Mortes)		transitoire	torrentiel	
Maux prépondérants	nil	← inondations	→	← débâcles →	nil	régularisation artificielle
Fréquence et valeur moy. des dommages	nil	1 dans 10 ans ($33,250)	1 dans 4 ans ($84,200)	1 dans 4 ans ($84,200)	nil	
Eléments principaux de la remédiation	négligeables	dragages plus certains endiguements	travaux majeurs de régularisation		travaux secondaires de stabilisation de la glace	
Coût figuratif de la remédiation d'après hypothèses sommaires	négligeable	$600,000 (Voir renvoi "a" ci-dessous)	$2,000,000 (voir renvoi "b" ci-dessous)		$400,000 (voir renvoi "c" ci-dessous)	Total $3,000,((voir r voi "d"

Profil en long schématique



Lieux hydrauliques singuliers	Fl. St-Laurent	Chute Chaudière	Le Rocher	Rapide-du-Diable	Site Lessard	Gayhurst

Localités	Charny	Scott	Ste-Marie	Vallée-Jonction	St-Joseph	Beauceville	N.-D.-des-Pins	St-Georges	St-Martin	St-Ludger

"a": pourrait être supérieur si endiguements latéraux s'avéraient nécessaires;

"b": pourrait être moindre si la coupure du Rocher peut être évitée; pourrait être supérieur si certains endiguements doivent être constru

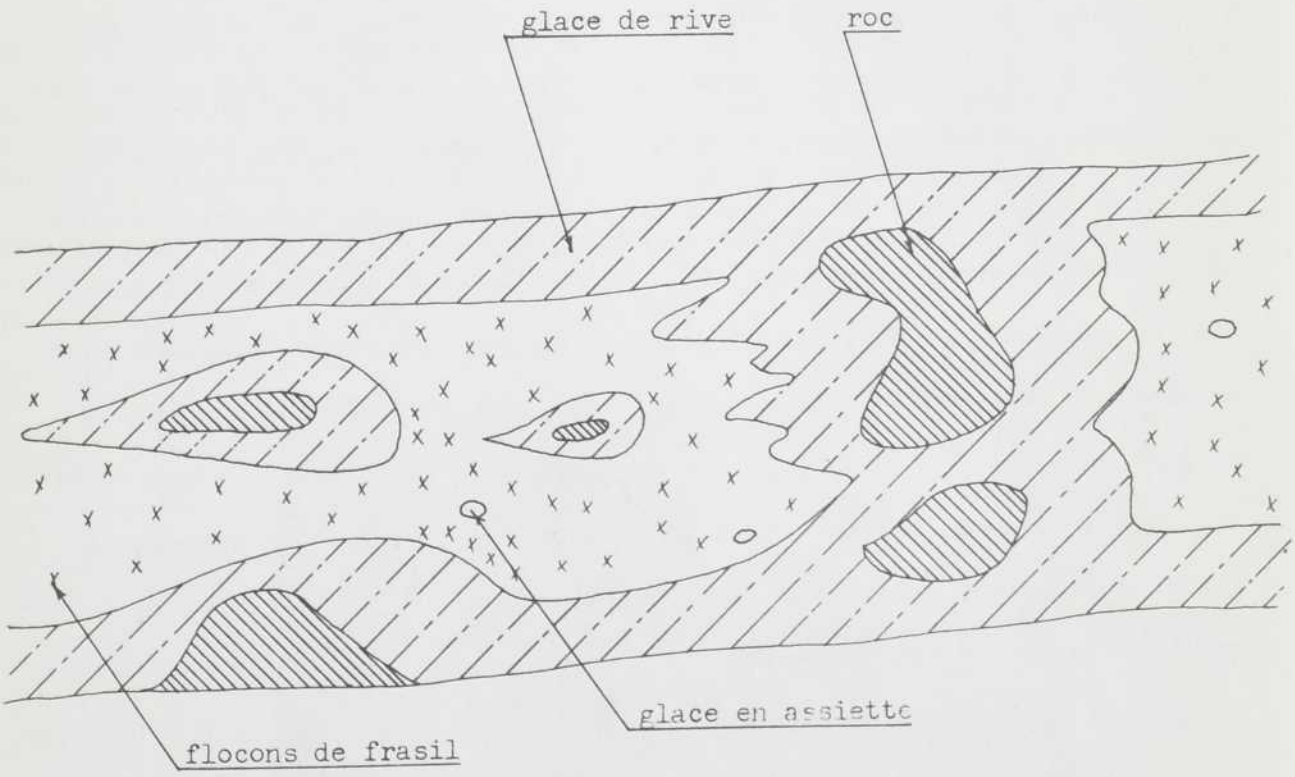
"c": pourrait être moindre si la stabilisation des couverts de glace de la Haute Chaudière pouvait suffire; pourrait être supérieur s'il f lait considérer chacun des tributaires et s'il fallait inclure des programmes de reboisement;

"d": ne correspond qu'à des hypothèses primaires; est assujetti aux aléas mentionnés aux alinéas "a", "b" et "c" ci-dessus; ne tient pas te des dépenses autres que les coûts de construction ou d'exécution des ouvrages.

1) - Formation des glaces dans le tronçon Charny-Scott.

Une zone de nombreux rapides existe entre Charny et Scott. Dans ces rapides, beaucoup de pointes et d'écrans rocheux émergent ou sont à fleur d'eau. Les quelques rares zones d'eau calme, les méandres, les sections très rétrécies, se prennent d'un champ de glace par formation de glace de rive sur les bords et accumulation de flocons de frasil dans le chenal central.

Dans les rapides, le processus est différent:



tel que montré dans le schéma et la photo ci-dessus, il se forme autour des pointes et écrans rocheux de la glace de surface sur une étendue plus ou moins grande, qui affecte des contours hydrodynamiques. Sur le pourtour immédiat du roc, la glace se forme comme sur les rives: la surface de glace augmente par les flocons de frasil qui s'y accrochent, s'y soudent et y gèlent en surface pour former une couche de glace mince, semi-transparente. La glace en assiette, ainsi que les flocons de frasil qui ne s'accrochent pas, contournent ces surfaces de glace ou passent dessous. Le pourcentage de glace en assiette qui circule dans cette zone est très faible, car la plupart de celle formée dans le tronçon précédent est arrêtée avant de l'atteindre; la zone elle-même est en général trop rapide pour en former, le frasil y demeurant à l'état de flocons. A la longue, ces surfaces se rejoignent et le plan d'eau est entièrement recouvert, sauf en quelques points à écoulement trop rapide et turbulent qui restent libres de glace tout l'hiver.

A Charny, extrémité aval de ce tronçon de rapides, se trouve une usine hydro-électrique. Le réservoir se couvre rapidement d'un champ de glaces, au tout début de l'hiver; la majeure partie du frasil formé à l'amont s'accumule sous le champ dans ce réservoir.

2) - Formation des glaces dans la Basse-Chaudière.

a - Généralités

Le processus de la prise du champ de glaces dans ce tronçon-ci se poursuit de façon plus progressive que dans le précédent. De façon générale, la prise se fait de la façon suivante (voir plans et photos pages 67 à 76): une partie des flocons de frasil formés à l'amont voyagent en surface: plusieurs aspérités de ces paquets de flocons émergent légèrement de l'eau.

Cette condition favorise une cristallisation supplémentaire à la partie supérieure des flocons et s'y forme peu à peu une pellicule de glace continue. Le rebord de la partie supérieure des paquets, en train de former une couche de glace, devient surélevé par rapport à la partie centrale, dû à ce qu'ils se frappent entre eux et aux berges durant leur transport à la surface de l'écoulement: ce phénomène, plus le fait que dans les zones rapides l'écoulement les force à tournoyer sur eux-mêmes, contribue à leur donner une forme à peu près circulaire. On obtient finalement des glaçons plus ou moins ronds, au rebord surélevé, constitués d'une couche de glace surmontant une certaine quantité de frasil, que l'on appelle glace en assiette. Le diamètre de ces glaces peut varier de 1 à 3 pieds environ, mais dépasse très rarement ce maximum approximatif. Les flocons de frasil ne s'agglomèrent pas en quantité suffisante pour former des paquets ayant des surfaces de diamètre supérieur à trois pieds, car la turbulence de l'écoulement empêche qu'une aussi grande masse ne se forme, ou la brise presque aussitôt formée.

Les glaces en assiette, après avoir voyagé un certain temps en eau calme, finissent par se souder entre elles et former des plaques approximativement circulaires de surface importante, pouvant aller jusqu'à une cinquantaine de pieds de diamètre. Quelques unes de ces plaques, arrivant à une singularité du cours d'eau (par exemple rétrécissement de section), se coincent et forment un pont de glace à partir duquel s'amorce un champ de glace par juxtaposition d'autres plaques. Vu leur grande dimension, les interstices entre

ces plaques sont considérables; en partie parce qu'il s'y insère des flocons de frasil, en partie parce que la couche d'eau de surface s'y trouvant est pratiquement stagnante, il s'y forme rapidement une couche de glace.

Plaques formées de glaces en assiette.

Formation d'une couche de glace dans les interstices entre les plaques de glaces en assiette.

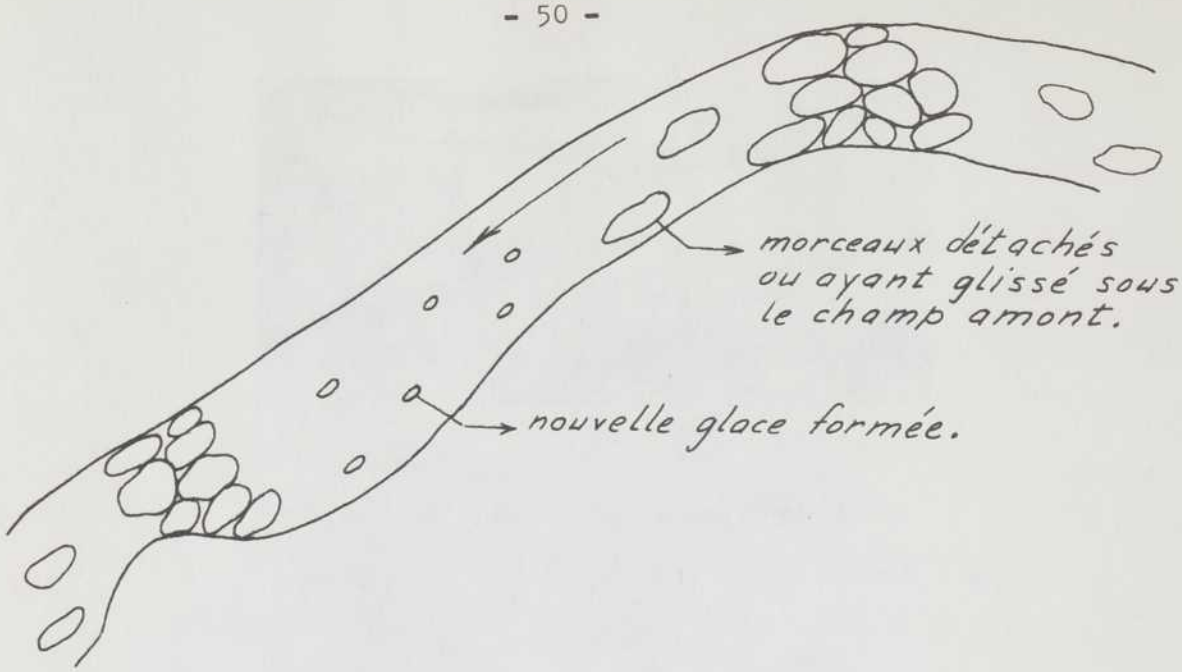
Glaces en assiette.

Amorce du champ de glaces par l'arrêt des plaques à une singularité: ici il s'agit d'un rétrécissement de section causé par les piles du pont.

Champ de glace continu formé de plaques de glaces en assiette et de couches de glace de surface.

Il est à noter que, même dans les zones où le frasil a évolué sous forme de glaces en assiette, il y coule encore des flocons de frasil: ces flocons ne remontent pas tous à la surface en même temps et ceux y apparaissant plus tard n'ont pas encore eu le temps de former une pellicule de glace continue. De plus, il peut y avoir formation en n'importe quelle zone ouverte de la rivière, dépendant des conditions de température atmosphérique, pourvu que la longueur de cette zone ouverte soit suffisante pour permettre à l'eau de surefroidir. Ainsi, en tout point du tronçon Basse-Chaudière, il y a toujours un certain pourcentage de flocons de frasil durant la période de formation des glaces.

Des ponts de glace se forment presque simultanément en plusieurs points du tronçon. Les points d'arrêt aval sont alimentés par la glace qui peut se former entre deux arrêts consécutifs, par celle qui se glisse sous le champ de glace amont et enfin, par des morceaux se détachant de ce dernier.



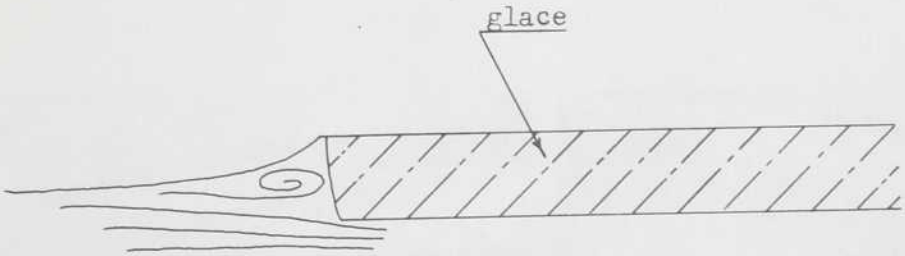
b - Processus de formation particuliers.

Il est très rare qu'un champ de glaces se forme à partir de morceaux individuels de glace en assiette: à cause de leurs dimensions relativement petites, il faut une singularité très fortement prononcée pour provoquer leur arrêt définitif. De plus, ils glissent très bien le long des bords de la glace de rive, de sorte qu'ils ne s'y accrochent pas.

Par contre les flocons de frasil ont la faculté de s'accoller facilement le long des bords de la glace de rive, surtout si le bord est à angle par rapport à la direction du courant, tel que dans les méandres; les rebords s'y accrochent et s'y soudent par gel; d'autres flocons s'accollent à ceux qui sont en place, et ainsi de suite: le champ formé ainsi de flocons de frasil évolue en surface en une couche de glace continue. Il peut arriver, mais c'est l'exception, qu'une telle formation se produise le long de

bords parallèles à l'écoulement: une très grande concentration en surface de flocons de frasil, dans une zone très lente suivant immédiatement une zone rapide, où les flocons se touchent entre eux, produira un arrêt dans un tel cas si les côtés de l'accumulation en viennent à toucher aux bords.

La juxtaposition des flocons à un bord perpendiculaire ne se produit généralement pas, sauf si l'apport de flocons est tellement grand que le débit fourni au bord est supérieur au débit entraîné dessous. Il se forme en effet, à ce point, une zone accélérée qui entraîne facilement les flocons, dont la densité est très faible.



Par contre, dans le cas du bord frontal à angle le courant, en surface, longe le bord pendant un certain temps avant de s'engouffrer dessous et même, dans le cas d'un angle très faible par-rapport à l'écoulement, il le suit complètement. Ainsi les flocons de frasil, dirigés le long du bord, finissent par s'y arrêter par friction.

Accumulation et arrêt de flocons de frasil entre des bords parallèles à l'écoulement.

Accumulation de flocons de frasil due à un obstacle local situé sur la rive.

Lisières successives de couches de glace à partir de l'arrêt de flocons de frasil, à gauche. A droite, accumulation due à un obstacle.

Lisières successives de couches de glace à partir de l'arrêt de flocons de frasil.

Formation hétérogène de couches successives de glace à partir de l'arrêt de flocons de frasil.

Accumulation de flocons de frasil causée par des obstacles en rivière.

3) - Formation des glaces en Haute-Chaudière.

Dans ce tronçon à écoulement rapide, la formation d'un champ de glaces continu est très longue à se faire. Il n'y a pas, comme dans le tronçon Charny-Scott, de roches émergentes qui favorisent l'amorce du champ; par contre, l'écoulement n'y est pas assez lent pour permettre la formation de glaces en assiette s'agglomérant par la suite en plaques.

Sauf pour quelques méandres très prononcés le long de ce tronçon, la glace y descend librement. Cette glace consiste en majeure partie en flocons de frasil et de quelques plaques arrachées à la glace de rive. Aux

endroits d'accumulation la fermeture complète de la section d'écoulement en surface se fait très lentement, par accollements successifs de flocons de frasil le long des bords de la glace de rive au début, puis les uns sur les autres par la suite. Comme l'écoulement dans ce tronçon est beaucoup plus rapide et turbulent que dans la Basse-Chaudière, ce processus de formation d'un champ de glaces y met beaucoup plus de temps à se réaliser, de sorte que, durant des périodes de temps pouvant s'étendre jusqu'à un mois, une quantité énorme de frasil est fournie au tronçon Basse-Chaudière.

4) - Points critiques d'arrêt des glaces.

Toute singularité de la rivière (méandre, rétrécissement, haut-fond, île, etc.) peut constituer un point d'arrêt des glaces. Mais, à moins d'être suffisamment prononcée, ou de réunir en un endroit plusieurs types d'obstacles, une singularité ne constitue qu'un ralentissement de la glace. En certains cas, il s'agit d'un ralentissement de courte durée. En d'autres cas la glace s'arrête à la singularité, y demeure un moment et une accumulation s'y produit; puis des plaques s'en détachent à l'aval, de temps à autre, pendant que d'autres plaques arrivant d'amont se juxtaposent à l'accumulation. La plupart du temps, la quantité de plaques se détachant à l'aval est supérieure ou égale à celle arrivant d'amont, sauf pour une brève période durant laquelle se forme l'accumulation.

Ainsi des ponts de glace se créent et disparaissent alternativement à certaines singularités. A certaines autres, qui s'étendent en longueur dans le cours d'eau, le pont de glace peut se déplacer vers l'amont ou vers l'aval.

Quelques singularités constituent des points d'arrêt définitif de la glace, en ce sens, que la quantité de plaques se détachant à l'amont est très petite et un champ de glaces stable s'y développe. Cependant, parmi ces singularités, quelques unes peuvent ne pas constituer un point d'arrêt définitif de la glace dépendant du débit, donc de la hauteur d'eau, au moment de la prise: de plus si, pendant qu'il s'y accumule de la glace, la hauteur d'eau varie de façon appréciable, l'accumulation peut se détacher et disparaître complètement.

Méandre très peu prononcé en zone d'eau très calme.
L'accumulation est instable et le point d'arrêt se déplace d'amont en aval.

Arrêt produit par un rétrécissement et un courant secondaire produit par un affluent. Arrêt stable sous certaines conditions de débit.

Méandre très prononcé mais très peu étendu. En général produit un champ de glace, mais très lentement, car le pourcentage de plaques se détachant à l'amont est très fort.

Les points d'arrêt critiques sont ceux qui produisent une immobilisation définitive de la glace, peu importe le débit durant la prise. Dans le tronçon Basse-Chaudière, deux de ces points critiques sont prédominants: il s'agit du Rocher, en aval de Beauceville et du pont de chemin de fer à Vallée-Jonction. (voir plans pages 67 à 76)

a - Arrêt des glaces au Rocher.

Le Rocher - Vue générale.

A l'avant-plan de la photo ci-dessus, on voit une île séparant l'écoulement en deux branches: dans celle de gauche, les glaces sont immobilisées dès qu'elles y pénètrent; celle de droite constitue un tronçon d'allure très inégale, où se fait presque tout l'écoulement. Juste en aval de cette île commence un méandre assez long, à courbure accentuée, à l'extrémité duquel se trouve un éperon rocheux qui y rétrécit la section. De plus, au début du méandre, la section s'élargit brusquement de façon importante et va ensuite en se rétrécissant de façon graduelle jusqu'à l'éperon rocheux. Le lit de la rivière, dans la zone du méandre, est constitué de hauts-fonds au travers desquels circulent des canaux en zig-zag. Les glaces, d'abord gênées dans leur mouvement par les sinuosités de la branche droite de l'île, sont très ralenties dans le méandre: la vitesse de l'eau y est très réduite à cause de l'élargissement subit, la face inférieure des glaces peut se frotter sur les hauts-fonds et, comme dans tout méandre, elles vont se buter à la rive convexe et y subissent aussi un effet de frottement. Le rétrécissement local causé par l'éperon rocheux est alors suffisant pour arrêter des glaces dont le mouvement est déjà très réduit.

LE ROCHER

Partie aval du méandre et vue de l'éperon rocheux à l'arrière-plan.

La photo ci-dessus montre bien l'arrêt des glaces sur la rive droite, à l'éperon rocheux par formation d'une extension importante de la glace de rive, et par l'arrêt subséquent des plaques de glace le long de cette extension.

La capacité de transport de glace d'une section de rivière est proportionnelle à VL, où:

V = vitesse moyenne dans la section $\simeq$ vitesse en surface.

L = largeur de la section en surface.

Or $V\,L = Q\,\frac{L}{A}$

Donc, pour un débit donné et par conséquent une hauteur d'eau donnée, cette capacité de transport est proportionnelle à L/A.

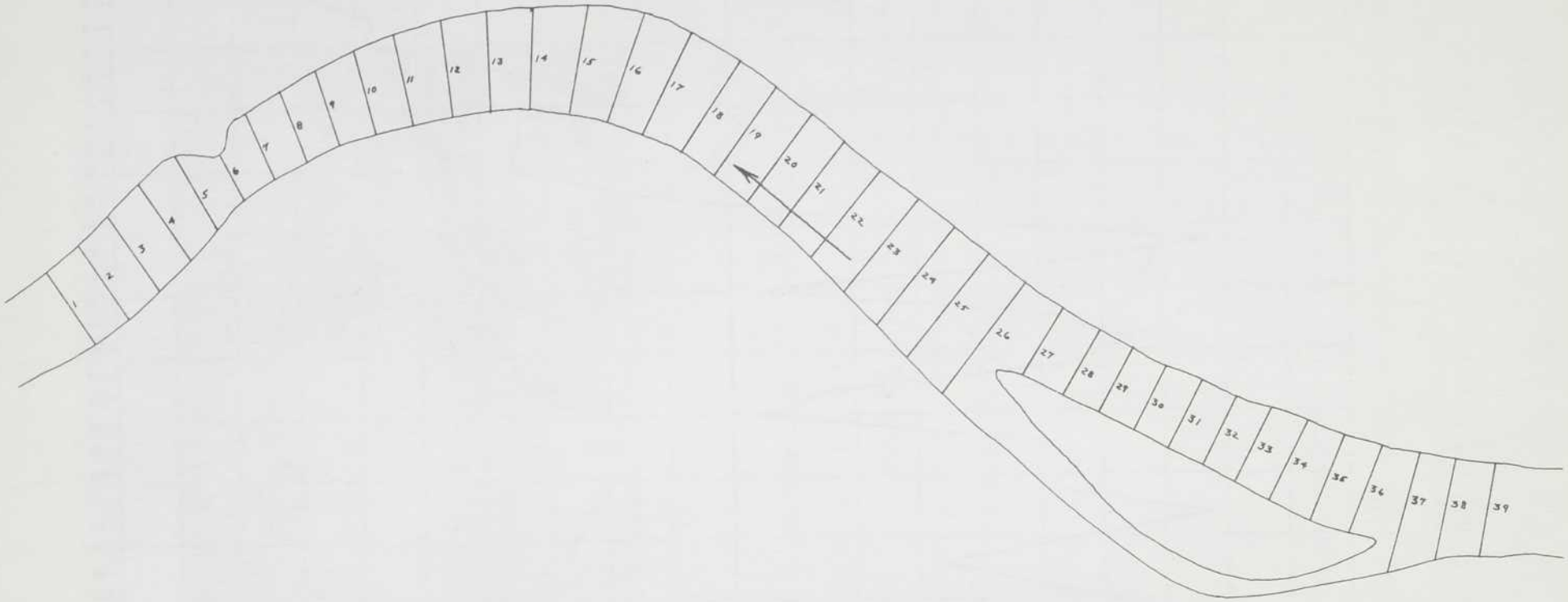
On fait le calcul des $\frac{L}{A}$ pour 39 sections s'étendant de 700 pieds en aval de l'éperon jusqu'à 3000 pieds en amont. (cf plan page 61). La mise en graphique de ces valeurs donne la courbe reproduite à la page 62. Par rapport à un L/A moyen de l'ordre de 0.275, pour ce tronçon, la zone s'étendant de la section 5 à la section 16 est celle dont la capacité de transport est inférieure, avec un minimum à la section 7. L'analyse du processus d'écoulement des glaces avec cette méthode est un indicatif à condition que l'on tienne compte en même temps de l'effet des courbures et des hauts-fonds qui peuvent produire l'arrêt des glaces par friction.

b - Arrêt des glaces au pont de chemin de fer, à Vallée-Jonction.

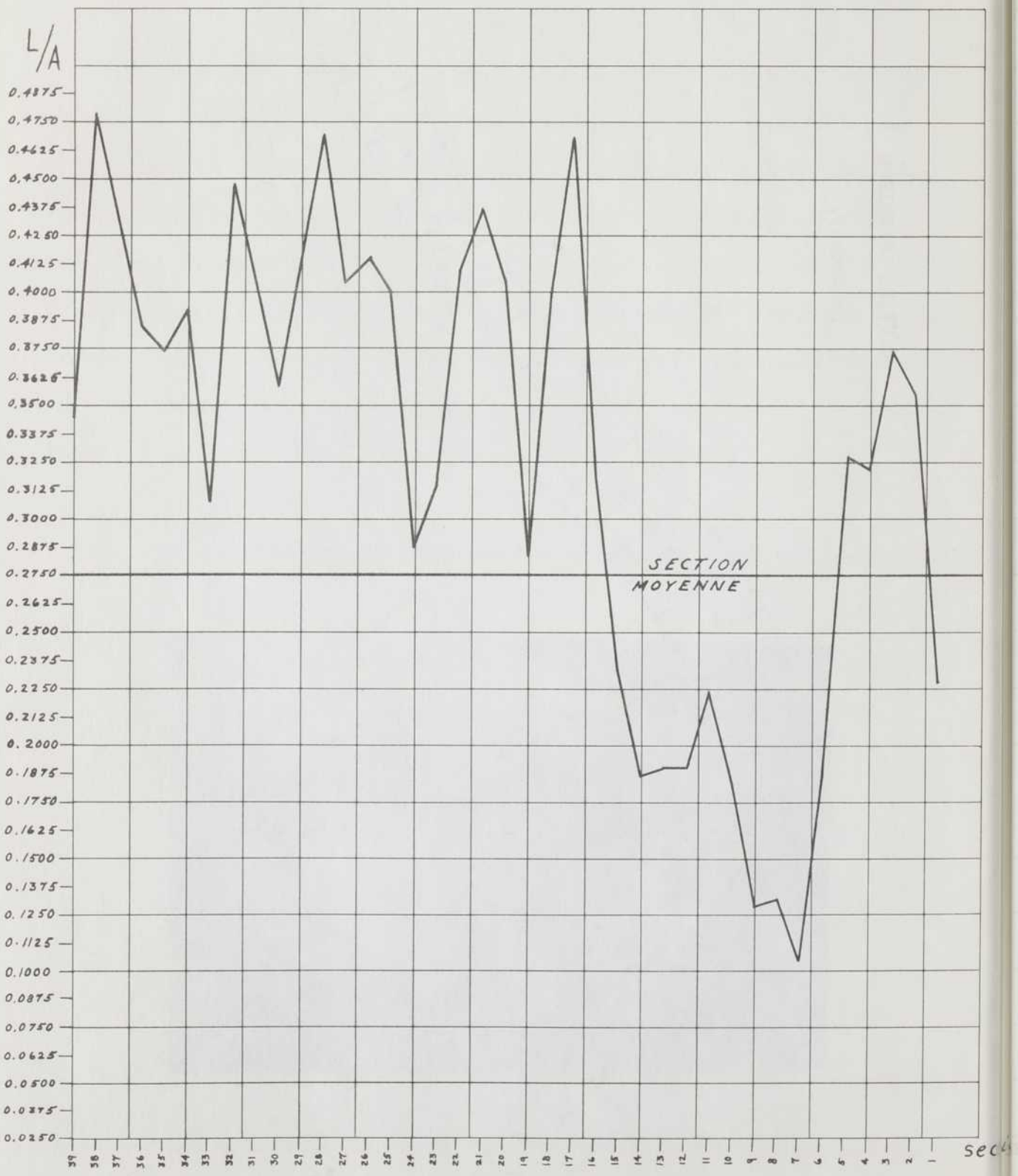
Pont de chemin de fer - Vue générale.

RIVIERE CHAUDIERE

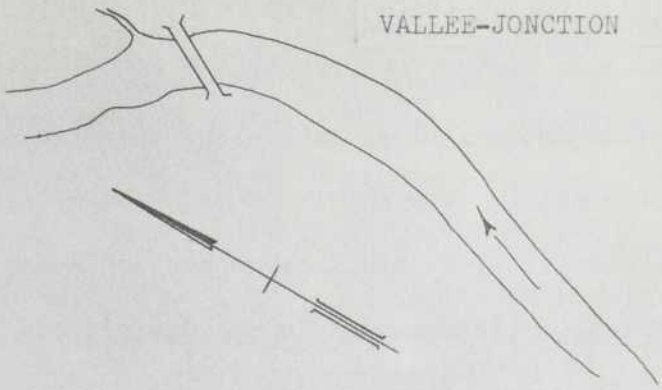
Le Rocher.



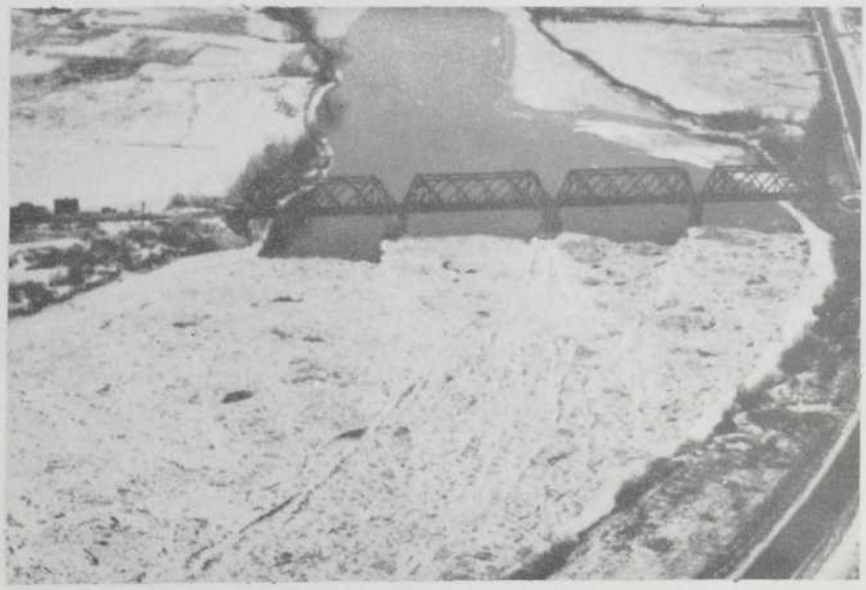
COURBE DES VALEURS L/A POUR LES SECTIONS AU ROCHER & ENVIRONS



Ce pont est situé à l'extrémité d'un méandre qui constitue en même temps un élargissement important par rapport au tronçon qui le précède.



Le pont est orienté à un angle assez accentué par rapport à la direction de l'écoulement, ce qui augmente considérablement le pourcentage de la section occupé par les piliers. Les glaces, au préalable ralenties dans le méandre par la lenteur de l'écoulement due à l'élargissement et par friction à la rive droite (ou concave), sont arrêtées aux piles du pont.



Pont de chemin de fer - Vue en détail.

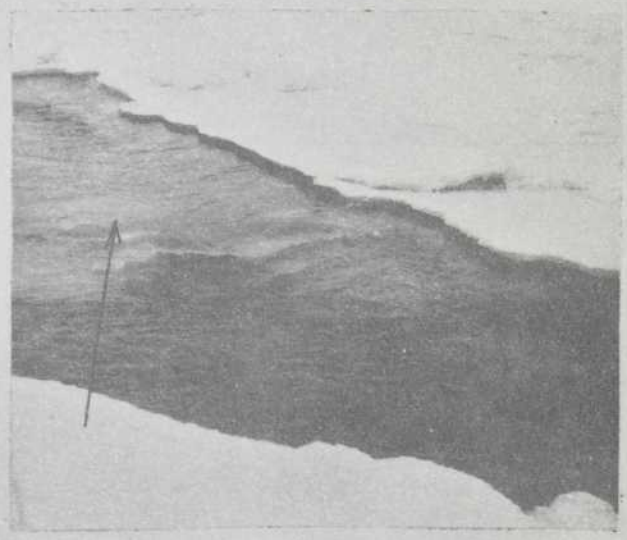
La photo précédente indique bien le processus de bloquage au pont. Les glaces, dirigées par le courant vers la rive droite, s'y arrêtent par friction et s'étendent vers le centre jusqu'à ce qu'elles viennent s'appuyer au premier pilier de droite. Il se crée ainsi une première zone de champ de glace qui devient compacte et à partir de laquelle le même processus recommence jusqu'au pilier suivant, et ainsi de suite. Les démarcations entre les zones sont faciles à distinguer dans le cas des piliers de droite et du centre.

5) - Une série d'observations aériennes, menée pendant quelques jours, avec prises de photos, permit de déterminer le processus de formation du champ de glaces dans le tronçon de Basse-Chaudière. Ci-après une série de plans et de photos correspondantes représentent l'état des glaces, en Basse-Chaudière, le 2 décembre 1963 (pages 67 à 76).

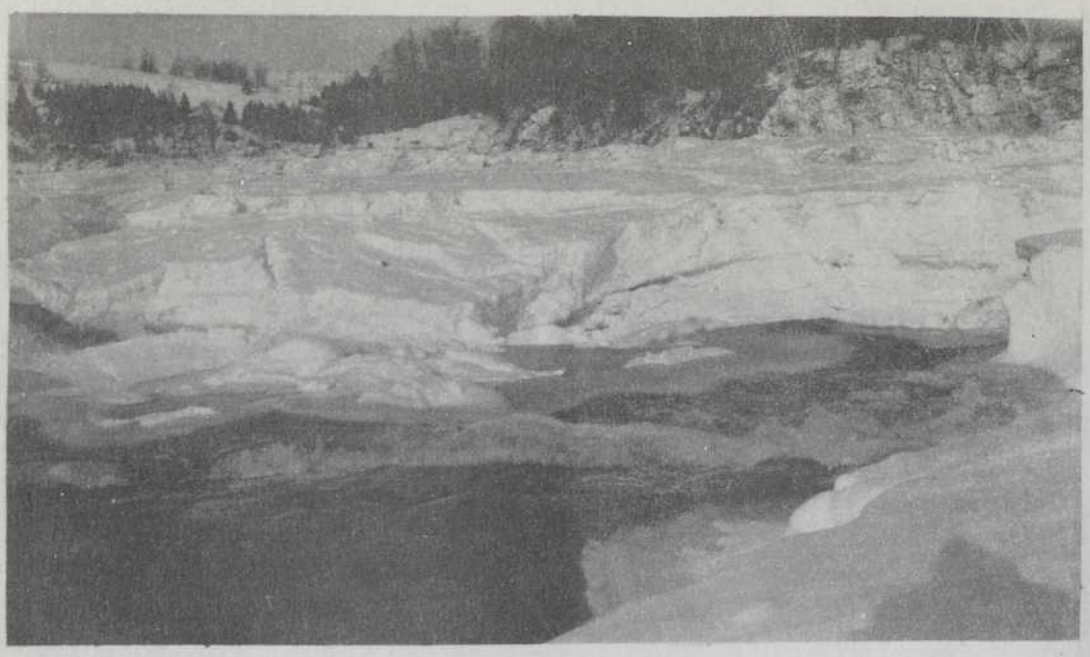
Les photos suivantes montrent quelques types de glace, définis dans le chapitre I, et qui ne sont pas représentés ailleurs dans le texte.

Grande accumulation de flocons de frasil voyageant à la surface de l'écoulement.

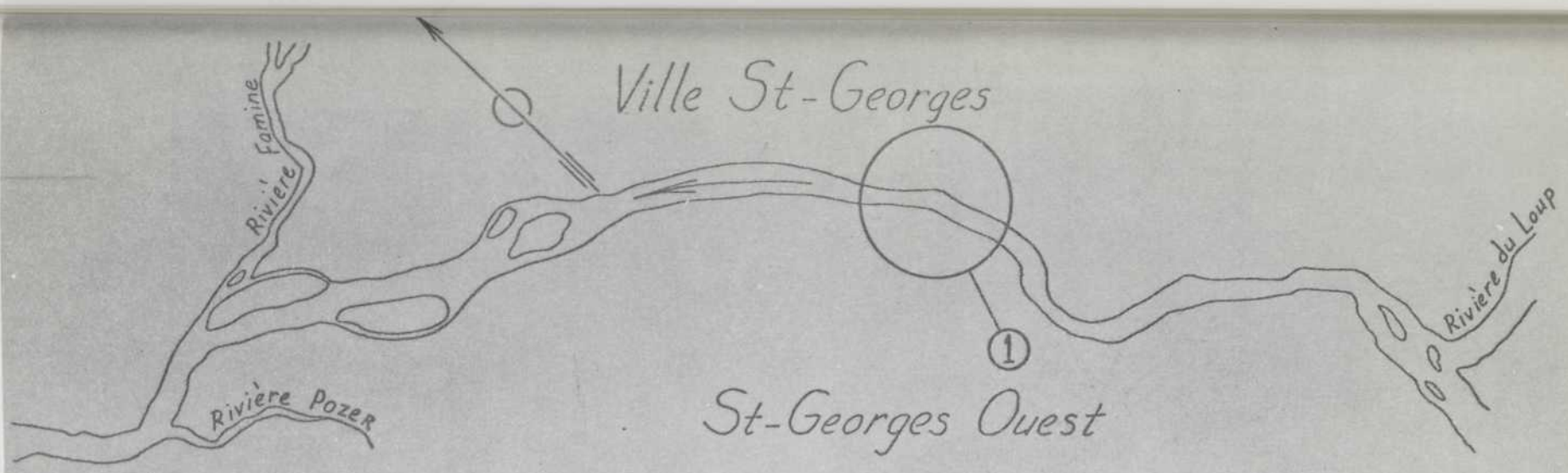
Glace de verre



Glace de fond



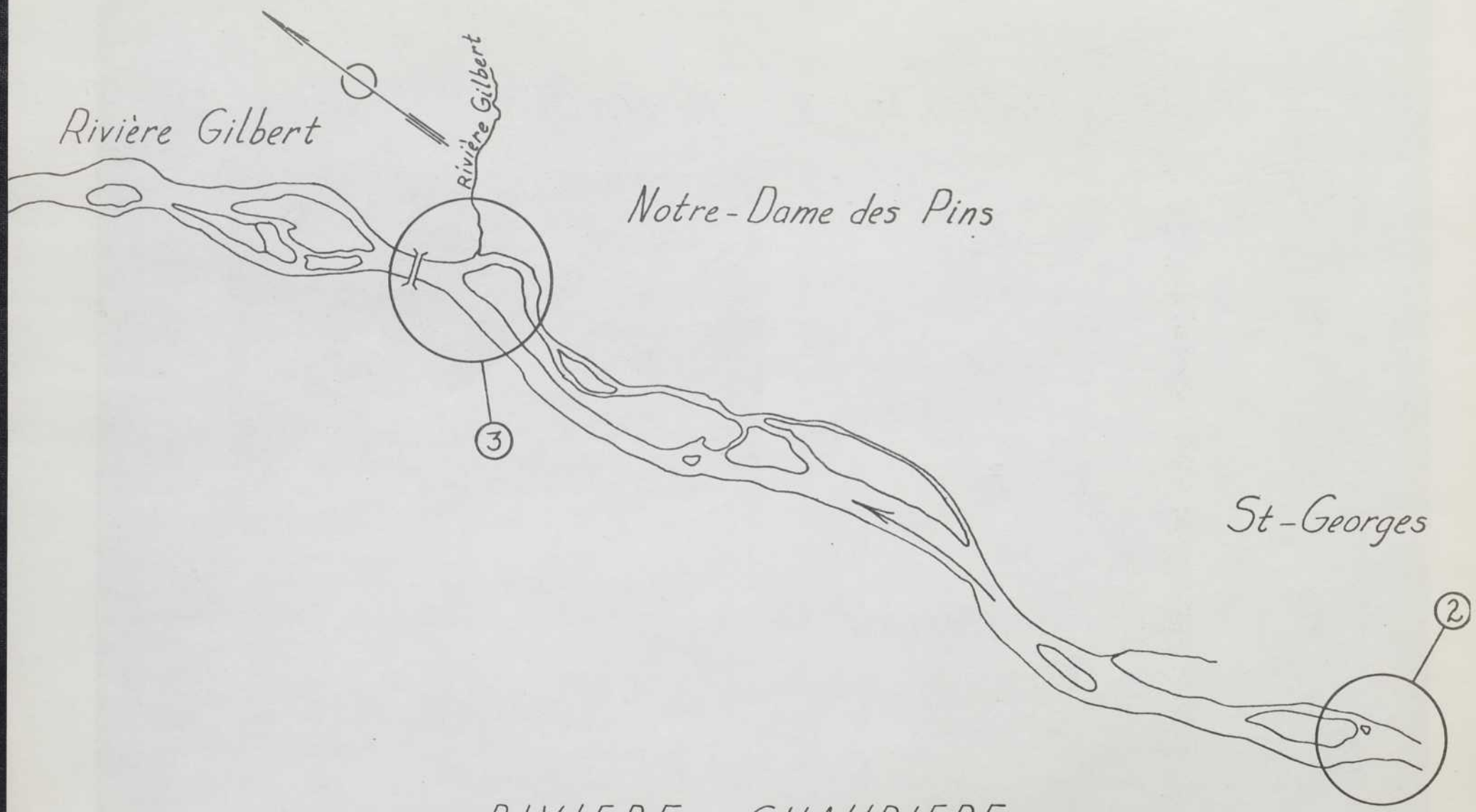
Les deux photos ci-contre montrent une accumulation de frasil dans le bassin au pied des chutes Lessard, quelques milles à l'amont de St-Georges. Pendant la période de prise, une forte crue amena cette masse de frasil, dont l'eau se draina quand le débit redevint normal. La photo du haut est une vue générale de l'accumulation, celle de droite montre l'aspect du frasil dont l'eau s'est retirée.



flocons de frasil commencant

à s'accumuler en surface.

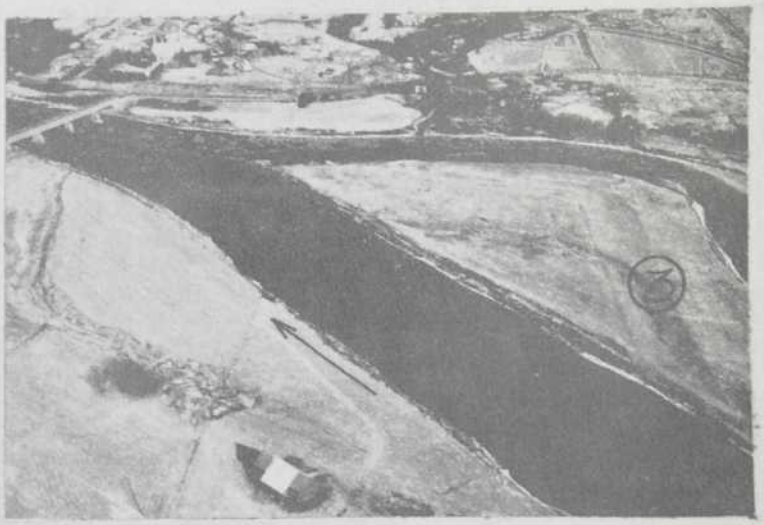
RIVIERE CHAUDIERE

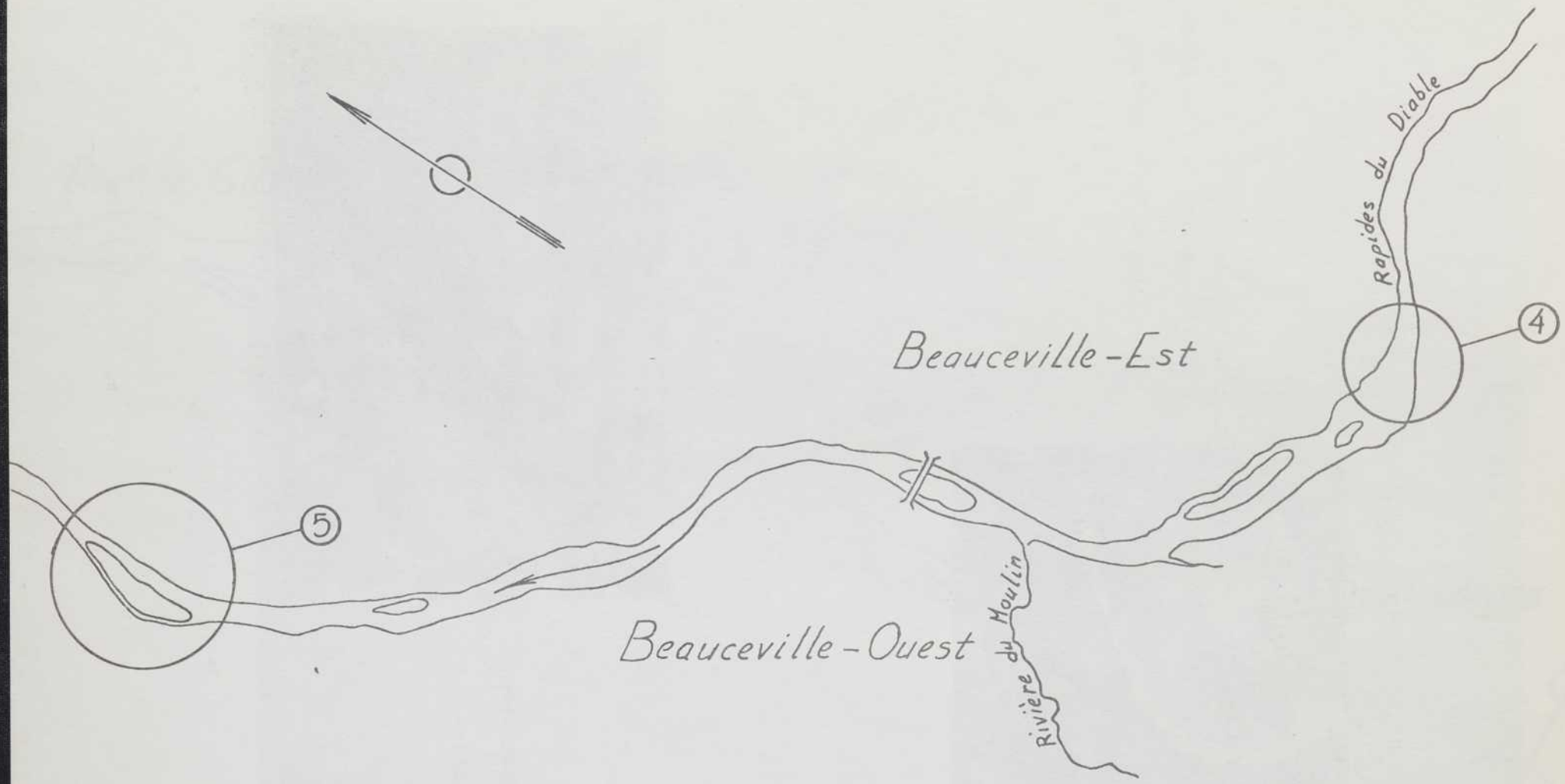


RIVIERE CHAUDIERE

Grande quantité de flocons de frasil accumulés en surface.

Commencement de formation de glaces en assiette.

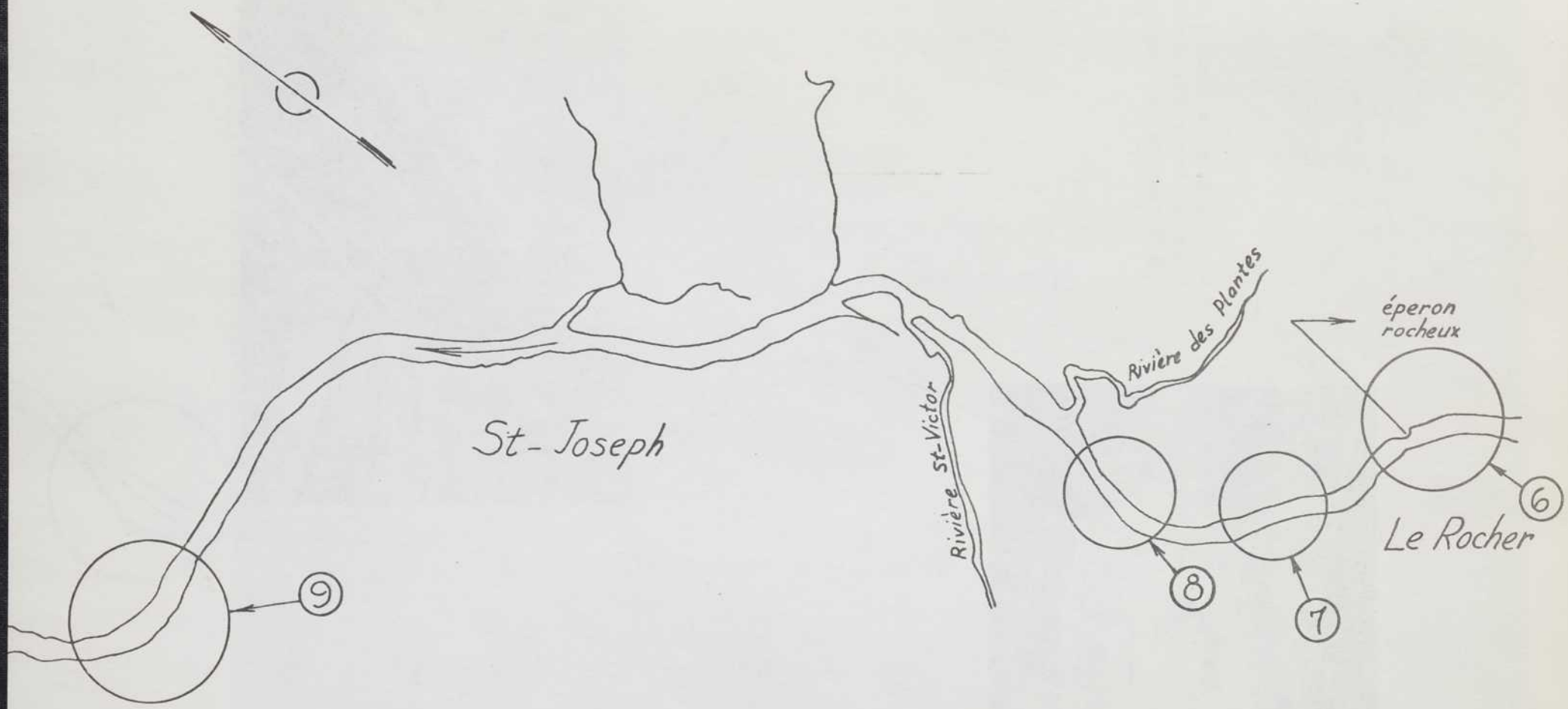




RIVIERE CHAUDIERE

Accumulation de frasil et de glace en assiette, aux pieds des Rapides du Diable.

Grande concentration de glace en assiette.



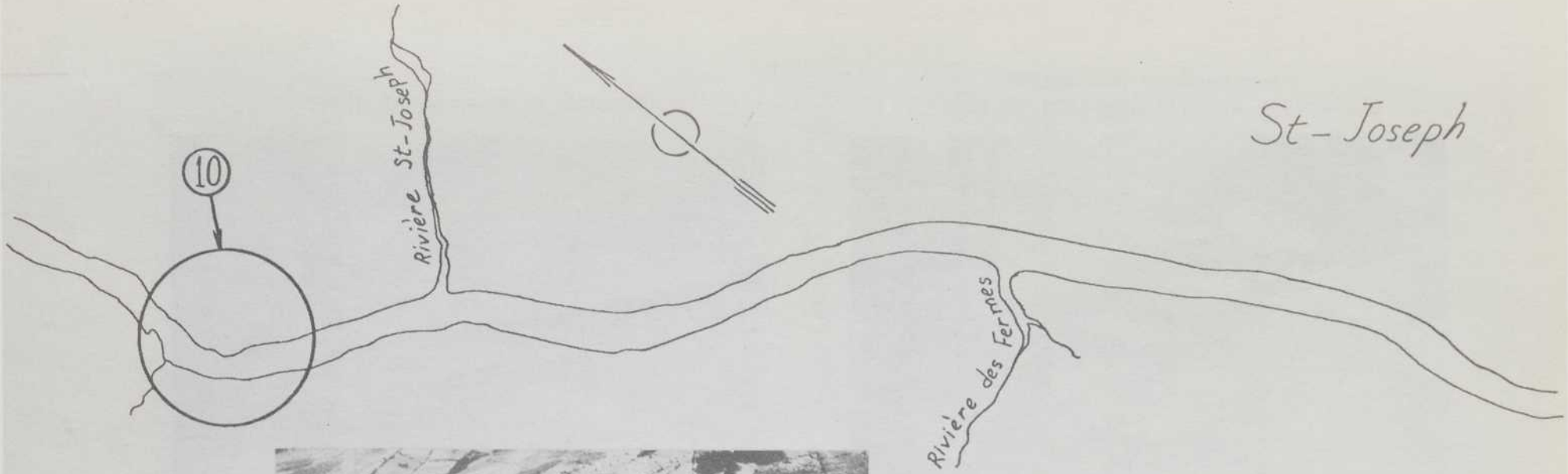
RIVIERE CHAUDIERE

Accumulation de glace en assiette au Rocher.

Début de formation de plaques de glace en assiette.

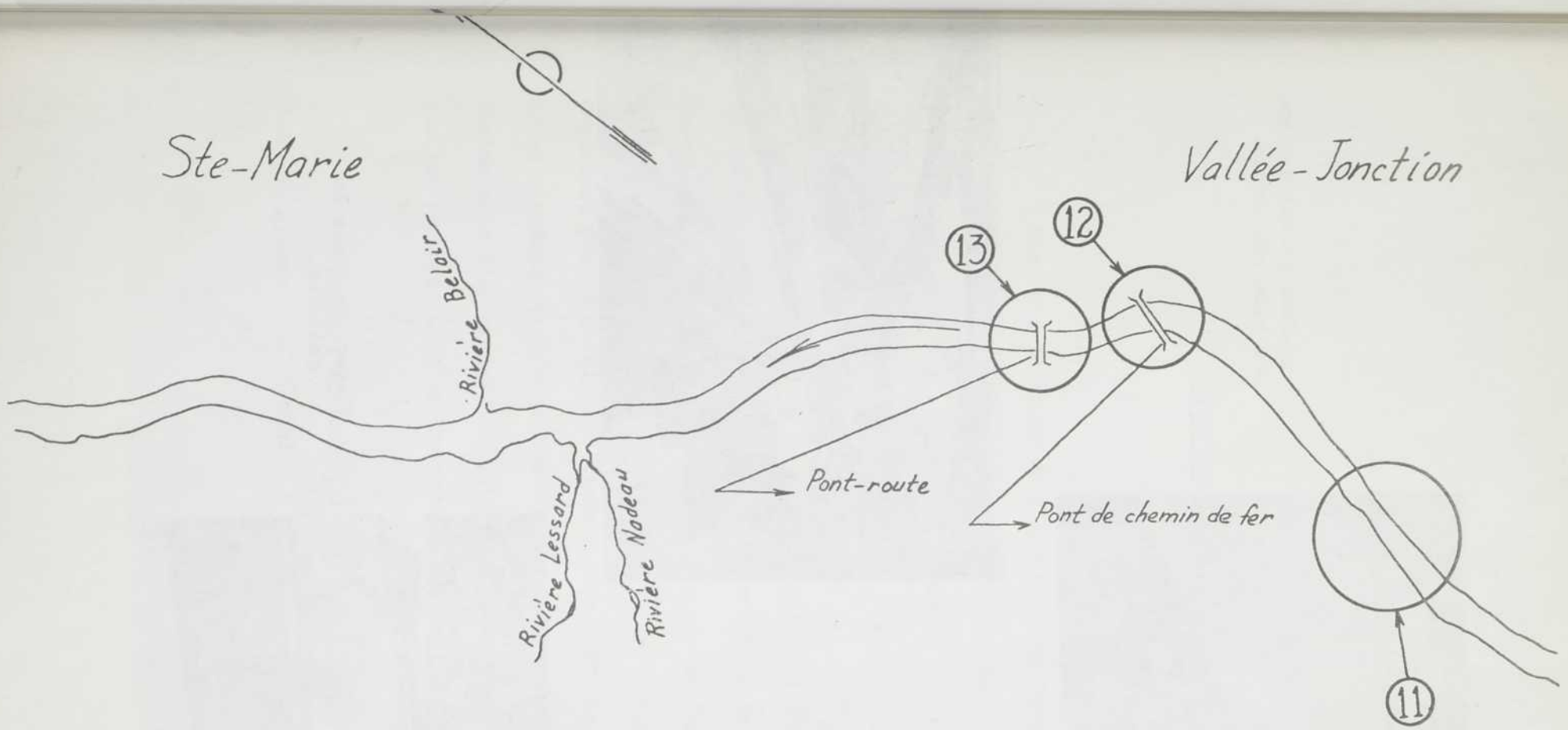
Arrêt instable à un méandre

Glace en assiette presque totalement agglomérée en plaques.



Arrêt des plaques à
une singularité.

RIVIERE CHAUDIERE



RIVIERE CHAUDIERE

Haut-fond produisant une accumulation locale.

Arrêt des glaces au pont de chemin de fer à Vallée-Jonction.

Plaques de glace en assiette.

CHAPITRE V

EVOLUTION DES GLACES SUR LA CHAUDIERE

Une fois le champ de glace continu formé, il peut épaissir de différentes façons: soit par transport de chaleur de l'interface eau-glace vers l'atmosphère, soit par apport de glaçons et de frasil venant d'amont qui se glissent sous le champ et s'y collent.

Les tronçons où le champ continu épaissit uniquement par transport de chaleur sont rares: ce sont des tronçons à section transversale relativement régulière, précédés d'un tronçon qui arrête presque toute glace se glissant sous le champ qui le recouvre. Le tronçon exempt d'accumulation doit cependant être à écoulement assez rapide pour que les glaçons s'échappant du tronçon précédent ne s'arrêtent pas par friction et continuent jusqu'à la prochaine zone d'accumulation. L'existence simultanée de toutes ces conditions se réalise rarement dans un tronçon de rivière.

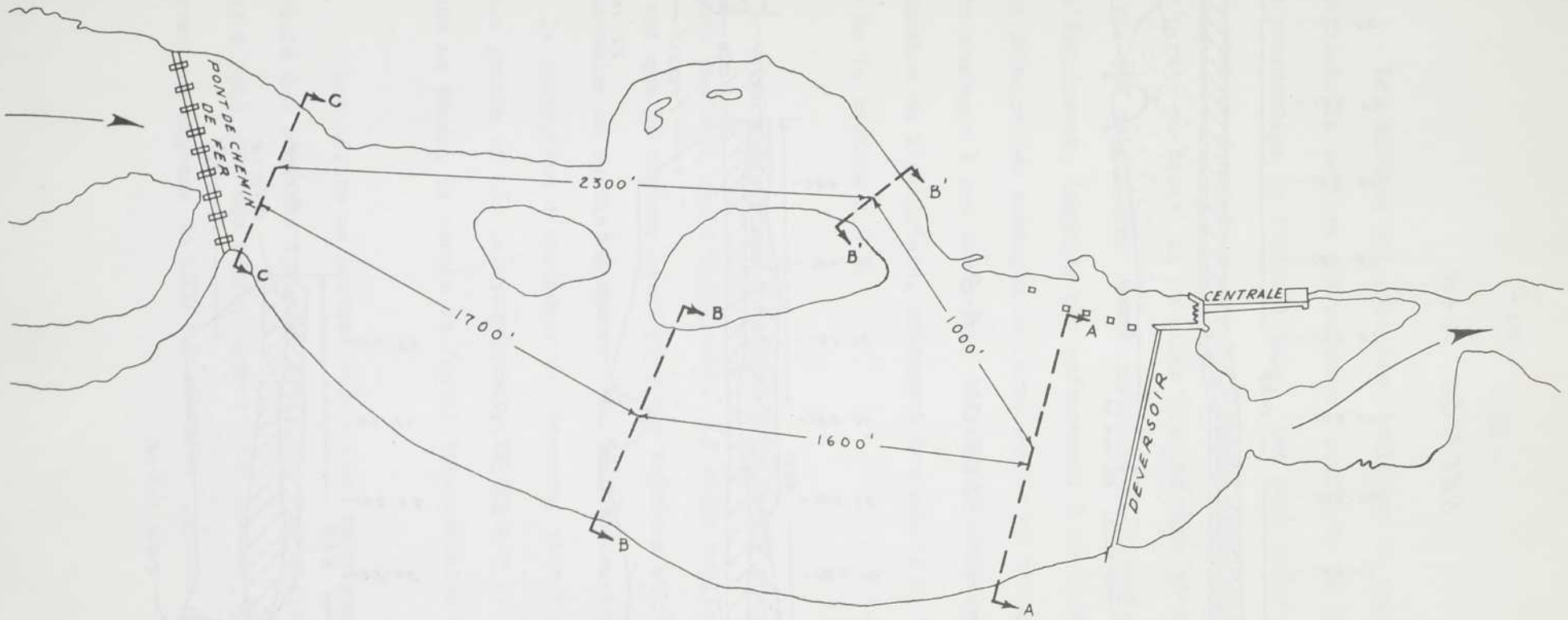
La plupart du temps, l'épaississement du champ se fait par accumulation de glaces: ce phénomène a déjà été expliqué en détail (11) (17).

Cependant, même dans ce cas, un certain pourcentage de transport de chaleur est nécessaire pour faire geler l'eau dans les interstices de l'accumulation. Cette dernière commence aussitôt qu'un champ de glace, continu ou morcelé, s'étend sur une certaine longueur; elle se développe très rapidement et on a ainsi, très tôt, un champ d'une épaisseur importante et difficile à augmenter par transport de chaleur, à cause de l'isolation fournie par la couche de glace elle-même; le plus souvent la glace est surmontée d'une couche de neige, qui constitue un isolant encore meilleur.

Des sondages du champ de glace ont été réalisés durant les hivers 1962 - 1963, 1963 - 1964 et 1964 - 1965, dans les parties suivantes de la rivière Chaudière: au réservoir du barrage de Charny, dans une zone comprenant le Rocher et l'embouchure de la rivière St-Victor, et en Haute-Chaudière, à l'embouchure de la rivière Drolet.

1) - Sondages au réservoir du barrage de Charny.

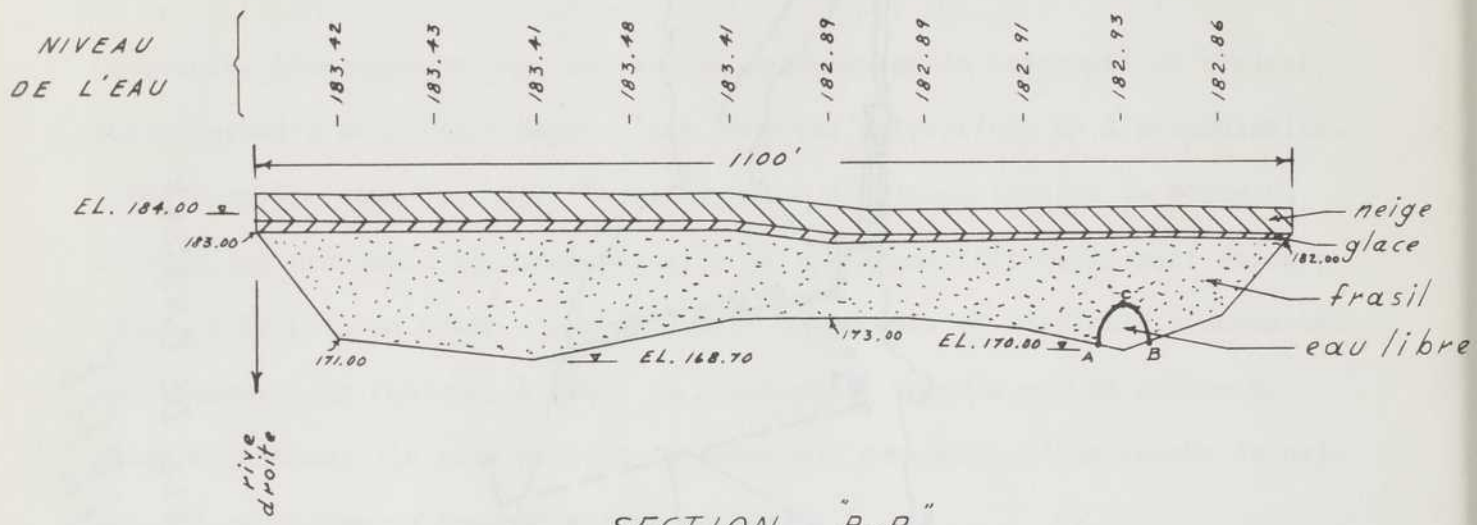
Des trous de sondage à tous les 100 pieds ont été percés le long de 3 sections transversales, dans le réservoir (voir plan page 79). On y a mesuré le niveau de l'eau, l'épaisseur des couches de neige, de glace et de frasil et le niveau du lit. (voir schémas page 80).



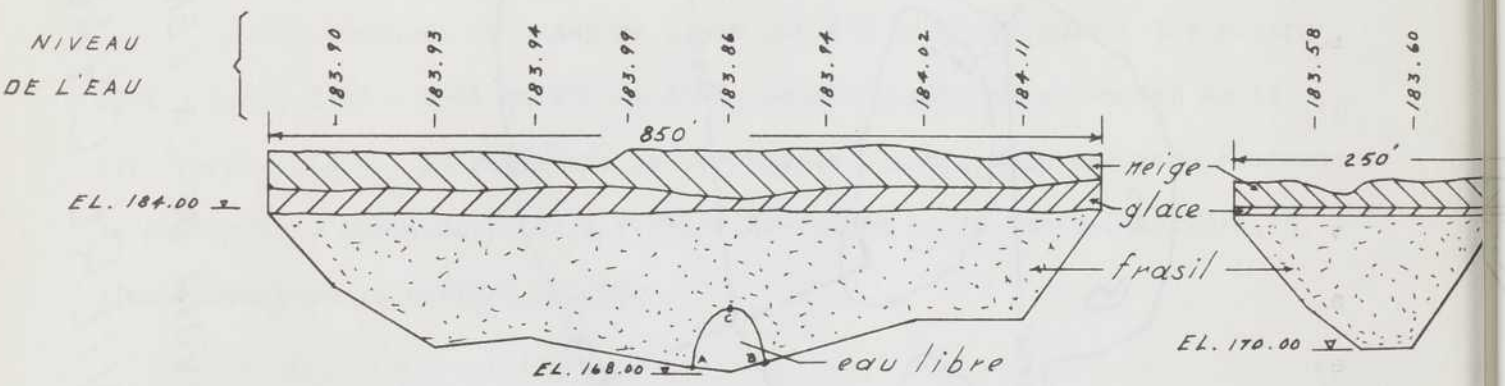
RÉSERVOIR DE LA CENTRALE DE CHARNY

RIVIÈRE CHAUDIÈRE

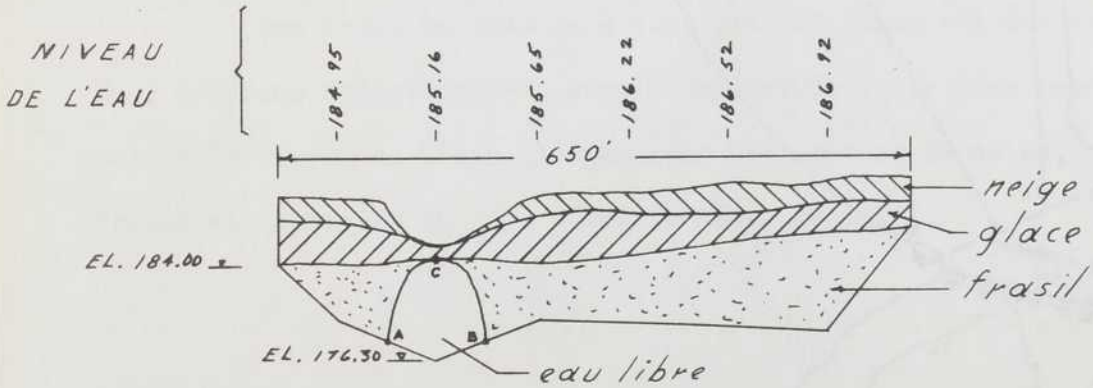
SECTION "A-A"



SECTION "B-B"



SECTION "C-C"



Les schémas qui précèdent indiquent la présence de frasil dans presque toute la section d'écoulement, sauf pour un chenal représentant un faible pourcentage de l'aire totale. Les particules de frasil se déposent d'abord sous le champ de glace et la couche s'épaissit par dépôts successifs à partir du haut: il ne reste bientôt plus qu'une ouverture de fond vis-à-vis des points bas. Cette ouverture se transforme peu à peu en section d'écoulement, laquelle est présumément à peu près circulaire: on ne peut déduire des sondages la forme exacte du chenal; on a fait suffisamment de sondages à ces zones pour déterminer seulement quelques points sur le périmètre de l'ouverture, notamment les points A, B et C indiqués sur le schéma de la section "A - A".

Des diminutions sensibles d'épaisseur du champ de glace existent vis-à-vis des sections d'écoulement. La seule explication apparemment possible est que la chaleur développée par friction aux parois de l'ouverture est transmise en partie au champ. Une indication corrobore cette explication: la diminution d'épaisseur est beaucoup plus forte là où l'ouverture est plus grande et où, par conséquent, la chaleur est plus directement communiquée au champ, la couche de frasil intermédiaire étant moins épaisse.

Les débits ne pouvant être connus maintenant, à cet endroit, pour la période des sondages (janvier 1964), il faut utiliser une valeur moyenne. De 1923 à 1960, 70% des débits moyens pour janvier varient de 400 pcs à 2000 pcs, avec une moyenne de 1200 pcs environ. Janvier 1964 ayant été une période

de débits normaux, on peut conclure que le débit s'est tenu entre 400 et 2000. Les schémas de la page 80 montrent bien qu'il existe un débit d'infiltration dans la masse de frasil puisque, pour une section totale moindre, l'ouverture est plus grande, car le pourcentage du débit pouvant passer par infiltration est moindre, si on suppose que la vitesse de l'eau dans la masse de frasil ne varie pas d'une section à l'autre: cela semble logique puisque, dans ce milieu, l'opposition au mouvement est assez grande pour qu'une variation de pression de vitesse globale n'y affecte pratiquement pas la vitesse de filtration.

La vitesse de l'écoulement dans les ouvertures, de même que dans la masse de frasil accumulé, est à peu près égale d'une section à l'autre, puisqu'elle est égale à la vitesse limite de dépôt des particules de frasil; donc, pour que passe le même débit dans une section plus petite, il faut que l'ouverture augmente.

Section A - A { Aire totale 13,500 pi^2
Aire de l'ouverture 200 pi^2

Section B - B { Aire totale 12,000 pi^2
Aire de l'ouverture 300 pi^2

Section C - C { Aire totale 4,800 pi^2
Aire de l'ouverture 600 pi^2

Si on prend le débit moyen de 1,200 pcs

Section A - A $1200 = 13200\ V + 200\ V^1$ ①

Section B - B $1200 = 11700\ V + 300\ V^1$ ②

La solution de ① et ② donne $\begin{cases} V = 0.07 \text{ pi/sec} \\ V^1 = 2 \text{ pi/sec} \end{cases}$

Comme vérification, prenons ces valeurs dans l'équation pour la section C - C

$$42\ 00 \times 0.07 + 600 \times 2 = 1500$$

Vu l'approximation des données et celle des calculs, la concordance est assez bonne.

Avec le débit extrême inférieur de 400, on obtient $V = 0.015$ pi/sec et $V^1 = 0.8$ pi/sec

Avec le débit extrême supérieur de 2000, on obtient $V = 0.1$ pi/sec et $V^1 = 3.4$ pi/sec.

La formule de Darcy, pour l'écoulement en milieu poreux, est:

$$Q = K A \frac{dh}{ds} \begin{cases} K = \text{coefficient de perméabilité} \\ A = \text{aire d'écoulement} \\ \frac{dh}{ds} = \text{gradient piézométrique} \end{cases}$$

$V = K\, dh/dx$

De C à B: $dh/ds = 1.70 / 1700 = 0.001$

$$0.07 = K \times 0.001$$

$$K = 70 \text{ pi/sec}$$

avec $V = 0.015$ pi/sec

$$K = {}^{0.015}/\, 0.001 = 15 \text{ pi/sec}$$

avec $V = 0.1$

$$K = {}^{0.1}/\, 0.001 = 100 \text{ pi/sec}$$

entre B et A

$$dh/ds = 0.0008$$

$$K = {}^{0.07}/\, 0.0008 = 87 \text{ pi/sec}$$

avec V = 0.015

K = 19 pi/sec

avec V = 0.1

K = 125 pi/sec

On a ainsi des valeurs limites pour la perméabilité et la vitesse d'entraînement:

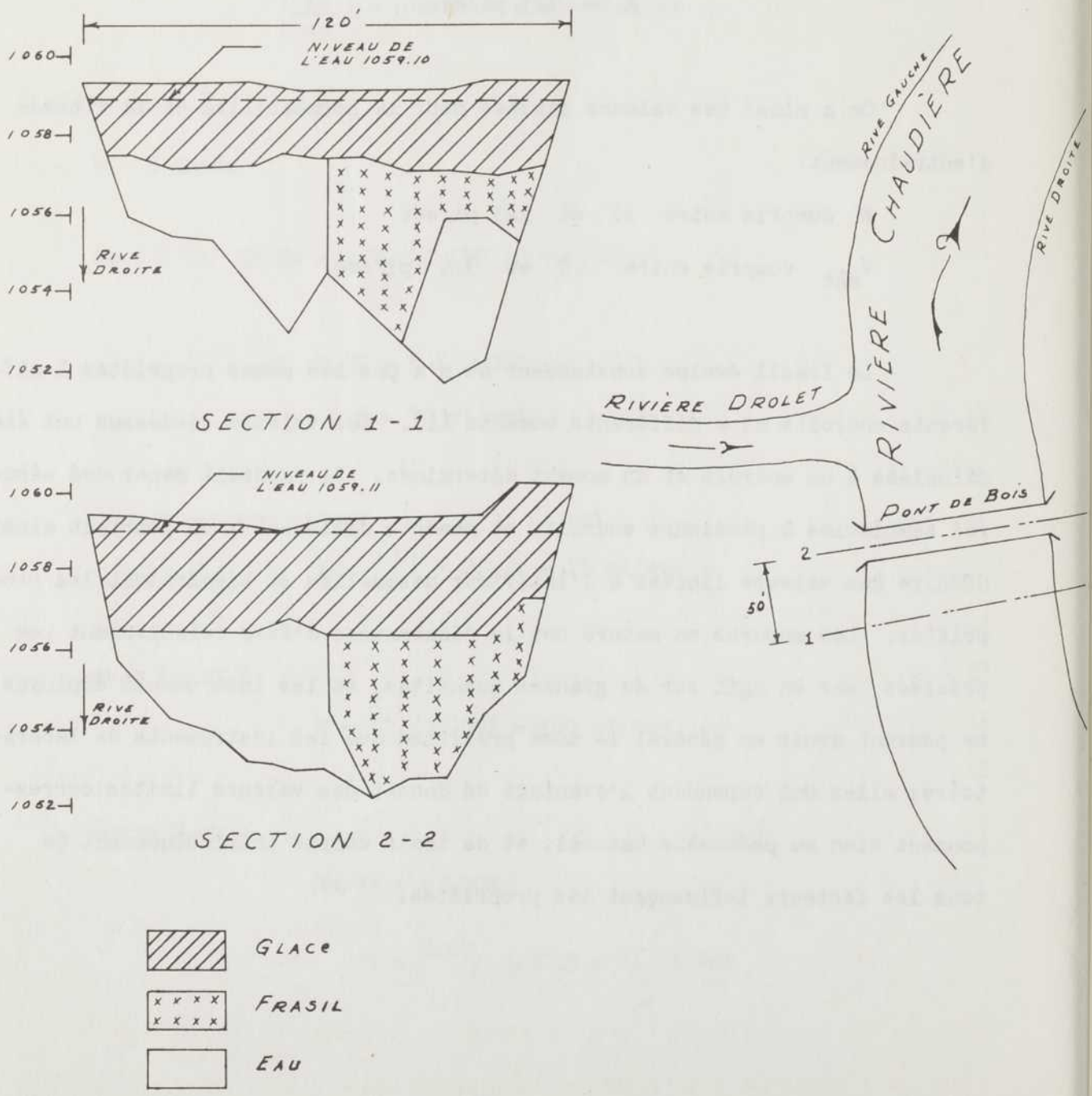
K compris entre 15 et 125 pi/sec

V_{ent} compris entre 0.8 et 3.4 pi/sec

Le frasil évolue constamment et n'a pas les mêmes propriétés à différents endroits et à différents moments (4). Les valeurs ci-dessus ont été calculées à un endroit et un moment déterminés. Il faudrait mener des mesures semblables à plusieurs endroits et moments différents; on pourrait ainsi déduire des valeurs limites à l'intérieur desquelles se tiendraient les propriétés. Les mesures en nature ont le désavantage d'être relativement peu précises, car on agit sur de grandes quantités, et les instruments employés ne peuvent avoir en général la même précision que les instruments de laboratoire; elles ont cependant l'avantage de donner des valeurs limites correspondant bien au phénomène naturel, et de tenir compte intrinsèquement de tous les facteurs influençant les propriétés.

a - Sondages à Drolet.

La zone suivante est située en Haute-Chaudière, à environ 15 milles de l'embouchure. Des trous de sondage ont été pris à tous les 10 pieds.



A la section de sondage 1-1 se trouve une échelle limnimétrique donnant les débits à cet endroit. Pour la hauteur d'eau mesurée, le débit est de 1,700 pcs pour la condition d'écoulement à surface libre. Dans l'état d'écoulement avec champ de glace, ou écoulement en charge, la pratique courante consiste à prendre environ 70% de cette valeur. Vu l'absence de connaissances en ce qui concerne le coefficient de rugosité sous un champ de glaces, il faut forcément adopter une pratique donnant une valeur plausible du débit durant l'hiver.

On a donc comme débit, au moment des mesures, 1,200 pcs.

Aire de la section 1-1: 220 pi^2

Vitesse d'entraînement à 1-1: 1200/220 5.4 pi/sec

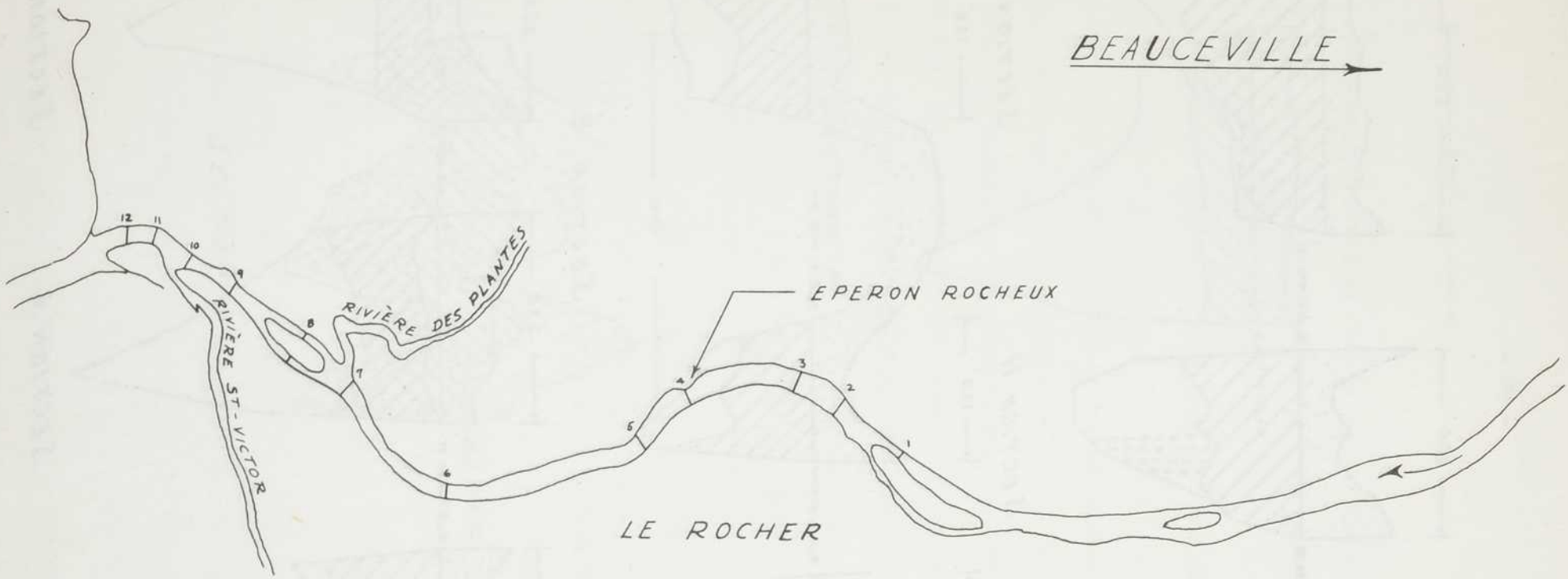
Aire de la section 2-2: 180 pi^2

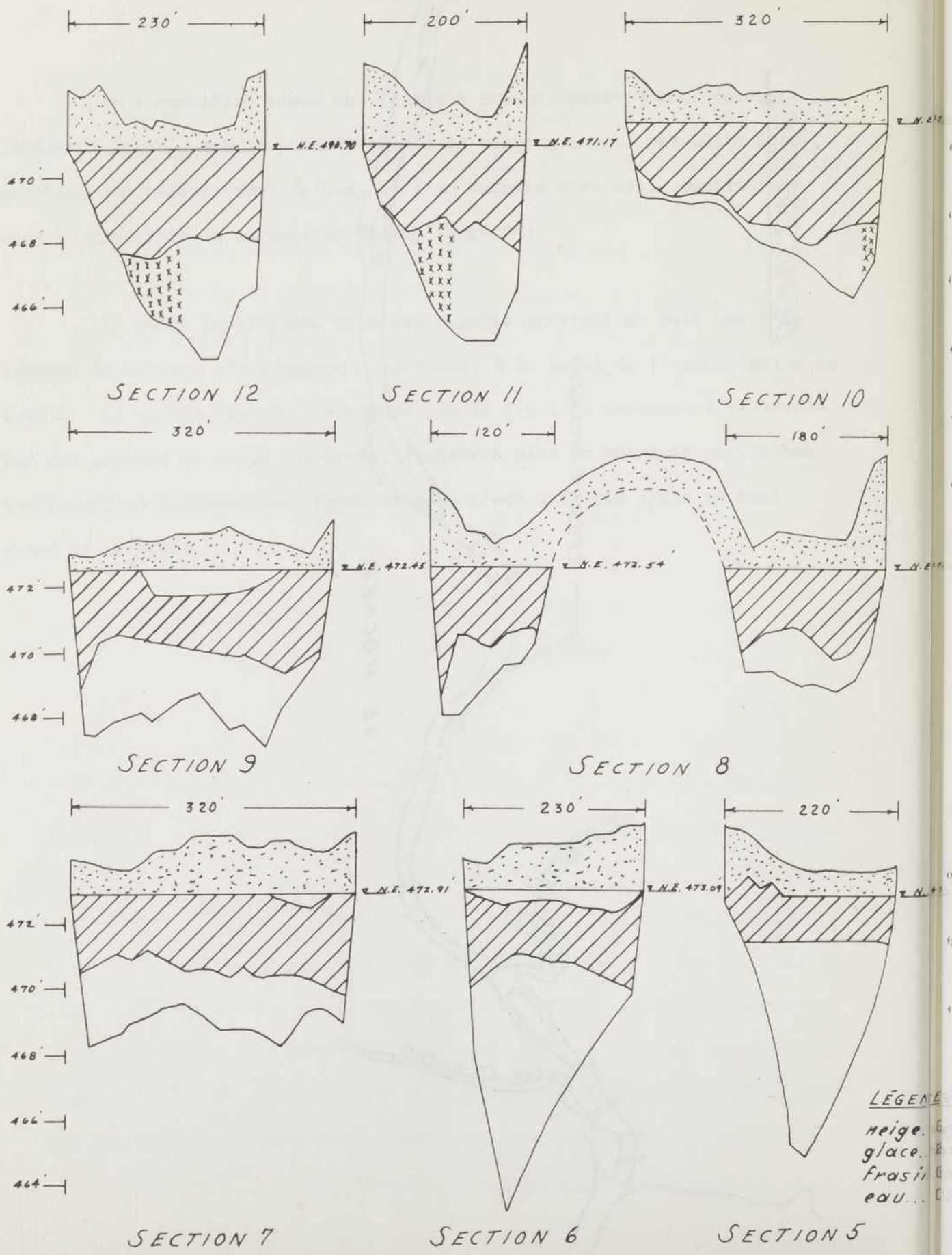
Vitesse d'entraînement à 2-2: 1200/180 6.6 pi/sec

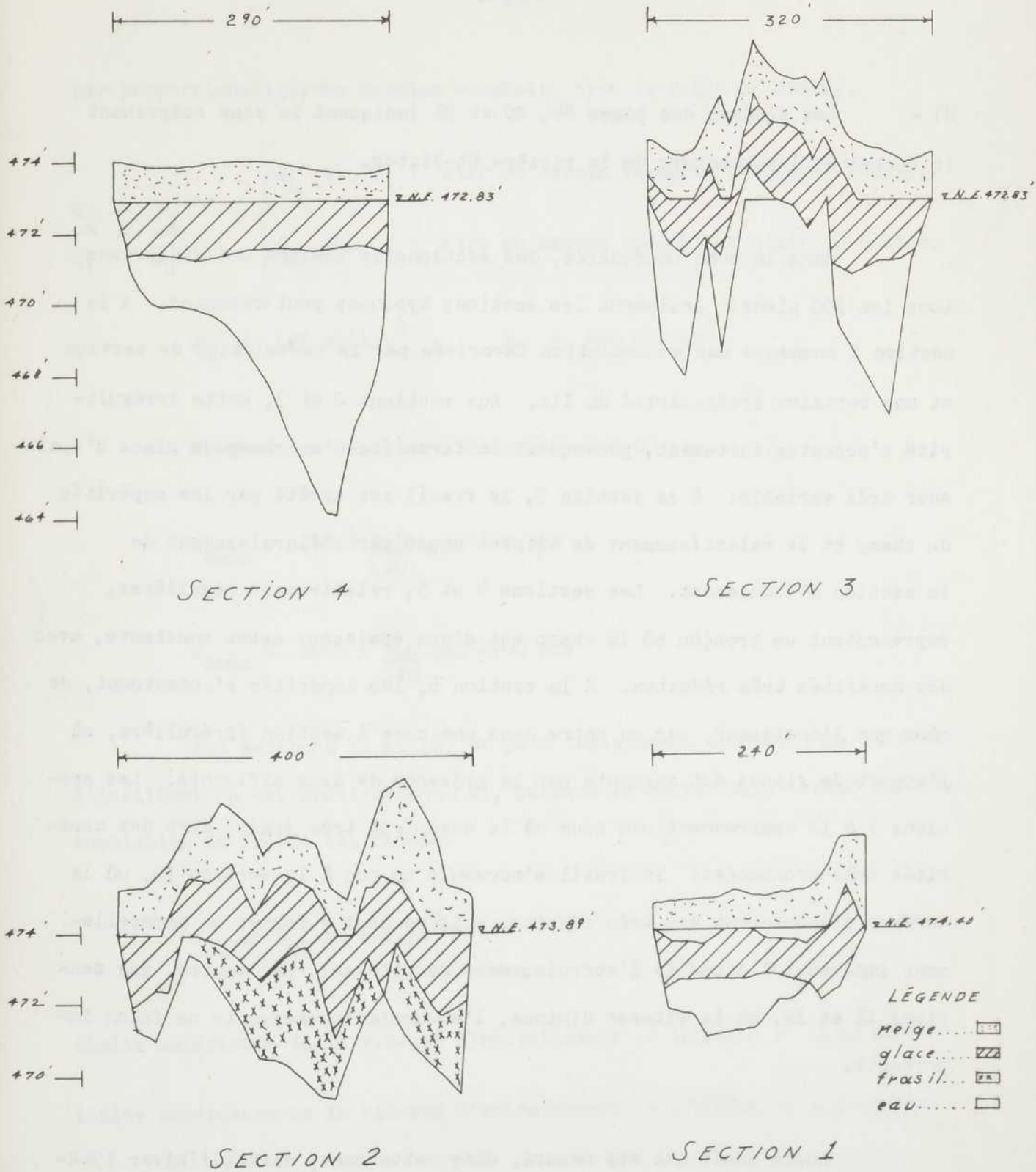
Il est à noter que, dans les calculs de vitesses d'entraînement du frasil effectués dans ce chapitre-ci, on se sert de la vitesse uniforme correspondant au quotient du débit par l'aire d'écoulement. En réalité, les vitesses à la paroi de l'accumulation de frasil sont fort probablement différentes de celle donnée par le calcul ici utilisé. Cela explique peut-être le fait que les vitesses d'entraînement aux sections 1-1 et 2-2 soient si différentes, bien que les mesures aient été prises au même endroit dans la même journée et qu'il s'agisse par conséquent de frasil ayant atteint le même degré d'évolution. Les sections d'écoulement 1-1 et 2-2 étant fort différentes, la différence marquée entre les vitesses d'entraînement provient sans doute de l'utilisation du rapport Q/A.

On a considéré comme nul le débit pouvant passer dans l'accumulation de frasil, car le pourcentage de la section occupé par cette accumulation est relativement faible, si l'on compare avec celle se trouvant dans le réservoir du barrage de Charny (page 80).

Un autre imprécision dans ces calculs provient du fait que l'on suppose la vitesse d'entraînement uniforme, à la paroi de l'accumulation de frasil. Il semble logique d'admettre que le frasil a tendance à se décoller par paquets de volume variable, contenant plus ou moins de particules individuelles agglomérées. Cette vitesse n'est donc pas égale en tout point de la paroi.


BEAUCEVILLE
EPERON ROCHEUX
RIVIÈRE DES PLANTES
RIVIÈRE ST-VICTOR
LE ROCHER
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12


230'
N.E. 490.70'
470'
468'
466'
SECTION 12
200'
N.E. 471.17'
SECTION 11
320'
SECTION 10
320'
N.E. 472.45'
472'
470'
468'
SECTION 9
120'
N.E. 472.54'
180'
SECTION 8
320'
N.E. 472.91'
472'
470'
468'
466'
464'
SECTION 7
230'
N.E. 473.09'
SECTION 6
220'
SECTION 5
LÉGEN
neige.
glace.
frasil
eau...


290'
474'
472'
470'
468'
466'
464'
N.E. 472.83'
SECTION 4
320'
N.E. 472.83'
SECTION 3
400'
474'
472'
470'
N.E. 473.89'
SECTION 2
240'
N.E. 474.40'
SECTION 1
LÉGENDE
neige.....
glace.....
frasil...
eau.....

2) - Les schémas des pages 89, 90 et 91 indiquent la zone comprenant le Rocher et l'embouchure de la rivière St-Victor.

Dans la zone considérée, des sections de sondage ont été prises tous les 100 pieds: seulement les sections typiques sont retenues. A la section 1 commence une accumulation favorisée par la restriction de section et une certaine irrégularité du lit. Aux sections 2 et 3, cette irrégularité s'accentue fortement, provoquant la formation d'un champ de glace d'épaisseur très variable: à la section 2, le frasil est arrêté par les aspérités du champ et le ralentissement de vitesse causé par l'élargissement de la section d'écoulement. Les sections 4 et 5, relativement régulières, représentent un tronçon où le champ est d'une épaisseur assez constante, avec des aspérités très réduites. A la section 6, les aspérités s'accentuent, de même que l'épaisseur, car on entre dans une zone à section irrégulière, où l'apport de glaces est augmenté par la présence de deux affluents. Les sections 7 à 12 comprennent une zone où le champ est très épais, avec des aspérités très prononcées: le frasil s'accumule un peu à la section 10, où la surface d'écoulement est très réduite, mais ne peut y former un amoncellement important à cause de l'accroissement de vitesse: par contre, aux sections 11 et 12, où la vitesse diminue, l'accumulation augmente de façon importante.

Aucun débit n'a été mesuré, dans cette zone, durant l'hiver 1962-1963, période de prise des sondages. On peut le déduire approximativement,

par proportionalité des bassins versants, avec le débit de Charny.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad \begin{cases} A_1 \text{ et } Q_1 : \text{ aire du bassin versant et débit à Charny.} \\ A_2 \text{ et } Q_1 : \text{ aire du bassin versant et débit au Rocher.} \end{cases}$$

$$A_1 = 480 \text{ milles}^2 \qquad A_2 = 640 \text{ milles}^2$$

Prenant les débits extrêmes 400 et 2000 pcs

$$Q_{2min} = 400 \times \frac{640}{480} \simeq 500 \text{ pcs}$$

$$Q_{2max} = 2000 \times \frac{640}{480} \simeq 2700 \text{ pcs}$$

Aux sections 11 et 12, on peut logiquement supposer que le débit d'infiltration est pratiquement nul, puisque le pourcentage occupé par l'accumulation de frasil est faible.

$$A_{11} \simeq A_{12} \simeq 600 \text{ pi}^2$$

Limite inférieure de la vitesse d'entraînement = 500/600 = 0.83 pi/sec

Limite supérieure de la vitesse d'entraînement = 2700/600 = 4.5 pi/sec

CHAPITRE VI

DESTRUCTION DES GLACES SUR LA CHAUDIERE

L'observation quantitative de la destruction d'un champ de glace est très difficile à réaliser, surtout lorsque les glaces de dérive sont en mouvement. On peut quand même prendre certaines mesures des phases statiques du phénomène, telles que les embâcles et observer qualitativement les phases dynamiques.

De façon générale (7) (33) (5), la destruction du champ procède comme suit: au printemps, l'élévation de la température fait fondre la neige du bassin versant, ce qui produit une crue journalière se situant en fin de journée. Cette crue développe des poussées verticales et le champ de glace est soulevé: comme il est pris aux berges, il se bombe sous l'effet de ces poussées, voir fig. VI (1).

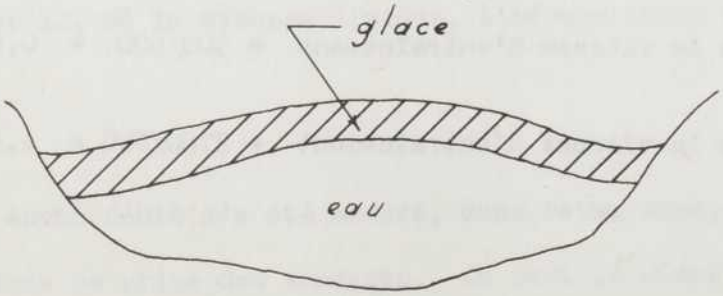


Figure VI (1)

A un certain moment, la crue est assez forte et assez subite pour provoquer la rupture, qui se fait aux points d'inflexion de la courbe, fig. VI (2);

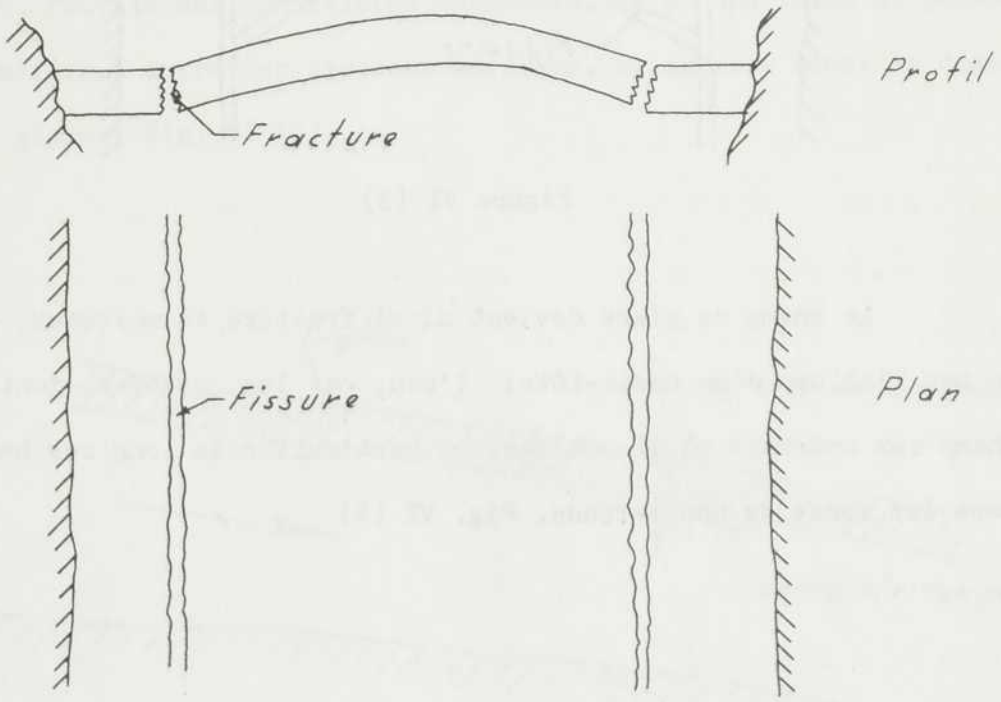


Figure VI (2)

en plan, on a ainsi des fissures le long des berges, à une distance qui est fonction du degré de rigidité de la glace, lequel détermine la longueur de la partie demeurant rectiligne. Des fissures transversales sont aussi provoquées par les irrégularités du lit, comme par exemple les hauts-fonds, où la glace reste accrochée ici et là et d'où partent des fissures, fig. VI (3).

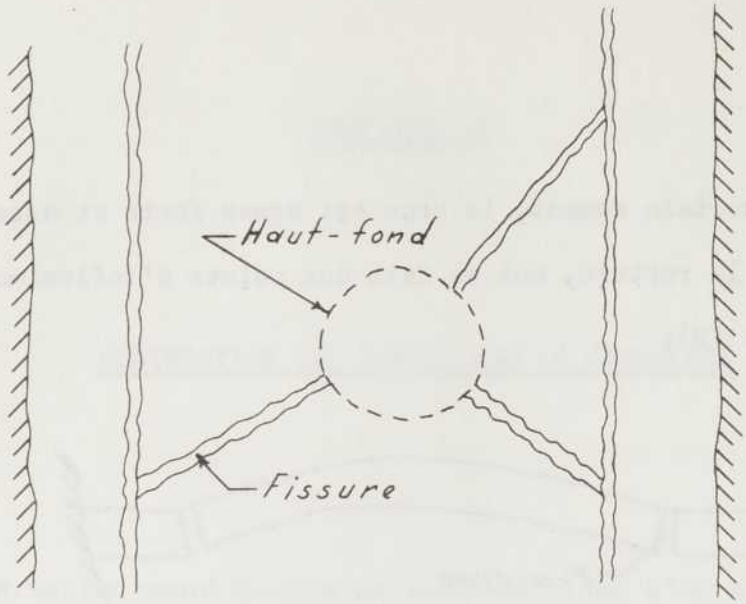


Figure VI (3)

Le champ de glace devient ainsi fracturé en morceaux, et prend un peu l'allure d'un casse-tête: l'eau, par les fissures, monte sur le champ aux endroits où il est bas, en particulier le long des berges et dans les zones de hauts-fonds. Fig. VI (4)

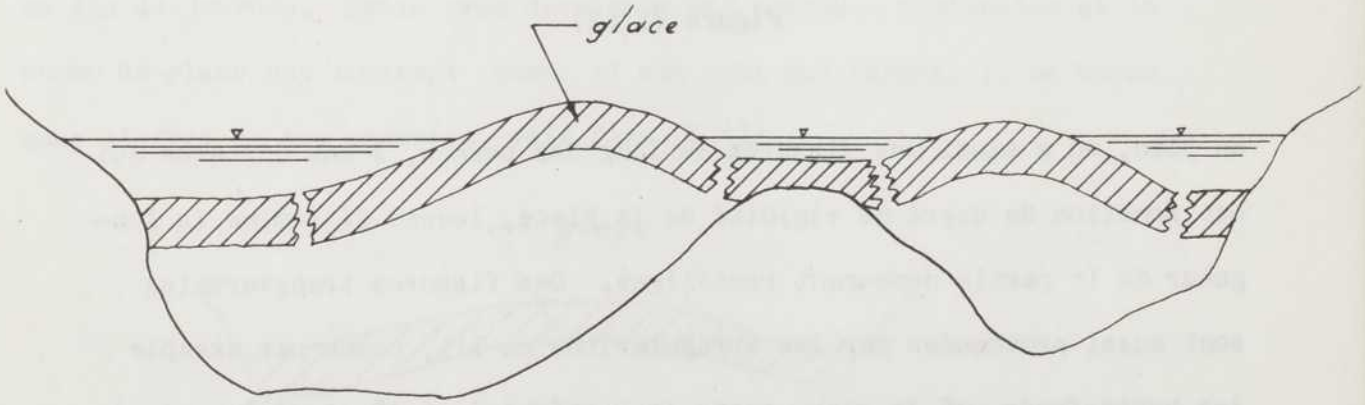


Figure VI (4)

L'arrivée d'une forte onde de crue, produite soit par une fonte très élevée de neige ou une période de pluie intense, provoque un soulèvement majeur qui augmente la largeur des fissures, dégage les morceaux les uns des autres; l'accroissement de vitesse sous les morceaux, dû à cette onde, fournit des contraintes tangentielles et une force de portance pouvant suffire à entraîner certains morceaux, et amorcer ainsi la descente des glaces. Fig. VI (5).

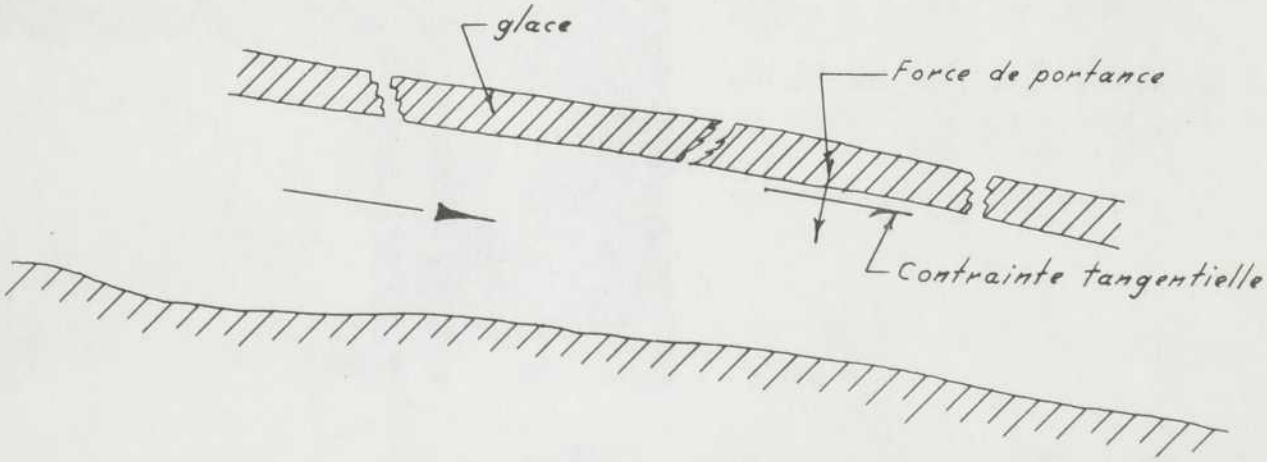
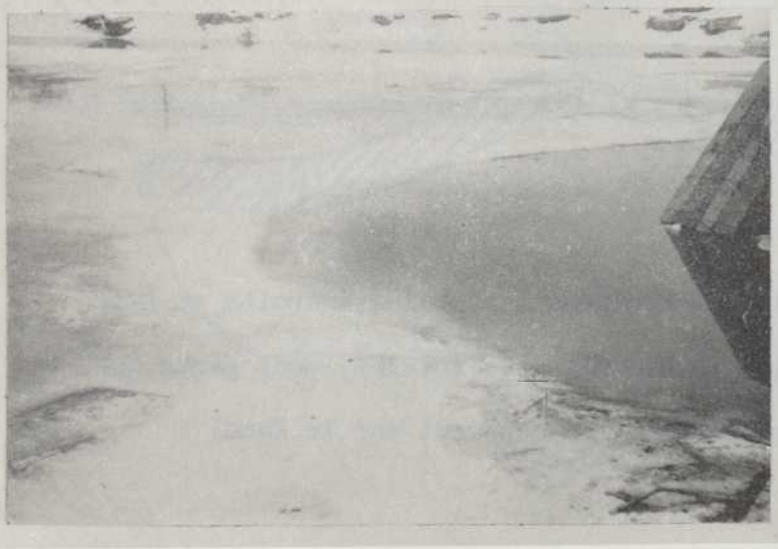


Figure VI (5)

Ces glaces en dérive sont arrêtées à certains endroits et forment des embâcles, soit à cause de singularités locales, soit parce que le débit devient tellement faible qu'elles échouent sur le fond.

Dans la zone rapide Charny-Scott, grande quantité d'eau sur le champ, amenée par les fissures entourant les hauts-fonds rocheux.

Eau sur le champ, le long de la rive, amenée par une fissure le long de celle-ci.

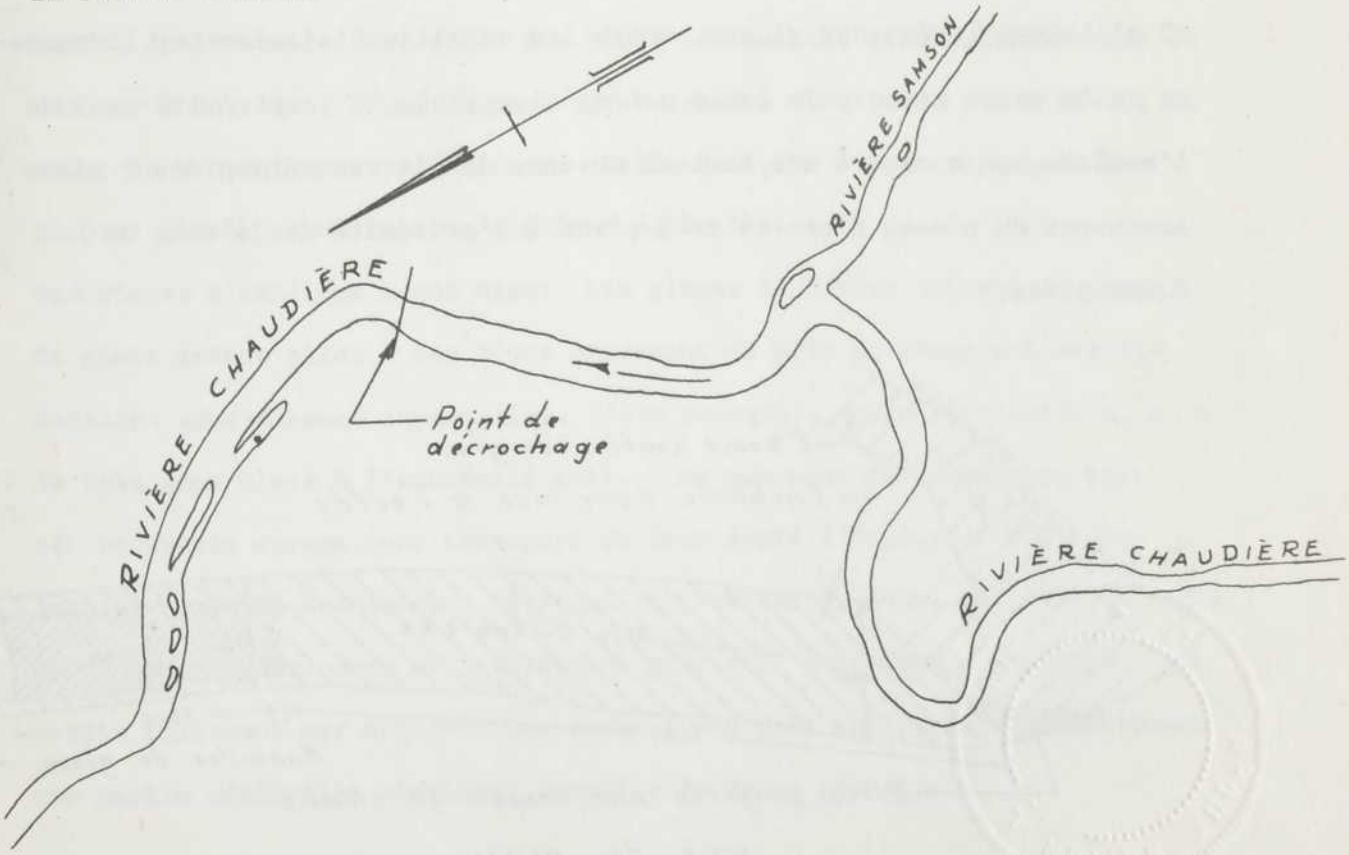


Eau sur le champ, autour d'un pilier de pont, amenée par une fissure autour de ce dernier. Noter le début de fissuration à la périphérie de la nappe d'eau, où il y a un point d'inflexion dû au fait que le champ redevient horizontal.

1) - Observation d'un embâcle durant l'hiver 1963-1964.

Le 7 mars 1964, le champ de glaces se décrocha prématurément, en Haute-Chaudière. Les glaces furent brisées sur une distance de 20 1/2 milles et descendirent la rivière pour former un embâcle à l'amont de St-Georges.

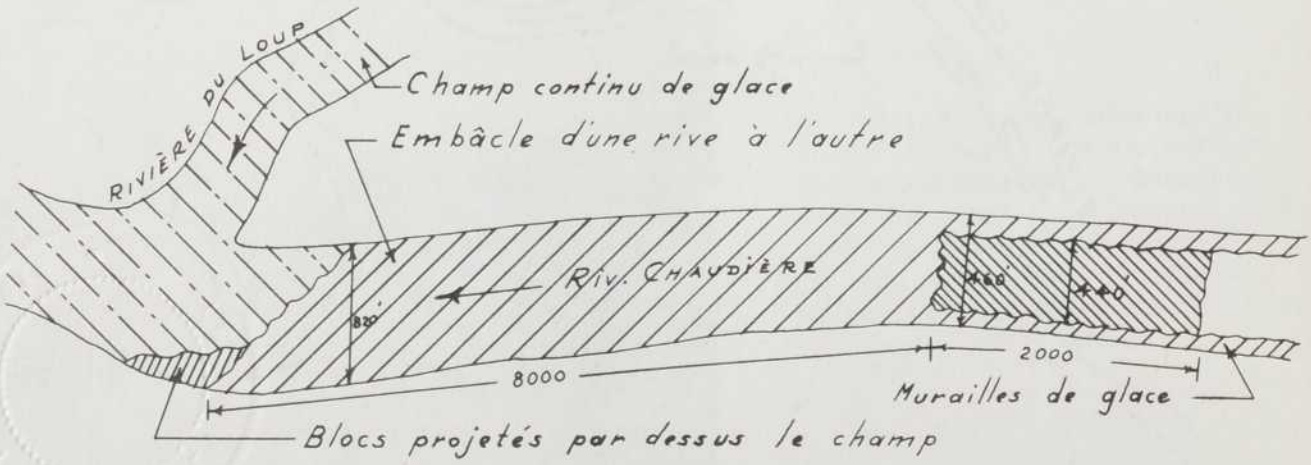
Durant la semaine précédant le décrochage du champ, la température était assez élevée, produisant un ruissellement intense du bassin versant dans cette partie à écoulement rapide de la rivière. Le point de décrochage était situé à environ 3000 pieds à l'aval d'un affluent important, la rivière Samson.



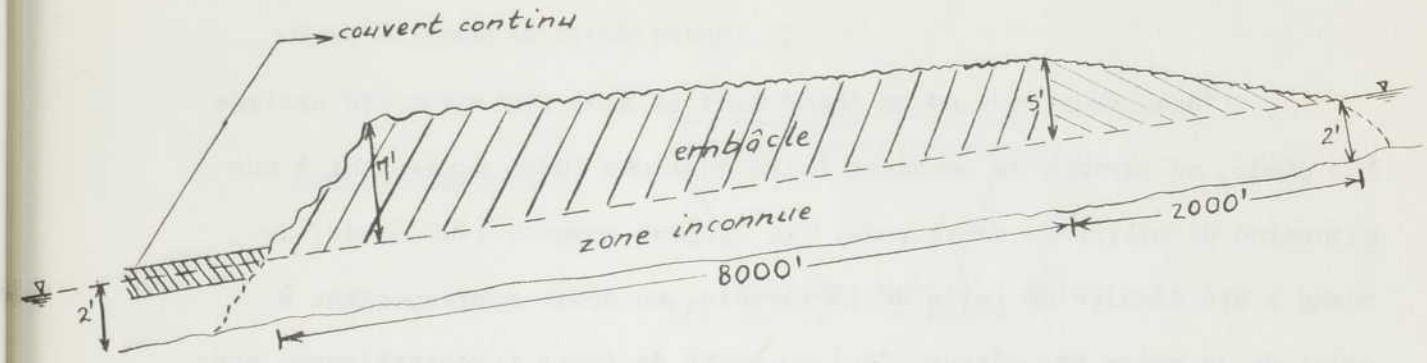
Cette dernière a très probablement été le facteur primordial de cette débâcle partielle: les affluents se réchauffent et se dégagent beaucoup plus tôt que le cours d'eau principal, et cet apport supplémentaire de débit a sans doute causé la rupture. Le même phénomène a pu être empêché à l'amont par la présence de méandres très prononcés situés juste avant la rivière Samson.

L'embâcle s'est logé un peu avant la Rivière du Loup, affluent situé à quelques milles pieds à l'amont de la municipalité de St-Georges.

La zone dégagée était de 20.5 milles, et la longueur de l'embâcle de 10,000 pieds, se divisant en une partie de 8,000 pieds comprenant des glaces de dérive d'une berge à l'autre, et d'une partie de 2,000 pieds où s'étaient logées des glaces, entre les murailles laissées par le passage de la masse principale (voir schéma ci-après). A l'extrémité aval de l'embâcle, on a mesuré une hauteur moyenne de l'accumulation des 7 pieds au-dessus du niveau d'eau et de 5 pieds à l'extrémité de la zone de 8,000 pieds.



VUE EN PLAN



SECTION LONGITUDINALE

La zone résiduelle de 2,000 pieds diminuait d'une hauteur de 5 pieds jusqu'à une valeur nulle. A l'extrémité aval de l'embâcle, on a observé des blocs de dimensions gigantesques (surface de 10 pieds par 20 pieds, épaisseur de 3 pieds): ces blocs diminuaient graduellement pour en arriver à des blocs d'une surface approximative de 2 pieds par 2 pieds, au point de rencontre des deux zones. Celle de 2,000 pieds comprenait des glaçons plutôt arrondis d'un diamètre équivalent de 2 pieds. Cet état des glaces s'explique assez bien: les glaces de dérive brisent le champ de glace devant elles. Les blocs provenant du bris du champ ont des dimensions généralement importantes, c'est pourquoi, au point d'embâcle, on a de très gros blocs à l'extrémité aval. Les morceaux de glace sont brisés et érodés durant leur transport et leur degré d'évolution est fonction du temps de transport. Ceux qui se trouvent à l'aval ont subi un temps de transport plus court et inversement pour ceux à l'amont. Les plus petits finissent par acquérir une forme à peu près sphérique et constituent une partie résiduelle cheminant derrière la masse principale.

Volume des apports de glace:

L'épaisseur moyenne du champ dans la zone libérée a été estimée à 2 pieds, en partant de sondages faits quelques jours auparavant à une quinzaine de milles de cette zone. La largeur moyenne (300 pieds) du champ a été déduite de celle de la rivière, au débit correspondant à celui de la prise des glaces. Ceci au moyen de plans topographiques, avec lesquels on mesura la longueur de la zone dégagée (20.5 milles).

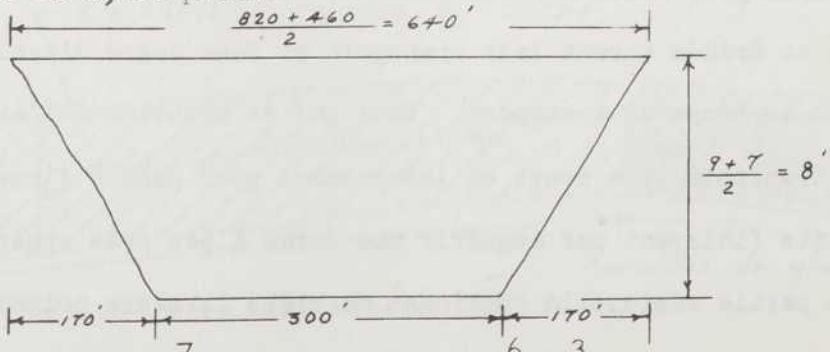
$$(20.5 \text{ milles} \times 5280) \times 300 \times 2 \simeq 65 \times 10^6 \text{ pi}^3$$

Volume des glaces dans l'embâcle:

Les hauteurs d'eau étant en moyenne de 2 pieds aux extrémités amont et aval de l'embâcle, et la hauteur moyenne des glaces au-dessus de ce niveau étant de 6 pieds, on en conclut que les glaces se rendent jusqu'au fond de la rivière. La section moyenne de la rivière à cet endroit est trapézoïdale. En supposant une variation linéaire de la hauteur entre les points extrêmes, on obtient:

Dans la zone de 8,000 pieds:

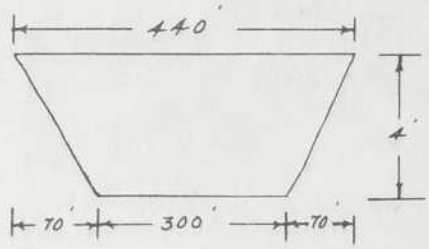
Section moyenne



$$\left[(300 \times 8) + (170 \times 8)\right] \times 8000 = 30 \times 10^6 \text{ pi}^3$$

Dans la zone de 2,000 pieds:

Section moyenne:



$$\left[(300 \times 4) + (70 \times 4)\right] \times 2000 \simeq 3 \times 10^6 \text{ pi}^3$$

Total: 33×10^6 pi^3

Il faut considérer un certain indice des vides dans l'accumulation des glaces, pratiquement impossible à déterminer avec précision. Si on prend une valeur moyenne de 20% de vides:

$$33 \times 10^6 \times 80/100 = 26.5 \times 10^6 \text{ pi}^3$$

or $26.5 \times 10^6 \simeq 40\%$ de 65×10^6

donc environ 60% des glaces sont restées sur les rives. Ce pourcentage de glaces laissées aux rives dépend de la topographie locale. Il doit donc être étudié pour chaque cas.

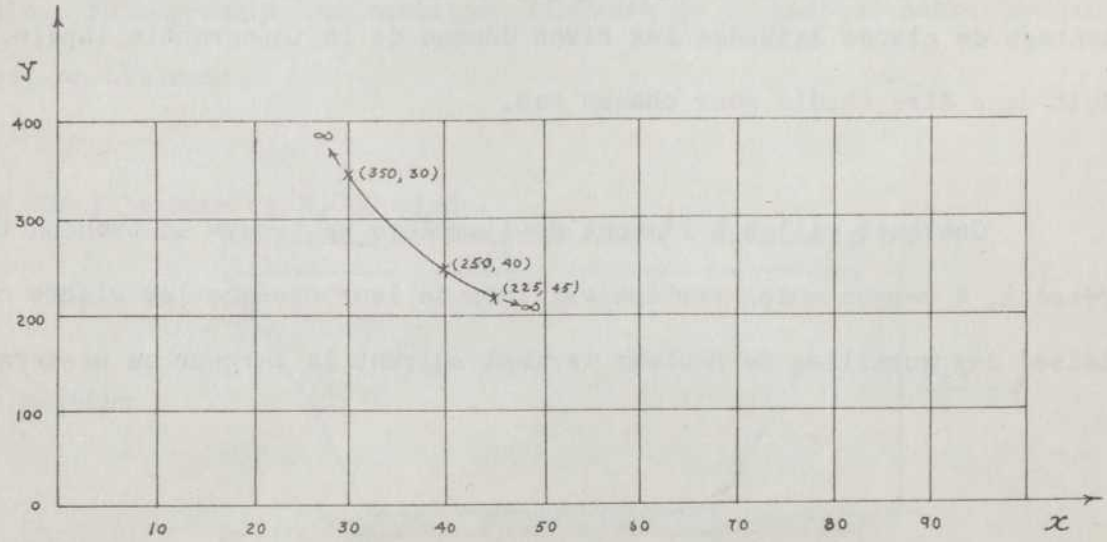
Quelques milles à l'amont de l'embâcle se trouve un tronçon très rétréci, à berges quasi verticales; lors de leur passage les glaces ont laissé des murailles de hauteur variant suivant la largeur du passage.

Murailles d'une dizaine
de pieds de hauteur.

Murailles d'une quarantaine
de pieds de hauteur.

Des mesures ont été prises à cet endroit de la hauteur des murailles et de la largeur correspondante du couloir.

A une largeur de 350 pieds correspondait une hauteur de 30 pieds, à 250 pieds 40 pieds, à 225 pieds 45 pieds. Si on porte en graphique ces valeurs, on trouve la forme d'une hyperbole, car théoriquement pour un passage de largeur nulle on a une hauteur infinie et inversement.



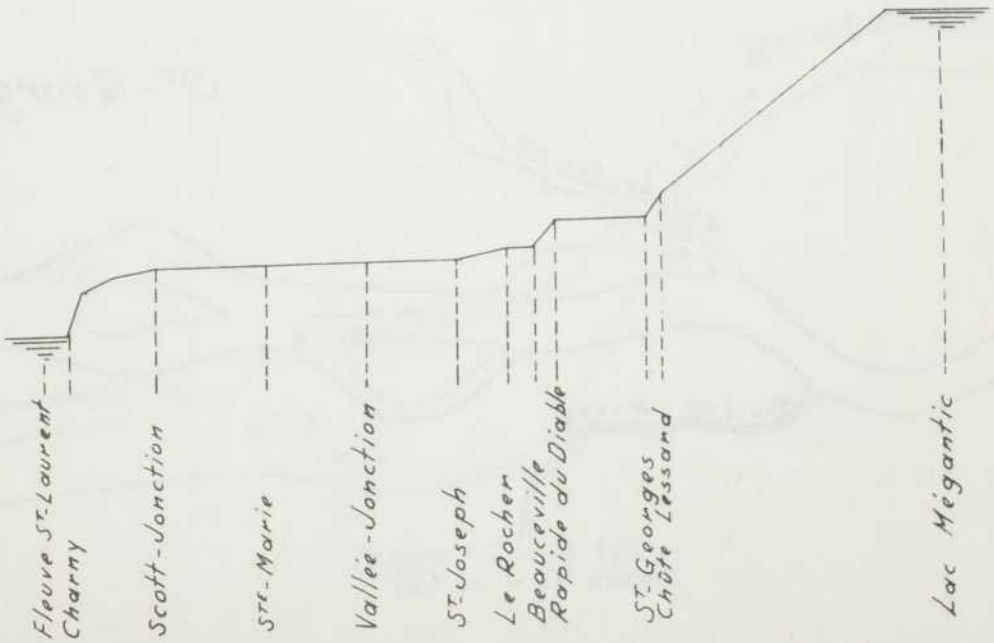
Equation d'une hyperbole: $x\,y = A$ = constante

Vérification:

$$\left.\begin{array}{l} 350 \times 30 = 10500 \\ \\ 250 \times 40 = 10000 \\ 225 \times 45 = 10125 \end{array}\right\} \text{écart} = \frac{10^5 - 100}{105} \simeq 5\% \qquad \text{écart} = \frac{101 - 100}{100} \simeq 1\%$$

l'approximation est donc valable, et on peut donner à A la valeur 10^4. Ce facteur est intéressant en ce qu'il représente la façon de réagir d'une masse de glaces en dérive à une variation de largeur du passage, il pourrait servir, par exemple, dans l'étude de la construction de murs de protection latéraux. Les mesures ont été peu nombreuses et peu précises. Une étude intéressante serait à faire pour affiner cette valeur.

2) - <u>Observation du processus de la débâcle sur la Chaudière.</u>



Comme l'indique le schéma ci-dessus, le tronçon entre le lac Mégantic et St-Georges est à forte pente; de plus, la température atmosphérique à cet endroit, surtout vers le haut, est d'une dizaine de degrés supérieure à celle du reste de la rivière. Ce tronçon se dégage donc alors que le tronçon à pente faible, de St-Georges à Scott, est encore bien en place.

La débâcle, en général, se fait successivement de l'amont vers l'aval. Un premier arrêt a lieu à St-Georges; les glaces subissent un ralentissement considérable au point de changement abrupt de pente. Leur énergie de mouvement de beaucoup diminuée, elles arrêtent aux piles du pont-route de St-Georges, et ensuite à l'île située juste à l'aval de ce pont. Elles subissent aussi un freinage plus ou moins prononcé au méandre suivant, vis-à-vis l'embouchure des rivières Famine et Pozer, fig. VI - 2) (1).

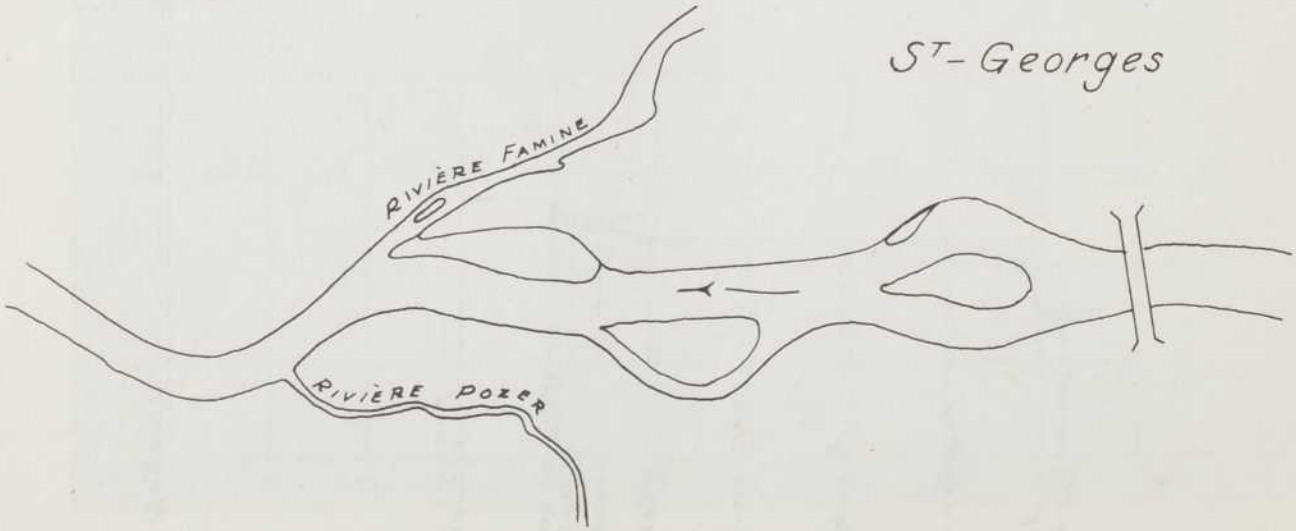


Figure VI - 2) (1)

Les glaces sont ensuite fortement ralenties, et parfois arrêtées, par échouement dans le bassin Bégin, tronçon dégénéré en plusieurs chenaux secondaires et encombré de nombreux hauts-fonds, fig. VI - 2) (2).

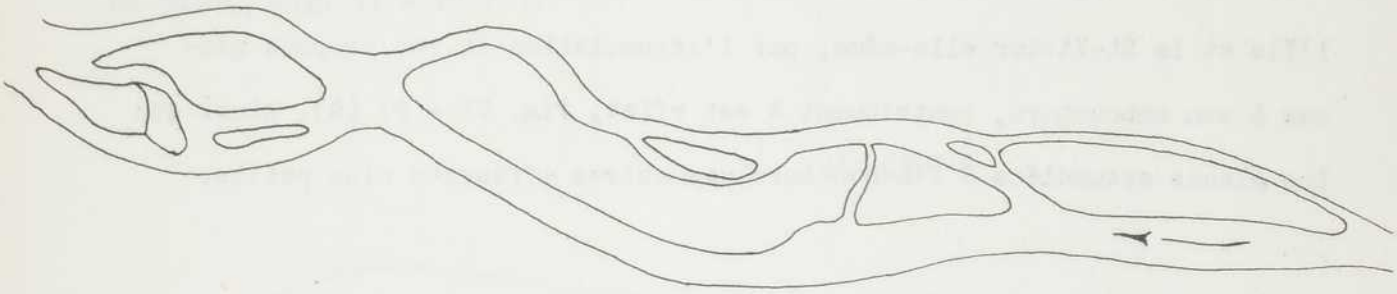


Figure VI - 2) (2)

Immédiatement à la sortie de ce bassin se trouve le Rapide du Diable, à pente très forte et dont l'écoulement est encombré de pointes rocheuses, la plupart émergeant plus ou moins à la surface; les glaces y sont donc ralenties et ensuite arrêtées dans le bassin situé au pied de ce rapide, fig. VI - 2) (3).

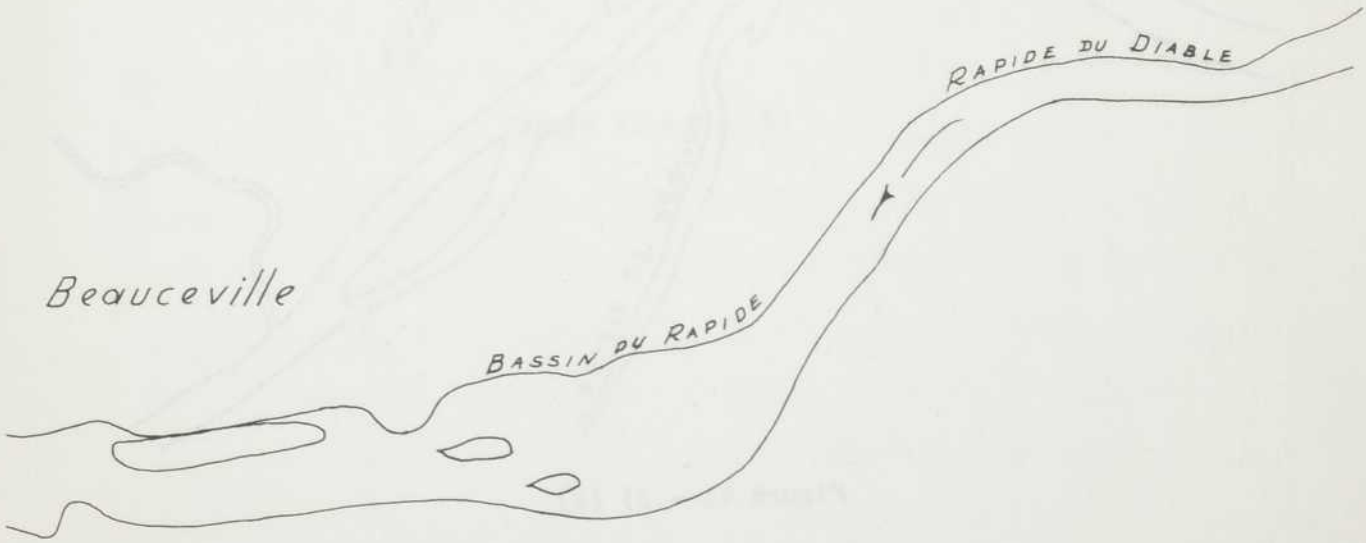


Figure VI - 2) (3)

A environ 3 milles en aval de Beauceville se trouve le Rocher, prochain point d'arrêt des glaces, et qui constitue un point critique d'embâcle, tel que discuté au chapitre IV du présent ouvrage. A quelque 2 milles en aval du Rocher, au voisinage de l'embouchure de la rivière St-Victor, les glaces sont aussi souvent arrêtées: le méandre, l'île et la St-Victor elle-même, par l'accumulation de ses propres glaces à son embouchure, contribuent à cet effet, fig. VI - 2) (4), ainsi que les glaces accumulées à l'embouchure des autres affluents plus petits.

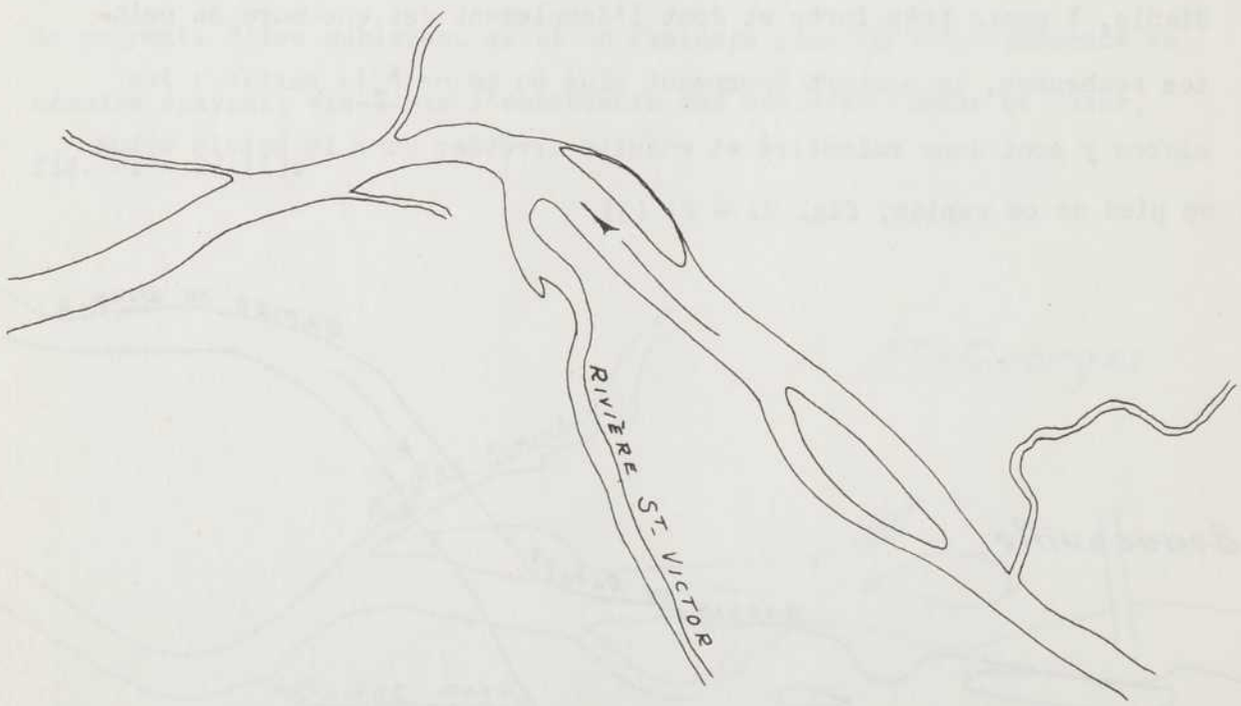


Figure VI - 2) (4)

A St-Joseph, environ 10 milles en aval de Beauceville, un embâcle se produit souvent, causé surtout par les hauts-fonds formés par la forte sédimentation de la rivière des Fermes à son embouchure à quoi s'ajoute une importante réduction de vitesse due à un élargissement à ce point, fig. VI - 2) (5).

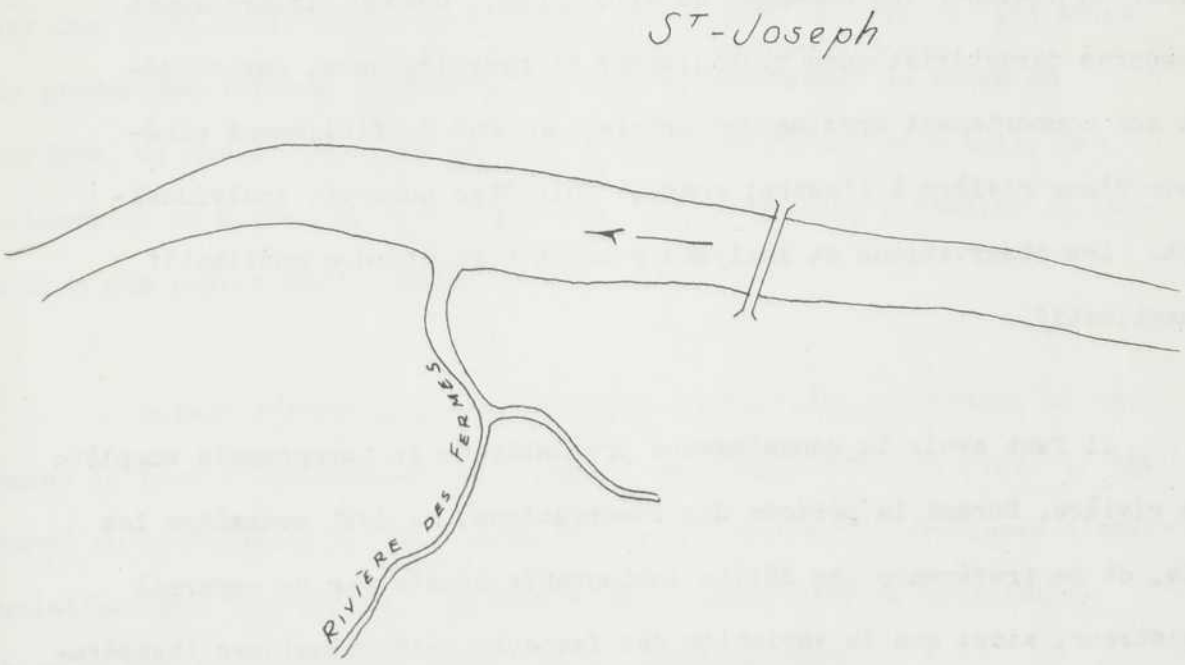


Figure VI - 2) (5)

CHAPITRE VII

RECOMMANDATIONS

L'observation du comportement de la glace en rivière est un élément essentiel prérequis à la mise en oeuvre de travaux visant à éliminer ou diminuer les dommages qu'elle cause. Chaque rivière ayant ses propres caractéristiques hydrauliques et hydrologiques, par conséquent son comportement cryologique propre, on peut difficilement généraliser d'une rivière à l'autre; chacune doit être observée individuellement. Les observations et analyses peuvent être d'ordre qualitatif ou quantitatif.

Il faut avoir la connaissance préalable de la topographie complète de la rivière. Durant la période des observations, on doit connaître les débits, et de préférence les débits instantanés donnés par un appareil enregistreur, ainsi que la variation des facteurs météorologiques (températures de l'air et de l'eau, précipitations atmosphériques, radiation, humidité relative, direction et intensité du vent), au moyen d'autres appareils enregistreurs: l'avantage de ces derniers est de donner le taux réel de variation des facteurs, nécessaire pour effectuer des calculs avec une précision adéquate: autrement il faut assumer une variation linéaire entre des points de mesure le plus souvent très espacés, ce qui correspond rarement à la variation naturelle.

1) - Observations générales.

Durant la prise, il faut observer la formation des différents types de glace, les points où s'amorce le champ, la façon dont s'écoulent les glaçons. Ces observations sont de deux sortes: les observations d'ensemble, par avion ou hélicoptère, qui permettent de déterminer les zones critiques d'accumulation et d'arrêt des glaces, les zones de production intense de frasil, le taux de croissance du champ en surface, de quelle façon il se forme; les observations de détail, par automobile ou à pied le long des rives, qui permettent d'étudier la formation des glaces elles-mêmes.

Durant l'évolution, des sondages journaliers permettent de mesurer le taux d'épaississement du champ, de quelle sorte de glace il est formé en profondeur; on peut ainsi déterminer les zones critiques d'accumulation sous la surface, les points où le champ offrira vraisemblablement beaucoup de résistance lors de la destruction.

A la débâcle, il faut observer où et quand la destruction du champ commence, comment elle évolue, déterminer les points où le champ cède et ceux où la glace en dérive forme embâcle, étudier et mesurer autant que possible ces dernières.

2) - Plan des travaux pour éliminer les dommages causés par la glace sur la Chaudière.

Ce plan se divise, de façon générale, en deux parties: les travaux visant à retenir les glaces de la Haute-Chaudière et les travaux d'amélioration de la voie d'écoulement en Basse-Chaudière; ces derniers hâteront le départ des glaces dans la zone à faible pente, alors que les premiers empêcheront les glaces de la partie haute de venir s'accumuler sur un champ encore en place.

Les travaux d'amélioration de la voie d'écoulement consistent en enlèvement de hauts-fonds, d'îles, d'obstacles latéraux formant des restrictions locales prononcées, en correction de courbure de méandres. Chacun de ces travaux nécessite une étude préalable, car il faut prévoir comment la rivière réagira aux changements apportés, afin de s'assurer que l'on ne provoquera pas un état d'écoulement pire que le précédent.

Les travaux de rétention des glaces ont nécessité la conception d'ouvrages d'un type spécial: le type adopté a pour fonction essentielle de retenir jusqu'à leur fonte les glaces venant d'amont. En principe, il s'agit d'un barrage en béton, sans vannes, muni de piles et de grilles au-dessus du déversoir. Voir fig. VII - 2) (1).

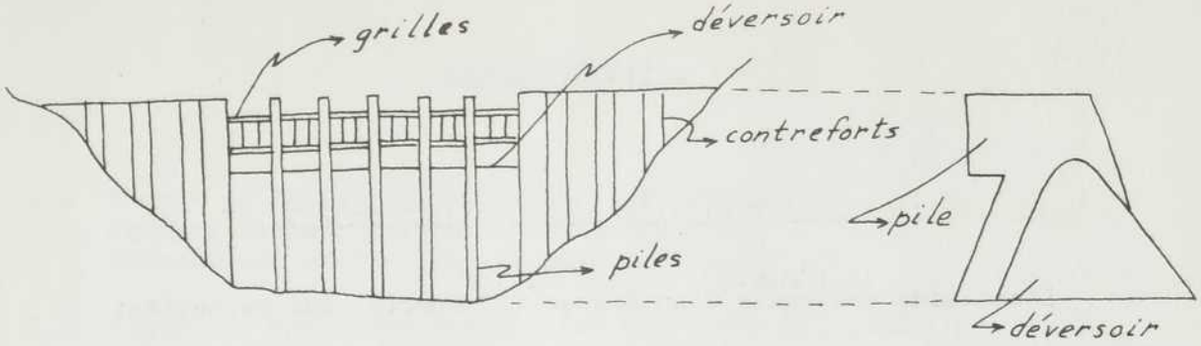


Figure VII - 2) (1)

Les piles et grilles serviront à l'arrêt des glaces, sous lesquelles l'eau s'écoulera par le déversoir.

Un autre type d'ouvrage projeté est une estacade pour la rétention temporaire des glaces, qui servira à retarder le départ des glaces pour un temps plus ou moins long. Voir fig. VII - 2) (2).

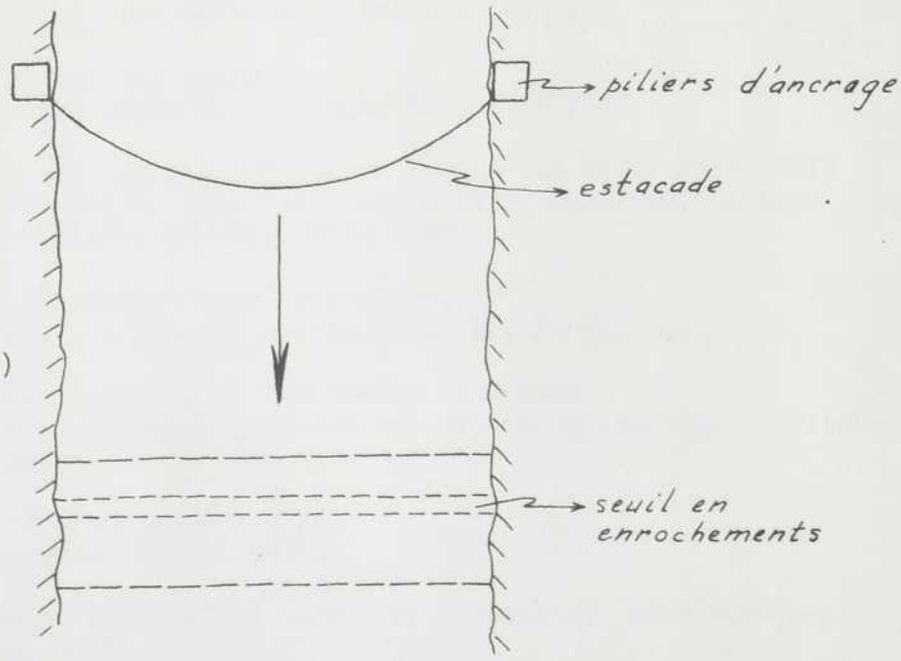
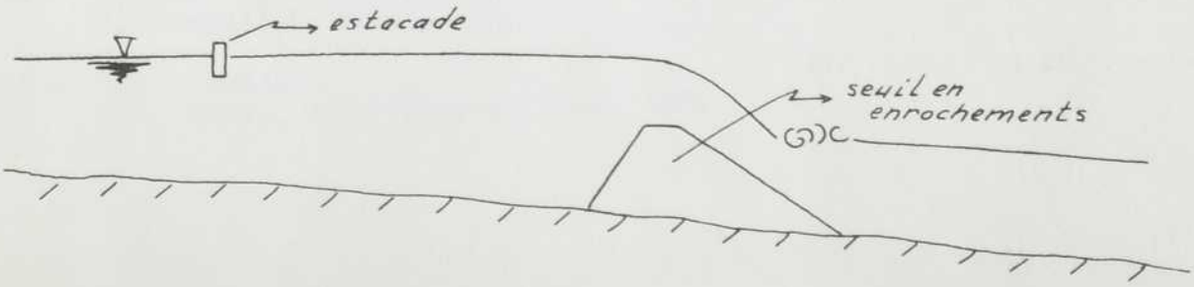


Figure VII - 2 (2)



L'estacade est munie d'un dispositif spécial lui permettant de s'élever ou de s'abaisser avec les variations de débit et aussi d'un dynamomètre à chacune de ses extrémités, pour la mesure des poussées dues à la glace. A son aval, un seuil d'enrochement sert à surélever le niveau de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

1.- Theory of Formation and Deposit of Frazil Ice.
Bernard Michel, Eastern Snow Conference,
Proceedings of the 1963 Annual Meeting.

2.- Report on the Bromptonville Ice Jam March 20, 1948.
Duquet & Mackay, Ingénieurs-Conseils.

3.- Aménagement de Lachine, Problème des glaces,
Dossier V, Sous-dossier A. Cartier, Côté et Piette, Ing.-Conseils.

4.- Les métamorphoses du frasil en rivière.
Bernard Michel, Université Laval.
Présenté à la conférence technique de l'I.C.I. - section
Génie civil - 19 & 20 Nov. 1964.

5.- Cours de mécanique des glaces.
Bernard Michel, Les presses de l'Université Laval.

6.- Dictionnaire franco-anglais des glaces flottantes.
Louis Edmond Hamelin, Université Laval.

7.- La débâcle. C.E. Deslauriers, Université Laval.

8.- Régime des glaces des rivières.
N. W. Laszloffy, La Houille Blanche Nov. Déc. 1948.

9.- Formation of Ice and its Effects on Production of Hydroelectric
Plants. Y. de Guise, Canadian Electrical Association, Eastern
Zone Meeting Quebec, January 26th, 1960.

10.- Frazil Ice, a Review of its Properties.
G.P. Williams, Engineering Journal, Vol 42, No 11, Nov. 1959.

11.- Formation and Evolution of Ice Covers on Rivers.
E. Pariset & R. Hausser, Transactions of the Engineering Institute
of Canada, Vol 5, No 1, 1961.

12.- Theories of Formation of Ice.
Canadian Engineer, August 1895.

13.- Twenty Years of Work in the Domain of Underwater Ice Formation.
W.S. Altberg, 1938.

14.- Handbook des Wasserbaues.
A. Schoklitsh, Vienne 1950.

15.- Ice Formation.
H.T. Barnes, John Wiley and Sons, 1906.

16.- Ice Engineering.
H.T. Barnes, John Wiley and Sons, 1928.

17.- Hanging Ice Dams,
H.R. Rivisild, 8ième Congres A.I.R.H., 1959.

18.- Some Aspects of Ice Problems connected with Hydro-Electric.
J.E. Cousineau, Engineering Journal, March 1959.

19.- Probability Charts for Predicting Ice Thickness.
G.P. Williams, Engineering Journal, June 1963.

20.- On the transfer of Heat from a River to an Ice Sheet.
W.D. Baines, Transaction of the Engineering Institute of Canada, Vol 5, No 1, 1961.

21.- Criteria for the Stability of Ice covers on Rivers. F.I. Morton
Eastern Snow Conference, Proceedings of the 1963 Annual Meeting.

22.- Ice Problems at Hydro-Electric Plants.
T.G. Hogg, Canadian Engineer, Vol 47, Nov. 11, 1924

23.- Ice problems in Power Development,
J. Murphy, Canadian Engineer, Vol 58, May 27, 1930.

24.- Ice Problems in the St.-Lawrence.
C.W. Mc Lachlan, Canadian Engineer, Vol 46, March 11, 1924.

25.- Thawing Ice in Water Pipes.
Dobson & Buchanan, Canadian Engineer, Vol 68, April 2, 1935.

26.- Thrust exerted on a Retaining Structure by Unconsolidated Ice Covers. R. Beccat et B. Michel, 8ième Congrès de l'A.I.R.H., 1959.

27.- Ice Problems in Hydraulic Structures.
E.B. Strowger, 8ième Congres de l'A.I.R.H., 1959.

28.- Ice affecting Engineering Structures on the Siberian Rivers during Ice-run. K.N. Korzhavin, 8ième Congres de l'A.I.R.H. 1959.

29.- Ice Problems in the Design of the St-Lawrence River Power Project.
Ira A. Hunt, 8ième Congrès de l'A.I.R.H., 1959,

30.- Ice Problems in the St-Lawrence River.
H.L. Land, 8ième Congrès de l'A.I.R.H., 1959.

31.- Ice Problems relating to Dam Gates.
Nils Johansson, 8ième Congrès de l'A.I.R.H., 1959.

32.- Ice Formation on the St-Lawrence.
D.W. Mc Lachlan, Report on St-Lawrence Waterway Project, Appendix E.

33.- La débâcle: mécanisme, théorie et contrôle.
B. Michel, Rapport S5, Département de génie civil, Université Laval.

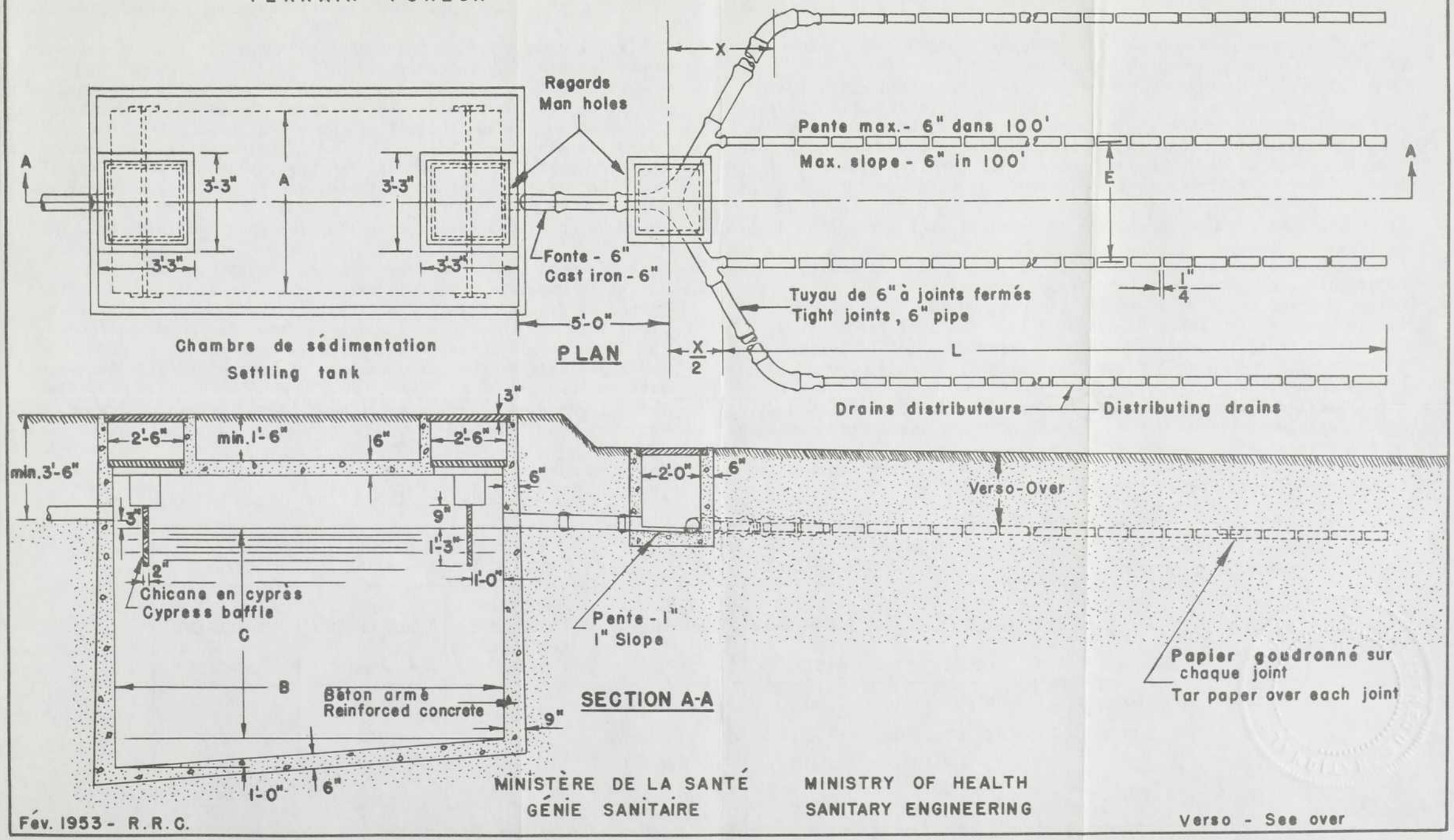
TABLE DES MATIERES

S-M-255

FOSSE SEPTIQUE
TERRAIN POREUX

SEPTIC TANK
POROUS SOIL

II



MINISTÈRE DE LA SANTÉ
GÉNIE SANITAIRE

MINISTRY OF HEALTH
SANITARY ENGINEERING

Fév. 1953 - R.R.C.

Verso - See over

NOTES EXPLICATIVES

1.- Aucune fosse septique ne sera creusée à moins de 100 pieds d'un puits, d'une source ou d'un cours d'eau servant à l'alimentation humaine.

2.- Le tuyau d'entrée des égouts dans la fosse septique doit être étanche et doit mesurer au moins 6" de diamètre.

3.- On place, à 12" du tuyau d'entrée, une chicane en bois pour forcer les matières solides à descendre au fond de la fosse. Une chicane semblable est placée devant le tuyau de sortie. Les 4 madriers de 2" qui forment la chicane sont descendus dans une coulisse pratiquée dans le mur de la fosse et pour pouvoir les sortir facilement il faut prévoir un élargissement de la coulisse au-dessus de la chicane.

4.- Il ne se forme pas de glace quand les regards sont munis d'un double couvercle.

5.- Il faut recouvrir une fosse septique d'au moins 18" de terre.

6.- La structure en béton doit être armée, dans les deux directions, de barres d'acier de ½" de diamètre, espacées de 12". Ces barres d'acier doivent être placées à environ 1" des surfaces intérieures.

7.- Les drains français de 1' de longueur auront des joints ouverts de ¼" recouverts de papier goudronné sur la moitié supérieure de la circonférence.

8.- L'épaisseur de la terre de remplissage, au-dessus des drains distributeurs, doit varier entre 2'-0" et 3'-6", suivant les conditions de gel dans la région.

9.- Pour obtenir de bons résultats, il faut vider la fosse septique au moins une fois par année.

EXPLANATORY NOTES

1.- No septic tank shall be tolerated at a distance of less than 100 feet from a well, a spring or a stream supplying drinking water.

2.- The sewer pipe entering the tank shall be water tight and should be at least 6" in diameter.

3.- A wooden baffle shall be placed at 12" of the inlet pipe to divert the sewage solids towards the bottom of the tank. A similar baffle is to be placed in front of the outlet pipe. The four 2" boards forming the baffles shall be inserted in sliding grooves in the side-walls of the tank and the grooves should become wider above the baffles so that the boards can be easily removed or replaced.

4.- There is no ice formation when manholes have double-covers.

5.- A septic tank has to be covered with at least 18" of soil.

6.- The whole concrete structure shall be reinforced, in both directions, with steel bars ½" in diameter, spaced every 12". These steel bars are to be placed about 1" from the inside surfaces.

7.- The French drains, one foot long, will have joints ¼" wide and the upper half of the circumference of the joints will be covered with tar-paper.

8.- The thickness of covering soil, over the distributing drains, will vary between 2'-0" and 3'-6", according to the frost in the locality.

9.- For good results, a septic tank must be emptied at least once a year.

PERSONNES OU ELEVES PERSONS OR PUPILS	CHAMBRE DE SEDIMENTATION SETTLING TANK			DRAINS DISTRIBUTEURS : 4" diamètre DISTRIBUTING DRAINS : 4" diameter		
	(B) LONGUEUR LENGTH	(A) LARGEUR WIDTH	(C) PROFONDEUR DEPTH	NOMBRE DE RANGEES NUMBER OF ROWS	(L) LONGUEUR LENGTH	(E) ESPACEMENT SPACING
12	10'-0"	5'-0"	5'-0"	8	80'	6'
20	12'-0"	6'-0"	6'-0"	10	100'	6'
25	13'-0"	6'-0"	6'-0"	11	115'	6'
30	13'-0"	6'-0"	7'-0"	12	120'	6'