

Fourth Workshop on
Hydraulics of River Ice
Montreal, June 19-20, 1986

Quatrième atelier sur
l'hydraulique des glaces
Montréal, 19-20 juin 1986

Simulation d'un barrage suspendu sur la rivière Chaudière
en amont de Saint-Georges de Beauce

par

Jean-Michel Tanguy et Albert Réal Tremblay

Service des études hydriques

Ministère de l'Environnement du Québec

3900 Marly - 5e étage

Sainte-Foy (Québec)

G1X 4E4

RESUME

Sur la rivière Chaudière, en amont immédiat de Saint-Georges de Beauce se forme chaque année, une immense accumulation de glace dans un secteur au relief particulièrement éprouvé, très escarpé, où la pente moyenne avoisine 1% et où le couvert de glace atteint 10 m d'épaisseur.

Grâce au modèle de simulation BBMASTER qui comporte, outre une loi empirique de génération de frasil, les principaux mécanismes hydrauliques qui conditionnent les phases de formation, de progression et de destruction des couverts de glace en rivière, il a été possible de reconstituer le barrage suspendu de glace. Nous disposons de relevés en nature sous la forme de deux campagnes d'auscultation du couvert conduites par le MENVIQ en janvier et en mars 1984 et complétées par des observations visuelles pendant les phases d'évolution et de débâcle. Celles-ci ont permis de mieux comprendre la dynamique du barrage suspendu et grâce aux résultats obtenus par la simulation numérique, de pouvoir être en mesure de les reproduire d'une façon tout à fait satisfaisante.

I PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS

La rivière Chaudière a un bassin versant d'une superficie de 6 731 km² et prend sa source au lac Mégantic. Elle est un affluent de la rive droite du fleuve Saint-Laurent où elle se jette à l'aval immédiat du pont de Québec après un parcours de 209 km. Le comportement de ce cours d'eau est assez complexe à cause de ses caractéristiques très particulières, telles que son orientation générale sud-nord, la concentration de sept confluent importants à l'intérieur d'une distance de 26 km entre Saint-Georges et Saint-Joseph de Beauce, la configuration sinueuse de son lit, les zones à forte pente, la présence d'îles, ainsi que l'alternance de tronçons très encaissés et de tronçons à faible pente.

La partie de la rivière qui nous intéresse plus particulièrement est située à l'amont du barrage Sartigan, près de Saint-Georges de Beauce où un immense barrage de glace se forme tous les hivers. D'une longueur de 4,5 km, cette accumulation atteint par endroit 10 m d'épaisseur et se développe dans un secteur où la pente moyenne est de l'ordre de 1%. La zone de génération de frasil, de plusieurs dizaines de kilomètres, contribue à sa formation en moins de 48 heures.

Les hivers 1980-1981 et 1982-1983 ayant été marqués par des débâcles précoces à l'origine d'inondations localisées, le ministère de l'Environnement du Québec a conduit, au cours de l'hiver 1983-1984, une série de campagnes d'auscultation du couvert de glace. Les résultats de ces mesures ont permis de préciser les dimensions du barrage suspendu, le volume de glace en place et de préciser son degré d'évolution au cours de la saison froide.

En utilisant un modèle de simulation des couverts de glace en rivière, capable de générer les volumes de frasil incidents et de reproduire les phases de formation et d'évolution des couverts, il a été possible de reconstituer les caractéristiques du barrage suspendu tel qu'il a pu être observé lors de ces reconnaissances "in situ".

II SOMMAIRE DES OBSERVATIONS RÉALISÉES SUR LE SITE

Deux campagnes d'auscultation ont été réalisées les 20 janvier et 19 mars 1984, complétées d'observations visuelles lors des phases de formation et de débâcle. Ces mesures ont montré que le couvert comprend trois parties bien distinctes: un couvert mince qui s'étend du barrage au pied des rapides, une accumulation qui recouvre l'ensemble des rapides et, enfin, un autre couvert mince en tête de l'accumulation. Les observations ont permis de bien comprendre les mécanismes qui prennent naissance lors de chaque phase d'évolution du couvert.

***Formation:** Cette phase est extrêmement rapide, puisque le couvert progresse du barrage Sartigan jusqu'à la tête des rapides, soit sur une distance de 8 km, en moins de 48 heures. Compte tenu des débits très faibles caractéristiques de cette phase de formation du couvert, la partie de la section qui reste en eau constitue un chenal qui serpente au fond de la rivière (figure 1). L'étroitesse de ce chenal permet au couvert de reposer sur les deux côtés du lit restés à sec et de se solidariser avec le fond. Une fois le couvert en place, la turbulence de l'eau va générer des flux de chaleur qui, conjugués avec les fluctuations de niveaux provenant des variations de débits, vont produire au-des-

sus du chenal un affaissement de la surface supérieure de la glace (figure no 2), allant même jusqu'à l'effondrement de la colonne de glace recouvrant le chenal (figure no 3).

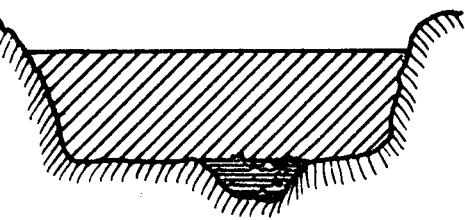


Figure No: 1

Formation du couvert

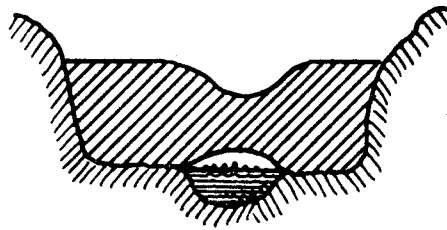


Figure No: 2

Affaissement localisé

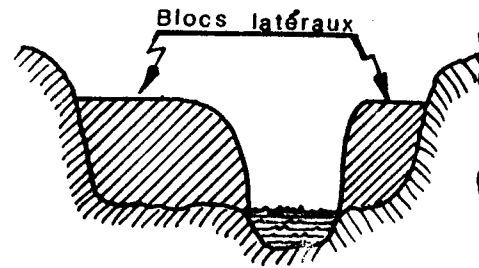


Figure No: 3

**Effondrement
d'une colonne de glace**

Les reconnaissances sur le site mettent d'ailleurs en évidence un couvert assez homogène à l'intérieur duquel serpente un chenal partiellement ouvert.

*Evolution: Les campagnes de mesure effectuées en janvier et en mars montrent très peu d'évolution du couvert en cours d'hiver. Ceci peut être expliqué par l'indépendance thermique des blocs de glace latéraux reposant sur le fond et du chenal central qui reçoit, génère et véhicule les flux de chaleur vers l'aval. On peut aussi noter une augmentation de la longueur découverte du chenal central entre ces deux campagnes, mais peu de changements de niveaux concernant les blocs latéraux.

*Débâcle: Compte tenu de cette indépendance thermique entre les blocs latéraux et le chenal central, la destruction du couvert va résulter de mécanismes hydrauliques. Pour l'année qui nous intéresse, la débâcle s'est produite les 6 et 7 avril 1984 avec des débits qui sont passés de 50 m³/s à 295 m³/s (6/04), puis à 405 m³/s (7/04). L'observation de cette débâcle a d'ailleurs

permis de constater que le couvert se détruisait par dessolidarisation de pans entiers de blocs de glace qui basculaient dans la rivière en conservant leur cohésion.

L'ensemble de ces considérations montre que l'accumulation qui recouvre les rapides:

- a une structure monolithique et extrêmement compacte sur l'ensemble de sa longueur;
- repose sur le fond sur une grande partie de sa surface, ce qui rend inadéquate l'utilisation de théories relatives aux couverts en équilibre hydrostatique;
- subit peu d'évolution thermique à l'échelle de la rivière, mais plutôt à l'échelle du chenal central;
- est conditionnée par les mécanismes hydrauliques lors des phases de formation et de débâcle qui se déroulent très rapidement (quelques heures).

III SIMULATION DE LA FORMATION DE L'ACCUMULATION À L'AIDE DU MODÈLE BB MASTER

Afin de pouvoir simuler la formation de l'accumulation dans la zone de rapides, nous avons utilisé le modèle BB MASTER qui comprend l'ensemble des mécanismes hydrauliques intégrés au modèle MASTER (Tanguy, 1985), intègre une formule empirique de génération du frasil en amont du couvert, mais qui est exempt de toute évolution thermique du couvert en place (cf.: organigramme). Les spécificités du site en question et les mécanismes mis en jeu le rendent tout à fait adapté au cas étudié.

Il est basé sur les plus récentes théories publiées par B. Michel (1984) que nous allons rappeler ici très succinctement en mettant l'emphase sur le mécanisme du barrage suspendu qui nous intéresse ici directement.

- Progression en couvert mince

Ce type de progression résulte de la juxtaposition de grandes plaques de glace dérivantes qui se soudent entre elles par congélation, constituant ainsi un couvert solide qui progresse vers l'amont. Expérimentalement, le nombre de Froude de l'écoulement a été identifié comme étant supérieur à 0,44 (Michel, 1984). Ce processus n'a pas encore été inclue dans le modèle, faute de disposer d'un critère d'évolution surfacique des plaques de glace.

- Progression frontale mince

La descente du frasil cohésif ou de plaques de glace de petites dimensions va produire une progression du couvert suivant la loi:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy}} = 0,21 \sqrt{\frac{h}{y}} \left(1 - \frac{h}{y}\right) \quad (3.1)$$

- où
- F = nombre de Froude à l'amont du couvert
 - V = vitesse de l'écoulement à l'amont du couvert
 - y = profondeur de l'écoulement à l'amont du couvert
 - g = accélération de la pesanteur
 - h = épaisseur du couvert de glace

Expérimentalement, le nombre de Froude frontal en amont du couvert est de l'ordre de 0,08 et de 0,21 sous le couvert.

- Ecrasement frontal

Ce processus apparaît lorsque le frasil généré en amont subit une période de réchauffement et perd de sa consistance ou bien lorsqu'un débit de frasil important, nouvellement formé, donc non consolidé, arrive en tête du couvert. L'épaisseur du couvert est donnée par:

$$F_i = \frac{U}{\sqrt{gh}} = 0,197 \sqrt{\frac{h/y}{(0,3 + (1-y_0/y)^2)}} \quad (3.2)$$

- où F_i = nombre de Froude de l'écoulement sous le couvert
 U = vitesse de l'écoulement sous le couvert
 y, y_0 = profondeur d'eau en amont et sous le couvert
 g = accélération de la pesanteur
 h = épaisseur du couvert

Expérimentalement, le nombre de Froude de l'écoulement sous couvert oscille entre 0,13 et 0,20 (Michel, 1984).

- Ecrasement généralisé

On rencontre ce processus lorsque le couvert en place subit un redoux prolongé qui va produire une perte de sa consistance. Ceci va provoquer un écrasement généralisé qui peut concerner une longueur importante du couvert. Sous l'effet de cet écrasement généralisé, le bord frontal va subir un recul vers l'aval. La courbe de stabilité a pour expression (Pariset, Hausser et Gagnon, 1961):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q^2}{BC^2H^4} = \frac{0,094 X^2 (1 - 0,92X)^3}{1 + 0,92X} \\ X = t/H \end{array} \right. \quad (3.3)$$

- où
- Q = débit
 - B = largeur au miroir
 - C = coefficient de Chezy de l'écoulement
 - H = hauteur piézométrique
 - t = épaisseur du couvert

- Barrage suspendu

Le processus du barrage suspendu prend naissance lorsque la progression frontale n'est plus possible à cause de la vitesse trop importante du courant. Le bord amont continue néanmoins de recevoir du frasil qui, faute de pouvoir s'accumuler frontalement, est entraîné sous le couvert. D'une densité inférieure à l'eau, le frasil va se déposer sous le couvert et restreindre la surface utile de l'écoulement, produisant des pertes de charge qui elles-mêmes vont conduire à une surélévation du bord frontal et par conséquent de celle du niveau de l'eau. L'abaissement des vitesses de l'écoulement à l'amont de l'accumulation va alors permettre une nouvelle progression. Mais parallèlement à ce mécanisme de surélévation-progression, l'accumulation sous-jacente se poursuit jusqu'à ce que la vitesse limite d'entraînement des particules de frasil soit atteinte sous le couvert. Des mesures "in situ" ont mis en évidence une plage de vitesses limites comprises entre 0,6 et 1,3 m/s. Si nous supposons que les pertes de charge de l'écoulement sont du type Manning, la pente de la ligne d'énergie est donnée par:

$$i = \frac{n^2 V^2}{R_h^{4/3}} \quad (3.4)$$

- où
- V = vitesse de l'eau sous l'accumulation
 - n = coefficient de Manning
 - R_h = rayon hydraulique

Sous le couvert, l'écoulement prend alors l'allure d'un écoulement en conduite à vitesse constante. Dans le cas trivial où n est constant et où le gabarit de la rivière est uniforme ($R_h = \text{constante}$), la pente de la ligne d'énergie est constante et la régression se fait à pente constante. Pour connaître, à un instant donné, la position de la section jusqu'où a régressé le couvert, il suffit de mener, à partir de la position frontale du couvert, une droite de pente égale à "i", qui intercepte la ligne d'énergie au droit de la section S_x .

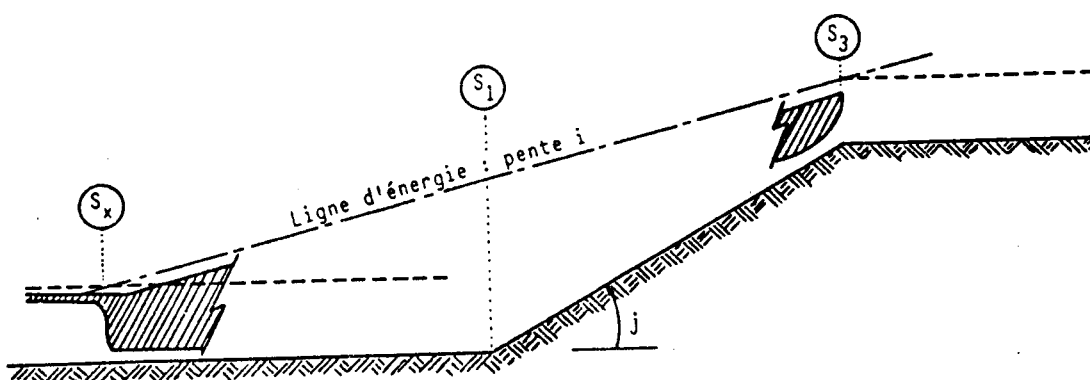


Figure 4: Détermination de la section limite de régression

- Critère thermique

Le calcul de la production du volume de frasil généré par la zone découverte est effectué d'une façon empirique par la relation suivante: (Hausser 1982):

$$V = 0,0104 S T_c - 4,6 Q h \quad (3.5)$$

- où
- V = volume de frasil généré
 - S = surface de l'éclaircie
 - T_c = température atmosphérique moyenne
 - Q = débit
 - h = dénivellée entre l'amont et l'aval de l'éclaircie

IV APPLICATION AU CAS DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

Comme nous l'avons dit, le tronçon étudié a des caractéristiques très hétérogènes d'une section à l'autre.

- longueur étudiée: 8 km dont 4 km de rapides
- pente locale, mini: 0,1%, maxi: 5%
- pente myenne du rapide: 1%
- largeur au miroir (pour 30 m³/s); mini. (profil 34); 28 m; maxi (profil 4) 36 m

Les paramètres hydrauliques ayant présidé à la formation du couvert sont ceux enregistrés aux alentours du 25 décembre 1983:

- niveau au barrage Sartigan: 174,00 m
- débit à l'aval du barrage Sartigan: 30 m³/s

4.1 Méthodologie adoptée

Cette étude de simulation numérique du couvert de glace a été menée en prenant comme référence la campagne de mesures du 20-01-1984, durant laquelle ont été relevées les cotes du dessus du couvert au droit des sections 4, 5, 11, 17, 19, 25, 40, 43 et 47. En conditions d'eau libre, cette portion de rivière est en rapides, ce qui a empêché la détermination des coefficients de rugosité du fond du lit. Les seules données concernant les caractéristiques du sol proviennent de reconnaissances visuelles sur les lieux où ont pu être distinguées trois zones principales.

- Un premier tronçon où la rivière est large et dispose de caractéristiques à peu près constantes et où l'écoulement est calme. Elle s'étend du barrage Sartigan jusqu'aux environs des profils 32-33. Notons tout de même une barrière naturelle de grosses roches entre les sections 23 et 23A.

- Un second tronçon (profil 33 - profil 40) où la rivière est considérablement rétrécie, la pente est très abrupte, le fond et les parois sont taillés dans le roc et l'écoulement, très rapide, a des difficultés à se frayer un chemin. C'est en fait un "rapide" au sens strict.
- Un troisième tronçon (profil 40 et au-delà) où la pente redevient douce et où le gabarit augmente sensiblement. Le fond du lit est beaucoup plus lisse que dans le tronçon précédent. L'écoulement est fluvial.

Faute de connaître les coefficients de rugosité de ces différents tronçons, ainsi que celui du frasil lors de la formation du couvert, nous avons été contraints d'en déterminer des valeurs relatives approchées, guidés par reconnaissances visuelles "in situ". Nous partirons des paramètres suivants:

- coefficient de rugosité du frasil lors de la formation du couvert: 0,020
- vitesse de l'écoulement sous l'accumulation: 0,90 m/s
- nombre de Froude limite au bord frontal: 0,09

4.2 Les résultats obtenus

Signalons en premier lieu que les coefficients de rugosité, qui ont convenu pour reconstituer la formation de l'accumulation de glace et qui paraissent "raisonnables" compte tenu du site étudié, sont les suivants:

- profil 1 au profil 33 : 0,03
- profil 34 au profil 39: 0,17
- profil 40 au profil 43: 0,13
- profil 44 au profil 47: 0,08

La simulation numérique a fait apparaître quatre phases principales dans la formation du couvert:

• Phase 1: Progression frontale no 1 (schéma no 1)

Partant du barrage Sartigan (profil 1), le couvert progresse vers l'amont en progression frontale mince jusqu'au profil 23, soit sur une distance de 3 365 m. Cette zone constitue en effet la retenue du barrage, caractérisée par des vitesses faibles et des pentes très douces.

• Phase 2: Barrage suspendu no 1 + progression frontale no 2 (schéma no 2)

Cette première accumulation se situe aux alentours des profils 23 et 23A, où le couvert rencontre une première barrière de hauts-fonds. Ne pouvant progresser en conditions frontales minces, le barrage va constituer un barrage suspendu qui va progresser jusqu'au profil 25 tout en régressant jusqu'à la section 19, soit sur une distance de 1 185 m. En amont du profil 25, le couvert va trouver des conditions d'écoulement plus calmes, ce qui va lui permettre de progresser en conditions frontales minces jusqu'à la section 25 à l'abscisse 3 975 m.

• Phase 3: Barrage suspendu no 2 + progression frontale no 3 (schéma no 3)

A partir du profil 25, la pente du fond devient abrupte et le gabarit se réduit, ce qui n'autorise qu'une progression en barrage suspendu. Celui-ci va progresser de proche en proche jusqu'au profil 36 et régresser jusqu'au profil 17, englobant ainsi la précédente accumulation. Une légère zone de progression frontale prend alors naissance au voisinage du profil 37 (abscisse 5 361 m) où la pente du fond est faible.

• Phase 4: Barrage suspendu no 3 + progression frontale no 4
(schéma no 4)

Dans cette phase de progression finale, l'accumulation progresse jusqu'à la section 43 (6 756 m) et régresse jusqu'au profil 36 (5 296 m) avec une zone de léger recouvrement au voisinage de ce dernier profil. A l'amont de cette accumulation, la pente de la rivière diminue jusqu'à autoriser une progression en conditions frontales minces jusqu'à la section 47.

Notons que le volume de glace accumulé sur l'ensemble de cette zone, qui s'étend du barrage Sartigan au profil 47, atteint 2,3 millions de m³.

La comparaison entre les points mesurés (niveau supérieur de la glace) et les cotes obtenues par la simulation numérique nous donnent:

SECTION	COTES MOYENNES MESURÉES LE 20/01/1984	COTE CALCULÉE PAR LE MODÈLE
4	173,90	174,00
6	174,10	174,02
11	174,35	174,02
17	174,63	174,55
19	176,81	176,86
25	182,20	182,36
40	194,84	194,96
43	198,93	199,56
47	203,16	203,35

4.3 Commentaires sur les résultats obtenus

La comparaison graphique des quatre schémas précédents avec les schémas 5 et 6 qui reprennent les mesures effectuées sur le site, fait apparaître des différences dans l'allure du couvert entre les sections 30 et 35. Si l'on considère la vue en plan

du site (schéma 5 ou 6), il apparaît que deux grosses singularités conjuguent dans ce secteur: un coude à 90° et un fort rétrécissement de gabarit.

La pente de régression (équation 3.4) donne dans ce secteur des valeurs trop élevées, ce qui peut provenir de la formulation de type Manning utilisée qui donne un poids important au rayon hydraulique. Celui-ci subit, dans ce secteur, de brutales fluctuations (dans le rapport de 1 à 5).

- Le modèle ne simule pas la régression au-delà de la section aval de l'accumulation (section 17). Celle-ci résulte en effet du décollement de frasil produit par les fluctuations de débit, de son transport et son stockage dans la retenue du barrage (à l'aval de la section 17).
- On peut regretter le manque de données concernant les coefficients de rugosité du fond de la rivière, ce qui aurait permis la détermination du coefficient de rugosité de la glace. Cette façon de travailler "à l'envers" est un peu regrettable, mais elle est seule possible, à cause du danger de faire des mesures en période de crue, ce qui nous aurait permis de déterminer ces coefficients de rugosité du fond de la rivière. Néanmoins, il faut considérer les résultats obtenus:
 - comme des valeurs relatives entre les coefficients de rugosité du lit et celui de la glace, mais plus proche de valeurs absolues en ce qui concerne le coefficient de rugosité global (lit + glace).
 - comme révélateurs des performances du modèle de simulation numérique capable de reproduire d'une façon satisfaisante la dynamique de formation d'une telle accumulation et dans un site aussi tourmenté.

BIBLIOGRAPHIE

MICHEL, B., 1984

Comparaison of field data with theories on ice cover progression in large rivers

Revue canadienne de Génie Civil - Volume 11, no 4, p. 798-814

PARISET, E., HAUSSER, R., GAGNON, A., 1966

Formation of ice covers and ice jams in rivers

Journal of the hydraulics Division - Proceeding of the American Society of civil Engineers, Vol. 92, no HY6, P. 1-24.

HAUSSER, R., 1982

Projet Archipel de Montréal

Rivière des Mille Iles - Etudes du régime des glaces

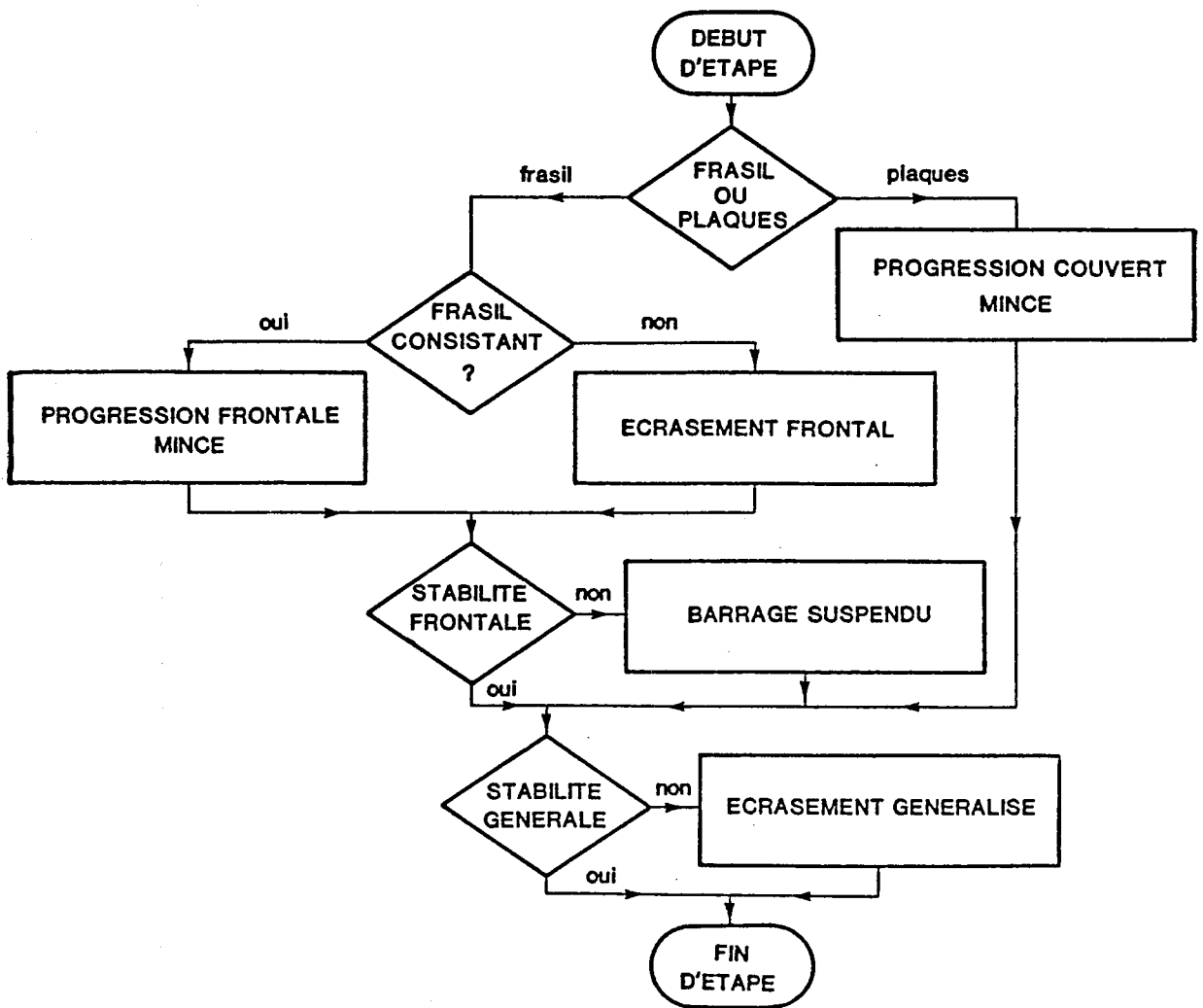
Laboratoire d'Hydraulique Lasalle - Secrétariat Archipel -
Ministère de l'Environnement

TANGUY, J.-M., 1985

Formation, progression et destruction des couverts de glace en rivière

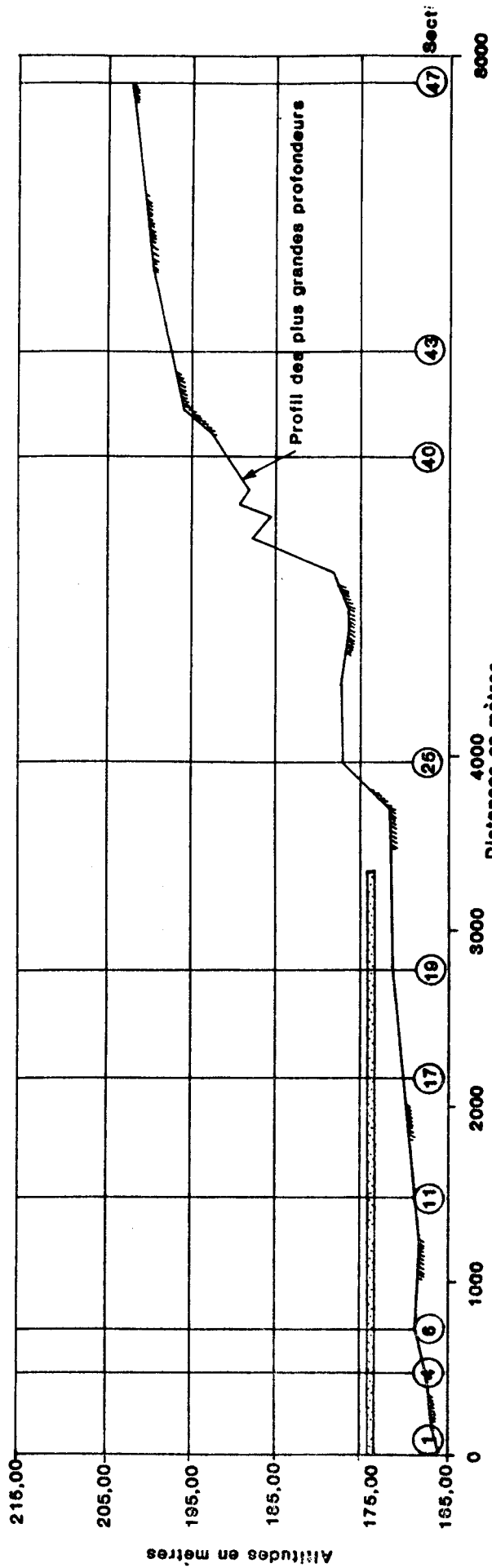
Thèse de maîtrise, Université Laval, 500 p.

ORGANIGRAMME ILLUSTRANT L'EVOLUTION D'UN COUVERT EN RIVIERE



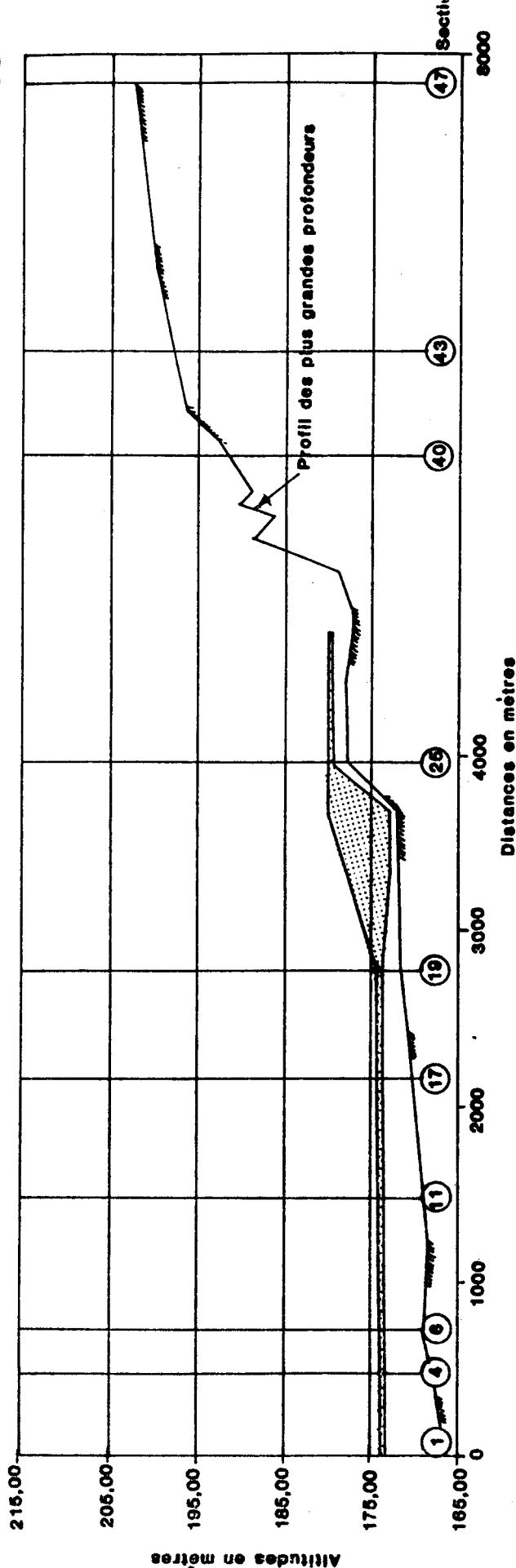
ETAPE NO 1: PROGRESSION FRONTALE NO 1

SHEMA NO 1



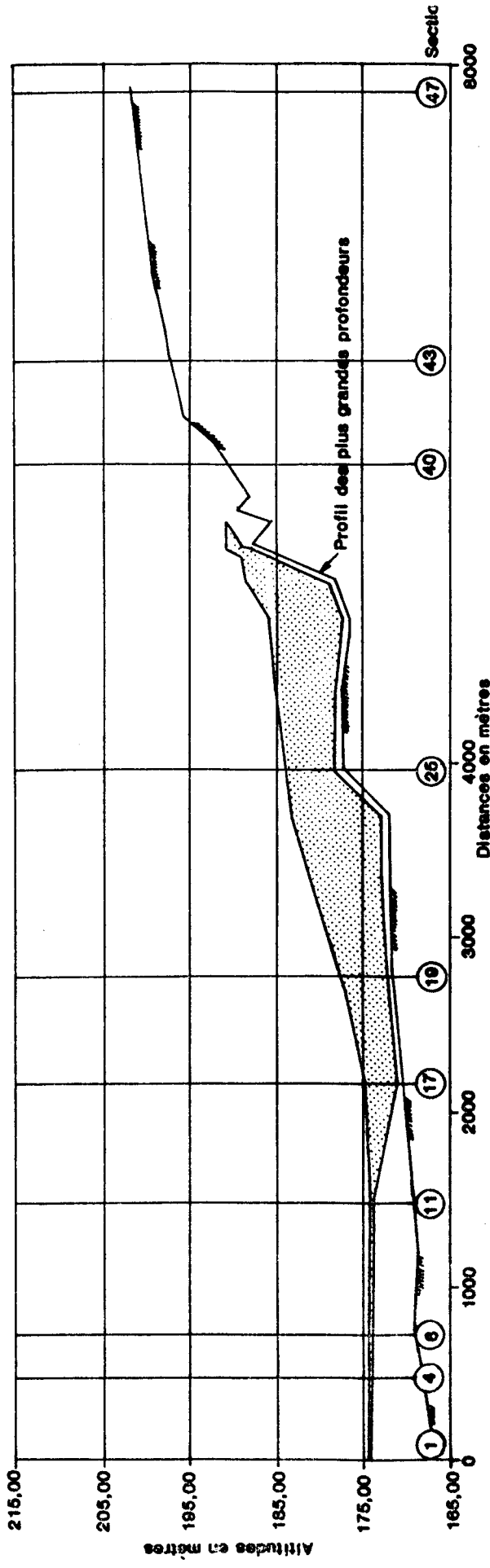
ETAPE NO 2: BARRAGE SUSPENDU NO 1 + PROGRESSION FRONTALE NO 2

SHEMA NO 2



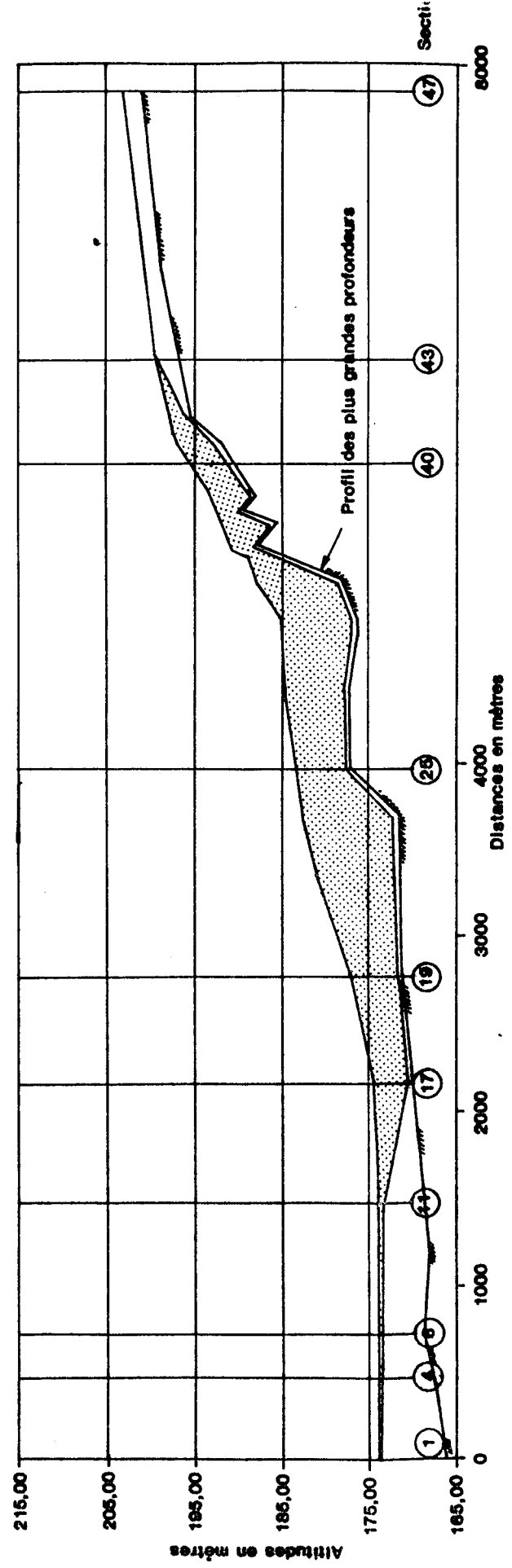
ETAPE No 3: BARRAGE SUSPENDU No 2 + PROGRESSION FRONTALE No 3

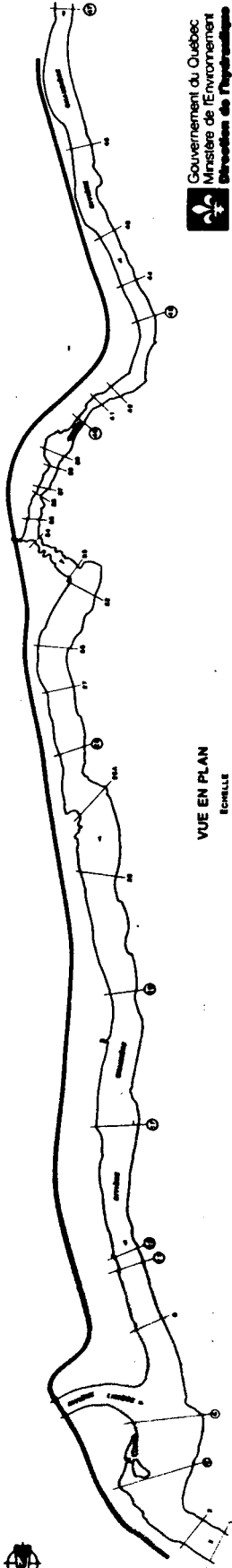
SCHEMA No 3



ETAPE No 4: BARRAGE SUSPENDU No 3 + PROGRESSION FRONTALE No 4

SCHEMA No 4





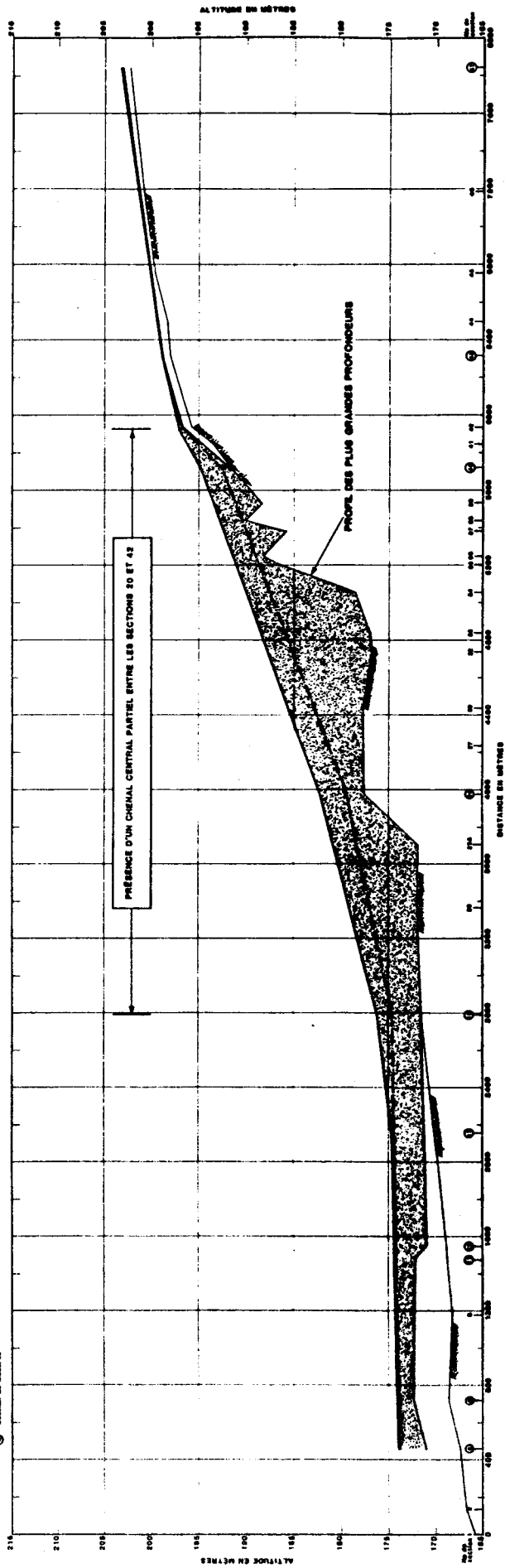
Gouvernement du Québec
 Ministère de l'Environnement
 Direction de l'Évaluation

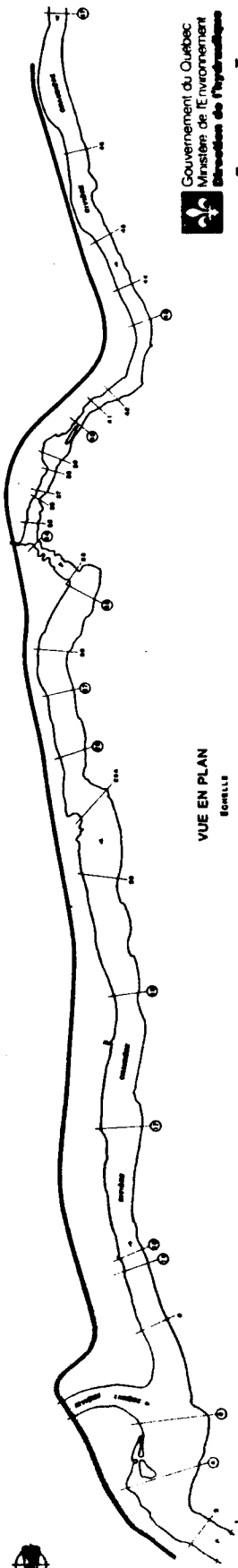
RIVIÈRE CHAUDIÈRE

ÉTUDE DU COUVERT DE GLACE
 EN AMONT DU BARRAGE GARIBOLDI

Date des mesures : 2008 V/1004

VUE EN PLAN
 Echelle
 1 cm = 500 mètres

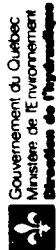




VUE EN PLAN

ÉCHELLE

1:5000



Gouvernement du Québec
Ministère de l'Environnement
et de l'Hydrologie

RIVIÈRE CHAUDIÈRE

ÉTUDE DU COUVERT DE GLACE
EN AMONT DU BARRAGE SARTIQOAN

Date des mesures : 19/03/1964

