

4 Analyse en laboratoire de dispositifs de contrôle des embâcles et analyses numériques

Cette dimension de la problématique a fait l'objet de documents complets publiés séparément par Francoeur (2002), Delcourt (2002) pour les essais techniques en laboratoire. Pour les fins du présent rapport, seuls seront rapportés les éléments concluants essentiels pour l'efficacité et le dimensionnement des structures ainsi qu'un bref rappel de la méthodologie employée pour les essais incluant la question du débit de conception.

4.1 Méthodologie générale

4.1.1 La modélisation physique en laboratoire

L'approche méthodologique consiste à mettre en œuvre les outils de modélisation physique sur maquette des processus en présence. En faisant appel à des règles précises de *similitude* du « modèle réduit » avec le prototype (la réalité physique), l'approche permet de tester différentes solutions, d'en faire varier les différentes caractéristiques (variantes) par l'entremise d'une analyse de sensibilité, et de choisir la variante qui offre les meilleures caractéristiques d'efficacité en vue de son implantation dans le milieu. Ci-après, les mots ou expressions « maquette », « modèle réduit » ou « modèle physique » sont considérés comme équivalents.

Dans le cas particulier des écoulements de rivière en présence de glace, qu'on dit « bi-phasiques », leur représentation sur maquette soulevait certaines difficultés liées au problème de la similitude avec la réalité du terrain. Si la représentation des écoulements « à l'eau libre » est bien maîtrisée aujourd'hui, celui du « modèle de glace » soulevait des difficultés auxquelles il a fallu apporter des solutions efficaces et économiques. De plus, si la modélisation de la topographie d'un bief d'écoulement n'est pas un problème en soi, le choix du site à modéliser posait un problème car quelques options se présentaient au départ et il était exclu de toutes les mettre à l'essai à cause des coûts représentés. Ces aspects seront traités plus en détails ci-après.

4.1.1.1 La modélisation de la glace

Pour le modèle de glace, il s'agit d'abord de choisir parmi les solutions suivantes (Delcourt, 2002;

Francoeur, 2002) pour représenter « à l'échelle » les glaçons en dévalaison ainsi que les principales propriétés physiques des embâcles:

1. des *substituts solides homogènes* reproduisant les caractéristiques d'ensemble de la glace en mouvement (débâcle) ou sous embâcle; il s'agit d'éléments ne reproduisant pas à l'échelle la résistance interne de la glace
2. des *substituts solides en matériau composite* cherchant à reproduire les caractéristiques physiques internes de résistance de la glace en plus du comportement d'ensemble;
3. de la glace naturelle.

C'est le premier choix qui s'imposait d'emblée puisque la deuxième option vise des objectifs de recherche ou des contextes qui dépassent de loin ceux de la présente étude. Pour ce qui est de la glace naturelle, si ce choix semble d'emblée représenter une option plus représentative du matériau, les difficultés et les coûts de mise en œuvre (besoin d'un laboratoire froid) restreignent cette possibilité. Le choix de substituts solides homogènes est un choix abondamment utilisé dans ce genre d'étude puisque dans le cas des embâcles, les propriétés physiques des blocs (tailles, porosité, perméabilité, frottement) sont plus importantes que la résistance interne de la glace.

Selon Zufelt (1996), les éléments à prendre en compte pour simuler une accumulation de glace sont :

- ?? la vitesse de l'écoulement;
- ?? la vitesse de la glace;
- ?? la taille des blocs;
- ?? la concentration de glace;
- ?? les frottements entre la glace et la berge;
- ?? l'angle de frottement interne de la glace-modèle;
- ?? les frottements, le coefficient de pression latérale et de pression passive.

Tous ces facteurs sont présentés et discutés en détails dans Delcourt (2002) et Francoeur (2002). Certains seront repris ici pour illustrer le problème de la modélisation des embâcles. Il s'agit de la taille des blocs de la glace modèle laquelle soulève la question de l'échelle de similitude, et de leur distribution de taille.

La *taille du matériau* utilisé doit tenir compte de l'échelle du modèle physique fixée pour les écoulements. La distribution de taille des glaçons substituts doit également s'ajuster à la grande variabilité de ceux retrouvés dans la nature. Une distribution des tailles doit donc être adoptée afin de s'approcher le plus possible de la réalité. Enfin, une dernière question devant être considérée avec soin est celle du débit de glace et des quantités devant être retenues par l'ouvrage.

Les variables mesurables pour définir l'accumulation de glace en nature et sur modèle sont l'épaisseur, la porosité, l'angle de frottement, la perméabilité et la rugosité. Pour ce qui est de l'écoulement lui-même, la mesure du débit et des niveaux d'eau sont les variables qui retiennent l'attention. Enfin, l'interaction entre l'accumulation de glace et les structures doit être considérée soigneusement car ce facteur détermine le dimensionnement des ouvrages. Les forces appliquées dépendront non seulement de la forme de la structure et de la surface de contact mais aussi, dans

une certaine mesure, des propriétés physiques de la glace, ce qui, pour les grandes structures, se traduit surtout par son coefficient de frottement.

Les choix de base relatifs à ces différentes questions seront abordés dans les sections suivantes.

4.1.1.2 La représentation topographique des biefs d'écoulement

Le problème est le suivant :

Doit-on tester les solutions envisagées sur les véritables biefs d'écoulement auxquels elles sont destinées, ou peut-on n'utiliser qu'une schématisation à géométrie variable desdits biefs?

Si le choix de la représentation exacte semble préférable pour la vraisemblance des conclusions, il soulevait des difficultés pratiques et économiques difficiles à surmonter dans le présent contexte. Premièrement, plusieurs sites (au minimum 3, un quatrième s'est ensuite imposé) avaient été identifiés *a priori* comme candidats à recevoir une telle intervention (voir Leclerc et coll., 2001). Étant donné que le programme d'essais est complexe à mettre en œuvre même pour une seule géométrie, la reproduction multiple d'un tel protocole et ses nécessaires adaptations (notamment la reconstruction du modèle en tenant compte de la topographie réelle) soulevaient des difficultés considérables de coût et de temps de réalisation.

Il fut donc considéré d'examiner l'approche générique par schématisation, éventuellement à géométrie variable, des biefs à l'étude. Pour ce faire, le principal paramètre à prendre en compte, au-delà de la largeur, de la rugosité caractéristique des matériaux du lit et de la forme générale qui pouvaient aisément se simplifier par des choix représentatifs du milieu, était la *pente du cours d'eau* qui, comme on le sait, est relativement forte sur la rivière Montmorency. Ce facteur est considéré comme étant le principal élément pouvant limiter l'efficacité des solutions envisagées puisque les tentatives similaires précédentes ont toutes été tentées avec des pentes plus faibles. Il fut donc décidé de construire une maquette *générique* permettant de faire varier ce facteur tout en reproduisant les caractéristiques générales des tronçons ciblés (largeur, profondeur).

Une telle approche ouvre la porte à une analyse de sensibilité à la géométrie des tronçons et permet même de vérifier l'efficacité présumée des solutions proposées pour des gammes de valeur se situant au-delà des valeurs rencontrées sur la Montmorency. Ainsi, en plus de répondre économiquement aux besoins de la présente étude, ce choix fait avancer la recherche en permettant de qualifier les propositions d'aménagement pour d'autres cours d'eau présentant des caractéristiques similaires. Les détails de ce choix seront introduits plus loin.

4.1.1.3 Exemples d'application de la modélisation physique d'embâcles et de structures de contrôle

La méthode de modélisation physique du transport de glace et d'embâcles n'est pas nouvelle puisqu'on en compte des exemples remontant aux années 60'. Afin de s'assurer de sa faisabilité, une revue bibliographique a été réalisée afin de trouver des exemples similaires d'application de la

méthodologie proposée. Ces exemples sont listés ci-après avec une brève description du contexte d'application et du degré de réussite de la méthode.

1. **Fleuve Saint-Laurent à Montréal - Modélisation de débâcle par Hausser (1964; d'après Michel & Abdelnour, 1975)**. Le but était d'étudier le comportement des glaces sur un tronçon de 8 km sur le fleuve Saint-Laurent au niveau de Montréal. Le modèle a été conçu pour étudier les impacts sur le port qu'entraîneraient les empiètements majeurs réalisés pour l'Exposition universelle de 1967. Le site subissait l'influence des glaces, de la slush et du frasil. Le protocole de modélisation qui utilisait des blocs de polyéthylène a donné des prévisions conservatrices ce qui, dans un contexte de conception d'ouvrage, se révèle nécessaire pour pallier aux incertitudes inhérentes à la méthode.
2. **Simulation d'embâcles pendant la dérivation temporaire de la rivière Nelson par MacDonald (1971)**. L'objectif du modèle était d'étudier l'effet du détournement de la rivière pendant la construction d'une centrale hydroélectrique endiguée par des batardeaux. Il s'agissait de former un plan d'eau à niveau constant en amont du chantier afin d'y favoriser la formation d'un couvert stable. Celui-ci devait limiter la production de frasil et diminuer les problèmes d'embâcles causant une surélévation indésirable du niveau d'eau juste en aval de la structure. Le couvert stable devait également contribuer à retenir les glaces dévalant des rapides situés à l'amont. Le protocole expérimental utilisait de la polyéthylène de basse densité de dimensions variables pour représenter la slush et les glaçons. Le matériau était amendé en surface avec une colle spéciale pour simuler les propriétés cohésives de la glace.

Les résultats se sont avérés conservateurs par rapport à la réalité. L'auteur a fait le bilan de l'exercice en affirmant que les modèles physiques de glace sont un moyen efficace de quantifier ce genre de phénomène pour les situations où les transferts de chaleur ne sont pas un facteur dominant. Autrement, le résultat obtenu est jugé conservateur ce qui n'est pas une mauvaise chose en soi en situation de conception et de dimensionnement d'ouvrage.

3. **Étude de la formation d'arches sur des piliers par de la glace-modèle (Calkins, 1978)**. L'auteur a étudié en laboratoire la formation d'arches sur des piliers de pont à l'aide de blocs de polyéthylène. La formation d'arches est un phénomène qui peut être observé dans la genèse d'embâcle de congestion sur les rivières. L'intérêt de l'exercice est évident pour la présente étude entre autres, à cause de la méthodologie employée. Les tests effectués sur une maquette à géométrie schématisée et adaptative prenaient notamment en compte le débit de glace, la vitesse d'écoulement, la taille des blocs et l'écartement des piliers dans le cadre d'un protocole axé sur l'analyse de sensibilité de ces variables.

Une relation empirique a été obtenue liant différents facteurs physiques à la formation d'arches. Cette relation permet de répondre à différentes questions expérimentales comme la taille des blocs à utiliser dans un modèle, la concentration de glace, la granulométrie des assemblages (mélange de tailles de blocs). Bien que les résultats de Calkins (1978) soient difficilement extrapolables pour dimensionner une structure dans une rivière réelle, la recherche fournit deux conclusions intéressantes parmi d'autres: à l'instar de Lever et coll. (1997), la largeur des piliers aurait une influence négligeable sur la formation d'arche et, si la concentration de glace est trop faible, la formation d'arche est peu probable. Ce dernier point

est confirmé par les observations de décembre 2000 sur l'estacade de Saint-Raymond de Portneuf (§ 3.3.1).

4. **Modèle de la rivière North Platte (Burgi, 1975).** L'auteur a utilisé une maquette afin de tester l'efficacité d'estacades flottantes pour former un couvert de glace et ainsi réduire la quantité de slush qui atteint un village situé en aval du site d'implantation sur la rivière North Platte. La maquette modélisait un tronçon d'environ 457 m de long pour 64 m de large à une échelle de 1/24 sans distorsion. La glace y était représentée par des particules hémisphériques de 0,32 cm d'épaisseur taillée dans du polyéthylène basse densité (0,91-0,925). Avant les expériences, le plastique était stocké dans des bidons pour qu'il reste mouillé et ainsi limiter les problèmes de mouillabilité caractéristiques du plastique. L'alimentation en glace n'était pas calibrée, l'estimation se faisant visuellement.

Le modèle initial ne présentait pas des capacités de rétention satisfaisante. Le nombre de Froude important de la rivière (0,17) entraînait la formation d'un couvert instable. Plusieurs configurations furent testées en modifiant l'estacade mais aussi en modifiant la géométrie du canal afin de réduire les vitesses d'écoulement. Le mécanisme de formation du couvert semble basé sur l'extension progressive de la glace de rive qui ne peut être reproduite en laboratoire avec le matériau choisi. De plus, en absence de gel, l'accumulation est moins stable. Pour évaluer l'effet de la glace de rive, des plaques de polyéthylène ont été placées dans la maquette en amont des estacades.

La leçon de l'expérience est qu'il est très difficile de représenter la formation progressive et l'effet d'un couvert de glace en place en amont d'une structure à l'aide d'un modèle physique. Si des tests sur maquette sont effectués en l'absence d'un tel couvert alors qu'en réalité celle-ci devrait en comporter un, le résultat ne peut être que conservateur et favorable à la conception. C'est le cas pour les tests conduits dans le cadre de la présente étude.

5. **Simulation de l'estacade de Hardwick au Vermont par Lever et coll. (1997).** Les auteurs ont développé des structures de rétention économiques pour contrôler les embâcles dans les petites rivières. La structure de Hardwick est composée de blocs massifs inclinés placés en travers de la rivière. Une plaine d'inondation jouxte la structure.

Quand un couvert de glace est présent lors de la débâcle, les glaces en dévalaison s'y heurtent et celui-ci est alors fracturé au niveau de l'impact des glaces et au niveau de la structure. Il s'agit de la situation la plus réaliste car les structures sont placées dans les zones de faibles pentes où l'écoulement est le plus calme, donc où un couvert de glace solide peut se former plus facilement. Les auteurs considèrent cependant que les embâcles peuvent aussi être formés sur la structure elle-même même si le rapport espace libre entre piliers/taille des blocs de glace dépasse 5. Cependant, si ce rapport atteint 6, l'embâcle lâche à un débit très faible. À 6,4, la glace ne s'arrête pas sur la structure. C'est pourquoi, il est plus difficile de former un embâcle quand la glace est jeune, fragile et fracturée lors de la dévalaison.

Au-delà des conclusions relatives à l'usage d'une telle structure dont nous avons déjà discuté (§ 3.3.5, page 66), il faut retenir ici que la prise en compte de la présence d'un couvert solide dans le bief d'amont de la structure ne peut vraiment se faire qu'à l'aide d'un modèle réfrigéré (Figure 58) et de la glace naturelle, ce qui peut s'avérer assez coûteux et difficile à réaliser

quoique possible. De plus, l'observation du comportement de l'ouvrage dans le cours d'eau naturel semble corroborer à ce jour les résultats obtenus en maquette.



Figure 57 : Modèle de la rivière Lamoille à Hardwick (source : Lever et coll., 1997)

6. **Simulation de la structure de Cazenovia Creel (New-York) (Lever & Gooch, 1999).** Le modèle développé par ces auteurs simulait une rivière de 46 m de largeur et 2,1 m de profondeur, dont la pente est de 0,001 sur 610 m. Cette pente augmente à 0,003 sur les 6,4 km en amont du site étudié ce qui se rapproche du cas de la Montmorency. Le débit maximal mesuré en condition de glace était de 360 m³/s. Les épaisseurs de glace varient beaucoup (de 10 à 60 cm) mais les problèmes d'inondations se présentent fréquemment lorsque l'épaisseur des glaces est supérieure à 25 cm.

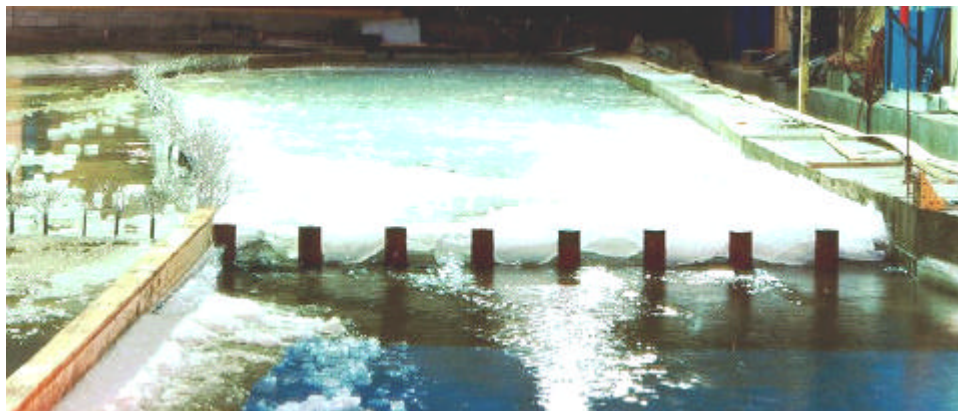


Figure 58 : Modèle de la rivière Cazenovia (Source : Lever & coll. 2000)

Il s'agit de tests similaires à la structure de Hardwick réalisés par la même équipe du CRREL (Lever & Gooch, 1999) mais l'objectif était dans ce cas de supprimer complètement les risques de lâchers d'embâcles car la structure devait être implantée dans une zone sensible avec des éléments très vulnérables en aval. La structure testée était constituée de piliers cylindriques verticaux. Cette structure devait être aussi efficace qu'un système déversoir assorti de piliers (comme la structure de Saint-Raymond, § 3.3.1) mais cette fois sans déversoir afin de limiter les coûts de construction. L'optimisation de la structure se fait donc

en étudiant l'influence de l'écartement des piliers. Ce protocole est similaire à celui retenu dans cette étude pour tester les estacades fixes sans déversoir.

L'échelle de la maquette était de 1/15 sans distorsion. Elle utilisait de la glace naturelle en laboratoire (entrepôt) réfrigéré. En unités du prototype, les piliers avaient un diamètre de 1,5 m pour une hauteur de 3 m, ce qui représentait un dépassement de 43% de la profondeur du cours d'eau. Les espaces testés étaient de 3, 3,7 et 4,3 m. À l'instar de plusieurs auteurs, Lever & Gooch (1999) estiment que l'espacement entre les piliers a plus d'importance que leur largeur. Pour cette raison, seule une largeur de 1,5 m fut testée.

Une disposition importante du protocole expérimental est la mesure des forces sur les piliers qui a été reprise dans nos tests. Cette donnée est très importante pour le dimensionnement des piliers. Les mesures de forces étaient donc réalisées sur cinq piliers. Quatre étaient équipées de cellules mesurant le moment appliqué au pilier par une force orientée dans le sens de l'écoulement. Le dernier pilier était équipé d'une cellule mesurant les trois forces et les trois moments.

Lever & Gooch ont obtenu des résultats très intéressants car pour le débit étudié (170 m³/s), aucune des structures testées n'a laissé passer de lâchers d'embâcles et ce, indépendamment de l'écartement des piliers. Le seul test ayant réellement échoué a été effectué avec des glaces peu épaisses et donc fragiles (27 cm) et des débits importants (260 m³/s). L'embâcle ne fut pas retenu par la structure et les glaces passèrent au-dessus des piliers.

Des « lâchers » temporaires de glace furent observés pour les trois écartements testés. Des mesures précises sur cette caractéristique ne sont pas possibles; cependant, les auteurs ont observé que les lâchers de glace pour l'espacement de 4,3 m duraient plus longtemps et se produisaient à des débits plus faibles ce qui est logique.

Par comparaison avec la structure à blocs inclinés abordée plus tôt (Harwick), les piliers verticaux ont une meilleure capacité de rétention.

Le test sans couvert de glace en amont de la structure a échoué : les glaces n'ont pas été arrêtées à la structure mais les auteurs prétendent qu'en pratique, ce scénario est irréaliste car un couvert de glace existe toujours en amont de la structure, la descente des glaces est donc freinée bien avant la structure.

Les simulations ont permis de conclure qu'un espace de 3,7 m était un compromis idéal. Un espacement de 3 m n'apporte pas de bénéfices supplémentaires, alors que des espaces de 4,3 m laissent passer la glace plus facilement et donnent lieu à des lâchers de glace transitoires.

4.1.2 Principes de similitude pour la modélisation physique

La plupart des simulations hydrodynamiques tentent de reproduire les écoulements observés en nature. Pour simuler correctement ces écoulements, les rapports de forces gouvernant les déplacements de l'eau doivent être identiques dans la maquette et dans le prototype. Dans cette

option, les similitudes sont très souvent basées sur l'égalité des nombres de Froude entre la maquette et le prototype. Le nombre de Froude exprime le rapport entre les *forces d'inertie* et les *forces gravitationnelles* de l'écoulement :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$$

V la vitesse de l'écoulement (m/s) ;

H la profondeur de l'écoulement (m) ;

g l'accélération gravitationnelle (9,8 m/s²).

L'échelle λ d'une maquette est le rapport entre la longueur en prototype et la longueur correspondante en maquette. Pour respecter l'égalité des nombres de Froude, l'échelle sur les vitesses est donc $\lambda^{1/2}$. Les échelles de similitude pour les autres grandeurs (forces, débit, volume,...) sont également dérivées de ce principe. Le Tableau 8 donne l'ordre de grandeur de quelques variables pour une échelle λ de 40, soit celle utilisée pour le programme de tests.

Tableau 8 : Équivalences de similitude de Froude pour une échelle de 40

Paramètres	Modèle physique	Prototype
Longueur, hauteur	1 m	40 m
Volume	1 m ³	64 000 m ³
Vitesse	1 m/s	6,3 m/s
Débit	0,001 m ³ /s	λ 10 m ³ /s
Masse	0,1 kg	λ 6520 kg
Force	1 N	λ 64 kN

4.2 Construction du modèle physique

Les détails de construction de la maquette non distordue à l'échelle 40 sont abordés dans cette section. La construction du modèle et l'ensemble de l'instrumentation qui a permis d'analyser et quantifier les phénomènes observés sont présentés ici en résumé. La quantification est importante en vue du dimensionnement d'un éventuel ouvrage, notamment au niveau des forces. Les détails sont disponibles dans les documents de Delcourt (2002) et Francoeur (2002).

4.2.1 Caractéristiques géométriques

La Figure 59 présente une vue en plan de la maquette à l'échelle 40 utilisée pour les tests. Les dimensions représentées sont en cm.

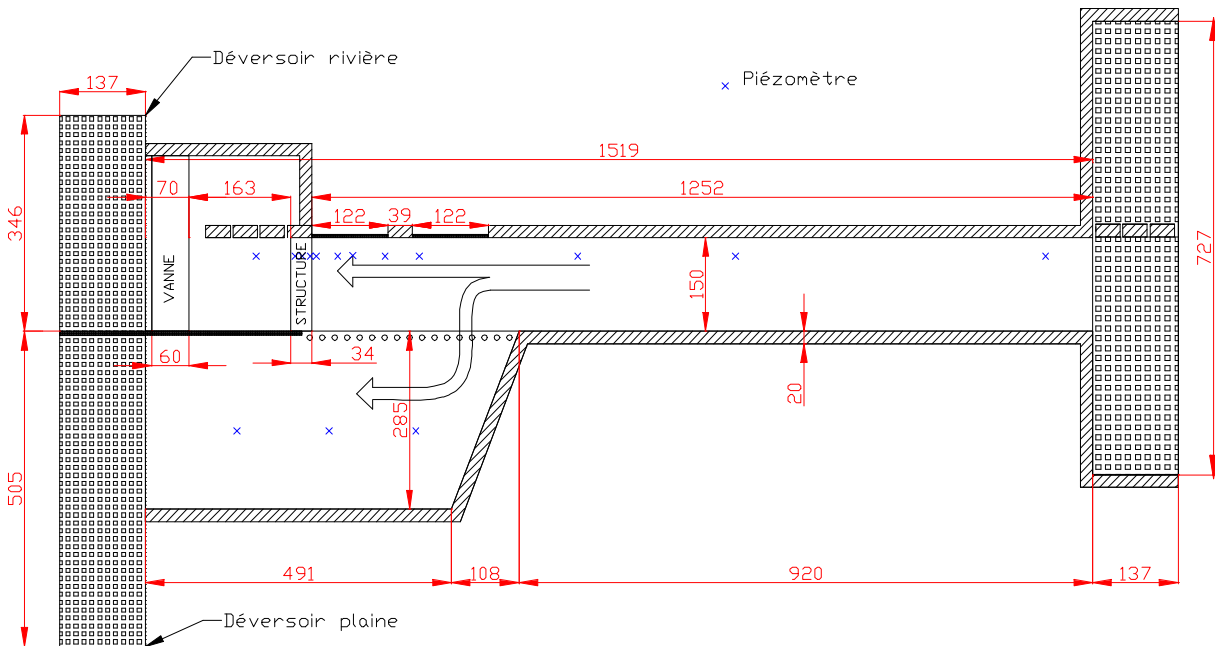


Figure 59 : Caractéristiques géométriques de la maquette

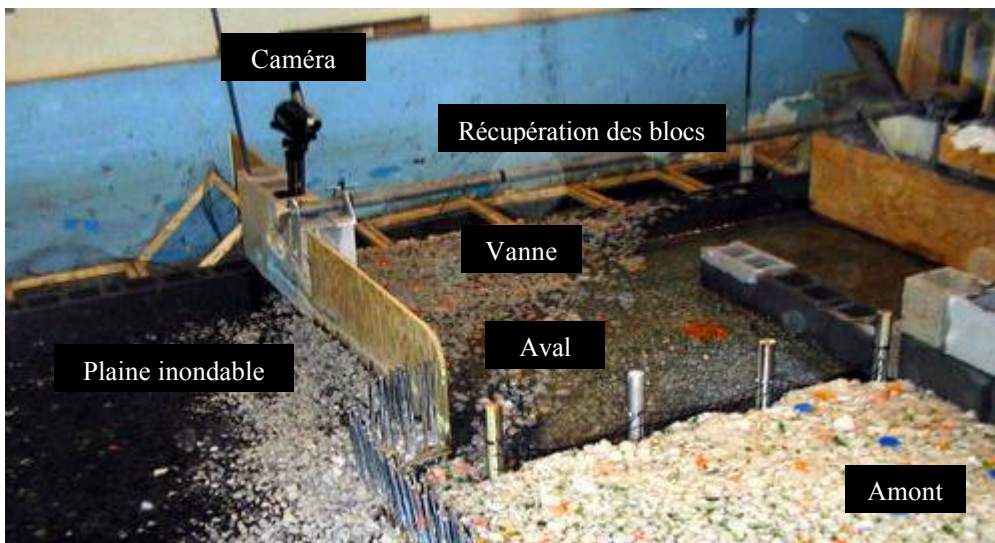


Figure 60 : Vue générale de la maquette

4.2.2 Fondations de la maquette

La maquette est délimitée latéralement par des blocs de béton sur une hauteur équivalente à 3 blocs (60 cm; *2,4 m en prototype*). Le mur de la rive gauche est bien hermétique alors que le mur en rive droite présente quelques infiltrations au niveau du passage des tubes de piézomètres et du cadre des fenêtres d'observation en plexiglas. Malgré cela, les fuites sont négligeables en regard du débit passant dans la maquette.



Figure 61 : Murs délimitant la maquette

4.2.3 Réalisation du fond

Le modèle du fond de la rivière et de la plaine est constitué de gravier de 18 mm (3/4") sur lequel un coulis de ciment a été répandu au pinceau afin d'assurer une bonne cohésion du lit et limiter les infiltrations. Pour maintenir une bonne rugosité, le coulis est le plus liquide possible afin de laisser les aspérités des cailloux ressortir.



Figure 62 : Épandage du coulis de ciment sur le gravier

4.2.4 Instrumentation

4.2.4.1 Vanne de sortie pour le contrôle du niveau d'eau

La vanne située à l'aval du canal permet de contrôler le niveau à la sortie de la maquette et d'y imposer le régime d'écoulement. La vanne est accrochée à un tube par des câbles. Ce tube pivote sur lui-même grâce à une manivelle et peut être bloqué grâce à deux vis de serrage.

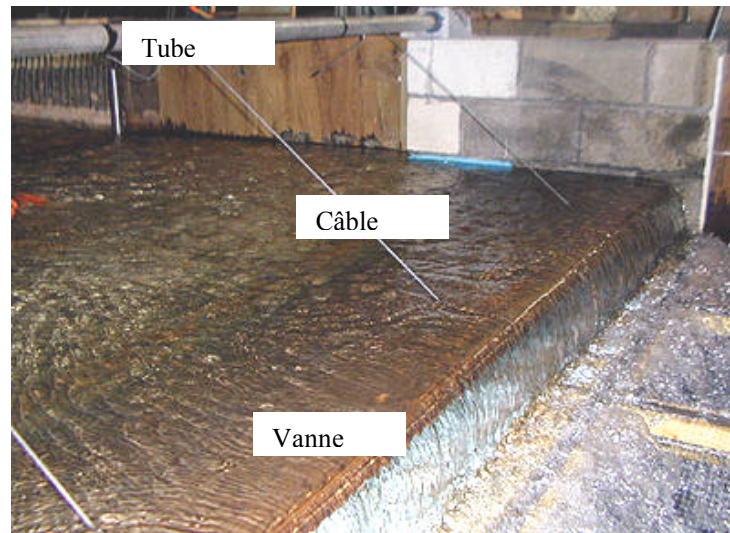


Figure 63 : Vanne de contrôle du niveau aval

4.2.4.2 Instrumentation des piliers pour la mesure des forces

Les piliers et estacades sont fixés sur un socle de bois dont la surface ne dépasse pas le niveau du lit. Une rainure à l'arrière permet de placer les câbles d'acquisition de données.



Figure 64 : Base de support des piliers

Les forces appliquées par les glaces aux structures sont mesurées grâce à des jauges de contrainte équipant certains piliers. Le détail des montages se trouve dans Delcourt (2002). Le principe en est simple : à partir de la connaissance de deux contraintes opposées sur une tige, il est possible de calculer la force appliquée (F) et le moment fléchissant correspondant (Figure 65).

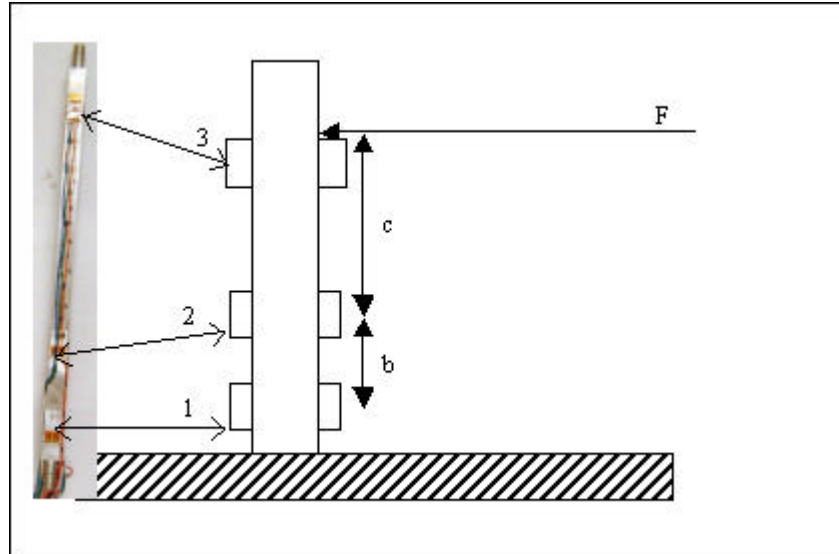


Figure 65 : Schéma de principe de la mesure de forces

Les contraintes sont mesurées par des ponts de jauges de contrainte situés à différents niveaux du pilier, les signaux sont enregistrés par un système d'acquisition de données et sont traités postérieurement pour déterminer les forces et les hauteurs d'application correspondantes (voir les figures ci-dessous). Les graphiques obtenus fournissent les forces et distances d'application (donc les moments fléchissants) en fonction du temps.

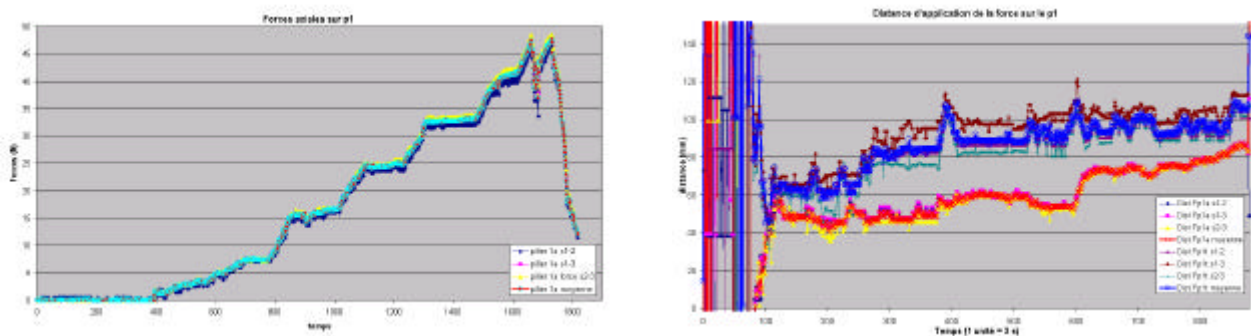


Figure 66 : Exemple de forces et distances d'application mesurées par les piliers jaugés

4.2.4.3 Piézomètres pour la mesure des lignes d'eau

Les piézomètres sont constitués de tubes de plastique souple suffisamment solides pour ne pas être écrasés par le poids du gravier et les déplacements des observateurs. Les tubes passent sous le lit de la maquette, en traversent les murets latéraux et sont finalement raccordés à des tubes de verre fixés sur un panneau de support gradué dont l'origine est calibrée au niveau du lit.



Figure 67 : Panneau de lecture des piézomètres

4.2.4.4 Fenêtres d'observation en plexiglas

Des panneaux de plexiglas ont été placés juste en amont des structures de rétention afin d'observer l'évolution des embâcles au cours des simulations.

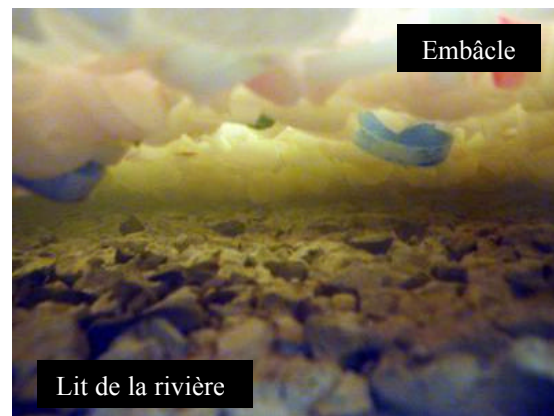


Figure 68 (a,b) : Fenêtre de plexiglas et vue d'un embâcle à travers la fenêtre

4.2.4.5 Déversoirs triangulaires pour la mesure des débits

La maquette est équipée de trois déversoirs triangulaires pour la mesure des débits de la pompe, du cours principal de la rivière et de la plaine de débordement respectivement. La rivière et la

plaine sont séparées par un panneau vertical permettant de mesurer les débits séparément. La courbe de calibration de la pompe est connue *a priori* et a permis de calibrer les deux autres déversoirs. Le débit est déterminé à partir de la hauteur d'eau s'écoulant au-dessus du déversoir. Cette hauteur est mesurée par des limnimètres permettant des lectures au 0,1 mm.



Figure 69 : Déversoir du côté de la plaine et tige limnimétrique

4.2.4.6 Enregistrement vidéoscopique

Durant tous les tests, deux caméras vidéo filmaient le déroulement des simulations. La première était placée au milieu du canal et donnait une vue globale de la rivière et de la plaine inondable. La deuxième était placée à l'aval du canal et filmait uniquement la structure de rétention testée. Les cassettes des caméras étaient retranscrites sur support VHS après chaque test.

4.2.5 Caractéristiques du modèle de glace

Le plastique simulant la glace est constitué de rondelles de plastique découpées sur des tiges de 3 m de polyéthylène de basse densité. Les caractéristiques de ce plastique sont décrites en détail dans Delcourt (2002). Des tiges de différents diamètres permettent d'obtenir des blocs de différentes tailles afin de mieux représenter la variation des blocs d'un embâcle naturel. Le diamètre des blocs vaut 4 à 5 fois leur épaisseur. Avec ce mélange, les paramètres suivants ont été

mesurés: densité du plastique (0,917), porosité (0,46), perméabilité (1,5 m/s) et angle de frottement (33°).

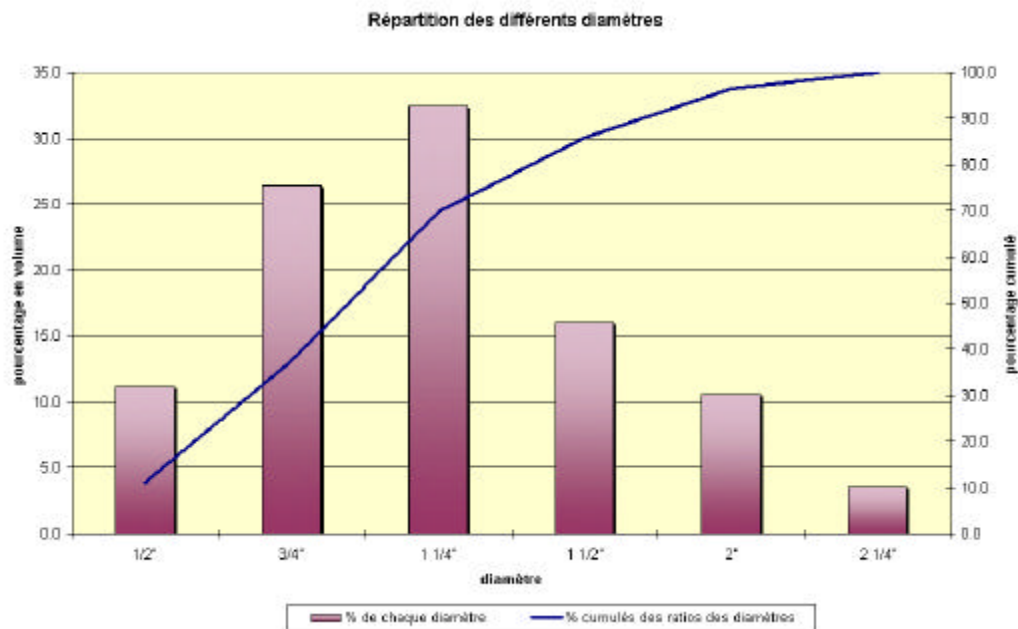


Figure 70 : Répartition des diamètres de blocs de plastique dans la glace modèle

La densité mesurée (à partir de la mesure de la masse volumique) est très voisine de celle de la glace (0,92). La porosité de 0,46 est proche de la valeur traditionnelle de 0,40 et reste dans la gamme de valeurs des porosités fournies par les différents auteurs et compilées par White (1999). La perméabilité est calculée à partir des principes de Beltrami (1999). La valeur de $1,5 \pm 0,4$ m/s (valeur prototype en considérant une échelle de 40) est semblable aux valeurs présentées dans son article.

4.3 Programme d'essais en laboratoire

Souvenons-nous que la maquette ne simule pas un tronçon particulier de la Montmorency : elle en reprend, à l'échelle, les caractéristiques principales telles la largeur, la pente, la rugosité. Les essais visent donc à étudier les paramètres influençant la capacité de rétention des structures testées, soit les estacades fixes avec ou sans filet, ou flottantes avec filet dans un milieu similaire. Les paramètres de sensibilité (ceux qu'on laisse varier) concernent à la fois le cours d'eau et les structures; ce sont :

1. Le débit d'amont
2. La pente de rivière
3. L'utilisation de seuils pour relever le niveau d'eau
4. La présence ou l'absence de plaine inondable
5. La taille des mailles du filet

6. La hauteur du filet sur les piliers
7. La forme du filet pour les estacades flottantes
8. La taille et le nombre de pontons des estacades flottantes
9. Présence de gros blocs de glace au niveau de la structure

4.3.1 Plan de test pour les estacades fixes avec ou sans filet

Le tableau suivant donne la liste des essais réalisés avec les estacades fixes avec ou sans filet.

Tableau 9 : Tests d'estacades fixes réalisés sur la maquette

N° de test	Date	Pente	Test
1	17 mai	0,002	Piliers + filet à petites mailles
2	22 mai	0,002	Piliers + filet à petites mailles II
3	23 mai	0,002	Piliers + filet à mailles de référence
4	24 mai	0,002	Piliers + filet à mailles de référence II
5	09 juillet	0,002	Piliers + filet à très grandes mailles
6	10 juillet	0,002	Piliers + filet à très grandes mailles II
7	11 juillet	0,002	Piliers + filets à très grandes mailles + gros débits de base
8	16 juillet am	0,002	Piliers + filets à mailles de référence, hauteur de filet = 2 x hauteur de la plaine
9	16 juillet pm	0,002	Piliers + filets à mailles de référence et pas de plaine
10	17 juillet am	0,002	Piliers + filets à mailles de référence + gros blocs en avant
11	17 juillet pm	0,002	7 piliers seuls
12	20 juillet	0,002	10 piliers seuls
13	23 juillet	0,002	10 piliers seuls + gros blocs en avant
14	24 juillet	0,002	7 piliers seuls + gros blocs en avant
15	31 juillet	0,002	Piliers + filet à mailles de référence III
16	20 août	0,0066	Piliers + filet à mailles de référence
17	22 août	0,0066	Piliers + filet à mailles de référence II
18	27 août am	0,0066	Piliers + filets à mailles de référence, hauteur de filet = hauteur de la plaine
19	27 août pm	0,0066	Piliers + filets à mailles de référence, hauteur de filet = 2 x hauteur de la plaine
20	28 août	0,0066	Piliers + filets mailles de référence et pas de plaine
21	29 août	0,0066	Piliers + filet mailles de référence + seuil
22	30 août	0,0066	Piliers raccourcis + filet à mailles de référence

4.3.2 Plan de test pour les estacades flottantes avec filet

Tableau 10 : Détails des tests réalisés sur le modèle physique avec des estacades flottantes avec filet

Test #	Date du test	Pente (%)	Nombre pontons	Diamètre pontons	Type de filet	Lieu d'ancrage	Présence d'un seuil	Autres caractéristiques
1	26 juillet 2001	0,2	6	3,75 cm	Escalier	Câbles à l'avant		Blocs de 4'' mis devant
2	30 juillet 2001 (am)	0,2	6	3,75 cm	Escalier	Câbles à l'avant		
3	30 juillet 2001 (pm)	0,2	5	3,75 cm	Escalier	Câbles à l'avant		
4	1 ^{er} août 2001	0,2	5	3,75 cm	Escalier	arrière		
5	2 août 2001 (am)	0,2	5	3,75 cm	Escalier	centre		
6	2 août 2001(pm)	0,2	5	3,75 cm	Escalier	centre		Similaire au test #5
7	6 août 2001	0,2	5	3,15 cm	Escalier	centre		Rupture du câble de section
8	7 août 2001 (am)	0,2	5	3,15 cm	Escalier	centre		Câble de section mal fixé
9	7 août 2001 (pm)	0,2	5	3,15 cm	Escalier	centre		Similaire au test # 7 et 8
10	8 août 2001 (am)	0,2	5	3,75 cm	En pointe	centre		
11	8 août 2001 (pm 1)	0,2	5	3,75 cm	En pointe	centre		Glaces lâchées loin en amont
12	8 août 2001 (pm 2)	0,2	5	3,75 cm	En pointe	centre	seuil de 9,6 cm	Glaces lâchées loin en amont
13	17 septembre 2001 (am)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre		
14	17 septembre 2001 (pm 1)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre (*)	seuil de 5 cm	
15	17 septembre 2001 (pm 2)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre (*)		Similaire au test # 13
16	18 septembre 2001 (am)	0,66	5	5 cm	En pointe	centre (*)		
17	18 septembre 2001 (pm)	0,66	5	3,15 cm	En pointe	centre (*)	seuil de 5 cm	
18	21 septembre 2001 (am)	0,66	4	3,75 cm	En pointe	rapproché		
19	10 octobre 2001 (am)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre		Rugosité
20	10 octobre 2001 (pm)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre		Rugosité / sans plaine
21	11 octobre 2001 (am)	0,66	5	3,75 cm	En pointe	centre	Seuil de 7,6 cm	Rugosité
22	11 octobre 2001 (pm 1)	0,66	4	3,15 cm	En pointe	rapproché		Rugosité
23	11 octobre 2001 (pm 2)	0,66	4	3,15 cm	En pointe	rapproché		Rugosité / sans plaine
24	22 octobre 2001 (am)	1,1	4	3,15 cm	En pointe	rapproché		Rugosité / sans plaine
25	22 octobre 2001 (pm)	1,1	4	3,75 cm	En pointe	rapproché		Rugosité / sans plaine
26	23 octobre 2001 (am)	1,1	4	5 cm	En pointe	rapproché		Rugosité / sans plaine
27	23 octobre 2001 (pm)	1,1	5	3,75 cm	En pointe	centre		Rugosité
28	24 octobre 2001 (pm 1)	1,1	4	3,75 cm	En pointe	rapproché		Rugosité
29	24 octobre 2001 (pm 2)	1,1	4	3,75 cm	En pointe	rapproché		Rugosité

(*) Le filet est fixé aux ancrages du centre sauf pour le milieu qui est relié par un filin à l'ancrage arrière

4.4 Résultats des essais : estacades fixes avec filet

4.4.1 Tests de référence pour une pente de 0,2 %

En plus de servir de base comparaison pour les autres tests à venir, les tests conduits ici avaient aussi pour but de s'assurer d'un certain nombre de comportements du modèle, notamment la reproductibilité des tests, avant de mettre en œuvre le programme de tests proprement dit.



Figure 71 : Structure de référence

La structure de référence est constituée de quatre piliers sur lesquels est posé un filet devant retenir les glaces. Trois piliers sur quatre sont jaugés pour permettre la mesure des forces et des moments fléchissants appliqués. Le pilier 1 est positionné sur la rive droite, le pilier 2 est au centre droit et le pilier 3 est sur la rive gauche (coté plaine inondable). Le filet mesure 162 x 17 cm (*64,8 m x 6,8 m en prototype*) et est constitué de mailles de 9 cm de longueur (3,6 m) sur 8,5 cm (3,4 m) de hauteur. La hauteur de fixation vaut 1,5 fois la hauteur de la plaine inondable, c'est-à-dire, 15 cm (6 m). Le volet est placé de manière à ce que les niveaux en amont et en aval de la structure soient égaux lorsque le débit de base est envoyé. Ce débit vaut environ 6 l/s (*60 m³/s à l'échelle 1/40*).

Trois tests ont été réalisés sur cette même structure. Le deuxième sert de confirmation au premier. Le troisième permet d'obtenir des informations plus précises sur les niveaux d'eau au niveau de la structure après l'ajout de trois nouveaux piézomètres.

4.4.1.1 Mesures sur les piliers

La Figure 72 représente uniquement les forces axiales mesurées sur le pilier 1. Sur le graphique, chaque pallier correspond à une augmentation du débit. Les forces correspondant à chaque débit sont estimées à l'endroit du seuil où les forces ne varient quasiment plus. Vers le point 1700, on

remarque une chute des forces qui correspond à un « lâcher de glace », c'est-à-dire, une rupture partielle ou complète de l'embâcle. Après quelques instants, l'embâcle se reforme sur l'estacade, on voit alors les forces augmenter à nouveau. Ce lâcher est aussi visible sur le graphique des distances (voir Figure 73). Lors du lâcher, l'eau peut s'évacuer plus facilement, ce qui diminue le niveau en amont de la structure, les distances d'application des forces diminuent donc aussi.

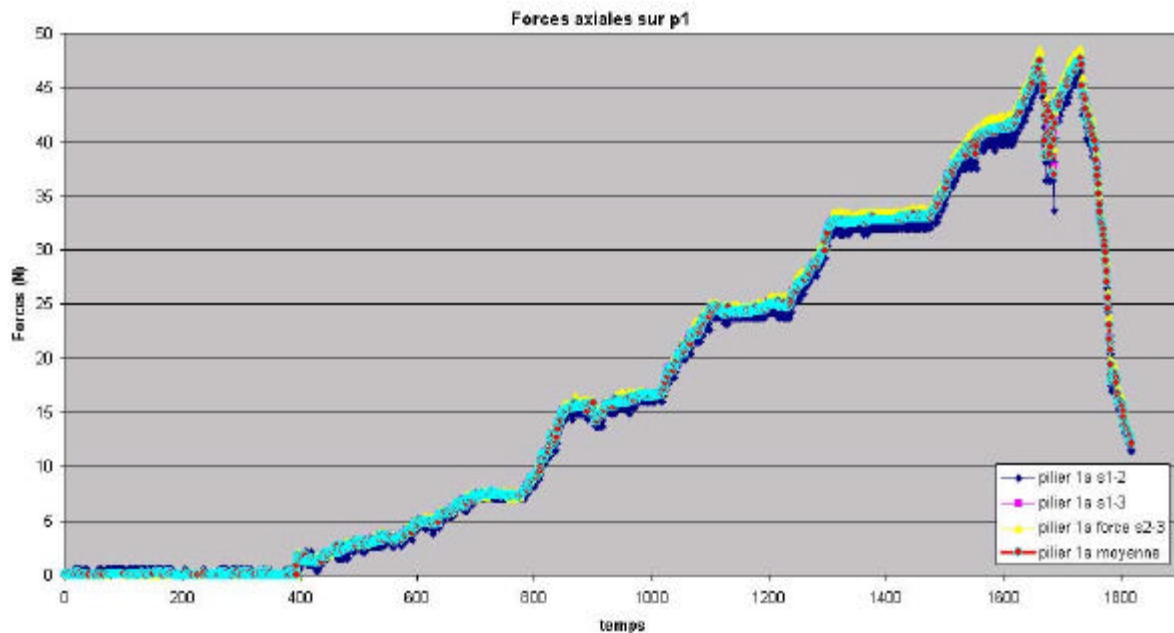


Figure 72 : Évolution des forces axiales en fonction du temps sur le pilier 1

On remarque aussi sur le graphique des distances d'application (hauteur; voir la Figure 73) que les estimations sont totalement imprécises avant l'abscisse 600, ce qui correspond à des forces d'environ 4 N. Comme les forces, les distances d'application augmentent avec le débit ou, plus précisément, avec le niveau d'eau. Les distances d'application pour les forces transversales sont toujours supérieures ou sensiblement égales aux distances pour les forces axiales. Le filet étant ancré en trois points sur le pilier, il est possible que les différences de tension entre ces trois points expliquent les différences observées. La synthèse des forces et des distances d'application de ces forces pour trois tests est présentée à la section suivante.

4.4.1.2 Analyses des forces en fonction du débit

La Figure 74 présente l'ensemble des valeurs de forces mesurées en fonction du débit total de la rivière car, en pratique, c'est ce débit qui est mesuré par les stations de jaugeages.

Sur ce graphique récapitulatif:

- ?? Chaque couleur de courbe correspond à un test
- ?? Les points ronds correspondent aux mesures de forces axiales : ronds vides – forces axiales sur P1; ronds pleins – forces axiales sur P2 et ronds pleins colorés – forces axiales sur P3

?? Les triangles correspondent aux forces transversales : triangles vides – forces axiales sur P1; triangles pleins – forces axiales sur P2 et triangles colorés à l'intérieur – forces axiales sur P3.

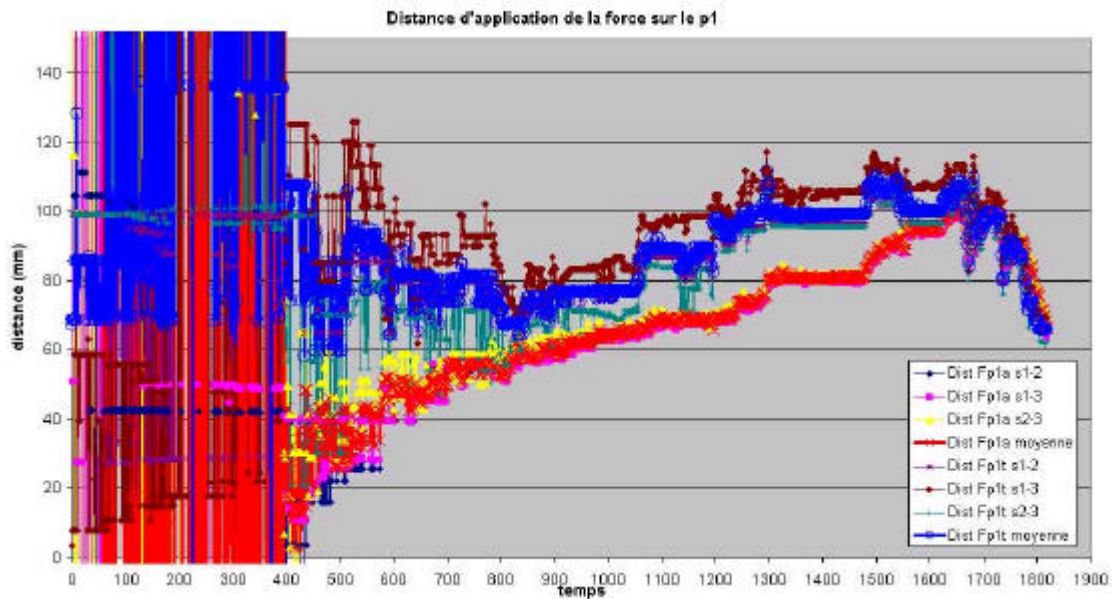


Figure 73: Évolution des distances d'application des forces en fonction du temps sur le pilier 1 (1 unité de temps = 3 sec)

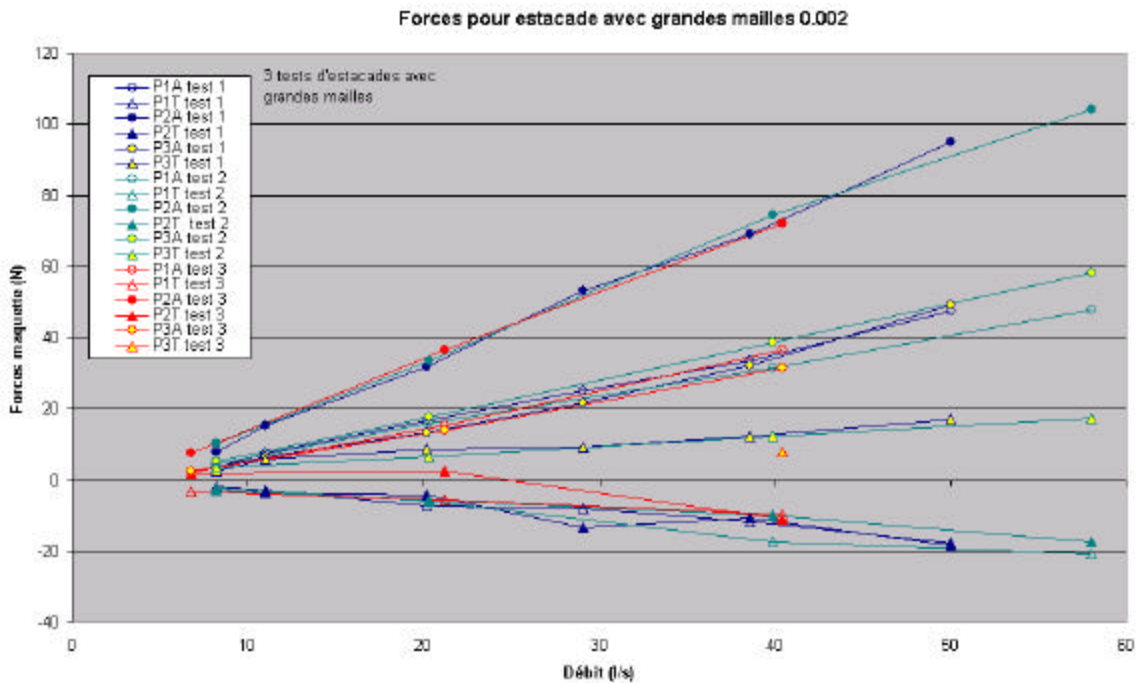


Figure 74 : Mesure des forces en fonction du débit total pour piliers avec filet à mailles de référence

Les différents essais fournissent les mêmes résultats, les courbes de chaque type de force sont assez semblables d'un test à l'autre. Ceci assure que les tests sont reproductibles. Par économie de temps, il n'est donc pas nécessaire de réaliser plus d'un seul test pour les autres structures.

Il ne sert à rien de définir une courbe débit total – force car elle ne prendrait pas en compte l'effet de la plaine inondable par laquelle peut passer une grande partie du débit. Par contre, une relation entre la hauteur d'eau et la force appliquée est plus intéressante car directement mesurable en nature. Cette analyse sera faite à la section 4.4.1.3.

Les courbes caractérisant les forces axiales des piliers 1 et 3 sont également très proches. Ces piliers situés respectivement en rive droite et en rive gauche réagissent de manière très semblable malgré la différence de structure des rives. En effet, la rive gauche est constituée de gravier fixé par du béton et formant une pente d'environ 1:1 alors que la rive droite est constituée, au niveau de la structure, d'une plaque de plexiglas verticale. On peut donc conclure que les caractéristiques des rives (rugosité, inclinaison) n'influencent pas significativement les forces axiales appliquées aux piliers.

Les forces transversales appliquées au pilier 1 sont négatives alors que celles du pilier 3 sont positives, ce qui est normal car, par convention, les forces transversales dirigées vers la rive droite sont positives. Donc, pour le pilier 1, les forces sont négatives car le filet tend à le tirer vers la gauche. C'est le phénomène inverse pour le pilier 3.

Sur le pilier 2, on remarque que les forces sont souvent négatives alors qu'elles devraient être globalement nulles. En observant la glace durant les simulations, on remarque qu'elle semble plus compactée du côté de la plaine. L'eau s'évacuant de ce côté a probablement tendance à y attirer les glaces, ce qui pourrait expliquer la dissymétrie sur ce pilier. D'autre part, si les forces appliquées sont essentiellement hydrostatiques, le niveau d'eau dans la partie la plus compactée de l'embâcle devrait être plus important, ce qui expliquerait également les forces transversales négatives sur le pilier 2.

4.4.1.3 Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau

Cette analyse tend à montrer que les forces appliquées aux piliers sont essentiellement du type hydrostatique, une donnée importante pour le dimensionnement éventuel du prototype :

$$F \propto \frac{\rho H^2}{2}$$

Où

F Force par unité de longueur (N/mm)

ρ Poids volumique de l'eau (N/mm³)

H Profondeur d'eau totale (mm)

Si les forces sont bien hydrostatiques, on devrait obtenir :

$$F_m \approx F_u \approx F_d$$

Où

F_m Force axiale mesurée sur la maquette (N)

F_u Force hydrostatique appliquée par la charge en amont de la structure (N)

F_d Force hydrostatique appliquée par la charge en aval de la structure (N)

Les mesures de niveau d'eau ont été prises sur le piézomètre 8 situé 0,225 m en amont de la structure, ce piézomètre fut choisi car pour les deux premiers tests, il s'agissait du piézomètre le plus proche de la structure. Le piézomètre 12 est le seul à fournir les niveaux en aval de la structure. Il est situé à 0,74 m de la structure.

Dans le Tableau 11, les trois colonnes de résultats correspondent aux trois piliers jaugés. La moyenne des rapports obtenus est très voisin de 1, ce qui signifie que l'hypothèse de forces hydrostatiques appliquées à la structure est bonne, les forces mesurées utilisées dans ce calcul étant prises lorsque l'embâcle est stable et donc à l'équilibre. Pour les autres tests réalisés, les valeurs obtenues sont aussi très voisines de 1 (voir les détails dans les paragraphes respectifs).

Tableau 11: Rapport entre forces mesurées et forces hydrostatiques théoriques

Débits du 23-05	Force mesurée/force théorique			Débits du 24-05	Force mesurée/force théorique		
83,4	1,03	1,14	1,00	82,9	1,25	1,43	1,44
111,6	1,06	1,08	0,94	205,6	1,03	1,08	1,13
204,5	1,19	1,14	0,97	403,8	0,96	1,14	1,18
294,2	1,13	1,20	0,98	587,0	0,98	1,06	1,19
390,5	0,94	0,97	0,91	Débits du 31-07	Force mesurée/force théorique		
506,4	1,10	1,10	1,13	68,2	0,55	0,89	0,60
Moyenne	1,04			214,8	1,03	1,22	0,94
				409,1	0,86	0,85	0,74

Si l'analyse des forces sur un pilier devait être détaillée, les forces suivantes pourraient être explicitées : *hydrostatique*, *poussée des glaces*, *poussée hydrodynamique de l'écoulement* (fonction de $V^2/2g$), *frottement des glaces sur le fond et sur les berges*. Cependant, les mesures réalisées sur les piliers ne permettent pas de faire la distinction entre ces différents types de forces. Pour donner quelques ordres de grandeur, considérons le test de référence du 31 juillet. Pour un débit total de 404 m³/s et un débit dans la rivière de 220 m³/s en unités prototype, on obtient une profondeur d'eau d'environ 8 m. Les piliers ont un diamètre de 2 m. La force hydrostatique vaut 9,81 N (627 kN en réalité) alors que les forces hydrodynamiques (écoulement d'eau autour d'un cylindre) ne sont que de 0,026 N (16,64 kN), ces dernières sont donc négligeables.

Pour ces raisons, il est raisonnable de conclure que :

les forces exercées sur une structure par un embâcle stabilisé sont essentiellement de type hydrostatique, la poussée hydrodynamique de l'eau et la poussée des glaces étant équilibrées par le frottement sur le fond et les berges.

Notons cependant que dans le cadre du dimensionnement, il faudrait aussi prendre en compte l'impact des glaces lorsque la débâcle rencontre un couvert fixe. Lorsque l'écoulement de glace rencontre les piliers, une surcharge (pic) est observable sur les piliers (voir Figure 75) due à la décélération brutale des blocs, soit la poussée dynamique des glaces freinées par le couvert fixe, les berges, le fond, la structure...

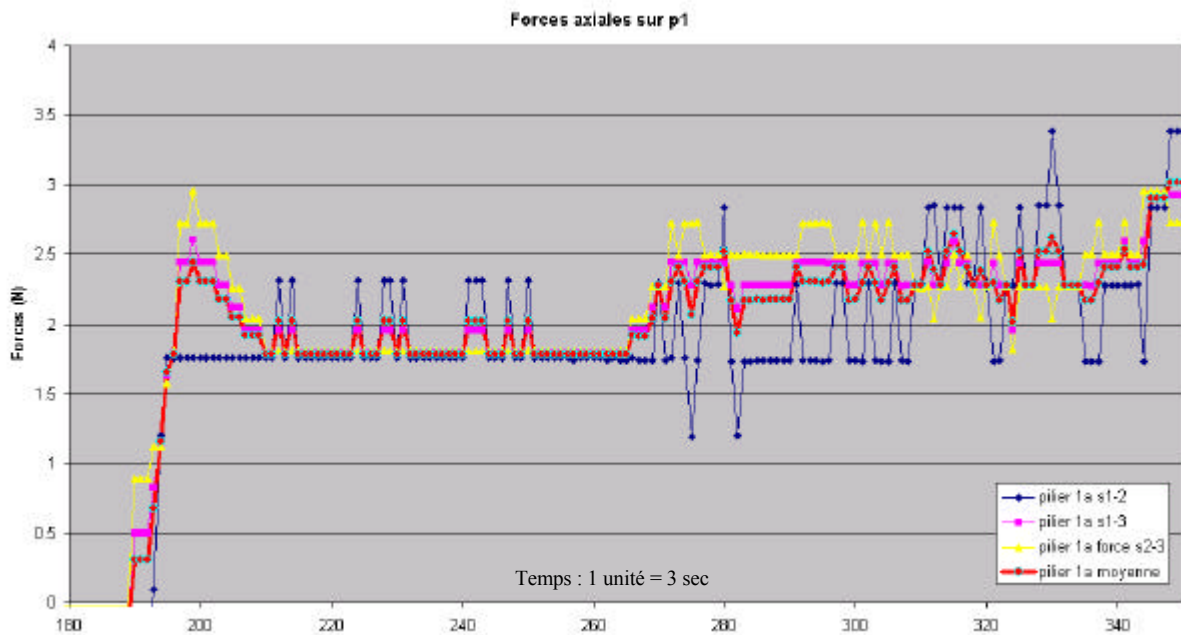


Figure 75 : Impact des glaces sur la structure pour le test de référence du 31 juillet

Sur la Figure 75, l'impact des glaces est marqué par un pic au niveau de l'abscisse 200 lorsque les premières glacent rencontrent la structure. Lorsque les premières glaces sont arrêtées, les forces dynamiques dues à l'impact diminuent (abscisse 200 à 210). Ensuite, l'accumulation de glace derrière la structure et l'augmentation du niveau d'eau provoquent une nouvelle augmentation des forces (à partir de l'abscisse 260). Les pics les plus importants se produisent en début de simulation au moment de l'impact des glaces sur les piliers. Dans la suite des tests, des pics apparaissent aussi lorsque le débit est augmenté rapidement. Le pic est sans doute dû à la vague arrivant sur les piliers, nous remarquons d'ailleurs que, lorsque l'augmentation de débit se fait progressivement, les forces augmentent aussi progressivement sans faire apparaître de pic (Figure 76).

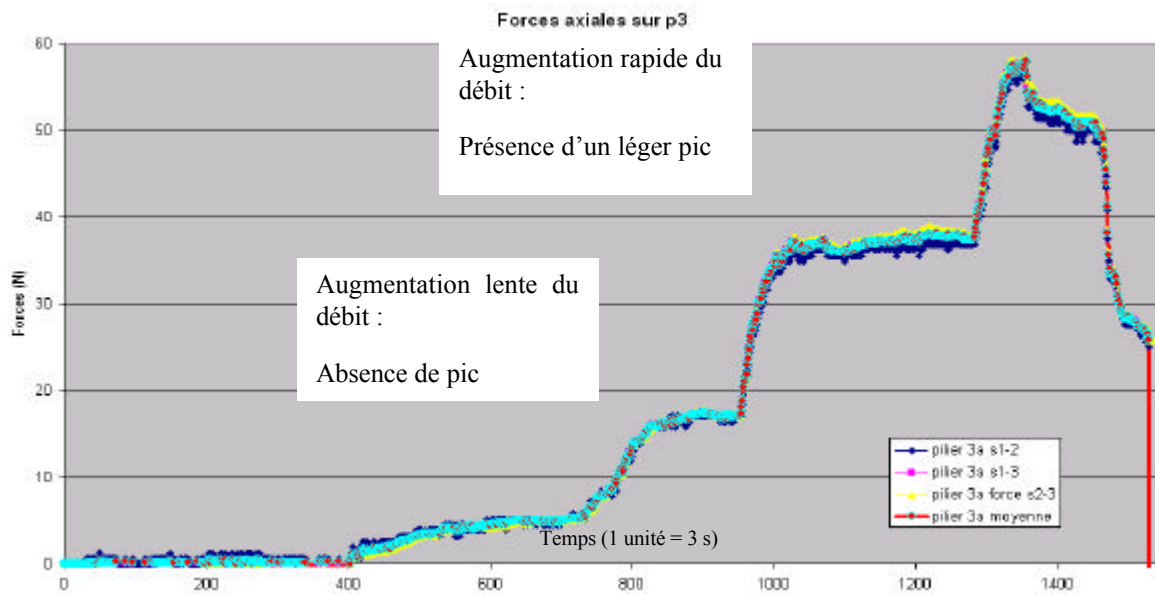


Figure 76 : Présence de pics de force lors d'un test sur la structure de référence

Pour les différents tests de piliers avec filet réalisés, les pics et les forces à l'équilibre dépassent transitoirement de 5 à 10% au maximum la force appliquée par un embâcle à l'équilibre. Cependant, il faut noter que les glaces étaient lâchées à proximité de la structure en début de test, leurs vitesses n'étaient donc pas trop importantes. Pour voir l'impact de glaces lâchées plus en amont du canal (au niveau du début de la plaine inondable), des tests ont été réalisés avec la pente de 0,0066 (Section 4.4.2.1) montrant que le pic de force peut atteindre deux fois la valeur de la force atteinte par la suite en équilibre (dépassement de 100% au lieu des 5 – 10 % précédemment cités). Il s'agit d'une valeur extrême mais irréaliste car cette situation ne peut se présenter en nature.

4.4.1.4 Analyse des distances d'application des forces

Les distances d'application permettent de calculer l'effort de renversement (moment fléchissant) qui pourrait être appliqué sur les structures étudiées. Les piliers jaugés permettent la mesure des distances d'application des forces exercées sur les piliers. Le détail des calculs est exposé dans Delcourt (2002). Seuls les résultats obtenus et les conclusions pertinentes sont résumés ici.

Le type de graphique obtenu est représenté à la Figure 73. À partir de ces graphiques, on obtient les distances d'application pour les différents débits et hauteurs d'eau. Le graphique de synthèse pour ces trois tests est présenté à la Figure 77. La légende suit la même logique que pour la Figure 74.

En plus des distances, les hauteurs d'eau au niveau de la structure (piézomètre 8) figurent également sur ce graphique. Les hauteurs en fonction des débits sont représentées par les courbes reliant les carrés. Chaque couleur correspondant à un test.

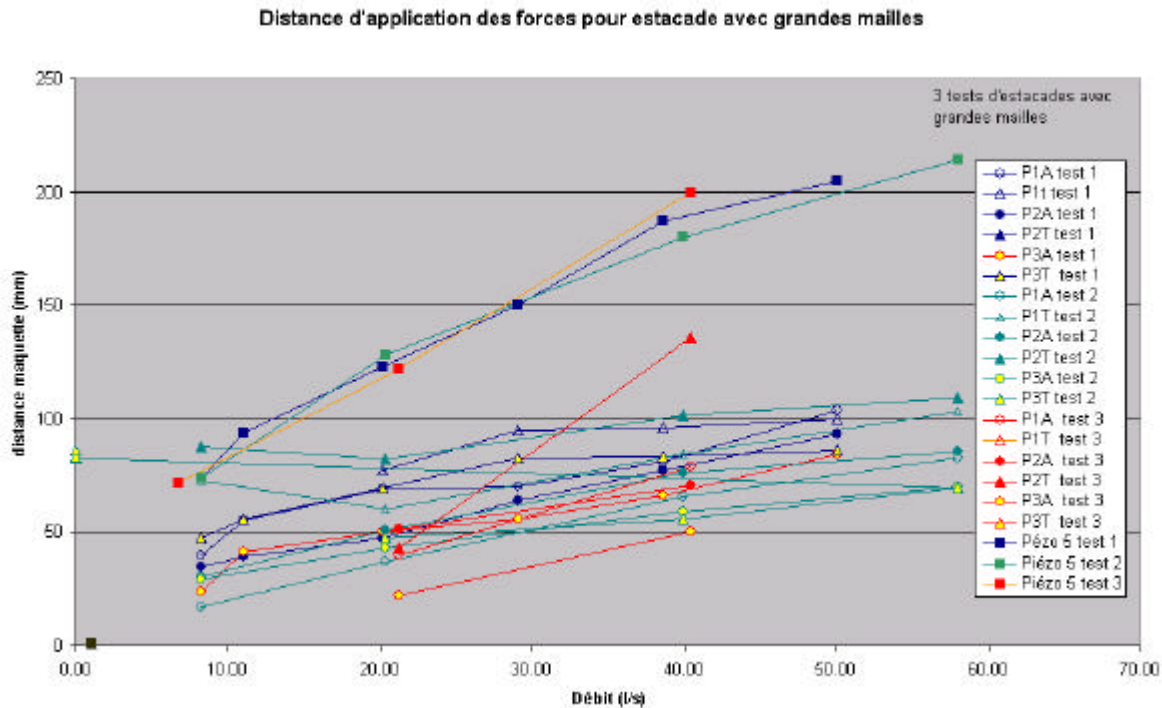


Figure 77 : Synthèse des distances d'application des forces (Unités modèle)

Les distances d'application des forces sont inférieures à la profondeur d'eau, ce qui est tout à fait logique. Si la poussée était 100% hydrostatique, ces distances devraient valoir 1/3 de la profondeur totale localement. Le Tableau 12 est obtenu en faisant le rapport entre les hauteurs d'application des forces et les hauteurs d'eau correspondantes. On y constate qu'en moyenne, les rapports de distance d'application des forces varient de 0,33 à 0,46. Les valeurs supérieures pourraient signifier que le couvert de glace déplace le centre de poussée vers la surface.

Tableau 12 : Rapports hauteur d'application des forces/hauteur d'eau - Pente de 0,002

Tests du 23 mai					
0,53	0,59	0,56	0,47	0,43	0,50
		0,63	0,63	0,51	0,49
0,47	0,41	0,39	0,43	0,41	0,45
0,32	0,44	0,41	0,37	0,35	0,41
0,64	0,59	0,56	0,55	0,45	0,42
Moyenne axiale					0,43
Moyenne transversale					0,54
Moyenne générale					0,46
Tests du 24 mai				Tests du 31 juillet	
0,23	0,29	0,36	0,39	0,33	0,40
0,99	0,47	0,47	0,48		
0,41	0,40	0,42	0,40	0,42	0,35
1,19	0,64	0,56	0,51	0,35	0,68
0,40	0,34	0,33	0,33	0,18	0,25
0,64	0,44	0,37	0,38		
Moyenne axiale				0,35	
Moyenne transversale				0,53	
Moyenne générale				0,42	
				0,30	
				0,47	
				0,33	

4.4.1.5 Autres observations

Sur le dernier test de référence réalisé, l'embâcle lâche au débit d'environ 40 l/s (400 m³/s) alors que pour les deux tests de référence précédents, la structure retenait des embâcles pour des débits supérieurs à 50-60 l/s, soit 500-600 m³/s en prototype (Figure 78). En fait, la partie du filet située en rive droite ne s'est pas bien tendue et a été écrasée par les glaces, ce qui a fait céder l'embâcle à un débit plus faible que d'habitude.

Un support qui soutiendrait les filets est donc nécessaire pour éviter le phénomène que nous venons de décrire, d'autant plus que le filet utilisé dans les simulations possédait une certaine rigidité. En nature, il ne faudrait pas compter sur la rigidité des câbles d'acier pour placer correctement le filet. Quand le lâcher intervient, les glaces s'évacuent par dessus le filet. Quand le niveau a un peu diminué, quelques glaces passent à travers le filet. Ensuite, on observe que l'embâcle se reforme, phénomène qui n'a pas été observé pour les autres tailles de mailles.



Figure 78 : Filet écrasé par les glaces

4.4.2 Comparaison des tests de référence pour des pentes de 0,2 et 0,66 %

Les comparaisons se basent essentiellement sur les forces mesurées (§ 4.4.2.1) et les distances d'application de ces forces (§ 4.4.2.2). La pente étant plus forte, les niveaux d'eau pour un même débit sont plus faibles bien que la rugosité soit légèrement plus importante comme l'illustre la Figure 79 représentant la relation hauteur – débit évaluée lors de tests de mesures du coefficient de Manning du canal pour les deux pentes testées.

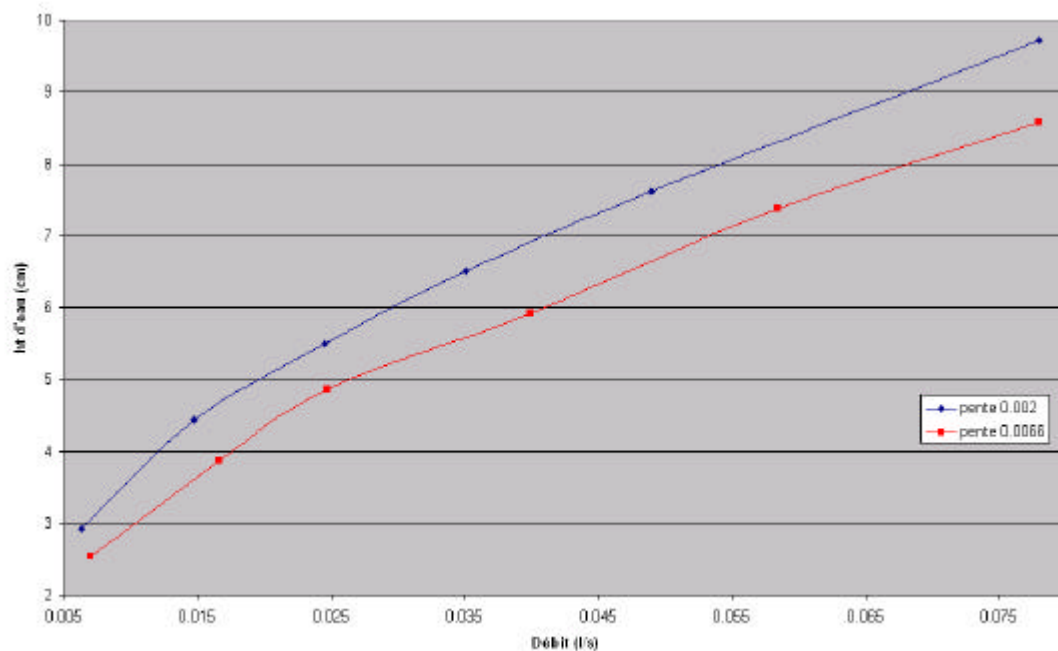


Figure 79 : Comparaison des niveaux d'eau lors des tests de mesure du coefficient de Manning pour des pentes de 0,2% et 0,66%

4.4.2.1 Les forces

La Figure 80 représente la synthèse des forces des tests de référence pour les deux pentes. Les courbes en rouge correspondent à la pente de 0,0066, celles en bleu à 0,002. Les marqueurs ronds correspondent aux mesures de forces axiales tandis que les marqueurs triangulaires représentent les forces transversales. Les marqueurs vides correspondent au pilier 1, les marqueurs pleins au pilier 2 et les marqueurs à moitié pleins au pilier 3.

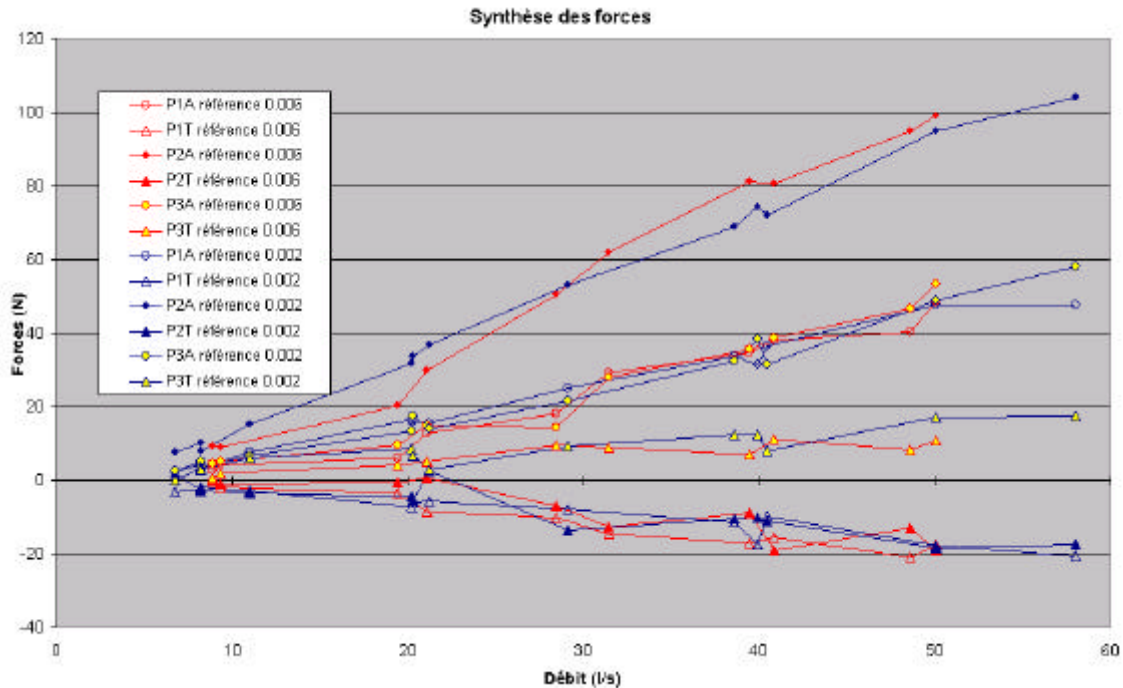


Figure 80 : Comparaison des forces en fonction du débit pour les deux pentes (Unités modèle)

Sur la Figure 80, les courbes pour chaque pilier et chaque pente se suivent très bien, ce qui signifie que les forces appliquées au pilier ne dépendent pas de la pente du canal. En effet, lorsqu'un embâcle se développe sur la structure, un plan d'eau se forme en amont. Le niveau de ce plan d'eau dépend essentiellement des caractéristiques de l'embâcle, de la plaine et du débit mais la pente n'a d'influence que sur la longueur du plan d'eau. Il reste à vérifier que les forces exercées correspondent, comme nous l'avons vu en 4.6.2, à des forces hydrostatiques. Le Tableau 13 ci-dessous donne les rapports entre les forces mesurées et les forces théoriques. Le détail des calculs est expliqué la section 4.4.1.3.

Tableau 13 : Rapport forces mesurées /forces théoriques pour l'ensemble des tests à 0,0066

Référence 1	1,09	Filet surbaissé	0,92
Référence 2	0,94	Sans plaine inondable	1,00
Filet surélevé	0,87	Avec plan d'eau	0,99
Moyenne générale			0,97

La valeur moyenne est très voisine de 1. Les forces appliquées aux structures peuvent donc être assimilées à des pressions hydrostatiques.

Les forces prises en compte dans ces calculs sont des moyennes mesurées après que l'embâcle se soit stabilisé mais lorsque les glaces arrivent sur la structure, les impacts des glaces entraînent l'apparition d'un pic de force. Ces impacts sont décrits à la section 4.4.1.3 et illustrés à la Figure 81.

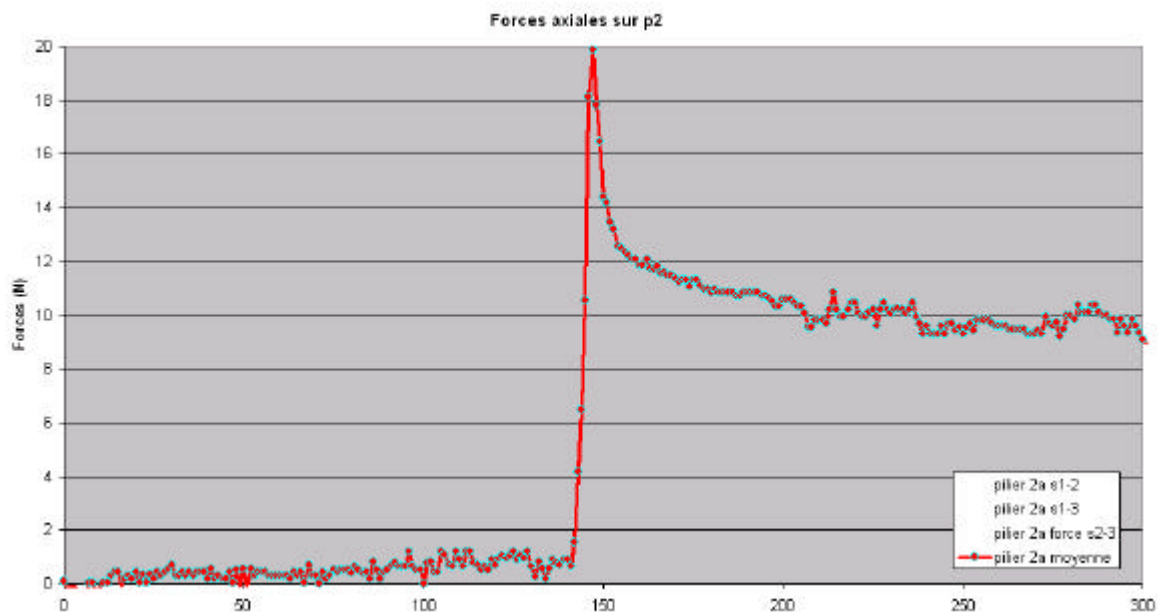


Figure 81 : Impact de glace sur la structure de référence (22 août 01) en unités modèle

Pour les forces axiales sur les tests de référence, les glaces ont été lâchées en amont de la plaine inondable et ces pics ont dépassé d'un peu plus de 100 % la valeur atteinte ensuite à l'équilibre. Mais ces pics sont excessifs car ils sont obtenus dans des conditions irréalistes en nature. En effet, sur la rivière, un couvert de glace est présent en amont de la structure pour amortir et freiner l'arrivée des glaces. Une valeur raisonnable de pic est obtenue en cours de simulation car le couvert de glace est présent dans ce cas. Les pics se présentent lorsque les augmentations de débit sont rapides. Les pics obtenus dépassent de 10 % la valeur de l'embâcle à l'équilibre (Figure 82).

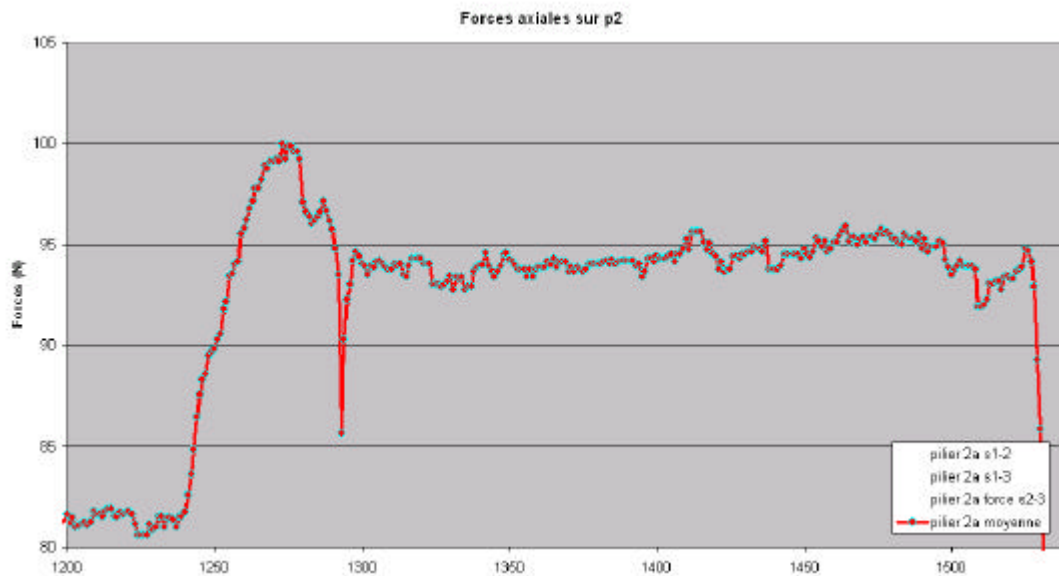


Figure 82 : Surcharge en présence d'un couvert (Test du 22 août 01) en unités modèle

4.4.2.2 Analyse des distances d'application des forces

La Figure 83 représente les hauteurs d'application des forces pour les tests effectués sur la structure de référence. Le principe de la légende est détaillé à la section 4.4.1.2.

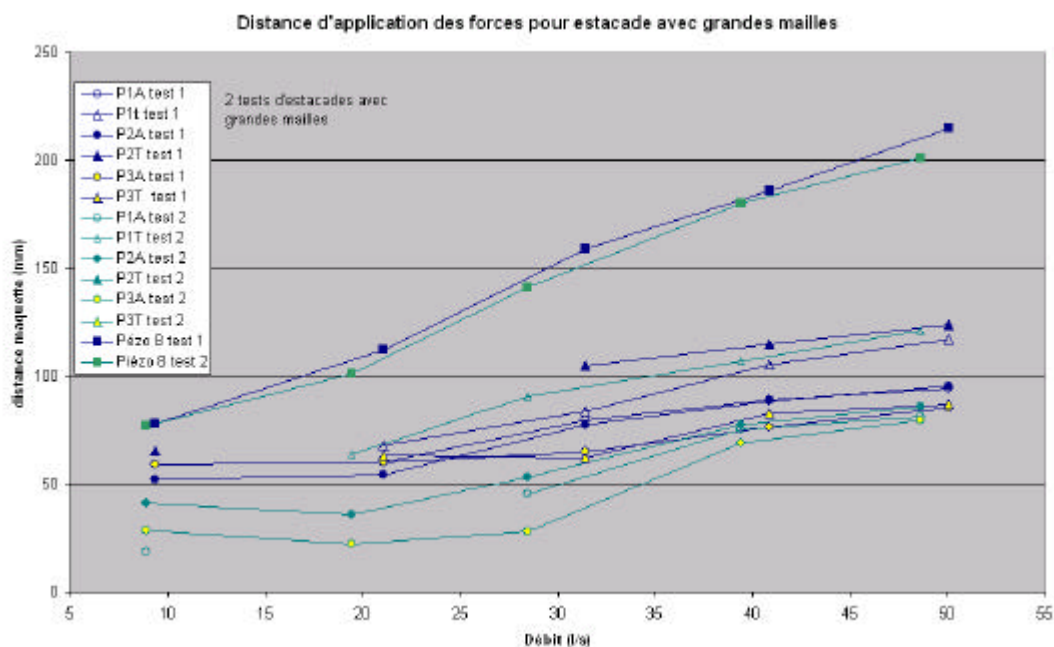


Figure 83 : Distance d'application des forces pour la structure de référence -
Pente de 0,0066 – Unités du modèle

Ces courbes sont analysées dans le Tableau 14 où nous obtenons des rapports entre hauteur d'application des forces et hauteur d'eau variant de 0,36 à 0,51. Cela représente une gamme assez large de valeurs comme nous en avons obtenues pour la pente de 0,002 (0,33 à 0,46, voir § 4.4.1.4). Durant les simulations, aucune observation visuelle ne distingue les deux tests, ces différences peuvent donc être attribuables à un écoulement sous l'embâcle ou, plus probablement à des imprécisions importantes pouvant affecter les calculs de distance.

Tableau 14 : Rapport hauteur d'application des forces / hauteur d'eau pour la structure de référence - Pente de 0,0066

	20 août	22 août
Moyenne axiale	0,49	0,32
Moyenne transversale	0,54	0,62
Moyenne générale	0,51	0,36

4.4.3 Influence de la taille des mailles

Deux autres types de filet ont été testés uniquement sur la pente de 0,2%, la hauteur et la longueur globales restant inchangées (162 x 17 cm, soit 64,8 m x 6,8 m en prototype), seules les dimensions de mailles variant : les petites mailles mesurent 4,5 x 4,25 cm (1,8 m x 1,9 m) et les plus grandes 18 x 8,5 cm (7,2 m x 3,4 m) (nommé « filet à très grandes mailles »). Ces filets sont représentés à la Figure 84.



Figure 84 : Filets à très grandes mailles et à petites mailles

Ces filets n'ont pas été retenus comme référence car leur fonctionnement semblait moins intéressant que le filet de référence à moyennes mailles 9 x 8,5 cm (3,6 x 3,4 m). En cas de lâcher d'embâcles, le filet de référence à moyennes mailles peut reformer une accumulation lorsque le niveau a diminué, ce qui représente une sécurité.

4.4.3.1 Test des petites mailles

Le filet à petites mailles constitue un véritable barrage de glace. Lorsque l'embâcle lâche, l'eau ne peut passer à travers le filet qui est bouché par les glaces, elle passe alors par-dessus le filet en entraînant les blocs provenant de l'amont. Sur les deux tests effectués, aucun embâcle n'a pu se reformer après le lâcher mais les débits auxquels les embâcles ont cédé étaient plus importants comparativement aux tests de références (plus de 70 l/s, soit 700 m³/s en unités prototype contre 50 à 60 l/s ou 500-600 m³/s pour les tests de référence).



Figure 85 : Lâcher de glace pour l'estacade avec filet à petites mailles

L'évolution des forces en fonction du débit ne diffère pas des tests de référence. On obtient pour les deux tests avec filets à petites mailles des rapports entre forces théoriques - forces mesurées de 0,96 et 1,09. Les rapports entre hauteurs d'application des forces et profondeur d'eau sont de 0,43 et 0,53.

4.4.3.2 Test de très grandes mailles

Trois tests ont été réalisés sur une estacade avec filet à très grandes mailles (deux avec un débit de base d'environ 6 l/s, soit 60 m³/s, et le dernier avec un débit de base de 20 l/s, soit 200 m³/s), de petits lâchers de glace assez fréquents ont été observés, surtout pour les débits les plus faibles. Pour les débits les plus importants, les lâchers se font plus rares mais lorsque l'embâcle cède, les glaces passent à la fois au travers et au-dessus du filet (Figure 86). Sur les trois tests effectués, l'embâcle ne s'est jamais reformé après avoir cédé.

Cette structure peut sembler intéressante car les petits lâchers fréquents permettent de diminuer les volumes de glace accumulés dans l'embâcle mais n'oublions pas qu'il s'agit de simulations et que les propriétés de la glace ne sont pas reproduites parfaitement. Il est donc impossible de prévoir exactement les caractéristiques des lâchers que pourrait avoir cette structure en nature. De plus, les riverains pourraient ressentir de l'insécurité et mal accepter le comportement d'une structure dont les lâchers de glace ne semblent pas être contrôlés.



Figure 86 : Lâcher de glace pour estacade avec filet à très grandes mailles

Cette structure a supporté des débits moins importants (de l'ordre de 45 l/s, soit $450 \text{ m}^3/\text{s}$) que la structure de référence car les très grandes mailles offrent de moins bonnes capacités de rétention que des mailles plus petites.

4.4.4 Influence de la présence d'une plaine inondable

Pour ces tests, la sortie de la plaine inondable est fermée. L'objectif est de montrer l'influence d'une plaine inondable sur les niveaux atteints par l'eau en cas d'embâcle. La Figure 87 représente la relation débit-niveau pour les tests de référence et le test sans plaine inondable pour des pentes de 0,2% et 0,66%.

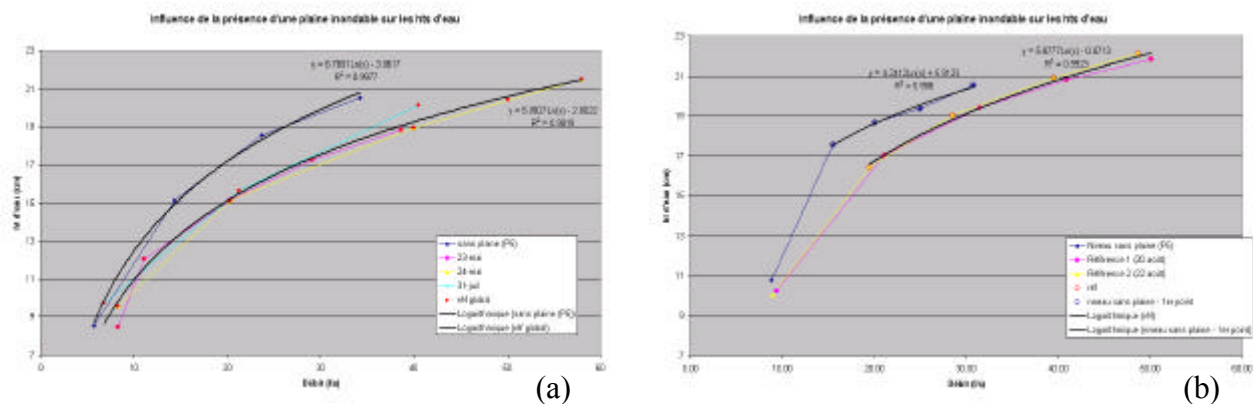


Figure 87 : Influence de la présence d'une plaine inondable sur les hauteurs d'eau pour une pente de 0.2% (a) et 0.66% (b)

Pour les faibles débits, la présence d'une plaine inondable n'a aucune influence car la rivière coule encore dans son lit mineur. Les différences apparaissent dès que l'eau envahit la plaine. Lorsque la plaine n'est plus disponible, l'eau ne peut plus s'évacuer de ce côté, les niveaux sont alors plus importants, ce qui est illustré à la Figure 87. La conséquence la plus directe est que l'embâcle cède beaucoup plus tôt car à débit équivalent, le niveau est beaucoup plus haut. Le graphique montre que l'embâcle a cédé à 34 l/s alors que tous les tests de référence ont cédé à des débits supérieurs.

Après avoir ajusté une courbe de corrélation sur chacune des situations, le rapport entre les hauteurs obtenues sans plaine et celles avec plaine a pu être calculé. Un rapport de 1,135 a été obtenu, ce qui signifie que pour une pente de 0,2 %, les profondeurs en absence de plaine sont 14% supérieures à la situation avec plaine d'inondation. Pour la pente de 0,66 %, l'augmentation est de 10%.

4.4.5 Influence de la hauteur du filet

Ce test étudie l'influence de la position du filet sur la capacité de rétention d'un embâcle. Deux configurations ont été testées : un filet surélevé placé à 20 cm (8 m) du fond de la rivière (deux fois la hauteur de la plaine) et un filet surbaissé placé à 10 cm (4 m) du fond (à la hauteur de la plaine). Les tests semblent montrer que la gamme de hauteur testée n'influence pas significativement la hauteur de rétention de l'embâcle, les différences observées étant du même ordre de grandeur que la dimension des blocs de glace. Cependant, les tests n'étaient pas assez nombreux pour tirer des conclusions définitives par rapport à l'influence de la hauteur du filet sur la hauteur de rétention de l'embâcle.

4.4.6 Influence de la présence d'un seuil

La création d'un plan d'eau au niveau de l'estacade est censée ralentir les glaces et quand c'est possible favoriser la prise d'un couvert solide, deux facteurs assurant un meilleur fonctionnement de la structure. Cette technique est surtout utilisée pour les estacades flottantes où la vitesse de l'écoulement est un des principaux facteurs influençant l'efficacité de la structure. Pour créer ce plan d'eau, le volet contrôlant le niveau de sortie de la rivière a été relevé jusqu'à ce que les lectures piézométriques nous indiquent la présence du plan d'eau et d'un écoulement dit « graduellement varié ». Bien sûr, la présence d'un couvert solide n'est pas prise en compte ici.

La Figure 88 illustre les niveaux relevés sur les piézomètres durant la simulation. Le premier niveau (100,017) est mesuré à l'eau libre. Sur ce graphique, nous avons ajouté la ligne d'eau du test pour filet abaissé où nous n'avons pas créé de plan d'eau (ligne 105,792), ce qui permet de montrer la présence du plan d'eau entre les abscisses 0 et 1,88. Le plan d'eau est environ 0,7 cm plus haut que le niveau normal. Les autres lignes du graphique correspondent aux niveaux avec embâcles. Au niveau des débits, l'embâcle cède au même débit que les tests de référence, c'est-à-dire aux environs de 50 l/s ($500 \text{ m}^3/\text{s}$). Au niveau des forces, aucune distinction ne peut être faite entre ce test et les tests de référence.

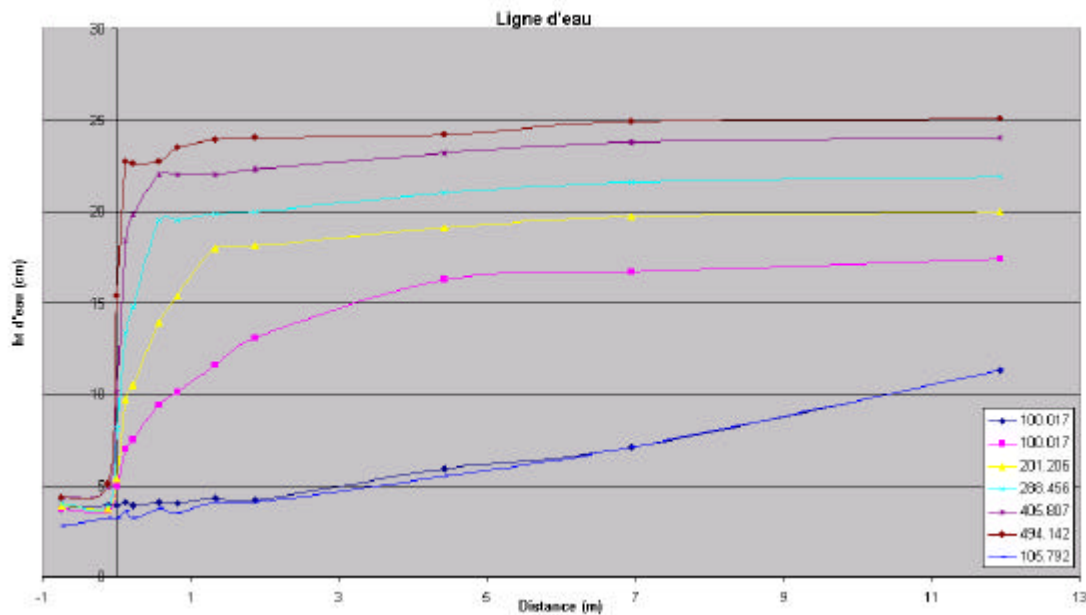


Figure 88 : Lectures piézométriques du test de sensibilité à la présence d'un plan d'eau (Unités modèle)

Les niveaux obtenus pour ce test ont aussi été comparés avec ceux des tests de référence (Figure 89). Sur les points obtenus, nous avons ajusté des courbes de régression qui ont permis d'évaluer les différences entre ces deux courbes.

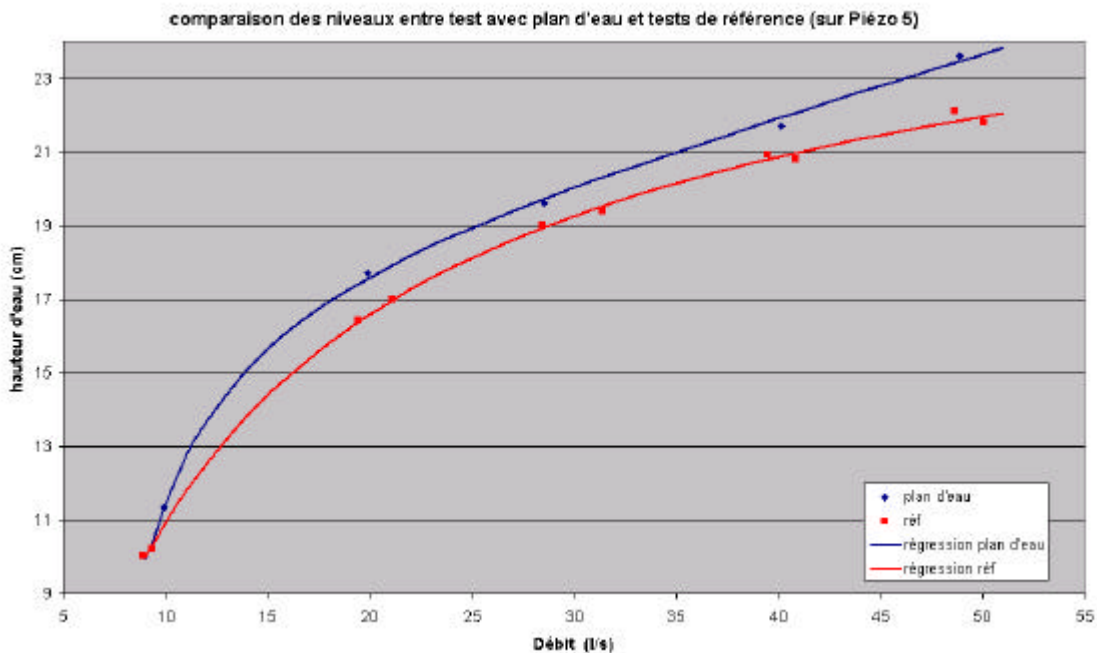


Figure 89 : Hauteur d'eau pour le test avec plan d'eau et le test de référence (Unités modèle)

Les niveaux pour le test avec plan d'eau sont supérieurs de 1 cm (40 cm) en moyenne aux niveaux des tests de référence. Cette augmentation ne doit pas être due à la présence du plan d'eau pour deux raisons. Premièrement, le plan d'eau n'affecte que les deux premiers mètres en amont de la structure; or nous voyons sur la Figure 89 que l'augmentation de 1 cm est présente sur l'ensemble du canal. Deuxièmement, l'écoulement au pied de l'embâcle est de type *torrentiel* : il s'agit d'une chute d'eau, le niveau en aval de l'embâcle ne peut donc influencer le niveau amont. Cette augmentation est plus probablement due à une compaction différente des blocs constituant l'embâcle, ce qui a entraîné une diminution de la perméabilité et donc une augmentation des niveaux. Les niveaux atteints durant les embâcles étant nettement supérieurs à la surélévation du plan d'eau et la vitesse d'approche n'étant pas un critère d'efficacité des filets, on peut conclure qu'une surélévation du plan d'eau au niveau de la structure ne doit pas affecter ses capacités de rétention.

4.5 Analyses des tests pour une pente de 1.1 %⁸

Afin de répondre plus adéquatement à la problématique de la rivière Montmorency, il apparaissait nécessaire de conduire un programme réduit de tests, choisis parmi les plus prometteurs en majorant la pente jusqu'à une valeur semblable à celle qu'on rencontre dans les biefs d'écoulement sélectionnés.

4.5.1 Tests réalisés

Les mesures de hauteurs d'eau montrent que la pente effective du canal est de 1,12 %. Le coefficient de Manning est en moyenne de 0.024, ce qui correspond à un coefficient de 0,044 en nature.

Tableau 15 : Coefficient de Manning en fonction du débit $n(Q)$

Débit maquette (l/s)	10	20	29	39
$n(Q)$	0,025	0,024	0,023	0,021
n moyenne	0,0239	-	-	-
n en prototype	0,044	-	-	-

⁸ Les résultats des tests réalisés avec une pente de 1,1% ont été obtenus à la toute fin de la rédaction de ce rapport, ce qui explique que la matière présentée n'est pas aussi bien intégrée dans le document.

On constate que le coefficient de Manning diminue lorsque le débit augmente. La hauteur devenant de plus en plus importante, l'effet de la rugosité du fond devient de moins en moins dominant, ce qui explique la diminution du Manning.

Les tests réalisés (Tableau 16) étudient l'influence de la présence de la plaine, de la hauteur du filet et de la longueur du filet. Le tableau suivant détaille les conditions des tests réalisés.

Tableau 16 : Plan de test pour les essais d'estacades fixes avec filet et une pente de 1,1%

Test	Plaine	Hauteur du filet Maquette (<i>prototype</i>)
1 – 1 ^{er} novembre am	Fermée	15 cm (6 m)
2 – 1 ^{er} novembre pm	Fermée	10 cm (4 m)
3 – 2 novembre am	Ouverte	10 cm (4 m)
4 – 2 novembre pm	Fermée	5 cm (2 m)
5 – 5 novembre am	Fermée	2.5 cm (1 m)
6 – 5 novembre pm*	Ouverte	10 cm (4 m)
7 – 5 décembre*	Fermée	7.5 cm (3 m)

* tests réalisés avec un filet raccourci à 148 cm au lieu de 162 cm (maquette)

4.5.2 Forces et hauteurs d'application

Le Tableau 17 montre les forces et les distances d'application pour les essais d'estacade fixe avec filet avec une pente de 1,1%.

Tableau 17 : Forces et distances d'application avec une pente de 1,1%

Test	F_g	F_{max}	H_g	hauteur maximum
1	0,65	0,58	0,43	0,36
2	1,47	0,52	0,54	0,32
3	1,19	0,28	0,42	0,26
4	1,16	0,36	0,39	0,21
5	1,17	0,16	0,50	0,23
6	1,21	0,45	0,46	0,27
7	1,39	0,42	0,43	0,23

Ce tableau montre que le rapport forces mesurées/forces théoriques calculé avec les hauteurs d'eau au niveau de la structure (F_8 - piézomètre 8) est supérieur à 1, les forces appliquées sont donc un peu plus importantes qu'une force simplement hydrostatique mais la mesure de niveau utilisée dans ce calcul se situe dans une zone de transition importante des niveaux d'eau. Le même calcul a donc été réalisé avec la hauteur d'eau maximale. Dans ce cas, le rapport vaut environ 0,44 si la valeur de 0,16 n'est pas prise en compte car pour ce test, le filet a été enfoncé par les glaces et l'embâcle ne fut que temporairement retenue. Cette valeur de 0,44 signifie qu'en moyenne plus de la moitié des forces hydrostatiques sont reprises par les appuis de l'embâcle sur le fond et les berges.

Au niveau des distances d'application, le rapport hauteur d'application de la force/hauteur d'eau calculé avec les hauteurs d'eau au niveau de la structure (H_8 - piézomètre 8) vaut environ 0,45 comme ce qui avait été obtenu avec la pente de 0,2 % et 0,66%. Si le rapport est calculé avec les niveaux d'eau maximums, le rapport vaut environ 0,27 ce qui signifie que la hauteur d'application des forces vaut un peu plus du quart de la hauteur d'eau maximale dans l'embâcle.

4.5.3 Relation niveau-débit dans l'embâcle

À partir des mesures de niveaux et de débits de chaque test, un graphique a été construit pour représenter les niveaux maximums observés pour les différents débits testés. Lorsque la plaine est ouverte, seul le débit passant dans l'embâcle est pris en compte.

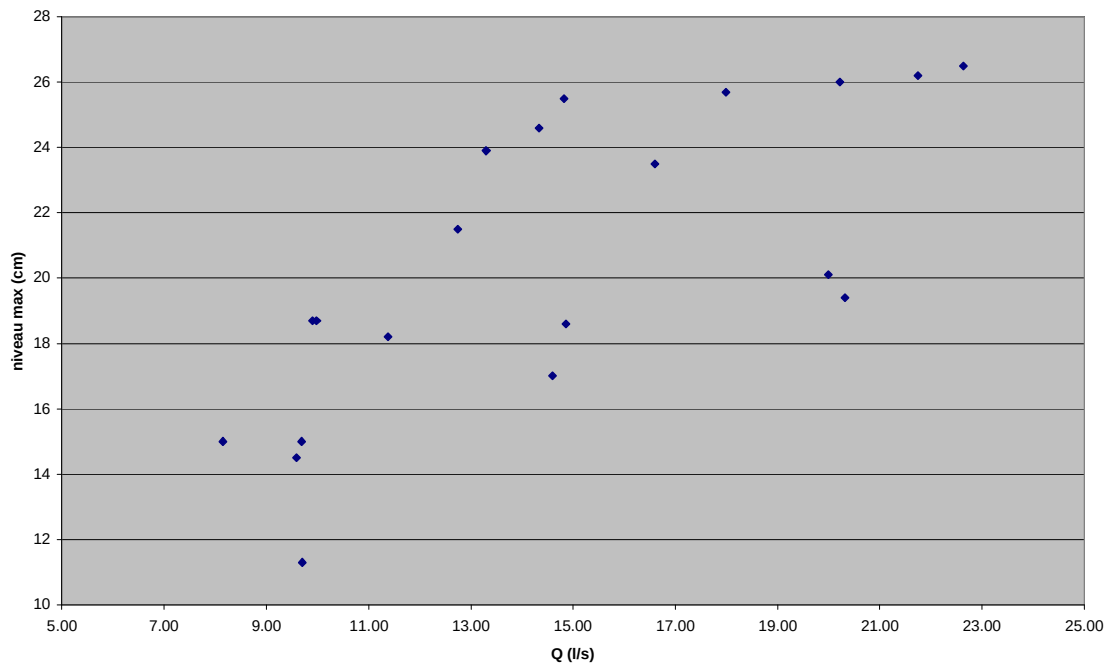


Figure 90 : Valeurs observées de la relation hauteur-débit dans un embâcle

La Figure 90 montre que les niveaux atteints peuvent être très importants même si les débits ne sont pas énormes. Le niveau de l'embâcle peut atteindre 25 cm pour des débits de 15 l/s, ce qui

correspond à l'échelle 1/40 à un embâcle de 10 m pour un débit de 150 m³/s. Pour des débits plus faibles, de l'ordre de 9 l/s (90 m³/s sur prototype), le niveau d'embâcle vaut environ 15 cm (6 m), ce qui correspond aux ordres de grandeur observés sur la Montmorency.

4.5.4 Influence de la hauteur du filet

La Figure 91 identifie les différentes hauteurs de filet testées. Pour chacun de ces tests, la hauteur maximale de l'embâcle et le débit correspondant ont été mesurés.

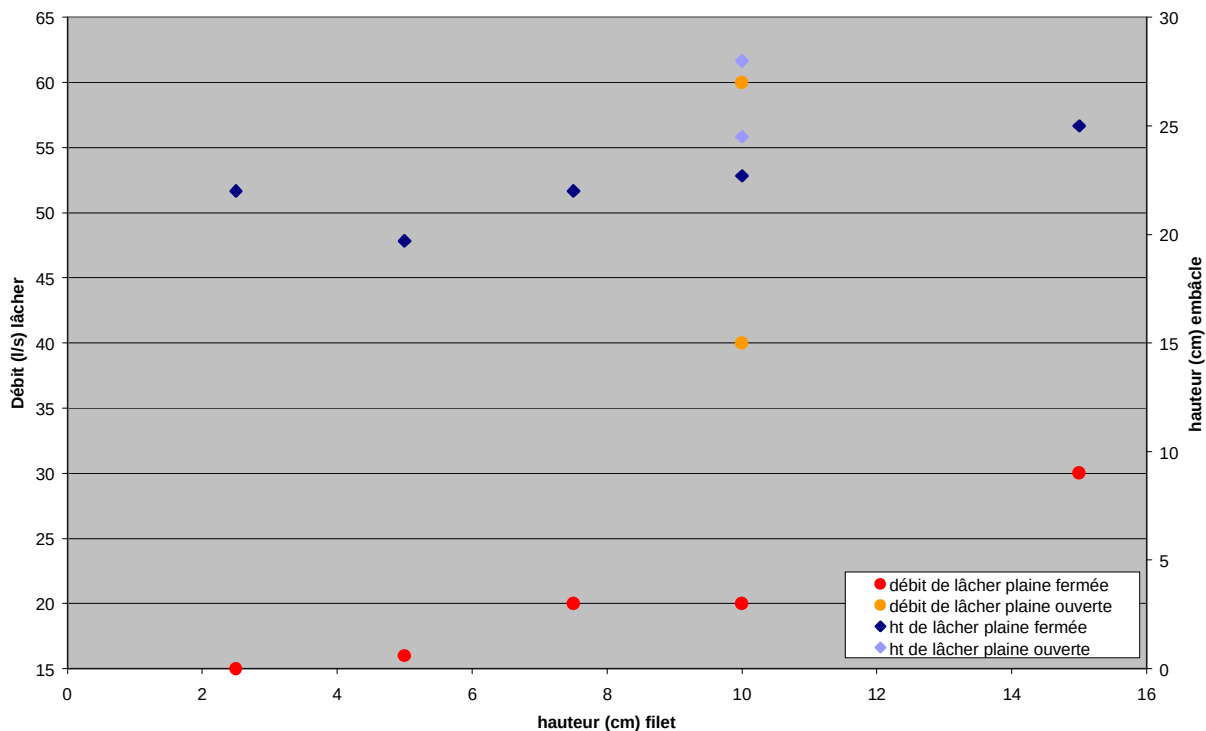


Figure 91 : hauteur et débit de lâcher en fonction de la hauteur du filet

On voit que les hauteurs et les débits de lâcher ne sont pas fortement dépendants de la hauteur du filet. Évidemment, les débits et niveaux maximaux augmentent lorsque la hauteur augmente. Cette tendance est surtout marquée pour les débits: si la hauteur du filet triple (5 $\leq$ 15 cm, soit 2 $\leq$ 6 m prototype), le débit maximal retenu double (16 $\leq$ 30 l/s, soit 160 $\leq$ 300 m³/s) alors que la hauteur maximale n'augmente que de 5 cm ou 2 m (20 $\leq$ 25 cm, soit 8 m $\leq$ 10 m).

4.5.5 Conclusions pour les tests avec une pente de 1,1%

Les tests réalisés à une pente de 1.1% sont déterminants pour évaluer la faisabilité d'installer une structure dans la rivière Montmorency vis à vis le meilleur site identifié soit en amont du 300

Sainte-Brigitte.

1. Tous les tests démontrent que la structure estacade-fixe avec filet réussit à arrêter la glace et former un embâcle malgré la pente élevée. Les embâcles formés pouvaient cependant atteindre des hauteurs de *10 m prototype* (25 cm en maquette) pour un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. Les tests démontrent que le débit retenu dépend directement de la hauteur du filet. Par exemple, un filet 7,5 cm de haut (*3 m en nature*) réussit à retenir les embâcles produits à des débits inférieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$, soit notre débit de conception retenu. Si on voulait un niveau de protection plus élevé, il s'agirait d'augmenter la hauteur du filet. Par exemple, un filet installé à une hauteur de 15 cm (*6 m*) réussit à retenir un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. Un filet plus tendu (148 cm, soit 12% plus long que la distance entre les piliers) offre une meilleure performance que les autres tests réalisés avec un filet plus long (24% plus long que la distance entre piliers). Un filet plus tendu réussit à mieux capter les glaces et reste plus haut au centre quand les poussées sont plus fortes à des débits plus élevés.
4. Les forces appliquées sur la structure sont beaucoup supérieures (jusqu'à 150%) à la poussée hydrostatique de l'eau locale et représentent, en moyenne, 44% des poussées correspondant aux niveaux maximums formés plus hauts par l'embâcle. Pour des fins de conception, les poussées maximales enregistrées représentaient une hauteur d'eau équivalente à 8 m comparée à des hauteurs maximums d'embâcle de 10 m.
5. Le niveau d'application de la force était très variable et pouvait atteindre 58% de l'élévation du niveau d'eau local. Cette variabilité nécessite que chacun des câbles devra être conçu pour retenir à lui seul un très bon pourcentage de la force totale plus un facteur de sécurité.

4.6 Résultats des essais : estacades fixes sans filets

Les estacades fixes sans filet appelées aussi « estacades-peignes » sont constituées d'une série de piliers placés en travers de la rivière. En maquette, les piliers mesurent 5 cm de diamètre (*2 m*) et sont recouverts de papier sablé pour mieux simuler le frottement entre les glaces et le béton de piliers prototypes. Deux espacements ont été testés avec ou sans gros bloc au niveau de la structure pour simuler l'existence d'un couvert. Les structures testées comportaient donc :

?? 7 piliers (espace libre : 23,3 cm, soit 9,3 m à l'échelle 1/40)

?? 7 piliers assortis de gros blocs

?? 10 piliers (espace libre : 15,6 cm, soit 6,2 m à l'échelle 1/40)

?? 10 piliers assortis de gros blocs

Le test sur une structure à 7 piliers a échoué, la glace ne s'étant pas arrêtée du tout sur l'estacade. La structure à 10 piliers a un peu retenu les glaces mais bien moins efficacement que la structure de référence avec filet. L'embâcle s'est formé au débit de base mais n'a pas tenu durant la montée à 15 l/s ($150 \text{ m}^3/\text{s}$) alors que la référence supporte des débits de 50 à 60 l/s ($500\text{-}600 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.6.1 Estacade de 10 piliers avec gros blocs

Pour ce test, un couvert constitué de gros blocs a été installé juste en amont de l'estacade. Le reste de la glace a ensuite été envoyé pour former l'embâcle.



Figure 92 : Simulation d'une structure à 10 piliers avec gros blocs en avant

Pour le premier débit, la glace forme un embâcle derrière le couvert de gros blocs. Ensuite, plus le débit augmente, plus l'embâcle progresse à travers le couvert de gros blocs pour finalement se retrouver contre les piliers, comme on peut le voir sur les courbes de lignes d'eau (Figure 93) relevées aux piézomètres. Le test est arrêté au débit de 80 l/s ($800 \text{ m}^3/\text{s}$) environ car le canal risque alors de déborder bien que l'embâcle tienne encore.

Si ce test semble avoir bien fonctionné, il est à prendre avec beaucoup de précautions car les gros blocs ne peuvent simuler la véritable résistance et le mode de fracture d'un couvert réel. Les gros blocs ont un diamètre plus important que l'espace libre entre les piliers, ils peuvent donc très facilement bloquer le passage pour des blocs de plus petite taille. De plus, les gros blocs utilisés dans la maquette sont incassables, ce qui n'est pas le cas pour des plaques de glace réelles, surtout pour des plaques de glace de cet ordre de grandeur.

Pour les forces, le rapport forces mesurées/forces théoriques est de 1,69 en moyenne. L'hypothèse de forces hydrostatiques n'est plus acceptable dans ce cas, mais n'oublions pas que dans ce test, la structure supporte non seulement la pression de l'eau sur les piliers mais aussi la poussée de l'embâcle transmise à la structure par le couvert de gros blocs. Pour le rapport entre la distance d'application des forces et la profondeur d'eau, la valeur obtenue est de 0,46, ce qui est très proche de la valeur moyenne (0,45) obtenue pour l'ensemble des tests sur une pente de 0,002.

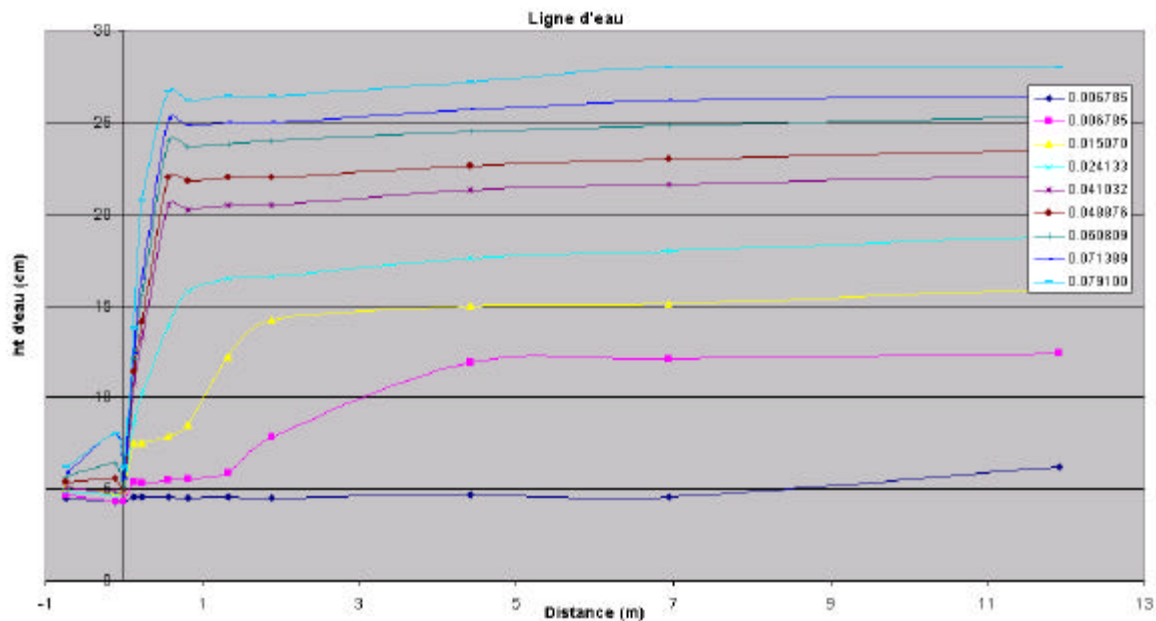


Figure 93 : 10 piliers avec gros blocs - Évolution des lignes d'eau

Nos tests de piliers seuls ne donnent pas de résultats semblables à ceux de Lever et coll. (1997) car les espacements testés étaient plus importants (6 à 9 m au lieu de 4,3 m pour Lever). De plus, notre plastique pourrait avoir un angle de frottement plus faible que le sien, ce qui signifie que les accumulations se fixent moins facilement dans les conditions où nous avons travaillé. Notons également que le plastique est incassable alors que les glaces naturelles de Lever et coll. pouvaient se fracturer et donc simuler un comportement plus réaliste.



Figure 94 : 10 piliers seuls pour un débit de 600 m³/s (prototype)

En fait, la capacité de rétention de ce type de structure dépend, entre autres, de la résistance de la glace qui ne peut être simulée avec notre plastique. Les tests les plus pertinents pour ce type de structure restent donc ceux réalisés par Lever et coll. (1997 et 2000).

4.6.2 Rapports entre forces mesurées et forces théoriques

Le Tableau 18 regroupe les rapports entre forces mesurées et forces théoriques pour l'ensemble des tests réalisés sur une pente de 0,002.

Tableau 18 : Rapports forces mesurées/forces théoriques pour l'ensemble des tests à pente de 0,002

Référence 1	1,06	Filet surélevé	0,97
Référence 2	1,16	Sans plaine inondable	0,98
Référence 3	0,85	Avec gros blocs en avant	1,07
Petites mailles 1	1,09	7 piliers sans filet	-
Petites mailles 2	0,96	10 piliers sans filet	-
Très grandes mailles 1	0,90	10 piliers avec gros blocs en avant	1,69
Très grandes mailles 2	0,83	7 piliers avec gros blocs en avant	-
Très grandes mailles avec gros débit de base	1,26		
		Moyenne générale	1,06

Notons que la moyenne tombe à 1,01 si la valeur de 1,69 n'est pas prise en compte. Les forces appliquées aux structures peuvent donc être assimilées à des pressions hydrostatiques.

Le Tableau 19 regroupe les rapports entre forces mesurées et forces théoriques pour l'ensemble des tests réalisés sur une pente de 0,0066. La moyenne générale de 0,97 confirme les résultats obtenus pour la pente de 0,002 (§ 4.6.2). La force exercée par un embâcle peut encore ici être assimilée à une pression hydrostatique.

Tableau 19 : Rapports forces mesurées/forces théoriques pour l'ensemble des tests à 0,0066

Référence 1	1,09	Filet rehaussé	0,87
Référence 2	0,94	Sans plaine	1,00
Filet abaissé	0,92	Plan d'eau	0,99
		Moyenne générale	0,97

4.6.3 Rapports entre les hauteurs d'application des forces et les niveaux d'eau

Le Tableau 20 regroupe les rapports entre distances d'application des forces et niveaux d'eau pour l'ensemble des tests réalisés avec une pente de 0,002. La valeur moyenne axiale (Axial dans le Tableau 20) est calculée à partir des distances déduites des jauges axiales, idem pour les valeurs transversales. La valeur moyenne (moy.) est calculée sur l'ensemble des valeurs obtenues, il ne s'agit pas de la moyenne de « Axial » et « Transversal ». En fonction de la méthode de calcul de la moyenne, la force est considérée s'appliquant à environ 0,45 fois la profondeur. Pour demeurer conservateur, la valeur de 0,48 peut être retenue pour ce paramètre.

Tableau 20 : Rapports hauteurs d'application des forces/niveaux d'eau – Ensemble des tests avec une pente de 0,002

Test	Axial	Trans.	Moy.	Test	Axial	Trans.	Moy.
Référence 1	0,54	0,46	0,46	Filet surélevé	0,51	0,52	0,51
Référence 2	0,53	0,42	0,42	Sans plaine inondable	0,44	0,56	0,48
Référence 3	0,47	0,33	0,33	Avec gros blocs en avant	0,46	0,49	0,47
Petites mailles 1	0,39	0,46	0,43	7 piliers sans filet	-	-	-
Petites mailles 2	0,48	0,62	0,53	10 piliers sans filet	-	-	-
Très grandes mailles 1	0,40	0,28	0,35	10 piliers avec gros blocs en avant	0,48	0,43	0,46
Très grandes mailles 2	0,34	0,65	0,42	7 piliers avec gros blocs en avant	-	-	-
Très grandes mailles avec gros débit de base	0,48	0,54	0,51				
Moyenne générale					0,46	0,48	0,45

Le Tableau 21 regroupe les rapports entre distances d'application des forces et niveau d'eau pour l'ensemble des tests réalisés sur une pente de 0.0066. La valeur moyenne axiale (Axial dans le Tableau 21) est calculée à partir des distances déduites des jauges axiales, idem pour les valeurs transversales. La valeur moyenne est calculée sur l'ensemble des valeurs obtenues, il ne s'agit pas de la moyenne de « Axial » et « Transversal ».

Les valeurs obtenues pour la pente de 0,0066 varient beaucoup plus que celles pour la pente de 0,002; cependant, une valeur de 0,45 est acceptable car elle constitue une sécurité par rapport à la moyenne de 0,36 sans toutefois être excessive. De plus, des coefficients de sécurité étant pris systématiquement en construction, il ne sert à rien de surévaluer prématurément cette valeur.

Tableau 21 : Rapports hauteurs d'application des forces/niveaux d'eau - Pente de 0.0066

Test	Axial	Trans.	Moy.	Test	Axial	Trans.	Moy.
Référence 1	0,49	0,54	0,51	Filet rehaussé	0.31	0.47	0.36
Référence 2	0,32	0,64	0,36	Sans plaine	0.43	0.44	0.43
Filet abaissé	0,25	0,40	0,29	Plan d'eau	0.17	0.65	0.22
Moyenne générale					0,33	0,52	0,36

4.6.4 Proportion du débit total passant dans la plaine

Les déversoirs triangulaires (voir § 4.2.4.5) permettent d'étudier séparément les débits passant dans la plaine et dans la rivière. La Figure 95 présente le rapport entre le débit de la plaine et le débit total en fonction du débit total. Pour ce calcul, le débit total est la somme des débits mesurés dans la plaine et la rivière. Quand le débit est faible, l'ensemble du débit passe entièrement dans la rivière, le rapport est donc de 0%. Ensuite, lorsque le niveau monte pour atteindre le plein bord, une part de plus en plus importante de débit total passe dans la plaine. La Figure 95 montre que la part du débit total passant par la plaine atteint rapidement 40 % pour finir à environ 50-55 % aux débits les plus importants.

La dispersion des points peut être due aux erreurs de lecture sur les tiges limnimétriques des piézomètres, et aussi à la forme et à la disposition de l'embâcle qui peuvent influencer significativement la répartition des écoulements.

Le débit de la plaine n'est pas influencé par sa largeur de sortie. Pour les premiers tests, l'ensemble de la sortie était libre. Puis, par manque de paniers pour la récupération de la glace, la taille de la sortie a été restreinte à une largeur de 86,5 cm (*34,6 m en prototype*) mais les courbes de la Figure 95 ne montrent aucune tendance différente entre les différents tests. En effet, il suffit de se rendre compte que, pour des débits assez importants, l'embâcle se situe bien au-dessus de la plaine (parfois plus de 10 cm ou 4 m au-dessus), le niveau d'eau dans l'embâcle est donc lui aussi bien supérieur à la plaine. L'eau a donc tendance à « chuter » dans la plaine et, si la fermeture de la plaine peut influencer le niveau d'eau dans celle-ci, le débit dépend essentiellement de l'embâcle (porosité, perméabilité), du niveau dans la rivière et de la longueur disponible dans la rivière pour que l'eau puisse rentrer dans la plaine.

Sur le graphique correspondant, on voit que le pourcentage d'eau passant dans la plaine diminue avant la rupture de l'embâcle. Cette diminution peut-être expliquée par le fait que la partie de l'embâcle appuyée sur le fond est moins importante lorsque le niveau est important, l'eau peut donc traverser la glace plus facilement.

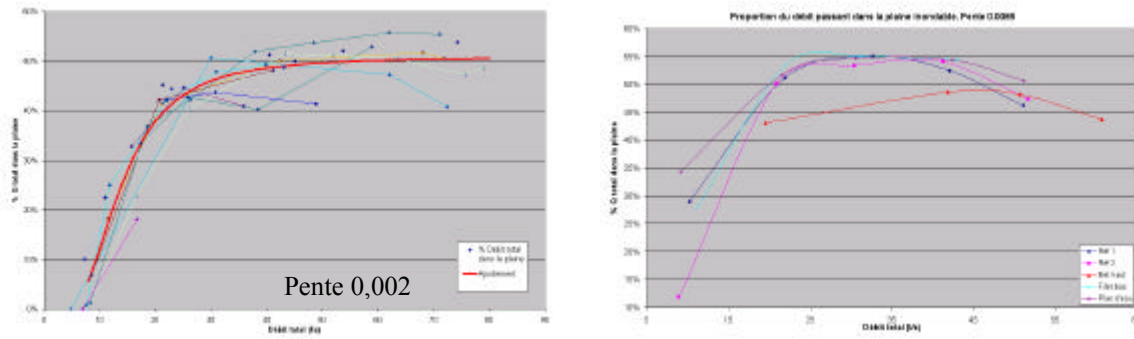


Figure 95 : Proportion du débit total passant dans la plaine

4.7 Conclusions des essais en maquette : estacades fixes

L'objectif principal de cette étude était, rappelons-le, de développer des structures capables de retenir des embâcles dans des rivières à forte pente ($>0,002$). Cette étude analyse les structures pour des pentes allant de 0,002 à 0,012. Ces structures doivent aussi être économiques et sans impact significatif pour l'environnement. Ci-après, nous allons tenter de résumer les conclusions et remarques de conception inhérentes au programme d'essais des estacades fixes avec ou sans filet.

4.7.1 Avantages comparatifs du concept d'estacade fixe avec filet

Le concept d'estacade fixe avec filet présente de nombreux avantages par rapport aux structures conventionnelles de type barrage, estacade flottante ou estacade-peigne (fixe sans filet):

1. L'estacade fixe à filet est de loin moins coûteuse (nous reviendrons sur les coûts plus loin) et invasive dans le cours d'eau que ne l'est la solution barrage bien que l'efficacité de cette dernière soit plus facile à garantir.
2. Il est connu que les estacades flottantes classiques (sans filet) ne sont pas fiables pour des conditions de fortes pentes où les écoulements sont trop rapides (la vitesse moyenne de l'écoulement ne doit pas dépasser 0,6 à 1,4 m/s selon le Zufelt & Ettema (1996) car elles sont conçues pour former un couvert stable qui, à son tour, sera chargé d'arrêter la débâcle. Dans des circonstances de fortes pentes comme la Montmorency, un couvert solide en amont ne peut pas être formé; les estacades fixes ne pouvant disposer pas d'un tel couvert, l'adjonction d'un filet à ce dispositif permet de suppléer à cette carence.
3. Les estacades-peignes développées par Lever & coll. (2000) sont aussi constituées de pilier mais sans filet. Ces structures s'avèrent efficaces à condition que les piliers ne soient pas trop espacés (de l'ordre de 4 m). Dans nos essais, les estacades fixes sans filet ne retiennent les embâcles qu'en présence de gros blocs au niveau de la structure et à condition d'être assez rapprochés. Le seul test ayant bien fonctionné comportait 10 piliers avec un espace libre entre piliers de 15,6 cm (6,24 m en réalité). Lever et coll. (1997, 1999) conseillent d'ailleurs des espaces libres de 3,7 à 4,3 m ce qui signifie autour de 15 piliers pour la Montmorency. On

imagine facilement l'impact visuel négatif et la restriction permanente aux crues à l'eau libre et à la navigation de plaisance. Cette option n'est pas retenue.

4. L'utilisation d'un filet placé entre les piliers permet de diminuer le nombre de ceux-ci en augmentant les performances de rétention de la structure. Les piliers peuvent donc être beaucoup plus espacés (15-20 m) car c'est le filet qui retient les glaces et non l'effet « arche » entre les piliers. Ce type d'estacade a donc un impact visuel beaucoup moins important en plus de limiter très peu l'écoulement. De plus, le filet peut être enlevé en été pour atténuer l'impact visuel et permettre la libre circulation des petites embarcations sur la rivière. Comme nous le verrons dans les conclusions sur l'efficacité, l'estacade fixe à filet peut supporter des débits plus importants. C'est ce type de solution qui est retenu pour la Montmorency. Pour cette raison, nous précisons ci-après les paramètres d'efficacité devant présider à la conception finale.

4.7.2 Paramètres d'efficacité

4.7.2.1 Grosseur de maille et soutien

Le filet ayant le meilleur comportement a des mailles de 9 x 8.5 cm (3,6 x 3,4 m prototype). Lorsque l'embâcle est formé, les lâchers de glace sont inexistantes (pour la pente de 0,002) ou rares (pour la pente de 0,0066). Lorsque l'embâcle cède, la glace passe par dessus et à travers le filet mais lorsque le niveau a diminué, l'embâcle se reforme sur le filet. La glace forme un barrage trop compact contre les mailles de 4,5 x 4,2 cm (1,8 x 1,7 m); lorsque l'accumulation lâche, il ne s'en reforme pas d'autre derrière la structure. À l'autre extrémité, des mailles de 9 x 17 cm (3,6 x 6,8 m) retiennent aussi les embâcles mais laissent passer périodiquement des lâchers de glace. La méconnaissance de ce processus risque de le rendre incontrôlable et difficile à accepter pour les riverains en aval à cause de l'insécurité qu'il pourra générer.

En nature, l'embâcle peut céder de deux manières : a) le niveau est trop important et l'eau emporte la glace par dessus la structure b) les infiltrations importantes au sein de l'embâcle peuvent produire un effet de Renard qui va fragiliser et faire fondre la glace, et ainsi entraîner les blocs en sapant l'accumulation par sa base. Ce phénomène n'est pas observable en maquette car la simulation de la fonte est impossible avec du polyéthylène. En pratique, un câble devra soutenir le sommet du filet afin de s'assurer que les glaces n'enfonceront pas celui-ci vers le bas (Figure 78). De même, des ancrages au fond pourraient être requis.

4.7.2.2 Hauteur de filet et capacité de rétention

L'estacade avec filet montre une excellente capacité de rétention de glace. Quelles que soient les conditions de test, la structure retient toujours les embâcles. Son comportement est très prévisible.

Il a été démontré que la capacité de rétention dépend principalement du niveau d'eau. Pour un filet 1,5 fois plus haut que la plaine (à 10 cm au-dessus du lit de la rivière pour tous nos tests, soit 4 m

en prototype), le niveau d'eau est 1,5 fois plus haut que le filet. Pour les niveaux de filet testés (10, 15 et 20 cm, soit 4, 6 et 8 m), la relation entre la hauteur (en mm de la maquette) du filet H_f et la hauteur d'eau H_e peut être estimée par la relation :

$$H_e = 0,268H_f + 181.2$$

Le faible coefficient de 0,268 montre qu'une variation importante de la hauteur du filet n'influence pas fortement le niveau d'eau. En fait, le filet amorce la formation d'un embâcle qui s'appuie sur le fond de la rivière et par la suite, les glaces vont s'appuyer sur cette base, ce qui explique pourquoi la hauteur du filet n'a pas un rôle majeur dans le niveau maximum de l'embâcle, en tout cas pour les hauteurs de filet testées.

4.7.2.3 Présence d'un plaine de débordement

La présence d'une plaine de débordement est intéressante mais pas indispensable. Avec une plaine, la structure peut transiter des débits moyens de 50 l/s vers l'aval (environ 500 m³/s à l'échelle 1/40) pour des pentes de 0,0066 alors que les piliers seuls ne supportent que des débits de 250 m³/s pour une pente de 0,001 selon les tests de Lever et coll. (1999) sur la Cazenovia Creek et nécessitent des espaces libres entre piliers beaucoup plus petits. En l'absence de plaine, l'embâcle cède à 350 m³/s mais les niveaux d'eau atteints sont semblables. Dans la configuration testée, il a été constaté qu'au maximum 50-55% du débit passait par la plaine, alors que Lever et coll. (1997) obtiennent 37 % pour les tests sur la rivière Lamoille. Cette différence provient probablement des glaces utilisées dans les simulations, de la configuration des plaines inondables et des débits inférieurs supportés par les structures de Lever.

Les estacades fixes à filet devraient être efficaces même si les glaces ne sont pas très solides car les capacités de rétention se sont avérées meilleures que pour les estacades fixes conventionnelles. En effet, Lever et coll. (1997 et 2000) remarquent dans leurs simulations que la capacité de rétention de ces structures est moins bonne lorsque la glace est plus faible et plus fragile.

4.7.2.4 Caractéristiques des forces appliquées sur la structure

L'intensité des forces appliquées aux piliers peut être considérée comme hydrostatique lorsque l'embâcle est stable.

Les forces d'impact des glaces qui peuvent devenir significatives dépendent de la situation testée :

?? En début de test, le débit est faible, la glace occupe la majeure partie de la section d'écoulement et les glaces sont lâchées 4 m en amont de l'estacade. Les glaces percutent donc directement l'estacade. Dans ce cas, la force d'impact vaut environ le double de la force lorsque l'embâcle est équilibré. Mais cette situation est irréaliste car, en nature, un couvert de glace est toujours présent à l'amont de la structure, même s'il de faible extension. Ce couvert freine l'avancée des glaces et limite les forces d'impact sur la structure. Ce type de test a été utilisé pour s'assurer de la qualité de la capacité de rétention de la structure. Si l'estacade retient des embâcles dans des situations aussi extrêmes, son fonctionnement ne doit pas poser de problème dans des situations classiques.

?? En cours de test, l'embâcle est déjà formé, les niveaux et débits sont plus importants et les pics observés dépendent du rythme d'augmentation du débit. Lorsque le débit est augmenté rapidement, les pics observés dépassaient d'environ 10 % la valeur de la force à l'équilibre.

Le niveau d'application des forces peut être estimé à 0,45 fois la profondeur d'eau pour des pentes allant de 0,002 jusqu'à 0,01.

Au niveau de la résistance, les piliers sont soumis à des forces de flexion qui peuvent atteindre 100 N en maquette, les maxima de moment observés se situent à 8600 Nmm, ce qui équivaut respectivement à 640 tonnes et 22 MNm en prototype pour une échelle de 1/40. Des analyses de résistance devront être conduites afin de confirmer que de tels piliers sont techniquement et financièrement réalisables.

De plus, pour éviter de superposer des contraintes de torsion aux contraintes de flexion, les filets devraient être attachés de manière à limiter les torsions.

Une attention toute particulière devra être apportée au dimensionnement des piliers qui devront supporter des charges importantes en flexion axiale contrairement aux piliers de ponts classiques qui travaillent en compression.

4.8 Résultats des essais : estacades flottantes à filet

Trois séries de tests ont été effectués par Francoeur (2002) sur la maquette pour vérifier le comportement d'estacades flottantes pourvues de filet afin de suppléer à l'absence d'un couvert fixe qui, classiquement, sert à déclencher le processus d'embâcles dans les cours d'eau à faible pente. La première série dite « de référence », a été réalisée avec une pente de 0,2%. Cette pente, plus faible que celle rencontrée sur la rivière Montmorency, est déjà à l'extrême limite supérieure des pentes déjà testées avec des estacades conventionnelles. Cette pente a permis de vérifier l'efficacité des structures et d'essayer diverses configurations de pontons et de filets. Par la suite, une deuxième série de tests ont été effectués avec une pente de 0,66%. Cette pente se rapproche de celles observées sur la Montmorency, bien que légèrement inférieures. Seules les configurations d'estacades flottantes les plus prometteuses furent testées. Une dernière série d'essais furent menés avec une pente de 1,1 (1,12% précisément). En tout 29 simulations avec filet furent réalisées. Les paramètres étudiés dans les tests de sensibilité sont : *la taille des pontons, la configuration du filet, la longueur du câble de section, la présence ou non d'un plan d'eau à l'aval ainsi que la présence ou non d'une plaine de débordement.*

4.8.1 Filet, pontons et ancrages utilisés lors des tests

La présente section décrit la configuration des filets, pontons et ancrages utilisés pour les différents tests. Comme dans les sections précédentes, les dimensions mentionnées pour décrire ces points sont d'abord celles de la maquette. Les équivalents sur le prototype sont donnés entre parenthèses. Autrement seules les dimensions en prototype sont données.

Les deux premiers tests furent effectués avec des estacades filets (compression de estacade flottante à filet) comportant un câble de section de 2,16 m (*équivalent à 86 m sur le prototype*). Six pontons étaient répartis sur ce câble pour en assurer la flottaison. Le filet de type « *escalier* » (c'est-à-dire plus court en haut et s'allongeant pour les mailles inférieures du filet) utilisé dans ces deux tests faisait 25,5 cm (*10,2 m*) de hauteur et comportait trois rangées de mailles. Lors de tous les tests, le câble de section supérieur a été attaché à une hauteur constante de 12 cm (*4,8 m*) de la base du pilier. La rangée supérieure de mailles avait la même longueur que le câble de section. Les rangées centrale et inférieure, plus longues, mesuraient respectivement 2,34 m (*93,6 m*) et 2,52 m (*100 m*). La distance entre les pontons intérieurs était de 8 cm (*3,2 m*) et la distance entre les pontons extérieurs et les piliers était d'environ 13 cm (*5,2 m*) (Figure 96).

La flèche de la parabole formée par l'estacade semblant plus grande que nécessaire fut réduite à 1,98 m (*79 m*) pour les tests suivants. Le filet conserva la même hauteur composée de trois rangées de mailles. Les rangées de mailles situées au centre et au bas du filet furent réduites, passant à 2,16 m et 2,34 m respectivement (*86 m et 93,6 m*). Le nombre de pontons fut également ramené à 5. L'espacement entre les pontons intérieurs fut resserré à environ 6 cm (*2,40 m*) de façon à ce que les pontons extérieurs aient plus de dégagement vis-à-vis des piliers d'ancrage. Il avait été constaté lors des premiers essais qu'un espacement trop court entre le dernier ponton et le pilier faisait que le ponton était à moitié « suspendu » dans les airs. Cette configuration fut utilisée pour les tests 03 à 09.

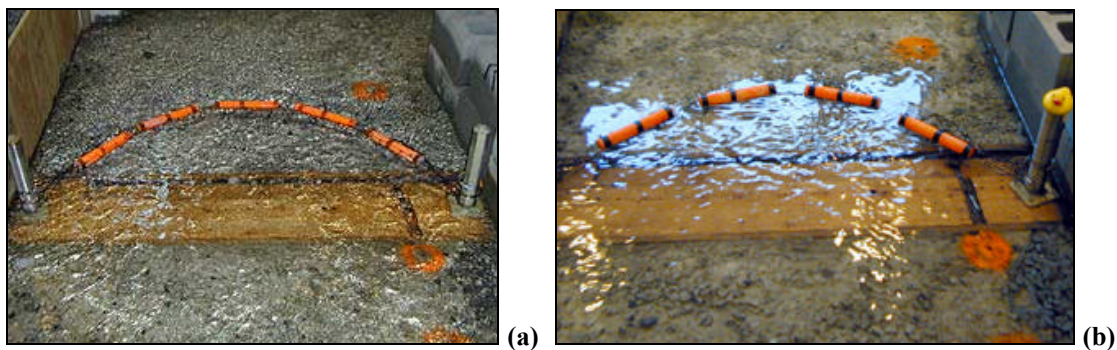


Figure 96 : (a) estacade-filet avec 5 pontons et (b) estacade 4 pontons

À partir du test 10 et jusqu'à la fin des essais le filet en « *escalier* » fut remplacé par un filet en « *pointe* » (plus long dans la rangée de mailles centrales et plus court sur les rangées supérieure et inférieure). Ce changement ne modifia pas la longueur du câble de section qui demeura à 1,98 m (*79 m*). Le filet conserva également sa hauteur de 25,5 cm répartie en trois rangées de mailles. La rangée centrale conserva la même longueur à 2,16 m de longueur. La rangée inférieure fut toutefois ramenée à 1,98 m. Une variante de cette estacade fut également testée avec un câble de section raccourci à 1,8 m (*72 m*) et un nombre de pontons ramené à 4. Les deux rangées inférieures de filet furent alors réaménagées en conséquence. Les essais réalisés avec cette estacade « *courte* » sont les tests 18, 22 à 26, ainsi que 28 et 29.

Lors des trois premiers tests (01 à 03 inclusivement), le filet était fixé dans sa partie inférieure à des câbles qui revenaient s'ancrer à la même hauteur que la section des piliers. Cette variante fut abandonnée car il était beaucoup plus simple de placer les ancrages du filet directement aux

endroits souhaités sous l'estacade. De plus, en plaçant les ancrages sous le filet, il était possible d'obtenir un meilleur contrôle de la forme du filet. Une série de 5 ancrages et deux de 7 furent alors disposés en demi-cercle au fond de la rivière pour la suite des tests (Figure 97). Les ancrages au centre du canal furent placés de façon à ce que le filet soit plus loin dans le bas que ne lui permettait le câble de section dans le haut.

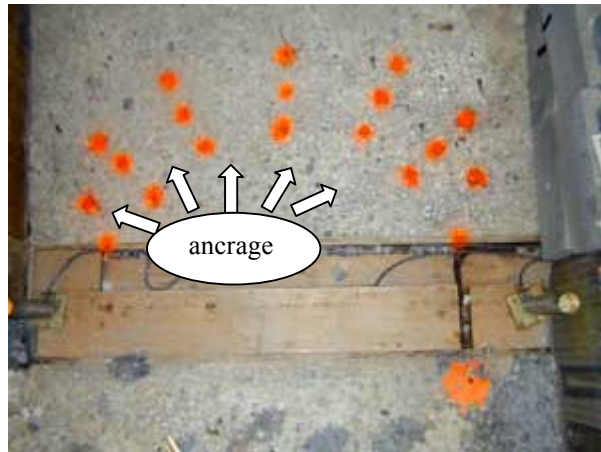


Figure 97 : Séries d'ancrages du filet au fond de la rivière en aval des piliers

Le test 04 fut réalisé en fixant le filet sur les ancrages les plus éloignés (arrière). Cette configuration se révéla mauvaise car le filet était beaucoup trop tendu. La glace ne put pénétrer facilement à l'intérieur du filet pour soulever les pontons. Les ancrages centraux furent utilisés pour tous les autres tests d'estacade-filet à 5 pontons. Les ancrages les plus rapprochés servirent pour tous les tests d'estacade-filet courte à 4 pontons.

4.8.2 Analyse des tests avec une pente de 0,2%

Sur les 12 tests effectués avec une pente de 0,2%, seuls 9 ont abouti à des résultats ou ont pu ou dû être analysés. Le test 04 a été soustrait des analyses car les ancrages du filet au lit de la rivière étaient trop en arrière de la structure : la glace n'a pas pu pénétrer dans le filet. Le test 09 n'a pas pu être traité car les données de débit n'ont pas été enregistrées. Bien qu'un débit approximatif a pu être déterminé à l'aide des séquences vidéos, il représente la valeur visée et non, la valeur réellement obtenue en manœuvrant la vanne. Le test 11 n'a pas non plus été utilisé dans l'analyse. Ce test avait pour but de voir l'impact d'un lâcher de glace venant de très loin en amont. Il a été arrêté après qu'un embâcle stable se soit formé.

4.8.2.1 Forces en fonction du débit

La mise en graphique des forces enregistrées sur les deux piliers d'ancrages en fonction du débit total de troue à la Figure 98. Il résume les forces que subit la structure lors des tests. Il est à noter qu'une partie des forces sont reprises par les ancrages qui retiennent le filet au lit de la rivière. Comme ces ancrages ne sont pas instrumentés une partie des forces échappe à l'analyse.

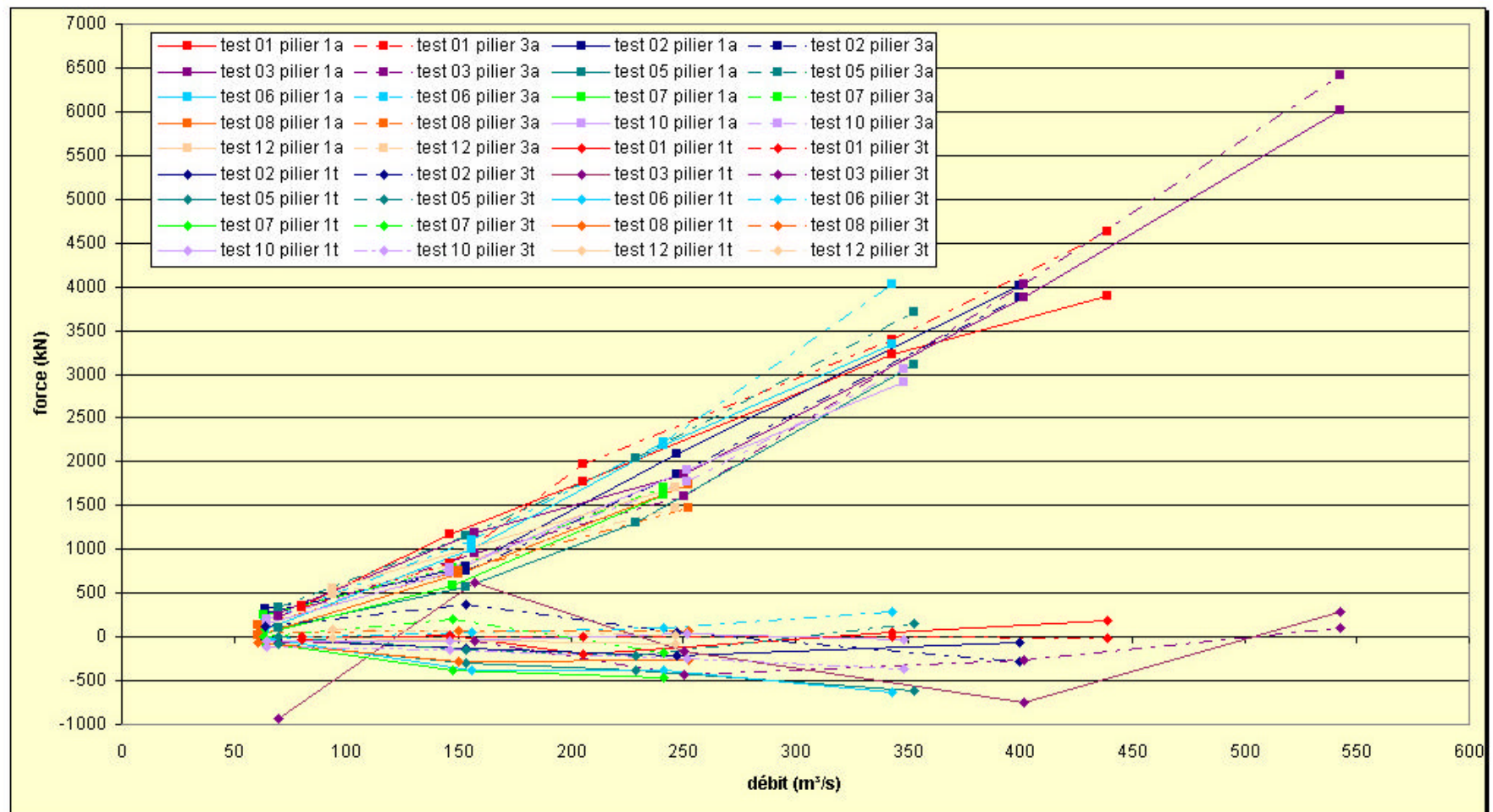


Figure 98 : Forces en fonction des débits pour les tests analysés à une pente de 0,2%

Note : ici, les valeurs indiquées sont ramenées à l'échelle du prototype

Les forces axiales augmentent régulièrement à chaque hausse de débit. Les forces transversales sont beaucoup plus près de zéro et évoluent également moins vite. Les forces transversales au pilier 1 sont la plupart du temps négatives alors que celles du pilier 3 sont positives. Cette situation est normale car, dans le calcul des forces, il a été fixé par convention que les forces transversales dirigées vers la rive droite seraient positives (Figure 99). Des forces négatives sur le pilier 1 et positives sur le pilier 3, tendent à montrer que le filet tire vers la gauche du côté droit et vers la droite du côté gauche.

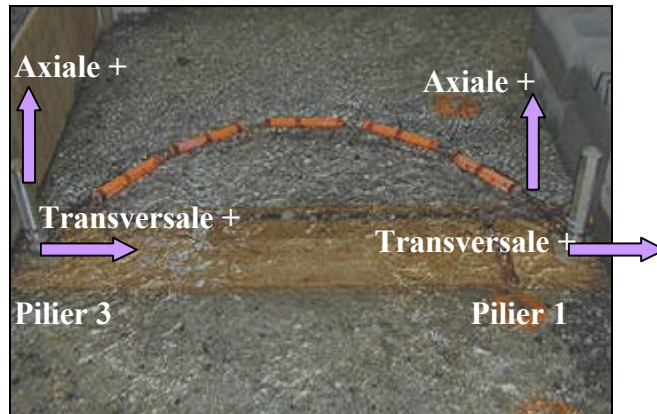


Figure 99 : Convention retenue pour le sens des forces (pris dans le sens d'écoulement du canal)

Le plus haut débit auquel la structure a réussi à retenir les glaces et à former un embâcle stable est de 540 m³/s lors du test 03. Ce résultat est à prendre avec beaucoup de précautions car les pontons (et donc le filet) ont été soulevés et remplacés manuellement lors du passage au débit de 250 m³/s. Cette manipulation a été faite dans le but de savoir le débit ultime auquel il était possible d'obtenir une bonne réponse de la structure dans des conditions idéales de déploiement du filet. Le deuxième meilleur débit de retenue fut de 435 m³/s au test 01. Encore une fois, cette valeur limite n'est pas la plus représentative vis à vis des autres tests car elle fut atteinte en disposant des gros blocs devant l'estacade-filet. Cette procédure ne fut pas reprise dans les tests subséquents.

4.8.2.2 Influence de la présence de gros blocs devant la structure

Une comparaison fut faite afin de voir si la présence de gros blocs de glace-modèle (diamètre de 4 m) disposés devant l'estacade pouvait avoir une influence sur les forces enregistrées dans le filet ou encore sur l'efficacité générale de la structure. Les gros blocs se voulaient une simulation de la présence d'un couvert de glace devant l'estacade. Les tests 01 (avec présence de gros blocs) et 02 (sans la présence de blocs) tendent à montrer que la présence des blocs n'influence pas les forces lues, les composantes axiales et transversales pouvant être qualifiées de similaires pour ces deux tests. Ce résultat n'est pas vraiment surprenant car les blocs qui ont été disposés devant ont tout simplement été poussés dans la structure dès l'arrivée du train de glace principal. Contrairement à un couvert réel qui aurait été ancré aux rives, les blocs étaient sans attache. De plus, les blocs ne simulent pas un couvert intact car ils ne sont pas non plus reliés entre eux. Malgré tout, la présence de blocs a permis d'obtenir la retenue des glaces à un débit plus élevé que sans les blocs. Cela est probablement dû au fait que les gros blocs forment une obstruction dans les mailles du filet et retiennent encore plus efficacement les petits blocs derrière. Cette constatation est

intéressante car dans la réalité la présence d'un couvert de glace à l'amont de la structure est fort probable bien que limitée en épaisseur et en extension vers l'amont par la forte pente du cours d'eau. Cela signifierait donc que si un couvert de glace assez épais existait devant l'estacade, cette dernière serait peut-être en mesure de retenir les glaces à des débits plus élevés.

4.8.2.3 Diamètre des pontons

Dans ce type de structure, le rôle des pontons est plus de servir de « flotteur » au filet que d'arrêter le train de glace directement. Il était toutefois intéressant de voir si la grosseur des pontons pouvait quand même influencer les forces enregistrées par les piliers. Cette analyse fut réalisée en comparant le test 06 (pontons de 1,5 m) avec les tests 08 et 09 (pontons de 1,3 m). Le test 08 a été arrêté à un débit de 250 m³/s. En effet, à ce débit le câble de section s'est détaché de son ancrage ce qui a entraîné la rupture de l'embâcle. Le test 09 reprit la même simulation. Malheureusement, les données de débit de ce test n'ont pas été correctement sauvegardées. En se fiant aux indications données sur les enregistrements vidéo, il a toutefois été possible de savoir que l'estacade a laissé passer les glaces lorsque le débit a été augmenté à 400 m³/s. Cette valeur est comparable à celles obtenues avec des pontons plus gros. Une reconstitution du test 09 à partir des débits enregistrés sur les caméras vidéo et des forces perçues par les ponts de jauges montre un écart dans la différence des forces axiales avec des pontons plus gros (de l'ordre de 10 à 15%). Cette différence dans les forces ne s'observe toutefois pas lorsque la comparaison est reprise dans les tests sur les pentes plus fortes.

4.8.2.4 Influence de la présence d'un seuil

La création d'un plan d'eau dans le bief d'amont y favorise l'épaississement et l'extension d'un couvert de glace solide et contribue à l'arrêt de la débâcle. Afin de vérifier si la création d'un plan d'eau changeait également le rapport des forces reprises par les piliers d'ancrage, les tests 10 (sans seuil) et 12 (avec seuil) furent comparés. Pour le test 12, un seuil de 3,8 m a été recréé (l'équivalent sur le prototype de la hauteur de la plaine inondable). Un seuil d'une telle hauteur serait probablement plus haut que ce qui pourrait être envisageable sur la rivière Montmorency sur le plan environnemental. Il fut décidé de tester une structure à un tel extrême afin de discerner facilement (contraster) un changement de comportement éventuel lors de l'analyse.

Malgré cette situation de seuil « extrême », les forces enregistrées en fonction du débit ne semblent pas être affectées par sa présence. Les forces axiales autant que transversales sont similaires d'un test à l'autre. Le test 10 (sans seuil) a formé des embâcles à des débits supérieurs au test 12 (avec seuil). Il faut toutefois se méfier de ce résultat. Un embâcle s'est formé à un débit de 351 m³/s dans le cas du test avec seuil. Il est resté stable pendant plusieurs minutes. Les données des piézomètres commencèrent même à être prises, signe que les forces dans l'embâcle étaient stables. De forts écoulements à travers l'embâcle apparurent alors du côté droit de l'embâcle. Ces écoulements finirent une minute plus tard par déstabiliser complètement l'embâcle. La question des écoulements dans le massif de glace sera plus attentivement abordée à la section 4.6.4. Il s'agit probablement donc d'un concours d'événements fortuits qui a entraîné la rupture de l'embâcle à un débit moindre plutôt que la présence du seuil.

4.8.2.5 Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau

Lors de la conception d'une structure il est important de savoir quelles forces s'appliqueront sur celle-ci. La méthodologie de calcul des forces a été expliquée à la section 4.4.1.3, page 93.

La question qui se pose ici est de savoir où les lectures de niveaux d'eau nécessaires au calcul des forces doivent être prises. Lors de la conception du réseau de piézomètres, il n'a pas été tenu compte de la forme qu'aurait le dispositif de contrôle. Plusieurs piézomètres furent donc installés en amont des piliers d'ancrage, mais peu en aval. La Figure 100 montre les différents rapports obtenus entre les forces mesurées sur les piliers et les forces théoriques calculées à partir des hauteurs d'eau mesurés sur les piézomètres en fonction de la distance à la structure (les piliers jaugés sont situés à $x = 0$).

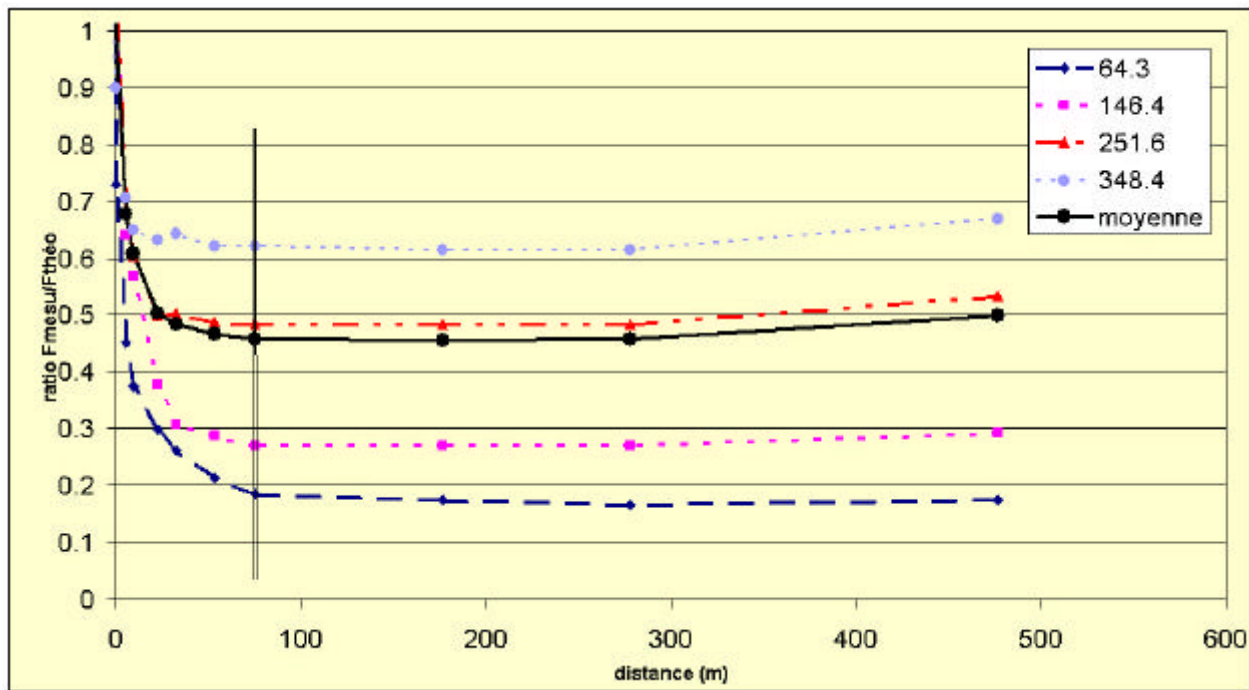


Figure 100 : Courbes pour différents débits du rapport $F_{mesu}/F_{théo}$ en fonction de la distance à l'estacade en unités de prototype

Chaque courbe de ce graphique représente un débit différent. La courbe en noir (avec des cercles) représente la valeur moyenne pour chaque distance, tous débits confondus. Il est à noter que plus la distance du calcul se rapproche de la structure et plus la force se rapproche de la force hydrostatique (rapport = 1). Il en sera plus longuement question plus loin. Il est également observé que plus le débit est élevé, plus la courbe du rapport $F_{mesu}/F_{théo}$ est élevée. Ceci est dû au fait que plus les débits sont élevés plus les niveaux d'eau le sont aussi. L'influence proportionnelle de la force de l'eau augmente alors en comparaison de celle de la glace. Le rapport se rapproche alors de la valeur hydrostatique. Il est possible de dire, à partir de ce graphique, qu'en moyenne 40% à 50% de la force engendrée par la hauteur de la colonne d'eau au début de la section d'équilibre est observé à la structure. Cette observation est intéressante car il est beaucoup plus facile, dans la réalité, de connaître le niveau d'eau dans la section d'équilibre que dans la section de transition

aval. Les données prises à environ 75 m de la structure (la ligne noire verticale) sont reprises et retravaillées à la Figure 101. Ce graphique illustre la relation qui existe entre le rapport des forces et le débit au début de la section d'équilibre de l'embâcle.

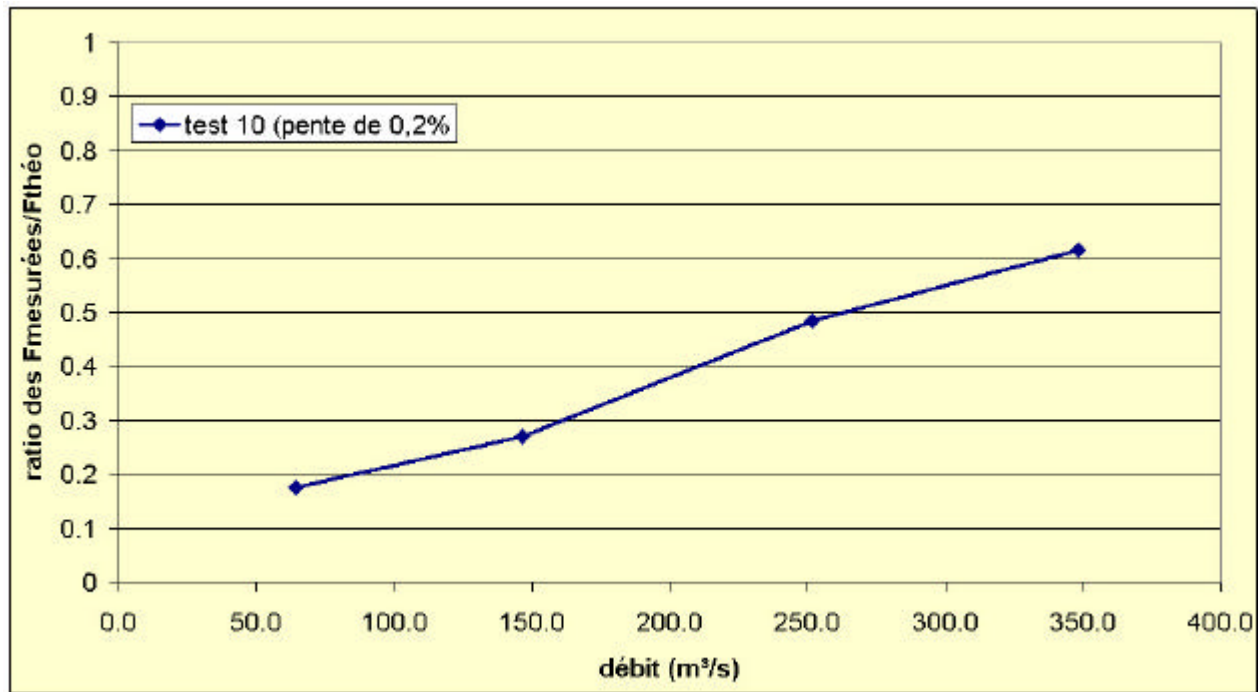


Figure 101 : Rapport de $F_{mesu}/F_{théo}$ en fonction du débit pris au début de la section d'équilibre de l'embâcle

La moyenne des rapports forces mesurées/forces théoriques pour chaque débit après le débit initial pour les tests effectués est de 1,06 au piézomètre situé le plus près de l'estacade-filet. Il est donc possible de dire que, localement du moins, les forces près de la structure sont hydrostatiques. Les tests 4, 9 et 11 n'ont pas été pris en compte dans ce calcul pour les raisons données au début de la section 4.8.2.

4.8.2.6 Analyse des hauteurs d'application

Les piliers d'ancrage jaugés permettent de mesurer les distances d'application des différentes forces exercées. La Figure 102 illustre la hauteur d'application des forces axiales en fonction du temps pour les 9 tests analysés à une pente de 0,2%. Cette notion a également été abordée lors des tests sur les estacades fixes. Cette variable est importante pour le dimensionnement des composantes statiques du prototype.

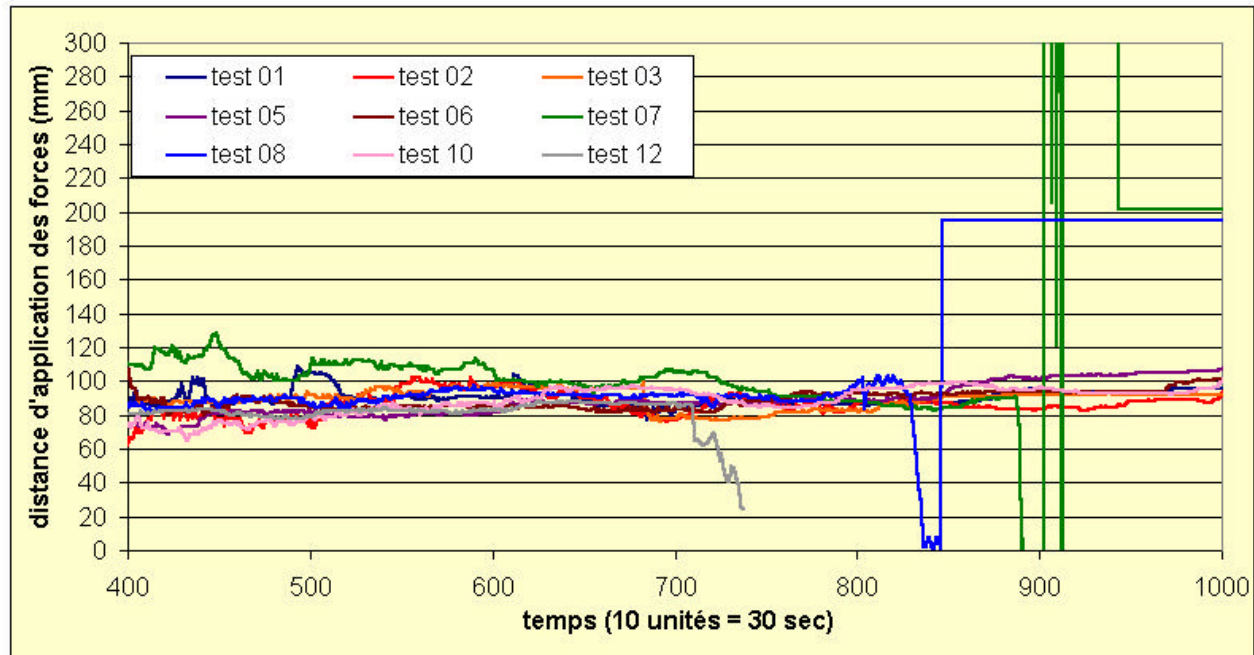


Figure 102 : Hauteur d'application des forces axiales lors des tests analysés avec une pente de 0,2%

Quoique le débit augmente avec le temps pour chacun des tests, tous se retrouvent avec des valeurs assez similaires situées entre 80 mm (2,4 m) et 100 mm (4 m). Lors de tous les tests, le câble de section a été attaché à une hauteur constante de 120 mm (4,8 m) de la base du pilier. Les forces transversales étant très près de zéro pour l'ensemble des tests, de grandes erreurs survenaient lors du calcul de leur distance d'application. Ces erreurs provoquaient des oscillations fortes et importantes sur le graphique des hauteurs d'application. Aucune analyse n'a pu être effectuée à partir de ces données.

Les deux principaux facteurs pouvant influencer la hauteur d'application de la force sont :

- ?? la hauteur des forces individuelles (ex : les câbles) s'exerçant directement sur les piliers
- ?? la répartition des forces entre les trois câbles reliant le filet à l'estacade et transmettant la force enregistrée au filet

Les forces autres que celle de l'eau ne peuvent qu'exercer des effets négligeables sur la structure, ou encore, elles ne peuvent être captées par le système d'acquisition équipant les piliers. Il a été démontré dans la section précédente que la nature des forces étaient essentiellement hydrostatique près de la structure. Si le facteur le plus important de la hauteur d'application de la force était la composante hydrostatique s'appliquant sur le pilier, la hauteur d'application devrait varier avec la hausse du débit et celle du niveau d'eau correspondant. Ce n'est pas ce qui est observé sur la Figure 102. La hauteur d'application demeure relativement constante dans le temps (et donc selon le débit et la hauteur d'eau) tout le long du test. Il semble donc que ce soit la distribution des forces dans les câbles qui détermine la hauteur d'application de la force. Comme les hauteurs d'ancrage du filet n'ont pas été modifiées durant les différents essais, il est difficile d'évaluer comment ce changement influencerait la hauteur d'application. En l'absence de plus de données et

d'une façon conservatrice, il est possible de dire que la hauteur d'application est située à la limite supérieure observée.

4.8.2.7 Proportion du débit total passant dans la plaine de débordement

Les deux déversoirs triangulaires installés dans la fosse permettent de différencier les débits passant par la plaine de débordement et ceux passant par la rivière. La Figure 103 illustre le pourcentage des débits passant dans la plaine par rapport au débit cumulé de la plaine et de la rivière.

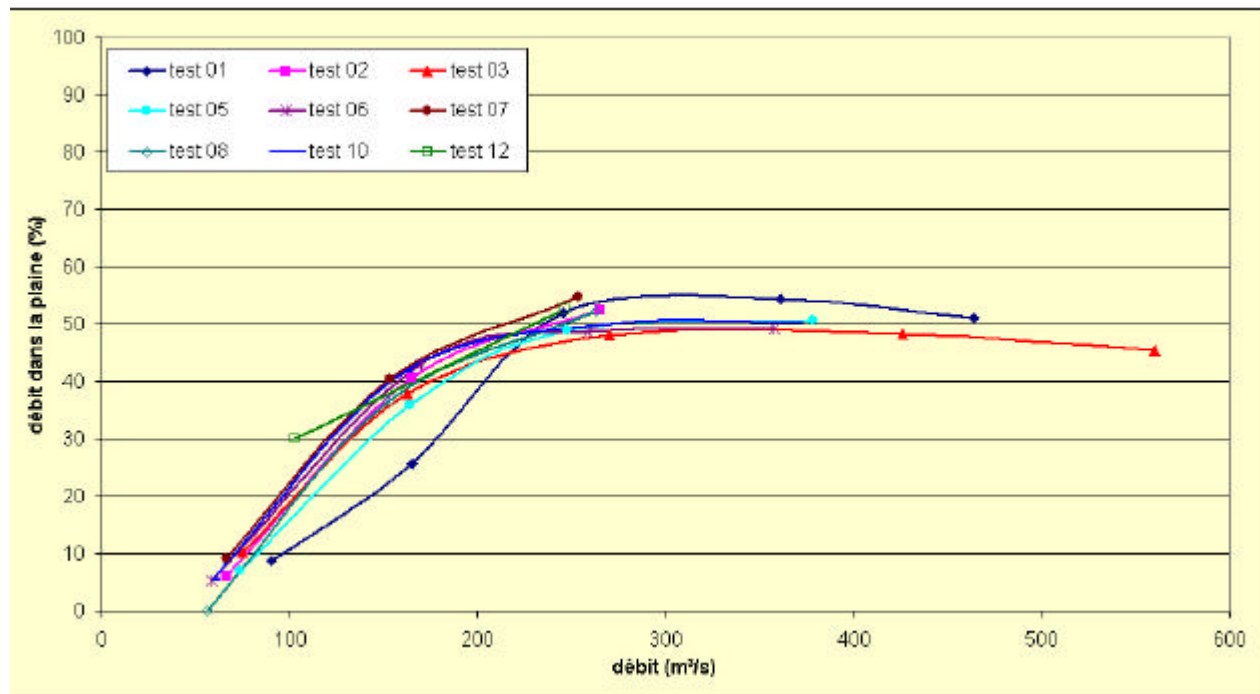


Figure 103 : Pourcentage du débit passant par la plaine inondable (pente de 0,2%)

Lorsque la glace n'a pas encore été relâchée dans le canal, le débit s'écoulant dans la plaine est nul. Toute l'eau circule alors dans la rivière. Aussitôt qu'un embâcle se forme, l'eau monte. Le débordement débute peu après. Le pourcentage du débit passant dans la plaine grimpe rapidement à mesure que le débit envoyé dans la maquette augmente. La part du débit total passant par la plaine se stabilise finalement aux environs de 50 % du débit total. Un phénomène de décroissance du pourcentage du débit passant dans la plaine est observé aux débits les plus importants. Cela peut être dû au fait que, plus les débits augmentent, plus l'embâcle tend à flotter. L'eau aurait une moins grande distance à parcourir dans le massif de glace, ce qui permettrait d'en évacuer plus de cette façon. Il a aussi été observé que dans les instants précédant le « lâcher » de l'embâcle un fort effet de renard est souvent constaté. Il est possible qu'un peu avant la relâche des glaces des tunnels d'écoulement profitent de la faible épaisseur de la matrice de glace pour se former et permettent également l'évacuation de plus grands débits dans la rivière. Ces écoulements pourraient déstabiliser l'équilibre de l'embâcle et contribuer à sa rupture. Le phénomène de baisse du pourcentage de débit dans la plaine ne pourraient alors être observé qu'à forts débits car

l'embâcle serait alors perméable. Cela voudrait dire également qu'à ces occasions les canaux d'écoulement ne se seraient pas encore formés ou n'auraient pas réussi à causer la rupture de l'embâcle.

4.8.2.8 Débordement de la structure et « lâchers » de glace

Il fut remarqué qu'à presque tous les tests effectués avec cinq pontons, et cela quel que soit le filet ou le type d'ancrage, le ponton central était rapidement enfoncé par les glaces. Alors que les glaces semblent entrer facilement dans le filet aux extrémités, la situation est différente au centre. Les glaces s'amoncellent plutôt sur le ponton, allant parfois jusqu'à le recouvrir complètement (Figure 104).

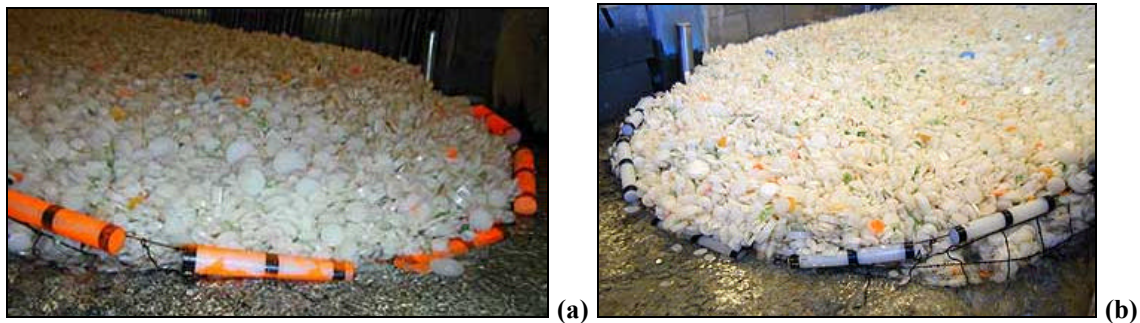


Figure 104 : Enfoncement du ponton central lors de divers tests

La faible profondeur d'eau est peut-être une des causes de cet enfoncement. Lorsque les premiers blocs frappent l'estacade ils touchent rapidement le fond et amorcent très rapidement un embâcle appuyé au fond. Les glaces n'ont pas l'occasion de pénétrer dans le filet. La pente douce de l'embâcle et le profil des lignes d'eau laissent entrevoir que dans les premiers débits l'embâcle est appuyé sur une grande longueur. Le fait que le câble de section soit attaché sur les piliers d'ancrage à 12 cm (4,8 m) de hauteur aide peut-être la glace à pénétrer plus facilement dans le filet près de cet endroit. De plus, comme les glaces pénètrent dans le filet à cet endroit en premier le processus de formation d'embâcle s'y amorce également quelques instants plus tôt qu'ailleurs. Les glaces s'appuyant sur le ponton central recevraient alors moins de pressions et chercheraient moins à pénétrer dans le filet. L'amplitude du rayon de courbure du câble de section deviendrait alors le principal critère pour empêcher le centre de l'estacade de s'enfoncer. Plus la flèche de la parabole formée par le câble de section serait réduite (plus l'estacade serait « tendue »), moins l'effet d'enfoncement devrait se faire sentir. Cette hypothèse fut enregistrée en vue d'une vérification ultérieure. Elle sera présentée et commentée lors des tests sur des pentes plus fortes.

Les lâchers de glace se produisent par un débordement de la structure, souvent au centre car cette partie de l'estacade est généralement moins bien déployée. Les glaces accumulées par dessus le niveau des pontons sont emportées par le niveau d'eau. On assiste alors à une chute rapide des niveaux d'eau à l'amont de la structure. Cette baisse du niveau d'eau est accompagnée d'une chute proportionnelle des forces enregistrées sur les piliers. Un embâcle a parfois pu se reformer dans le filet suite à un premier lâcher. Ce phénomène n'a pu être toujours observé. À quelques reprises, le filet était tellement rempli de glace que celles-ci ont formé un barrage empêchant le

niveau d'eau de descendre plus bas que la hauteur du filet. Les glaces restant derrière se sont alors écoulées par dessus la structure. Il est possible de croire qu'à d'autres occasions, le volume insuffisant de glace disponible pour les simulations ne permettait pas de reformer l'embâcle. Il fut observé que si l'embâcle ne se reformait pas rapidement, trop de glaces s'écoulaient et il n'en restait plus assez en amont de la structure pour reformer un embâcle. Il serait hasardeux de conclure suite aux essais menés qu'un embâcle se reformerait toujours derrière une estacade flottante à filet. Il apparaît plus raisonnable de dire que le cas est possible, mais incertain.

4.8.3 Analyse des tests faits avec une pente de 0,66%

La présente section contient toutes les analyses des tests réalisés avec une pente de 0,66%. Onze tests ont été réalisés avec cette pente. Sur ces 11 essais, seuls 9 seront examinés ici. Le test 16 n'a pas été traité car les données de débit n'ont pas pu être enregistrées. Comme dans le cas du test 09, un débit approximatif a cependant pu être déterminé à l'aide des informations écrites sur la « claquette » et enregistrées par les caméras. Le test 23 n'a pas non plus été utilisé dans l'analyse. Ce test n'a pas réussi à former un embâcle stable à un débit supérieur à 200 m³/s. La plage des données était alors trop réduite pour une analyse complète. Tout porte cependant à croire qu'un embâcle stable aurait pu se former à un débit de 175 m³/s.

4.8.3.1 Forces en fonction du débit

Dans ces conditions de pente, la structure a réussi à retenir les glaces jusqu'à des débits de 390 m³/s lors de la plupart des tests avec plaine de débordement. Aucun essai n'a toutefois dépassé des débits supérieurs à 400 m³/s. Les débits maximaux moyens atteints à cette pente sont plus élevés que ceux obtenus avec une pente plus faible. Cette surprenante constatation n'est toutefois pas concluante car la première pente a servi à pré-tester plusieurs configurations peu efficaces abandonnées par la suite. Seules les configurations les plus performantes ont été testées avec une pente plus forte. Pour des essais où la configuration était semblable (homogène) et où seule la pente était modifiée les débits maximaux moyens diffèrent d'à peine 25 à 30 m³/s. La différence pourraient encore être moins grande car, dans la première série d'essais, le débit était augmenté par paliers plus forts que pour la pente de 0,66%. Par exemple, le test 10 (pente de 0,2%) a retenu la glace à un débit de 350 m³/s (échelle maquette), mais a subi une hausse de débit à 500 m³/s par la suite. Il ne retenait pas la glace à ce débit.

En résumé, il est donc difficile de tirer des conclusions quant à la différence d'efficacité de ce type de structure en rapport avec la pente du cours d'eau.

4.8.3.2 Influence de la rugosité des parois

Lors de tests effectués à une pente de 0,2% ainsi que pour les 6 premiers tests avec une pente de 0,66%, les parois verticales intérieures du canal de modélisation ne possédaient aucun revêtement rugueux spécial et étaient simplement composées des blocs de béton. À partir du test 19 et jusqu'à la fin des essais, un revêtement en plastique rugueux transparent fut collé sur les parois du canal.

Cet ajout fut mis en place dans l'hypothèse de mieux modéliser l'écoulement et le déplacement des glaces près des parois. Dans les premiers tests, il avait en effet été noté que les morceaux de polyéthylène en contact avec les parois se déplaçaient (condition de glissement) alors qu'ils ne devraient pas bouger comme c'est le cas en réalité (condition d'adhérence). Le mouvement était encore plus accentué lorsque les blocs arrivaient dans la section en plexiglas, une surface plus lisse que les blocs de béton.

Le comportement de la glace a donc été observé suite à la mise en place de la membrane rugueuse. Il fut constaté que la glace touchant la paroi se déplaçait nettement moins comme on s'y attendait. En ce sens, la pose de la membrane rapprochait le modèle physique des conditions observées en nature. Le même exercice de comparaison fut refait entre les tests 14 et 21 (pontons de 1,5 m et présence d'un seuil). Aucune différence notable dans les résultats n'y fut non plus observée. Il faut donc conclure que même si l'ajout d'une membrane rugueuse sur les parois verticales du canal rapproche le modèle physique de ce qui est observé sur le terrain du moins dans la phase transitoire de la formation de l'embâcle, les résultats ultimes ne sont pas significativement affectés. La remarque s'explique par le fait que la plupart des observations sont faites à l'équilibre alors que les mouvements de la glace ne sont plus en cause. Tous les tests faits sans membrane rugueuse demeurent donc valides.

4.8.3.2.1 Présence d'un seuil

Comme il avait déjà été fait avec la pente précédente, trois essais (14, 17 et 21) tentèrent de déterminer si la présence d'un seuil influençait le comportement des forces de l'estacade-filet ou encore le niveau d'eau de l'embâcle. Le seuil fut fixé à une hauteur équivalente à 2 m sur le prototype, ce qui correspond à une hauteur réaliste pouvant être réalisée sur la rivière sans influencer trop la faune et les activités récréo-touristique y ayant lieu. Comme dans le cas de la pente de 0,2%, aucune différence dans les forces ne fut enregistré à cause de la présence du seuil. Les deux conceptions relâchèrent les glaces pratiquement au même débit. Les niveaux d'eau enregistrés derrière l'embâcle sont également semblables pour les deux tests, allant même jusqu'à se superposer à certains endroits. Il est curieux de voir que malgré le fait que les glaces semblent pénétrer mieux dans le filet et que les pontons se soulèvent, le débit maximal atteint ne soit pas modifié. Il aurait été attendu que le filet, mieux déployé, permette de retenir les glaces plus longtemps. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, lorsque le débit de la simulation est augmenté, le problème d'enfoncement du centre de l'estacade réapparaît. Ce phénomène est bien visible sur la Figure 105. Pourtant entre l'image de gauche et celle de droite un débit d'à peine 50% supérieur est envoyé.

Encore une fois, la forme incurvée de la structure donne à penser qu'elle favorise la concentration des glaces et des forces vers le centre. La seule façon de régler ce problème semble de raccourcir la longueur du câble de section de façon à réduire le rayon de courbure de l'estacade.



Figure 105 : Enfoncement du centre de l'estacade à des débits de 200 et 300 m³/s

4.8.3.2.2 Longueur du câble de section

Afin de remédier au problème d'enfoncement de la structure, il fut tenté de raccourcir le câble de section de l'estacade. Le câble étant plus court, un ponton dut être retiré de l'estacade. Son rayon de courbure étant moins élevé, l'effet d'enfoncement devait normalement moins se faire sentir. Les photographies prises lors du test 21 (Figure 106) montrent bien que le but semble atteint. Les glaces semblent pénétrer facilement dans le centre du filet et les pontons se soulèvent mieux.

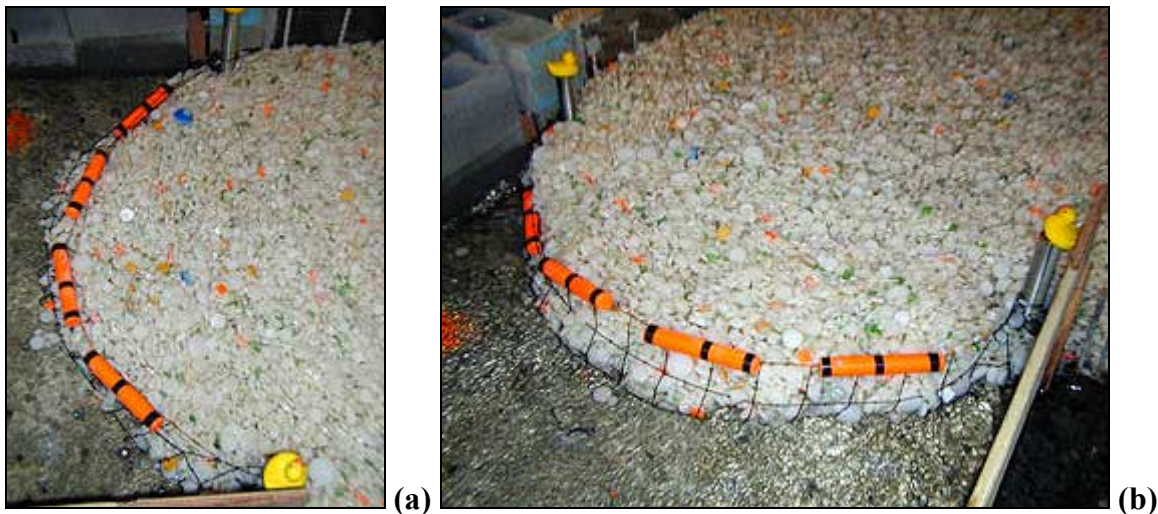


Figure 106 : Estacade-filet « raccourcie » (a) à 100 m³/s (b) aux environs de 400 m³/s

Les forces totales (axiale et transversale confondues) enregistrées sur les piliers jaugés lors du test 14 (estacade longue) et 17 (estacade raccourcie) sont semblables (Figure 107). Ceci voudrait dire que la longueur du câble de section n'influence pas les forces totales transmises aux piliers. Il aurait été logique de penser que les forces auraient augmenté dû à un surplus de contraintes transversales. Ceci n'est pas observé. Le fait que l'angle que fait le câble de section n'a pas été réellement modifié malgré le rétrécissement peut expliquer ce phénomène. Il faut ici souligner que le câble n'est pas une parabole « parfaite ». Il serait déformé par la poussée des glaces. Cette

déformation, du moins près des piliers, fait que le filet conserve toujours relativement la même courbure.

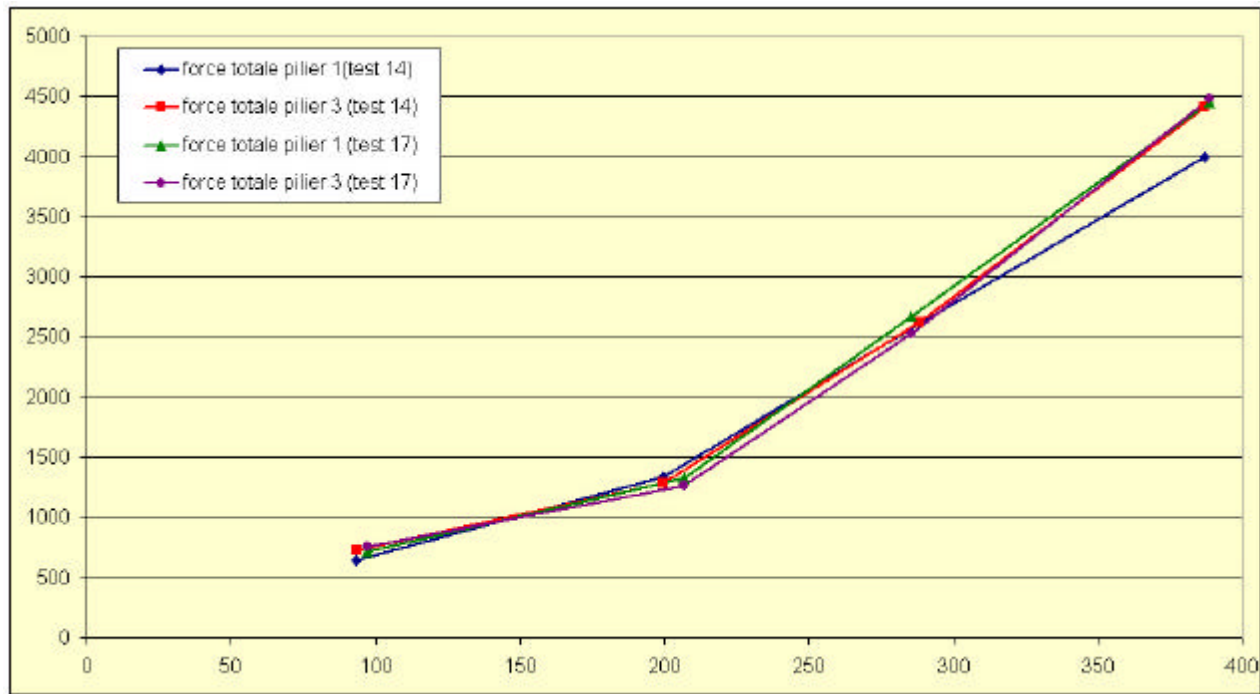


Figure 107 : Forces totales enregistrées sur chaque pilier lors des tests 14 et 17

4.8.3.2.3 Présence d'une plaine d'inondation

Tous les tests effectués depuis le début des simulations comportaient une plaine de débordement où l'eau pouvait s'écouler. Lors du test 20, la plaine d'inondation fut fermée à son embouchure. Les conditions qui se créèrent alors correspondent à ce que serait un environnement sans plaine. L'objectif du test est d'identifier l'influence de la présence d'une plaine inondable sur les niveaux atteints en cas d'embâcle. L'hypothèse posée est que en l'absence de plaine, les niveaux d'eau soient plus élevés même pour des débits plus faibles. Pour un débit équivalent avec un test avec plaine, les forces d'application devraient être plus importantes et leurs points d'application plus hauts.

Effectivement, il est ressorti lors du test que les niveaux d'eau sans plaine sont plus hauts d'environ 11% que ceux enregistrés dans un test avec plaine. Le débit maximal atteint avant la relâche des glaces par la structure a cependant été à peine supérieur à 200 m³/s alors qu'il était monté à près de 390 m³/s avec la plaine d'inondation, soit une diminution d'efficacité de près de 50% sur le débit de conception. L'augmentation des niveaux implique également une augmentation des forces. Les forces s'appliquant sur la structure étant localement hydrostatiques et le niveau d'eau étant plus élevé à un débit similaire, ce résultat était prévisible.

4.8.3.3 Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau

Le même cheminement que celui effectué à la section 4.8.2.5 a été fait pour les tests avec une pente de 0,66%. Les résultats confirment les valeurs précédemment obtenues. Il est encore possible de dire, qu'en moyenne 40 % à 50 % de la force engendrée par la hauteur de la colonne d'eau au début de la section d'équilibre est observé à la structure.

4.8.4 Tests faits avec une pente de 1,1%

Une fois le programme de tests initial terminé et vu que l'estacade-filet répondait mieux que prévu à des pentes fortes, une nouvelle série d'essais fut planifiée. Cette dernière série, à une pente de 1,1%, avait principalement pour but de répondre au critère de localisation d'une éventuelle structure sur la Montmorency. L'avancée des travaux en ce domaine avait effectivement montré que le seul lieu d'installation possible était dans une zone de pente d'environ 1%. Six tests ont été réalisés dans cette gamme de pente. Sur ces 6 essais, seuls 4 peuvent effectivement être examinés. Le test 24 ne peut être traité car les données de débit ne se sont pas été enregistrées. L'estacade-filet testé à l'essai 27 n'a pas réussi à stopper les glaces une fois le débit de base augmenté. Il a cédé à la première hausse alors que le débit était tout près de 200 m³/s.

Les résultats obtenus vont dans le même sens que ceux obtenus avec les pentes précédentes. Avec la présence d'une plaine de débordement, les tests 28 et 29 ont réussi à stopper les glaces au moins jusqu'à 350 m³/s. Le test 27 étaient le seul à reprendre une configuration de 5 pontons. Les glaces ont débordé de la structure dès la première hausse de débit. Les résultats de l'analyse des forces en fonction des niveaux d'eau tendent à montrer que la moyenne du rapport de la force engendrée par la hauteur de la colonne d'eau au début de la section d'équilibre sur celle observée à la structure est de 30%. Ce résultat diffère de ce qui était observé aux pentes précédentes, mais il faut mentionner que l'échantillon disponible était également plus restreint. Les distances d'application lorsqu'une plaine d'inondation est présente sont d'environ 80 mm (3,2 m). Lorsque la plaine est absente, les hauteurs d'application subissent une hausse en cours de test et se stabilisent autour de 120 mm (4,8 m) correspondant à la hauteur de l'attache du filet.

4.8.5 Conclusions des tests avec les estacades flottantes à filet

Trois séries d'essais ont été réalisées sur le modèle physique. Chaque série d'essais a permis de tester une structure d'estacade flottante à filet avec une pente différente. La pente est donc passé de 0,2% à 0,6 et finalement à 1,1%. Plusieurs variantes ont été testées lors de ces simulations. Les facteurs mentionnés dans la liste ci-dessous sont ceux qui ont fait l'objet d'études particulières :

- ?? Présence de gros blocs devant la structure au début du test
- ?? Influence du diamètre des pontons
- ?? Influence de la présence d'un seuil
- ?? Influence de la configuration du filet

- ?? Influence de la longueur du câble de section
- ?? Influence de la présence d'une plaine de débordement

En plus de ces divers paramètres, une analyse des forces en fonction des niveaux d'eau et de la hauteur d'application de ces forces sur les piliers fut également menée.

4.8.5.1 Efficacité des estacades flottantes à filet en fonction du débit

Il convient d'abord de mentionner que la structure d'estacade flottante à filet, grâce justement à la présence du filet, réussit à arrêter la débâcle. Les débits auxquels la structure réussit à former un embâcle stable sont portés en graphique à la Figure 108. Comme il est possible de le constater, si une plaine d'inondation est disponible, la structure est efficace à retenir la glace jusqu'à un débit d'au moins 250 m³/s. Le niveau peut même dépasser 400 m³/s si des gros blocs sont disposés devant la structure avant le début du test (test 01). La présence de ces blocs tente alors de reproduire la présence d'un couvert de glace en amont de la structure. Contrairement à un couvert réel qui aurait été ancré aux rives, les blocs étaient ici sans attache. De plus, les blocs simulent mal un couvert intact car ils ne sont pas non plus reliés entre eux. L'essai 01 fut le seul à essayer de reproduire ces conditions. Basé sur l'expérience et les résultats de ce test, il semble que la présence d'un couvert pourrait améliorer encore plus l'efficacité de la structure. Comme un couvert a de grandes chances d'être présent en réalité, même en extension limitée, le chiffre de 250 m³/s comme débit d'efficacité serait conservateur. Si aucune plaine d'inondation n'est disponible, les débits auxquels la structure réussit à former un embâcle stable varient de 175 m³/s (débit estimé) à 200 m³/s. La présence d'un couvert aiderait probablement la structure à résister à un débit supérieur tout comme la présence d'une plaine d'inondation.

4.8.5.2 Influence des divers facteurs

La taille des pontons attachés à l'estacade a semblé influencer les forces lors des tests avec une pente de 0,2%. Cette influence ne s'est pas manifestée avec des pontons de différentes grosseurs pour les autres pentes. Étant donné que les pontons ne jouent pas de rôle autre que de maintenir par flottaison le filet à la surface, il est surprenant qu'une différence dans les forces puisse être observée. La configuration du filet et du câble de section semblent à prime abord avoir plus d'importance. Si du point de vue des forces observées, les différentes combinaisons semblent toutes revenir au même, visuellement, il y a une différence. Le filet « en pointe » permet aux glaces de pénétrer plus facilement dans la structure. De même lorsque le câble de section est réduit l'estacade a moins tendance à s'enfoncer en son centre. Malgré tout, les forces et les débits de lâcher sont à peu près tous similaires. Cela voudrait peut-être dire que la structure sert essentiellement à amorcer l'embâcle. Une fois celui-ci formé, la configuration du filet et la longueur du câble de section semblent avoir peu d'importance du moment qu'ils soient choisis dans les limites du raisonnable. De même la présence d'un seuil aide le filet à mieux se déployer lors de la formation de l'embâcle : les pontons sont soulevés plus facilement car la glace peut pénétrer plus facilement à l'intérieur du filet grâce à la profondeur d'eau accrue. Par la suite par contre, l'importance du seuil se réduit considérablement : encore une fois, dès que l'embâcle est formé, la présence d'un seuil semble avoir peu d'importance sur l'efficacité de la structure.

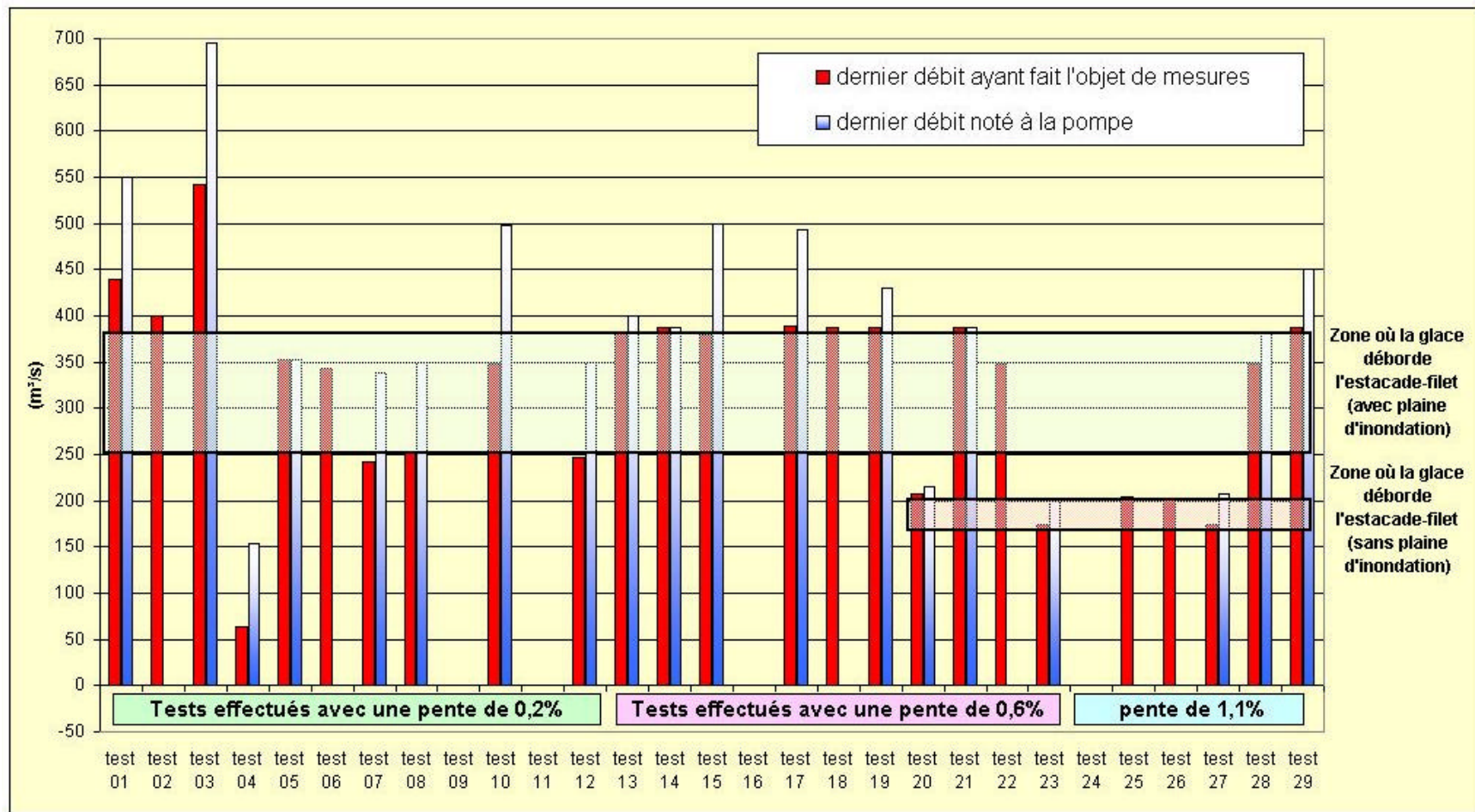


Figure 108 : Débit maximaux atteints lors des tests d'estacades flottantes avec filets

Lorsque des tests furent réalisés sans plaine d'inondation, il fut observé que les niveaux d'eau sont plus hauts d'environ 11 % que ceux enregistrés dans un test avec plaine. Le débit maximal atteint avant le lâcher des glaces par la structure reflète cependant une diminution d'efficacité de près de 50% en fonction du débit de débordement de la structure par les glaces.

4.8.5.3 Analyse des forces et des hauteurs d'application

En moyenne 30% (pour des pentes de 1,1%) à 40% (pour des pentes plus faibles) de la force engendrée par la hauteur de la colonne d'eau au début de la section d'équilibre est observé à la structure. La moyenne des rapports des forces mesurées contre les forces théoriques pour chaque débit après le débit initial pour les tests effectués est d'environ 1 au piézomètre situé le plus près de l'estacade-filet. Localement du moins, l'ampleur des forces sur la structure correspond donc à des valeurs hydrostatiques. Une partie des forces doit également être reprise par les ancrages du filet au fond de la rivière. Ces forces n'ont pas été lues par les piliers jaugés. Il est possible de croire que l'importance de ces forces soit négligeable vis-à-vis des forces totales s'appliquant sur la structure, mais aucune mesure n'a été prise pour le démontrer.

La hauteur d'application des forces sur les piliers d'ancrage varie pour tous les tests entre 3,2 m et 4,8 m (80 à 120 mm à l'échelle de la maquette). Ces forces sont transmises aux piliers par les trois câbles qui rattachent le filet aux piliers. La seule configuration utilisée lors des tests consistait à ancrer les câbles à 4,8 m, 2,4 m et au fond. La répartition des forces dans ces différents câbles n'a pas été étudiée. Il est donc possible de conclure uniquement pour cette situation. Une valeur de hauteur d'application des forces à 4,8 m est, dans ce cas, conservatrice.

En résumé, il est possible d'affirmer qu'en laboratoire les estacades flottantes à filet fonctionnent bien. Elles réussissent à stopper une débâcle peu importe la pente, du moment que ces différentes composantes soient dimensionnées raisonnablement. Par la suite, l'influence des composantes évaluées lors des tests (taille des pontons, seuil, configuration du filet) est peu reliée au débit maximal que la structure peut atteindre avant d'être débordée par les glaces.

4.9 Calculs complémentaires

Le but général des calculs complémentaires n'est pas de vérifier l'efficacité technique des dispositifs dans le genre de biefs d'écoulement de la Montmorency. Le but est plutôt d'évaluer les conséquences du comportement de la ligne d'eau dans les biefs d'accumulation, qu'il s'agisse de celui de l'ouvrage ou de ceux situés en aval. Il n'est pas tout de savoir qu'un ouvrage peut arrêter (ou retarder) efficacement la débâcle, provoquer un embâcle, résister aux efforts et évacuer le débit pour divers niveaux d'hydraulicité, il faut aussi s'interroger sur les niveaux d'eau atteints dans son bief d'amont surtout si l'on y trouve des éléments vulnérables aux inondations. De plus, étant donné que le couvert de glace peut décrocher en aval de la structure et aller former des embâcles plus loin en aval, il est important de vérifier si la ligne d'eau en amont de ces embâcles « résiduels » ne va pas entraîner des conditions d'inondation comparables à celles que l'on voulait résoudre.

Les questions répondues par les simulations ont donc trait à la faisabilité en terme de risque résiduel dans les biefs sélectionnés. Il ne suffit pas des résultats obtenues en laboratoire pour estimer les niveaux d'eau dans les différents biefs puisque, faut-il le rappeler, les essais ont été réalisés dans des géométries idéalisées, et ne représentant que les biefs d'amont des estacades. La prise en compte des données topographiques réelles des biefs concernés aurait toujours pu se faire en laboratoire mais les lois de similitude pour la glace étant difficiles à respecter, aucun gain de précision n'était anticipé d'un tel choix et son coût aurait été prohibitif.

4.9.1 Objectifs spécifiques des simulations numériques

Les objectifs spécifiques du programme de simulation sont les suivants :

1. choisir un débit de conception devant transiter par l'ouvrage lors d'embâcles ainsi qu'un volume de glace correspondant aux scénarios étudiés;
2. reproduire les conditions existantes lors d'un embâcle historique (volume de glace, débit) et s'assurer que le modèle reproduit correctement le phénomène qui fut alors observé;
3. vérifier les niveaux d'eau maximum atteints lors d'un embâcle majeur dans le bief d'amont d'une structure, quelle qu'elle soit, implantée aux sites 1 et 2 identifiés en pré-faisabilité et évaluer la vulnérabilité des résidences et infrastructures en rive;
4. vérifier les niveaux d'eau maximums atteints lors d'un embâcle majeur dans le bief d'amont d'une structure, quelle qu'elle soit, implantée dans le bief d'amont du 300 avenue Sainte-Brigitte;
5. vérifier les niveaux d'eau maximums atteints lors d'un embâcle résiduel formé en aval de la structure à la hauteur de la rue des Deux-Rapides et évaluer la vulnérabilité des résidences et infrastructures en rive à cet endroit et à l'Île-Enchanteresse;
6. essayer de prévoir les différents scénarios de comportement des différents biefs dans les circonstances connues de débâcle et d'embâcle.

4.9.2 Méthodologie de simulation

Deux modèles informatiques ont été utilisés afin de reproduire les conditions à l'amont d'un embâcle. Le premier est un modèle de simulation d'embâcle simplifié développé à l'Université Laval et spécifiquement conçu pour le cas de la rivière Montmorency. Ce modèle, développé sur le chiffrier Microsoft Excel™, avait pour but de fournir rapidement et sommairement une estimation des impacts résiduels de l'installation d'une structure dans la rivière. Il n'en sera que très peu question dans cette section étant donné que son utilisation s'est limitée à une première approximation qui fut par la suite précisée avec l'utilisation d'un second modèle. Ce second modèle, HEC-RAS, prend la forme d'un logiciel plus raffiné et utilisé fréquemment dans le domaine de l'hydraulique fluviale.

4.9.2.1 Modèle utilisé

Le logiciel de simulation numérique retenu pour ce projet est la version 3.0.1 de HEC-RAS (acronyme de Hydrologic Engineering Center - River Analysis System). Ce logiciel, développé par le US Army Corps of Engineers (USACE), représente l'évolution la plus récente des logiciels de simulation numérique de la famille HEC. Axé sur les courbes de remous à une dimension, HEC-RAS permet de reproduire ce qui se produit dans un réseau hydrographique naturel complexe, surtout en ce qui concerne les niveaux d'eau. Son interface graphique interactive permet la simulation conviviale de phénomènes hydrologiques avec réalisme et un bon degré d'exactitude du moins pour les niveaux d'eau. Le logiciel est doté d'un module permettant de simuler des couverts ou des embâcles de glace. À la fin des itérations informatiques permettant de déterminer l'épaisseur de l'embâcle, deux conditions doivent être respectées :

?? L'embâcle ne peut occuper toute la section. Au moins 30 cm doivent être laissés libre pour le passage de l'eau sous l'embâcle;

?? La vitesse sous l'embâcle ne peut excéder 1,5 m/s.

Le respect de la première condition implique que HEC-RAS ne peut modéliser d'embâcle posé sur le fond. C'est pourtant ce type d'embâcle qui pourrait se produire sur la Montmorency. Les simulations ont toutefois démontré que les 30 cm de dégagement requis sous la glace n'influençaient pas les résultats lorsqu'ils étaient comparés aux observations de terrain recueillies lors de certains événements.

4.9.2.2 Topographie de la rivière

Afin de recréer le profil topographique de la Montmorency sur le modèle numérique, trois jeux de données différents furent utilisés. Chaque jeu couvre une zone distinguée mais, lorsque c'était possible, se recoupant à leurs extrémités communes. Deux séries de données nous ont été fournies directement par le ministère de l'Environnement du Québec. Ces données ont été recueillies dans le cadre de la convention fédérale provinciale sur la cartographie des plaines d'inondation ou du Programme de détermination des cotes de crues récemment mis à place. Ces deux séries, en plus de comprendre des transects topométriques de la rivière, fournissent des relations niveaux-débits à divers lieux. Les données avaient déjà été utilisées et calibrées sur le programme HEC-2 (dont HEC-RAS est l'ultime évolution) afin d'établir les niveaux d'eau pour les récurrences de crue en eau libre de 20 ans et 100 ans. Le premier de ces deux jeux cartographiques couvre le secteur s'étendant de l'amont du rapide des Trois-Sauts jusqu'à l'aval de l'Île-Enchanteresse (km 7,8 à 13,5) (Boucher et Picard, 1994). Le second jeu décrit la zone de l'Île-Enchanteresse. Il s'étend du km 13,4 au km 14,8 (Picard et coll., 1990). La région située en amont de l'Île-Enchanteresse fut couverte grâce aux données laser et topographiques recueillies dans le cadre de ce projet (Leclerc et coll., 2001). L'extraction des profils des transects, essentiel à la réalisation des simulations 1D a été effectuée avec le logiciel MODELEUR développé à l'INRS-ETE avec lequel la base de données topographiques du projet avait été assemblée.

4.9.2.3 Débits et volume de glace

Les calculs de débits et de volumes de glace impliqués lors des phénomènes d'embâcle sur la Montmorency restent des éléments clés à définir. Sur la Montmorency, les débits sont enregistrés à la station hydrographique 051001 qui est située au barrage des Marches naturelles en amont de la chute Montmorency. Pour certaines dates d'embâcle, il fut possible de connaître les débits horaires pour la journée de l'événement. À d'autres périodes, il n'a été possible d'obtenir que les débits journaliers.

Les volumes de glace participant aux embâcles sur la Montmorency ont déjà été évalués sommairement dans le rapport de pré-faisabilité (Leclerc et coll., 2001) et par Doyon (2001). Ce calcul a été raffiné et bien qu'il soit encore approximatif, il semble bien correspondre à la réalité tout en gardant une proportion conservatrice. Le volume de glace maximal disponible pour la formation d'embâcle à l'Île-Enchanteresse est évalué à 560 000 m³ pour les fins de simulation. Si la débâcle devait continuer jusqu'au secteur des Îlets sur le territoire de la ville de Beauport et y former un embâcle, il faudrait ajouter au volume 140 000 m³ pour un total de 700 000 m³ de glace. Ces évaluations ont fait l'objet de la section 2.2.2, page 29.

Dans le modèle développé à l'Université Laval, le volume de glace doit être entré comme paramètre de base. Il est possible de savoir que le bon volume a été trouvé quand la longueur de l'embâcle simulé correspond à l'extension d'un embâcle réel dont la longueur est connue. Avec HEC-RAS, la longueur de l'embâcle est donnée au logiciel et le volume de glace est calculé dans le processus de simulation. Ces deux modèles numériques évaluent entre 330 000 m³ et 406 000 m³ le volume de glace des embâcles observés en 1999 et 1992 selon le logiciel utilisé et l'année de l'événement. Il était prévisible de ne pas obtenir tout à fait le même chiffre que le calcul théorique maximal. Lors de la débâcle, de nombreuses glaces sont abandonnées tout le long du parcours avant même la formation d'embâcle. La quantité de glaces « orphelines » dépend de plusieurs paramètres dont, entre autres, la distance parcourue et l'accessibilité à des zones de stockage. La différence d'environ 25 % à 40 % observée entre la valeur théorique maximale estimée et celle donnée par les modèles numériques semble réaliste vis à vis de ce qui est rencontré dans la littérature (Ashton, 1986).

4.9.2.4 Calibration et validation

Le but de la calibration n'est pas de tenter à tout prix de reproduire l'embâcle en détail, mais de s'assurer que le modèle s'approche assez de la réalité pour qu'il génère des résultats cohérents et plausibles lors de la phase de simulation.

Afin de reproduire les paramètres physiques de l'embâcle avec plus de réalisme, HEC-RAS offre de définir certains paramètres, tels la porosité et l'angle de friction de la glace. Toutes les simulations ont été faites avec une porosité dans l'embâcle de 0,40 et un angle de friction de 45°.

Dans un premier temps, le modèle numérique doit être calibré pour reproduire les débits et les niveaux historiques. S'il s'avère qu'un choix doit être fait entre le débit et le niveau, nous retiendrons le niveau car il sous-tend une donnée précise et connue alors que le débit est un estimé plus ou moins précis, surtout en condition de débâcle-embâcle. Deux événements majeurs d'embâcle ont servi à calibrer le modèle numérique, soit ceux du 25 janvier 1999 et du 12 mars

1992. Pour l'événement du 25 janvier 1999, nous disposons de plusieurs informations de premier plan. Le débit horaire maximal enregistré pour cette journée a été de 69 m³/s. Trois niveaux atteints par l'eau lors de l'embâcle ont aussi pu être retracés grâce à des témoignages de riverains et sont rapportés au Tableau 22.

Tableau 22 : Niveaux d'eau observés et simulés pour l'événement de 1999

Endroit	Niveaux observés	Niveaux simulés
Aval rue des Pins	175,2	175,4
Amont rue des Pins	178,0	178,3
Ruisseau Euclide	181,9	181,2

Le volume de glace composant l'embâcle tel qu'évalué par HEC-RAS est d'environ 330 000 m³. Doyon (2001) évaluait de façon théorique la quantité de glace de cet embâcle à 341 000 m³. Ce résultat est fort encourageant puisque la différence entre la théorie et le volume calculé numériquement est à peine supérieur à 3%. Comme il est possible de le voir au Tableau 22, de légères variations apparaissent entre les niveaux observés et ceux simulés, les écarts étant tout à fait acceptables eu égard à la précision intrinsèque du modèle. Ceci peut également s'expliquer par le fait que les niveaux d'eau sont évalués aux différents transects incorporés dans le modèle. Ces transects ne correspondent pas exactement avec la localisation des repères donnée par les riverains afin d'évaluer les niveaux d'eau.

Pour l'embâcle de 1992, nous disposons également de nombreux points de niveaux d'eau observés et reproduits sur une carte disponible à la MRC de la Jacques-Cartier. Par contre, le débit n'était pas disponible pour cette période. Afin de reproduire les différents niveaux d'eau observés à l'Île-Enchanteresse, un débit de 80 m³/s a été introduit dans le modèle. Cette valeur de débit est réaliste pour la période de l'année à laquelle est survenu l'embâcle et rien ne nous porte à croire qu'elle soit exagérément disproportionnée. Les résultats obtenus par simulation comparés aux niveaux observés sont excellents. Le volume de glace tel que calculé par le logiciel est de 375 000 m³. La Figure 109 montre un exemple de résultat obtenu pour l'embâcle de 1992 à l'Île-Enchanteresse.

Tableau 23 : Niveau d'eau observé et simulé pour l'événement de 1992

Endroit	Niveaux observés	Niveaux simulés
Aval rue des Pins	175.7	175.6
Milieu de l'Île-Enchanteresse	176.4	176.5
Amont rue des Pins	178,3	178,6

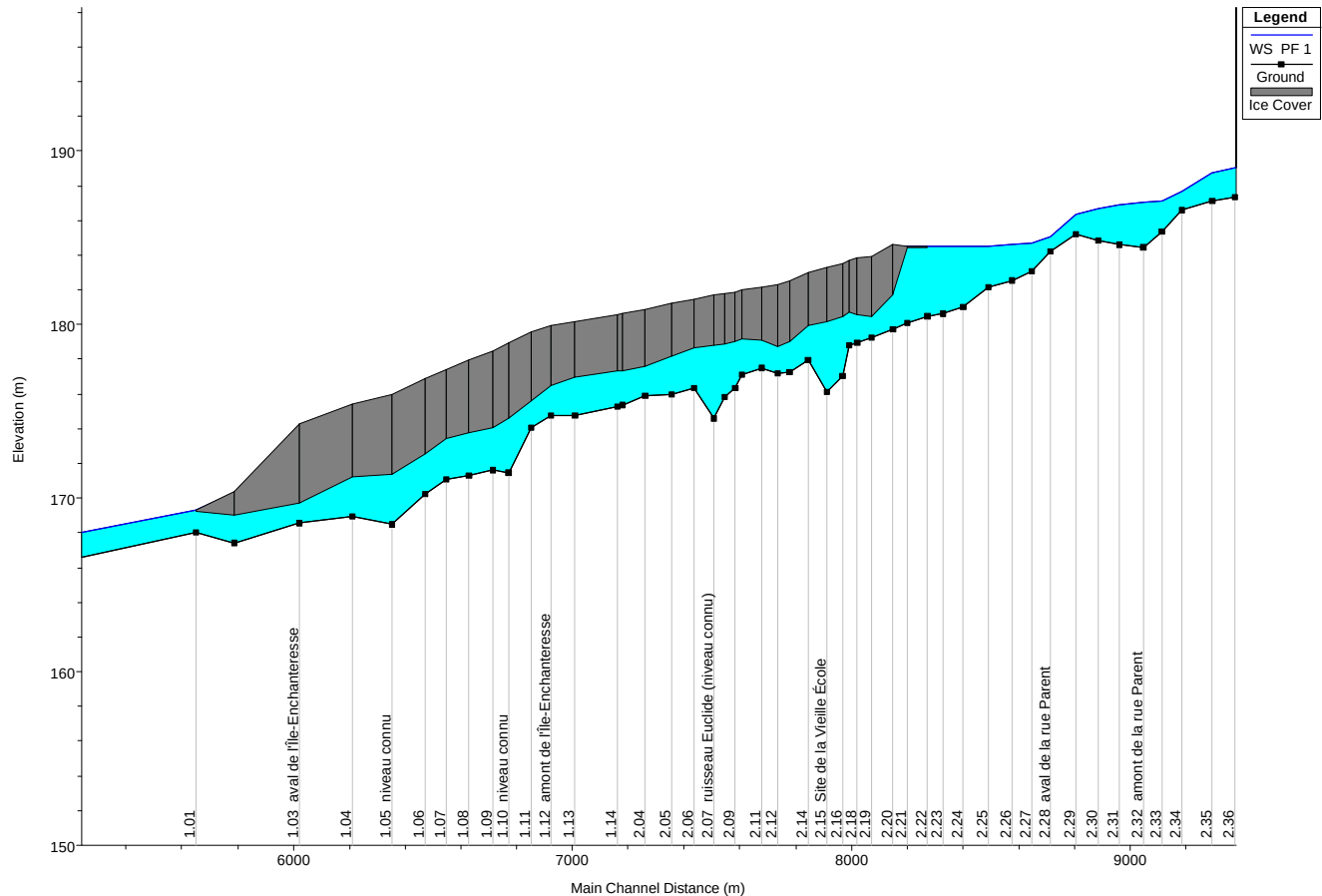


Figure 109 : Exemple de sortie graphique du logiciel HEC-RAS (embâcle de 1992)

Ces deux simulations pour des événements connus sont jugées satisfaisantes et montrent que le modèle numérique génère des résultats valides représentant correctement les niveaux d'eau lors de phénomènes d'embâcles connus.

4.9.3 Simulations pour les sites #1 et #2

Lors de la phase de pré-faisabilité, deux sites avaient été identifiés comme pouvant être de bons endroits pour l'installation de structure de contrôle des glaces. Ces sites étaient cependant considérés avec une grande circonspection étant donné la présence dans leur bief d'amont de nombreuses résidences riveraines qui, étant situées trop bas, pouvaient subir des dommages dus aux embâcles. Les simulations numériques sur HEC-RAS qui suivent ont permis de confirmer ces craintes et d'exclure ces deux possibilités.

4.9.3.1 Conditions simulées

Quoique l'embâcle de 1992 ne correspondait pas à des extrêmes de conditions d'embâcles, cet événement était suffisamment grave et connu pour servir de base aux simulations aux sites #1 et 2.

Les conditions de débit et de glace celles-ci furent donc reprises et rapportées aux localisations des deux sites identifiés dans la phase de faisabilité. Un embâcle fut formé dans un premier temps au site #1 (km 15,3) et, dans une seconde simulation, au site #2 (km 15,7). Le débit de 80 m³/s défini dans la calibration fut utilisé pour les deux simulations. L'embâcle fut prolongé vers l'amont jusqu'à ce que son volume de glace soit équivalent à ce qu'il aurait été si un embâcle s'était réellement formé à l'endroit où la structure aurait été établie. Un volume de glace dans l'embâcle estimé à 330 000 m³ est recherché pour le site #1. Ce volume provient du volume observé pour l'embâcle de 1992 à la rue des Deux-Rapides (375 000 m³) auquel on a soustrait le volume de glace qui ne participe plus à l'embâcle (s'étendant de la rue des Deux-Rapides au site numéro #1). Ce volume est estimé à 40 000 m³. Le même processus est utilisé pour évaluer le volume de glace pour un embâcle au site #2. Le volume recherché est alors de 335 000 m³.

4.9.3.2 Résultats

Afin de mieux visualiser l'impact qu'aurait l'installation de structures aux sites #1 et #2, la hauteur d'eau obtenue à partir des simulations a été superposée à un profil en long du secteur d'intérêt (Figure 110 et Figure 111). Il devient évident que l'installation d'une structure à l'un ou l'autre de ses deux sites soulève la question du risque additionnel d'inondation pour les résidences et infrastructures situés dans le bief d'amont, notamment à la rue Parent et à l'amont de la rivière des Pins. Il faut de plus se souvenir que le débit simulé ici n'est que de 80 m³/s; or, le débit de conception de la structure a été prévu pour retenir les glaces jusqu'à 200 m³/s. À ce débit, les niveaux d'eau atteints seraient encore plus catastrophiques pour les résidents du bief amont.

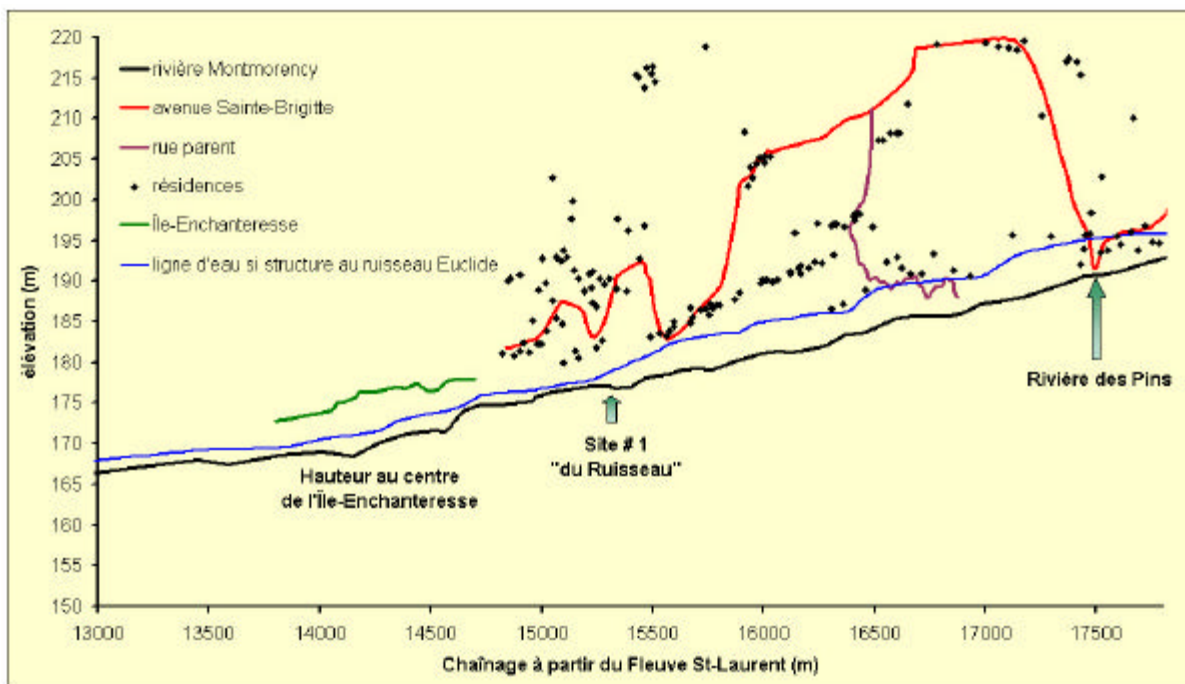


Figure 110 : Impact sur le bief amont de l'installation d'une structure de contrôle des glaces au site #1 lors d'un événement semblable à celui de 1992 à l'Île-Enchanteresse

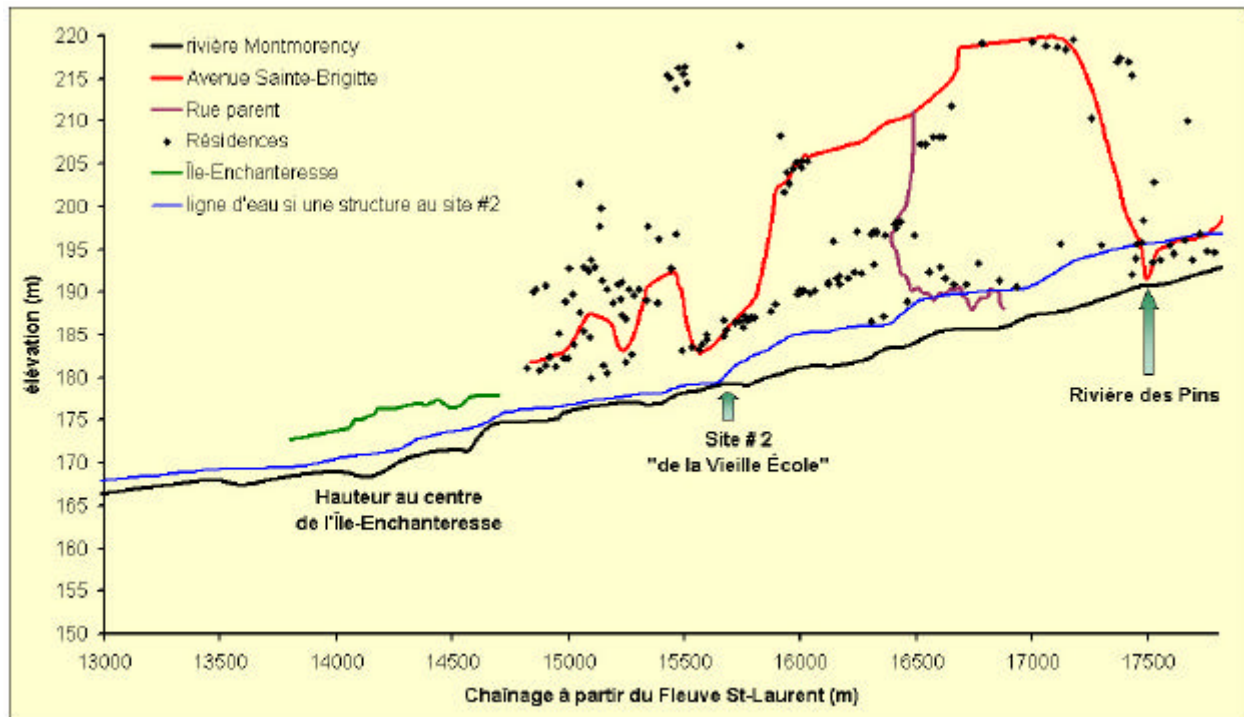


Figure 111 : Impact sur le bief amont de l'installation d'une structure de contrôle des glaces au site #2 lors d'un événement semblable à celui de 1992 à l'Île-Enchanteresse

4.9.4 Simulations pour le site d'amont du 300 avenue Sainte-Brigitte

4.9.4.1 Conditions simulées

Afin de voir l'impact qu'aurait sur le bief amont l'installation d'une structure à la hauteur du 300 avenue Sainte-Brigitte, deux simulations ont été réalisées. La première simulation reprend les conditions observées en 1992. Nous supposons qu'une structure existe à ce moment à l'endroit désigné. Le volume de glace et la longueur d'embâcle ont été ajustés de façon à refléter les valeurs attendues à cet endroit, comme cela avait été fait lors de l'évaluation des impacts aux sites 1 et 2 (section précédente). Un volume d'environ 300 000 m³ est visé pour les deux simulations. La deuxième simulation a été faite à un débit de 180 m³/s. Cela correspond au débit ayant vraisemblablement créé l'embâcle de 1947, le pire événement à être survenu dans le secteur de l'Île-Enchanteresse. Un débit de 180 m³/s est également près du débit de conception prévu pour cet ouvrage.

4.9.4.2 Résultats

La simulation d'embâcle par le logiciel HEC-RAS avec des pentes aussi fortes et des débits aussi élevés n'est pas facile et pose parfois des difficultés de convergence. Afin de respecter les

algorithmes de calcul et pouvoir poursuivre son calcul, le logiciel prédit une épaisseur d'embâcle trop mince, s'il est laissé à lui même. Afin de « guider » HEC-RAS, une épaisseur minimale d'embâcle fut donnée au logiciel. Cette épaisseur permet au logiciel d'avoir une base sur laquelle débiter son processus de résolution. Afin de déterminer l'épaisseur minimum devant être donnée, les données recueillies lors des simulations en maquette furent utilisées.

Les simulations furent jugées satisfaisantes lorsque les volumes de glace correspondirent à ce qui était visé (300 000 m³) et que les niveaux d'embâcle furent semblables (une fois remis à l'échelle du prototype) à ceux obtenus en maquette. Cette façon de faire est conservatrice car les niveaux d'embâcle en maquette sont surévalués à cause de l'angle de frottement plus faible du plastique (33°) comparativement à celui de la glace (45°). Les niveaux atteints lors des simulations numériques sont donc eux aussi légèrement surestimés.

Les embâcles formés en amont du 300 s'étendent sur une distance de 1,4 à 2 km (Figure 112). Pour le débit de 180 m³/s, une distance de 2,2 km est nécessaire, à partir de la structure, pour que le niveau d'eau retrouve sa hauteur normale. Pour un débit de 180 m³/s, les niveaux d'eau sont, en moyenne, surélevés de 7,9 m par rapport au fond de la rivière pour la section d'équilibre de l'embâcle.

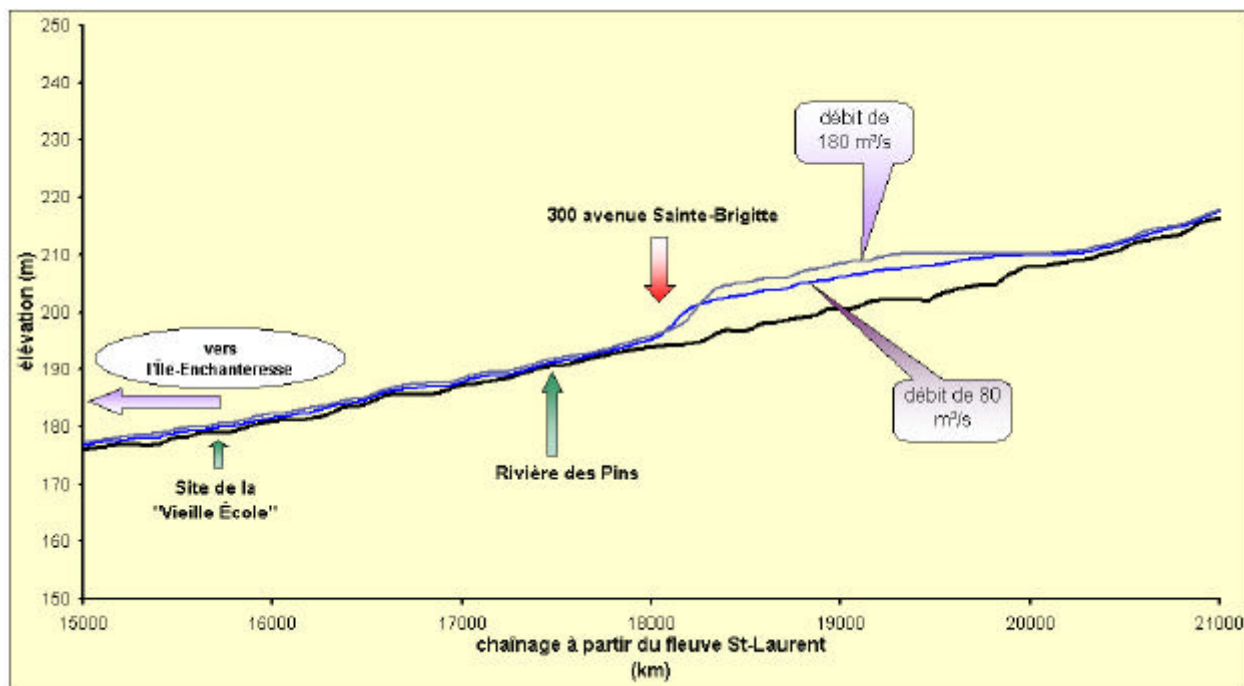


Figure 112 : Niveau d'eau atteint lors d'un embâcle formé sur une structure située en amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte

Bien que disposant de beaucoup moins d'informations sur la présence de résidences dans ce secteur, les rencontres avec les divers intervenants de la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval nous ont appris qu'il n'y aurait pas de riverains localisés à une hauteur exposée aux inondations dans ce secteur. Ceci nous permet d'affirmer que les impacts d'un tel niveau seraient acceptables en termes de dommages.

4.9.5 Simulations du risque résiduel pour le site de la rue des Deux-Rapides

Malgré la construction d'un ouvrage de rétention des glaces à l'amont, il reste toujours un danger de voir se former un embâcle à la rue des Deux-Rapides avec le volume résiduel de glaces qui resterait entre la structure et ce point. La possibilité de formation d'embâcles résiduels n'est pas certaine car elle dépend de la possibilité du déclenchement d'une débâcle dans ce secteur limité. S'il était difficile d'estimer le débit déclencheur sur l'ensemble du tronçon à débâcle dans les conditions actuelles, une telle évaluation devient impossible dans le secteur limité entre l'éventuel ouvrage et la rue des Deux-Rapides car il faut évaluer des conditions qui n'existent pas présentement sur la rivière donc qui ne procurent aucune donnée empirique.

En écartant les sites 1 et 2, il devenait important de savoir si la présence d'un ouvrage de contrôle aussi loin en amont que les environs du 300 avenue Sainte-Brigitte offrait une protection adéquate aux résidents de l'Île-Enchanteresse.

4.9.5.1 Conditions simulées

Afin d'évaluer le risque résiduel, nous avons procédé à trois simulations. La première consista à tenter de reconstituer l'événement de 1947, soit le pire événement historiquement documenté survenu à l'Île-Enchanteresse. Pour ce faire, nous disposons de quelques informations. L'embâcle étant survenu dans la période de Noël, nous avons supposé que sa longueur devait être relativement semblable à celle de l'embâcle de janvier 1999 survenu à la même période de l'année. Des témoignages nous permettent de savoir que l'Île aurait été complètement submergée par les glaces et que l'avenue Sainte-Brigitte à cette hauteur était impraticable parce qu'inondée elle-aussi. Afin de correspondre à ces indices, le débit a dû être augmenté jusqu'à 180 m³/s lors des simulations. Cela correspond assez bien au débit obtenu à partir d'une reconstitution faite à partir des débits connus pour les rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. Ce débit est également très proche du débit de conception retenu pour l'éventuelle structure de contrôle des glaces.

Nous avons par la suite produit une deuxième simulation dans le même secteur avec un volume restreint de glace. Nous reproduisons de cette façon le résultat de l'implantation d'une estacade en amont du 300 Ste-Brigitte. Le volume de glace considéré pour l'analyse du risque résiduel correspond à la quantité dans la rivière entre l'estacade fixe à filet et le pied de l'embâcle à la rue des Deux-Rapides, soit environ 75 000 m³.

La troisième simulation a repris tel quel l'événement de 1992 comme base de comparaison mais avec un volume de glace restreint correspondant au volume résiduel de glace advenant l'installation d'une estacade un peu en amont du 300 Sainte-Brigitte.

4.9.5.2 Résultats

La reconstitution de l'embâcle de 1947 reproduit d'une façon correcte le phénomène dans la mesure des indications que nous possédons (Figure 113, haut). Si une estacade avait été en place un peu en amont du 300 Sainte-Brigitte, les conséquences pour l'Île-Enchanteresse auraient été beaucoup moins grandes, mais non nulles. Pour un pareil débit, un risque résiduel demeure. La

partie aval de l'île serait en partie inondée si un embâcle se formait à la rue des Deux-Rapides (Figure 113 bas) dans les conditions traitées. Cependant, on remarque que le risque est grandement atténué en comparaison de la réalité observée en 1947 où la totalité de l'île a été submergée ce qui compte tenu de la grande sévérité de cet événement est une indication très encourageante.

Par ailleurs, la reconstitution de l'événement de 1992 est également intéressante, car sans que cet embâcle soit aussi critique que celui de 1947, il a été d'une grande ampleur; probablement le second en importance depuis 1947. Lorsque cet événement s'est produit en mars 1992, une très grande partie de l'île avait subi des inondations. Or, il est possible de constater sur la Figure 114 (le bas –vs- le haut), que si une estacade efficace avait existé à la hauteur du 300 avenue Sainte-Brigitte, les dégâts causés par les inondations se seraient limités à la pointe aval de l'île.

4.10 Résumé des conclusions des simulations numériques

Le but général des simulations numériques est d'évaluer les conséquences du comportement de la ligne d'eau dans les biefs d'accumulation, qu'il s'agisse de celui de l'ouvrage ou de ceux situés en aval. L'utilisation du modèle de simulation numérique HEC-RAS a permis de répondre à cet objectif en étudiant l'influence sur les niveaux d'eau qu'aurait l'implantation d'une estacade en amont de l'Île-Enchanteresse. Les simulations ont reproduit d'une façon satisfaisante en terme de niveaux d'eau et de volumes de glace deux événements récents ; ceux de 1992 et 1999. Il faut être conscient que l'objectif de la calibration n'est pas de tenter à tout prix de reproduire l'embâcle en détails, mais de s'assurer que le modèle s'approche assez de la réalité pour qu'il génère des résultats cohérents et plausibles lors de la phase de simulation. En ce sens des différences légères entre la réalité et la modélisation peuvent être acceptées. Le modèle doit garder assez de flexibilité pour pouvoir s'adapter à plusieurs situations et non pas respecter à la perfection les conditions d'une seule.

Des simulations d'embâcle furent réalisées à 4 endroits sur la rivière :

- ?? Au site # 1 (à la hauteur du kilomètre 15,3) qui avait été identifié comme site potentiel lors de la phase de pré-faisabilité.
- ?? Au site # 2 (à la hauteur du kilomètre 15,7) qui avait également été identifié comme site potentiel lors de la phase de pré-faisabilité.
- ?? Au site en amont du 300 avenue Sainte-Brigitte
- ?? À la rue des Deux-Rapides lors des calibrations et de l'analyse des risques d'embâcles résiduels.

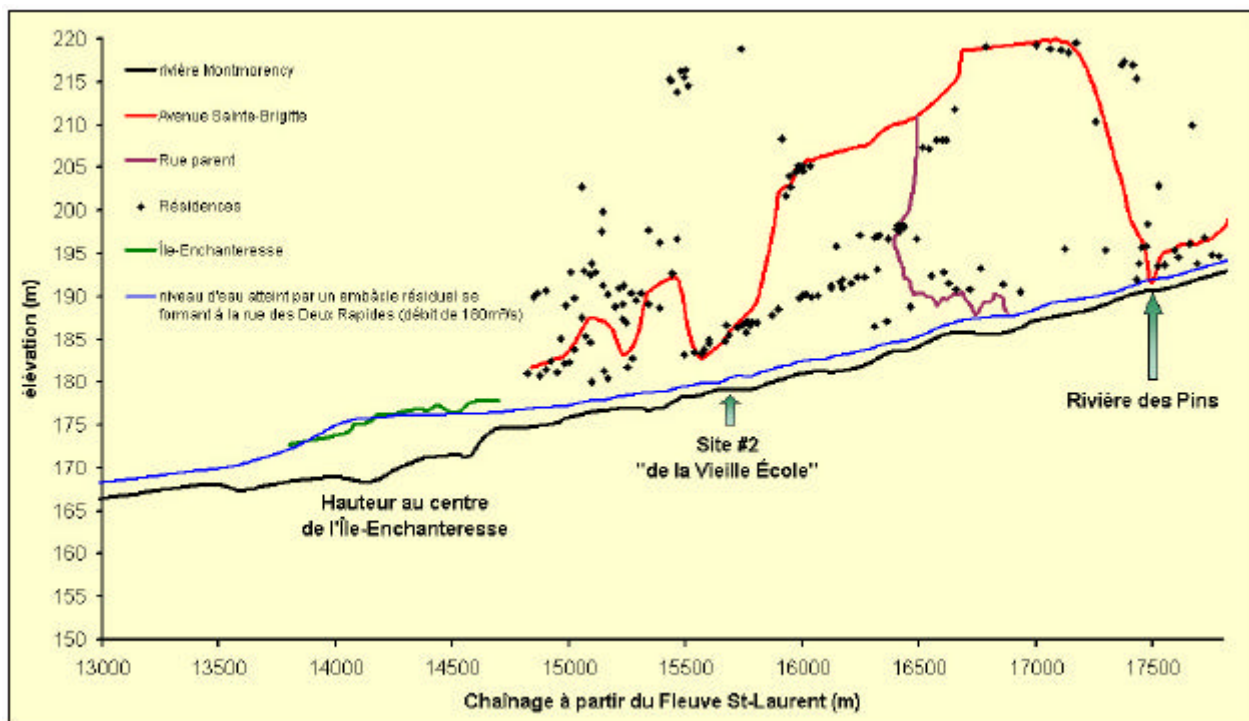
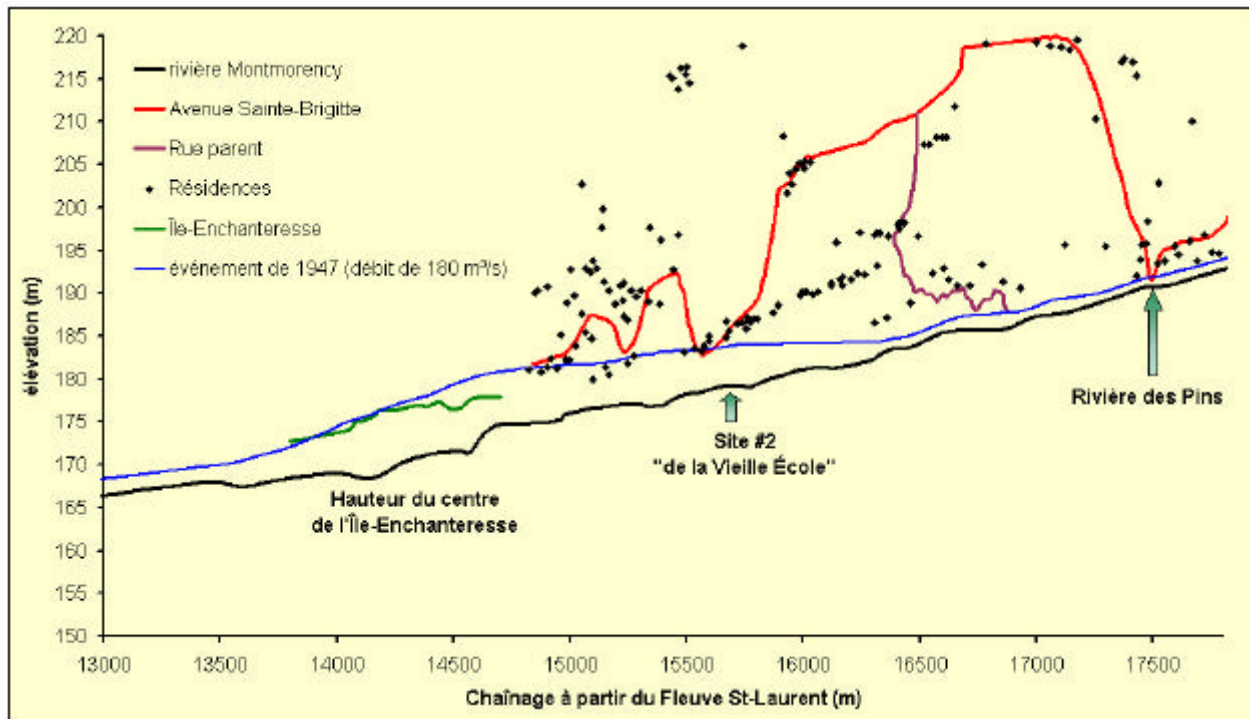


Figure 113 : Reconstitution de l'embâcle de 1947 tel qu'observé (en haut) et ce qui se serait produit si une estacade était implantée en amont du 300 Sainte-Brigitte (en bas)

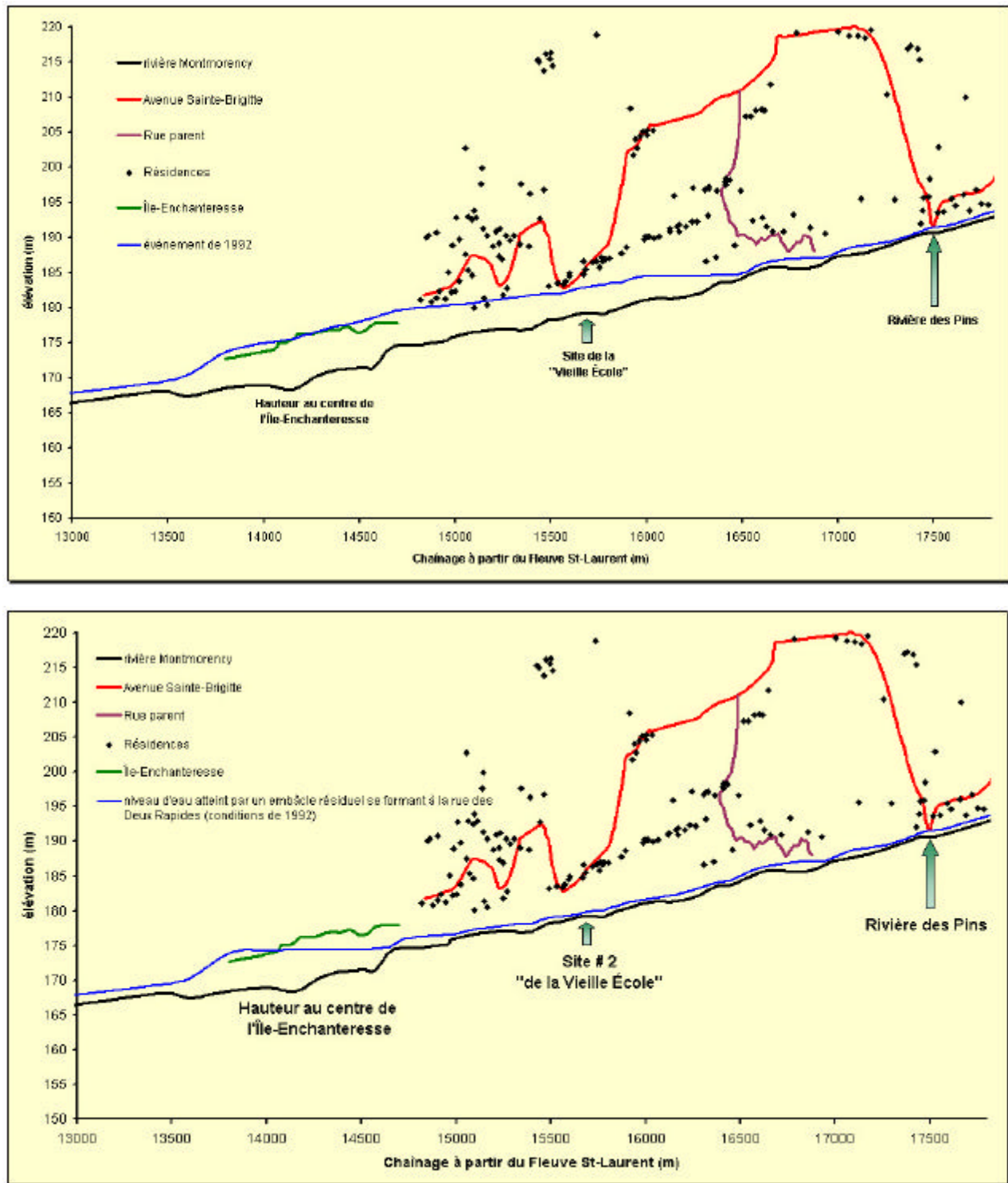


Figure 114 : Reconstitution de l'embâcle de 1992 tel qu'observé (en haut) et ce qui se serait produit si une structure de contrôle des glaces avait existé un peu en amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte (en bas)

4.10.1 Abandon des sites #1 et #2

Suite aux simulations en modèle réduit et par un modèle maison sur Excel et après une étude de l'élévation des résidences dans les secteurs en amont des sites 1 et 2, les deux endroits avaient fait l'objet de fortes remises en question. Ces sites furent préliminairement écartés par le comité de suivi (réunion de janvier 2001) car le risque d'inondation de résidences et de l'avenue Sainte-Brigitte dans le bief amont de cette éventuelle structure semblait trop grand. Les simulations numériques sur HEC-RAS permirent de confirmer ces faits. Pour des débits de 80 m³/s de nombreuses résidences et une partie de l'avenue Sainte-Brigitte se trouveraient inondées. Des simulations n'ont pas été faites à plus haut débit car déjà l'installation d'une structure même à ce débit modéré ne respectait pas le critère voulant que les risques ne soient pas augmentés pour un secteur suite à l'installation de structure *a fortiori* pour le débit de conception de l'ouvrage qui se situe vers 200 m³/s.

4.10.2 Un site retenu : l'amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte

Le lieu finalement retenu pour l'installation d'une structure est un peu à l'amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte. Afin de voir l'impact qu'aurait sur le bief amont l'installation d'une structure à cet endroit, deux simulations ont été réalisées. La première reprend les conditions observées en 1992 et les déplace au site choisi. La deuxième simulation a été faite à un débit de 180 m³/s. Cela correspond au débit ayant vraisemblablement créé l'embâcle de 1947, le pire événement historique connu à être survenu dans le secteur de l'Île-Enchanteresse. Les embâcles formés en amont d'une éventuelle structure au 300 s'étendent sur une distance de 1,4 à 2 km selon les cas traités. Les niveaux d'eau sont, en moyenne, surélevés de 8 m par rapport au fond de la rivière pour la section d'équilibre de l'embâcle. Bien que disposant de beaucoup moins d'informations sur la présence de résidences dans ce secteur, les rencontres avec les divers intervenants de la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval nous ont appris qu'il n'y aurait pas de riverains inondables dans ce secteur. Ceci nous amène à dire que les impacts d'un tel niveau seraient négligeables en termes de dommages directs.

4.10.3 Les embâcles résiduels en aval de l'Île-Enchanteresse

Malgré la construction d'un quelconque ouvrage, il reste toujours un danger de voir se former un embâcle à la rue des Deux-Rapides ou en aval avec le volume résiduel de glace qui resterait entre la structure et ce point. Cette possibilité de formation d'embâcle résiduel n'est pas certaine. Il est difficile de définir son risque d'occurrence car il faut alors évaluer des conditions qui n'existent pas présentement sur la rivière. Peut-être que si le train de glace était arrêté après 15 ou 18 km, il ne resterait plus assez de force à l'eau pour que les glaces du tronçon en aval ne se brisent. Le couvert de ce tronçon resterait alors en place. Il est également possible que le volume résiduel, dépendant des circonstances, soit trop restreint pour former un embâcle plus bas sur la rivière. Si ces situations se produisent, aucun impact résiduel ne subsistera.

En écartant les sites #1 et #2, il est toutefois devenu important de savoir si la présence d'un ouvrage de contrôle aussi loin en amont que les environs du 300 avenue Sainte-Brigitte offrait une protection adéquate aux résidents de l'Île-Enchanteresse. Deux séries de simulations ont été faites pour vérifier cela. Les embâcles de 1947 et 1992 fut reproduits numériquement tel qu'observés et tel qu'ils auraient pu être si une structure de contrôle avait existé. Les simulations d'intervention montrent que, même si des inondations peuvent encore survenir à l'Île-Enchanteresse suite à la formation d'un embâcle résiduel, leurs impacts seraient considérablement diminués sinon éliminés. Les conséquences vont typiquement de *faibles* à *modérées* selon l'échelle utilisée (Annexe 1). Lors des événements de référence, les conséquences ont été beaucoup plus graves, s'échelonnant de *très importantes* à *catastrophiques*.

5 Faisabilité dans les biefs identifiés

5.1 Identification des critères de faisabilité

Les critères qui ont été identifiés pour examiner la faisabilité de l'implantation d'une estacade fixe munie d'un filet amovible dans le bief d'amont du 300 avenue Sainte-Brigitte sont les suivants :

?? *L'efficacité technique*

?? *Le rapport coût-bénéfice par rapport au statu quo*

?? *La faisabilité technique*

?? *L'acceptabilité du risque résiduel*

?? *L'acceptabilité des impacts environnementaux et les conflits d'usage*

La question de l'efficacité technique a été abondamment analysée et discutée dans les divers chapitres de ce rapport et il n'est pas nécessaire ici de reprendre l'argumentation.

5.2 Le rapport coût-bénéfice

Une expertise a été demandée à Les Consultants BPR, un partenaire du projet concernant les coûts fixes et récurrents reliés à l'implantation du dispositif proposé. À ce coût doit être ajouté ceux reliés au risque résiduel représenté par les embâcles pouvant se former en aval de la structure.

La firme BPR Groupe-Conseil associée comme partenaire dans ce projet a estimé que l'implantation du dispositif de piliers avec de filet assorti de mécanisme de retrait et de posage reviendrait aux alentours de 1 million \$ excluant les coûts de conception, plans et devis et de sondage, soit approximativement 1,15 million \$ au total (voir l'annexe 2). Concernant le coût annuel d'un tel ouvrage, comme lors du rapport de pré-faisabilité, nous avons pris en considération son financement sur une période d'amortissement de 25 ans qui reviendrait à 10% de son coût total, un chiffre conservateur compte tenu des taux d'intérêts actuels offerts sur le marché financier. De même, les frais d'entretien, d'installation ou de retrait périodique, le cas échéant, de surveillance et de suivi peuvent s'établir au voisinage de 5% par année pour des ouvrages ou dispositifs relativement stables. C'est donc sur la base de 15%/année du coût initial

que s'établit le coût annuel de cette solution du point de vue structurel et opérationnel auquel il faut ajouter des éléments relatifs au risque résiduel.

À ce propos, il ne sera possible avant plusieurs années d'acquérir une certaine certitude quant au degré d'efficacité du dispositif non plus qu'à l'absence ou l'innocuité des embâcles résiduels se produisant en aval de la structure. Par contre, nous avons acquis la conviction que leur fréquence et leur sévérité seront largement atténués s'ils ne sont pas tout simplement éliminés. Cependant, nous posons comme hypothèse que les dommages directs seront réduits à néant par rapport aux risques majeurs, soit ceux de classe 3, 4 et 5. Des embâcles mineurs étant toujours possibles à partir d'un décrochement du couvert de glace en aval de l'estacade se produisant dans la gamme de débit inférieure à son débit de conception de 200 m³/s, une estimation a été effectuée situant à 10% les coûts des dommages physiques résiduels par rapport aux coûts estimés en phase de pré-faisabilité soit 16 100 \$.

Considérant ce point, les éléments d'incertitude identifiés en phase I sont maintenus (non-comptabilisés⁹) afin d'établir une image conservatrice sinon réaliste du risque résiduel que la population et les intervenants devront encore assumer tant que la perception de celui-ci ne pourra pas bénéficier des résultats de l'intervention. Conséquemment, sur le plan du déficit fiscal subi par les municipalités et commissions scolaires en raison d'une sous-évaluation de la valeur marchande des propriétés riveraines, nous avons choisi de comptabiliser le même montant qu'en phase de pré-faisabilité (49 475 \$) sachant cependant qu'un rétablissement de la valeur marchande des propriétés concernées est tout à fait probable mais sur un horizon prolongé correspondant à l'atténuation ou l'élimination du risque d'incertitude. Par contre, cet argument (sous-taxation des propriétés à risque) peut être mis dans la balance pour justifier une taxe de secteur visant justement la résolution du problème. Cet élément ne peut être pris en compte dans le tableau des coûts mais il pourra être considéré dans la mise en place du financement d'un tel projet.

Toutes ces considérations étant posées, le bilan des coûts et des bénéfices escomptés apparaît au Tableau 24.

En comparant sur le strict plan financier les coûts respectifs du *statu quo* à ceux impliqués dans la solution proposée, on anticipe un gain de près de **30 000 \$** annuellement, soit plus de 10% du coût intégré annuel du risque, ce qui n'est pas considérable mais tout de même significatif. Cependant, la prise en compte des autres types de dommages non-comptabilisables comme les risques pour la santé et les pertes de vie humaines lesquels sont très élevés dans la situation actuelle, les avantages globaux de la solution proposée apparaissent beaucoup plus significatifs, d'autant plus que l'intervention ne nécessite pas de relocalisations ou d'expropriations massives, une difficulté qu'il aurait été malaisé de surmonter tant sur les plans social que politique.

⁹ Pour le riverain, le dommage d'incertitude se traduit par un déficit patrimonial (sous-évaluation de la valeur marchande) et des inconvénients reliés au potentiel d'emprunt hypothécaire réduit et à la non-assurabilité. Par contre, ces éléments de passif sont compensés par une sous-taxation. Pour ces raisons, mais faute de détails sur la valeur exacte de ces inconvénients, nous choisissons de les considérer comme équivalents et s'annulant les uns les autres. Par contre, pour les pouvoirs locaux, le déficit fiscal doit être comptabilisé.

Tableau 24 : Bilan des coûts annuels et des bénéfices escomptés de l'installation d'une estacade fixe avec filet à l'amont immédiat du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte

Type	Équité			Total/année
	Riverains	Pouvoirs locaux	Gouvernements	
Santé et sécurité des personnes	Sécurité retrouvée	Surveillance constante en période critique (incluse dans le suivi de la solution)		-
Implications écologiques et visuelles	Anticipées légères, réversibles et pouvant être atténuées			-
Dommages physiques aux résidences et aux infrastructures	Probabilité d'aléa réduite dans les principaux secteurs vulnérables ; par hypothèse 10% des coûts du <i>statu quo</i> évalués à 161 245 \$ en pré-faisabilité			16 100 \$
Dommages d'incertitude	Rétablissement patrimonial à moyens et long termes		-	-
Déficit fiscal municipal et scolaire		49 475 \$		49 475 \$
Études	-	Incluses dans les coûts de suivi		-
Estacade fixe	-	-	-	115 000 \$
Opération et suivi	-	-	-	50 000 \$
Coût annuel de la solution		Équité à déterminer		230 575 \$
Statu quo	65 345 \$	101 370 \$	93 726	260 441 \$
Gain annuel possible	-	-	-	29 866 \$

5.3 Faisabilité technique

Dans son avis sur la faisabilité structurelle du dispositif proposé, la firme BPR Groupe-Conseil (voir l'annexe 2), divers éléments ont été examinés préliminairement comme le type et la résistance des câbles de retenue, la protection des berges et du lit contre l'affouillement et/ou l'érosion, l'implantation des piliers dans le lit du cours d'eau et des culées en berge, le mécanisme de retrait du filet pour la saison estivale. Bien sûr, une phase de conception approfondie sera requise avant de penser à la mise en œuvre d'une telle solution afin d'élaborer de manière très précise (plans et

devis) les caractéristiques d'implantation de la solution. Nous reprenons quelques uns des éléments cités ci-après.

5.3.1 Site d'implantation

Si le site propice se situe dans le bief d'amont immédiat du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte, sa localisation exacte n'en est pas encore déterminée pour autant des éléments cadastraux et géotechniques entrant en considération. S'il est avantageux de situer l'ouvrage le plus près possible du point mentionné à cause de l'accessibilité pour la machinerie et le transport des matériaux d'emprunt, les possibilités d'utilisation du site doivent être validées à divers niveaux dont la propriété et les droits d'accès nécessitant des autorisations par les propriétaires. Cet aspect de la question devra être développé lors de la phase de conception si les autorités compétentes décidaient d'aller de l'avant dans le dossier.

5.3.2 Érosion, affouillements et stabilité des talus

Un barrage de glace de plusieurs mètres peut se former derrière l'estacade fixe à filet, les pressions d'eau peuvent donc être très importantes et provoquer des écoulements très érosifs. Les zones à protéger sont le cas échéant les berges immédiates du bief d'amont de l'ouvrage, le périmètre des piliers où l'on constate la présence de jets d'eau, la zone située immédiatement en aval des piliers où les jets d'eau et les chutes de glaces pourraient être très dommageables pour le lit de la rivière. Les différences de pression importantes entre l'amont et l'aval de la structure peuvent aussi provoquer des écoulements dans le sol qui peuvent provoquer des sous-pressions importantes au niveau de la structure et entraîner l'érosion du lit par effet de renard. Les protections classiques de barrages telles les murs parafoilles, prolongements des seuils et drains devraient aussi être considérés dans ce cas-ci. Ces éléments ont été considérés dans l'avis de BPR Groupe Conseil.

Faute de données pertinentes et de l'expertise disponible, il n'a pas été possible de vérifier la stabilité des talus formant les berges des différents biefs envisagés pour intervenir dans l'hypothèse ou ceux-ci seraient constitués de dépôts meubles en forte pente. Ce facteur doit être vérifié à l'aide de sondages géotechniques afin de s'assurer que les rives du cours d'eau en amont de l'ouvrage ne sont pas sujets à des glissements de terrain importants et à l'affouillement et le cas échéant, de prévoir les dispositifs de protection requis pour le bief d'amont contre de tels éventualités.

5.3.3 Accessibilité en phase de travaux

À l'instar du critère de stabilité des talus, cet aspect devra être examiné en détail lors de la conception. Un problème particulier est l'absence de chemin pour accéder à la rive gauche. Une approche devra être trouvée pour y donner accès en travers de la rivière, éventuellement par un pont temporaire, et permettre ainsi l'implantation éventuelle d'une culée et la consolidation des berges. En rive droite, si le site proposé situé un peu en amont du 300 de l'avenue Saint-Brigitte

est retenu, les accès pour la machinerie sont facilités par la proximité de la berge et de la route à cet endroit et la présence d'un palier au niveau du lit mineur accessible en étiage.

5.4 Impact environnemental et conflit d'usage du cours d'eau

Tel qu'il a déjà été mentionné dans le rapport de pré-faisabilité, nous ne croyons pas *a priori* que cette approche comporte des conséquences adverses du point de vue environnemental étant donné qu'elle n'est mise en œuvre qu'en hiver et dans un site peu fréquenté à cause de sa faible accessibilité et son escarpement. Les interventions en rivière et en berge, mis à part les piliers et les culées sont constitués de gros matériaux alluvionnaires caractéristiques de ce qu'on retrouve actuellement dans le lit du cours d'eau, soit un assemblage profilés sur la topographie existante de blocs métriques, de cailloux et galets. L'étroitesse et le nombre réduit de piliers ne devraient pas non plus causer de sur-élévation excessive de la ligne d'eau lors des crues à l'eau libre, cette assertion devant cependant être démontrée lors des choix définitifs consécutifs à l'optimisation de la structure. Par contre, l'absence d'éléments vulnérables aux inondations dans le bief d'amont permet d'envisager sécuritairement une telle sur-élévation.

Sur le plan de l'habitat du poisson, notamment les salmonidés peuplant la rivière, le tronçon retenu n'est pas reconnu comme montrant une grande valeur ni pour la reproduction (carence de substrats avantageux) ni pour l'alimentation des jeunes ou des adultes (vitesses d'écoulement trop rapides). De plus la configuration d'ouvrage proposée n'est pas susceptible de causer nuisance au milieu sur ce plan, étant donné la faible interaction existant entre l'ouvrage et les écoulements. De plus, la configuration ne devrait pas nuire aux comportements migratoires du poisson, non plus que de nuire à la circulation des embarcations légères. L'interaction entre l'ouvrage et la débâcle qui définit son utilité est cependant de nature à favoriser la sédimentation de matériaux lourds dévalant à la faveur de la débâcle (blocs, galets). Toutefois, le bief d'amont est actuellement composés de tels matériaux ce qui est compréhensible étant donné la forte pente du bief et la compétence de la rivière à transporter les matériaux de plus petites dimensions lors des crues printanières. Des avis d'experts devront être obtenus pour préciser les implications biogéomorphologiques de cette approche lors de la demande de certificat d'autorisation accompagnant la mise en œuvre de cette solution.

Sur le plan visuel, l'impact se limite à la présence des piliers dans le lit du cours d'eau en saison estivale auxquels s'ajoute la présence du filet en hiver. La faible utilisation du tronçon à cause de problèmes d'accessibilité et l'escarpement des berges réduise l'impact négatif d'une telle implantation.

Quant à l'utilisation du tronçon pour la plaisance (canot-kayak), le retrait du filet en saison estivale a justement pour but d'éviter la nuisance qu'une telle présence pourra créer vis-à-vis de cet usage.

5.5 Acceptabilité du risque résiduel

Nous allons préciser ici quelques considérations relatives au risque résiduel.

Nous nous limiterons ici aux endroits où un tel risque peut subsister. Il s'agit de la plupart des voisinages résidentiels situés en aval de la structure, principalement ceux en amont de l'Île-Enchanteresse, de l'Île même et de la rue des Deux-Rapides. Les tronçons situés plus loin en aval ont été considérés comme similaires à la rue des deux-Rapides.

Il a été établi lors des simulations numériques qu'advenant une débâcle de la glace comprise en l'ouvrage et la rue des deux-Rapides, et un embâcle formé à la hauteur de cet endroit, la quantité réduite de glace par rapport à la situation antérieure ne peut qu'être bénéfique à la problématique. Tout au plus peut-on redouter des inondations mineures en aval de l'Île, la majorité du tronçon en débâcle se retrouvant à l'eau libre. La forte pente du tronçon en question ne favorise pas la propagation loin en amont d'un niveau d'eau élevé. Quant au tronçon situé immédiatement en aval de l'ouvrage, il se retrouvait dans tous les cas à l'eau libre et trop loin de l'embâcle pour subir les conséquences du refoulement du débit.

Par ailleurs, il est difficile d'établir la fréquence éventuelle de telles débâcles et embâcles résiduels dans le tronçon étant donné la nature empirique de l'approche utilisée pour ce faire (voir Leclerc et coll. 2001). Seule l'observation et le suivi permettront d'y arriver. Toutefois, il est logique de déduire que le « débit déclencheur » d'une débâcle est d'autant plus élevé que le couvert de glace est solide et que les courants se ralentissent. Ces deux facteurs sont reliés à la pente qui, comme on le sait se redresse rapidement en aval du site d'implantation. Un débit est d'autant plus rare qu'il est élevé ce qui nous amène à conclure à une plus grande rareté des aléas d'embâcles en aval de la structure qu'avant son implantation. Ce facteur combiné à une plus faible sévérité risque fort de rendre la situation future tout à fait acceptable vis-à-vis du *statu quo*.

Reste à considérer la question de la prise d'eau de Beauport. Il a déjà été recommandé par Heniche et coll. (1999) de planifier le rehaussement des digues formant les bassins de captation ainsi que l'installation de nouvelles pour protéger la station elle-même. Cette recommandation visait les crues à l'eau libre. Il semble tout à fait opportun d'étendre la portée des bénéfices escomptés à la protection contre les embâcles résiduels en modifiant la conception du rehaussement pour résister à la poussée des glaces.

6 Risques d'inondation à l'eau libre dans les secteurs de l'Île-Enchanteresse et Deux-Rapides

6.1 But de l'exercice

Le but de cette analyse complémentaire est de compléter l'établissement du coût moyen annuel des risques d'inondation toutes catégories d'événements confondus tel que demandé par le Comité de suivi lors de la phase I. Les risques reliés aux embâcles dans l'ensemble des secteurs concernés ont fait l'objet d'une évaluation complète lors de la phase de pré-faisabilité du projet. Une des alternatives d'intervention proposée dans le rapport (Leclerc et coll., 2001) recommandait l'implantation d'un ouvrage de contrôle des embâcles en aval de l'Île-Enchanteresse, plus précisément dans le secteur de la rue des Deux-Rapides. Étant donné qu'une telle intervention ne peut se faire qu'à moins de relocaliser l'ensemble des résidents de ces deux secteurs, il devient nécessaire d'établir les paramètres économiques complets de cette hypothèse de solution. Puisqu'un gain possible résulterait de l'annulation des risques à l'eau libre dans les secteurs relocalisés, il est important de l'évaluer car il contribue à améliorer le rapport coût/bénéfice de cette solution.

***En résumé,** la question est : peut rentabiliser l'implantation d'un ouvrage de contrôle en aval de l'Île-Enchanteresse qui nécessiterait la relocalisation des résidences de ces secteurs en considérant en plus de l'élimination des risques d'embâcles, ceux à l'eau libre?*

6.2 Portée de l'évaluation

La portée de l'évaluation comprend l'ensemble des résidences et bâtiments situés à l'Île-Enchanteresse ainsi que celles de la rue des Deux-Rapides. Les infrastructures municipales ou publiques (ex : voirie, lignes téléphoniques) n'ont pas été considérées. Bien que le niveau de risque ne soit pas uniforme pour toutes les unités résidentielles considérées, en particulier sur la rue des Deux-Rapides pour laquelle certaines unités ne subissent aucun risque significatif, nous avons opté pour toutes les prendre en considération dans le calcul. En effet, advenant la mise en œuvre de l'intervention suggérée par cette démarche, l'accessibilité aux secteurs considérés en période d'embâcles s'en trouverait réduite sinon annihilée temporairement. De plus, le fait d'aggraver la

fréquence et la magnitude des aléas dans un secteur est une option inadmissible pour les résidents concernés même s'ils ne sont pas touchés directement par les dommages directs. En effet, les dommages d'incertitude (perte de valeur marchande) et les inconvénients majeurs (accessibilité aux résidences en cas d'embâcle) représentent une part appréciable du risque et ils doivent être pris en compte pour mesurer l'acceptabilité d'une solution.

Pour cette phase complémentaire de l'analyse de risques, seuls les dommages directs aux meubles et immeubles ont été considérés étant donné que les composantes reliées aux dommages indirects et d'incertitude ont déjà été pris en compte dans l'analyse des risques par embâcles (Leclerc et coll., 2001).

6.3 Approche pour l'évaluation

La méthode utilisée est celle développée pour le compte du ministère de l'Environnement du Québec suite aux crues du Saguenay (Leclerc et coll., 1997). Elle consiste à évaluer d'abord les hauteurs de submersion par rapport au premier plancher de chaque résidence pour toute la gamme des événements de crue pouvant causer des dommages. Cette variable explique à elle seule une bonne partie des dommages directs. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître les cotes d'inondations pour chacun des événements de référence de crues aux sites des résidences ainsi que les cotes des premiers planchers de celles-ci. L'évaluation en valeur de remplacement est également requise pour quantifier les dommages directs. Les probabilités associées aux crues sont utilisées pour pondérer les dommages à long terme. Les cotes d'inondation sont obtenues par une approche hydraulique uni- ou bidimensionnelle tandis que les cotes des premiers planchers peuvent être obtenus par estimation depuis le modèle numérique d'élévation ou encore, pour être plus précis, par relevés sur le terrain.

Dans ce qui suit, nous allons apporter les précisions requises pour chacun de ces éléments.

6.4 Risques d'inondations par les crues à l'eau libre

6.4.1 Propriétés statistiques des crues à l'eau libre

L'étude par Leclerc et coll. (2001) a permis d'évaluer les débits correspondant à diverses périodes de retour à la hauteur du secteur des Îlets. Le Tableau 25 présente les résultats de l'analyse statistique réalisée avec la méthode au dépassement appliquée aux données de crue horaires annuelles dépassant 300 m³/s. Ces valeurs indiquent les débits retenus alors pour l'étude des risques à l'eau libre à la hauteur du secteur des Îlets.

Cette analyse hydrologique par la méthode au dépassement avait révélé que les crues printanières sont les plus à risques, du moins les plus fréquentes. Ce sont donc ces valeurs qui ont été retenues pour fin d'analyse de risques. Il fut aussi noté dans cette étude que les débits de crue

traditionnellement utilisés par le ministère de l'Environnement proviennent d'une méthode qui tend, pour les petits cours d'eau, à sous-estimer les valeurs de débit pour une période de retour donnée. En effet, l'utilisation de séries de moyennes journalières plutôt qu'horaires comme dans Heniche et coll. (1999) est une source importante de biais et la majoration des valeurs journalières de crue par un « facteur de pointe » moyen ne suffit pas à rectifier les estimations obtenues.

Le secteur des Îlets étant voisin de l'Île Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides, c'est donc la même réduction de 6% qui a été appliquée aux débits obtenus à partir des données de la station hydrométrique 051001. Le ministère de l'Environnement a utilisé ce même facteur de réduction dans ses études sur la cartographie des plaines d'inondation du secteur. Ce sont donc les valeurs présentes dans les cellules ombragées (Tableau 25) qui ont servi pour la présente étude. Pour la récurrence annuelle, c'est 398 m³/s qui a été utilisé.

Tableau 25 : Statistiques de crues maximums annuelles sur la rivière Montmorency selon les méthodes du dépassement appliquées aux pointes horaires et du maximum annuel horaire (extrait de Heniche et coll., 1999)

	Récurrence (années)					
	2	5	10	25	50	100
Débit (m³/s)	471,4	566,3	650,8	756,4	836,3	916,2

6.4.2 Lignes d'eau correspondant aux crues de référence pour l'aide d'étude

Afin d'établir les lignes d'eau correspondant aux crues, condition préalable à l'estimation des hauteurs de submersion aux résidences, il est possible de procéder par simulation hydrodynamique bidimensionnelle comme nous avons l'habitude de le faire (modèle HYDROSIM). Il est aussi possible et plus simple de partir des calculs hydrauliques existants réalisés par le ministère de l'Environnement et de la Faune dans le cadre de la Convention Canada-Québec sur la cartographie des risques d'inondation (Boucher et Picard, 1994; Picard et coll., 1990). Afin de ne pas refaire inutilement un travail déjà effectué, ce sont les résultats des simulations du ministère qui ont donc été utilisés.

Des surfaces de niveau d'eau correspondant aux récurrences 1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans ont été générés par interpolation et extrapolation à partir des calculs hydrauliques de lignes d'eau du ministère sur les deux tronçons. Pour ce faire, deux maillages bidimensionnels ont été créés à l'aide du logiciel MODELEUR en recoupant les transects de modélisation du ministère. Ces maillages bidimensionnels permettent non seulement une interpolation linéaire dans l'axe longitudinal entre les transects utilisés lors de la modélisation mais aussi une extrapolation latérale des niveaux d'eau dans les zones résidentielles à risque. Cette procédure a été présentée dans Secretan et coll. (2001).

Pour localiser les transects, les plans sur lesquels s'était basé le ministère ont été utilisés de même que les distances entre les sections mentionnées dans les deux rapports. Les plans utilisés sont B-10091 et R-9418-1 à 6. Les transects ont été localisés de la façon la plus précise possible compte tenu des circonstances. En effet, il n'y avait pas de repère cartographique précis sur les plans et les

distances entre les sections mentionnées dans les rapports ne correspondaient pas toujours exactement avec ceux-ci. Il s'agit particulièrement des sections 26 et 27 du rapport pour l'Île Enchanteresse (Picard et coll., 1990).

Les plans d'eau générés ont été validés localement à l'aide des deux courbes de tarage du ministère correspondant aux sections 14 du modèle Île Enchanteresse/rapide des Trois Saults et 27 du modèle de l'Île-Enchanteresse. Cette validation est présentée au Tableau 26. La section 26 du modèle de l'Île-Enchanteresse correspond à la section 1 du modèle Île-Enchanteresse/rapide des Trois-Saults. La comparaison des résultats d'extrapolation provenant des deux modèles permet de s'assurer leur compatibilité. Cette comparaison est également présentée au Tableau 27.

Tableau 26 : Validation des plans d'eau générés à partir des calculs hydrauliques du ministère

Site		Récurrence						
		1 an	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
Débit (m³/s)	Île Enchanteresse et Deux-Rapides	398	471	566	651	756	836	916
Débit (m³/s)	Station 051001	423	501	602	692	805	890	975
INRS	section 27:	170,05	170,22	170,43	170,62	170,86	171,04	171,22
Relation niveau-débit du ministère		170,08	170,23	170,43	170,61	170,82	170,96	171,11
INRS	section 14:	155,01	155,23	155,51	155,76	156,08	156,32	156,55
Relation niveau-débit du ministère		154,85	155,15	155,50	155,75	156,05	156,30	156,50
INRS	section 26	170,57	170,72	170,91	171,07	171,28	171,44	171,60
INRS	Section 1	170,50	170,67	170,88	171,07	171,31	171,49	171,67

6.5 La vulnérabilité résidentielle

6.5.1 Identification des résidences présumées vulnérables

Afin d'identifier les bâtiments à risque qui devaient être considérés dans l'étude (présomption de vulnérabilité), la berge correspondant au niveau d'eau de période de retour 100 ans majorée de 1,3

m pour tenir compte d'une présence éventuelle d'un sous-sol, a été tracée. Cette majoration permet de prendre en compte une résidence située hors de la zone 100 ans d'après la topographie mais dont le sous-sol tombe sous cette cote, ce qui la rendrait alors vulnérable (figure ? et ?). Les maisons présentes à l'intérieur de cette limite ont été ciblées pour une campagne de terrain visant à établir la cote géodésique du premier plancher. Une position (x,y) a été associée à chaque maison considérée dans le calcul du risque. C'est le centroïde des maisons telles qu'elles apparaissaient sur la carte de glace de la MRC Jacques Cartier qui a été utilisé pour évaluer les cotes d'inondation au site des résidences. (Figure 115 et Figure 116).

6.5.2 Caractérisation des résidences vulnérables

La caractérisation sur le terrain comprend la cote du premier plancher et l'identification de la présence d'un sous-sol. À l'aide d'une station totale utilisée en mode nivellement seulement, un parcours de 25 stations géodésiques temporaires a été établi. Une visée de la mire positionnée à la hauteur du premier plancher de chacune des résidences a été effectuée afin d'en établir la cote. Les stations géodésiques temporaires ont ensuite été rattachées aux bornes géodésiques du ministère des ressources naturelles. Les bornes 88KJS27 et 88KJS28 ont été utilisées à cette fin. La présence ou l'absence d'un sous-sol a été notée lors de cette même campagne. Le critère utilisé pour déterminer la présence d'un sous-sol est la présence d'une fenêtre dans les fondations.

Lors de l'établissement des stations géodésiques temporaires, deux mesures ont été prises, une dans chaque direction (dénivellation de A vers B et dénivellation de B vers A), afin de s'assurer de l'absence d'erreurs importantes. La différence la plus importante obtenue a été de 13 cm et en moyenne, elle était de 3 cm. Les cotes des stations géodésiques temporaires obtenues lors de la campagne ont été comparées aux autres jeux de données topographiques en notre possession. Ceux-ci sont :

1. le modèle de terrain de la Ville de Beauport,
2. la campagne de topographie laser aéroporté,
3. et un jeu de points topographiques obtenus par la MRC Jacques-Cartier.

Le jeu de données de la MRC Jacques-Cartier n'offre cependant pas une couverture et une densité suffisantes pour permettre une comparaison. Le modèle de la Ville de Beauport offre une bonne base de comparaison. Sur 20 comparaisons retenues, l'écart maximum et minimum est de 51 cm et -37 cm avec une moyenne de 19 cm. Pour le jeu laser, sur 23 comparaisons retenues, l'écart maximum et minimum est de 77 cm et 20 cm avec une moyenne de 42 cm. Les comparaisons non retenues l'ont été pour des problèmes évidents liés à l'interpolation ou à la position particulière des stations géodésiques temporaires qui faussaient le résultat. Le jeu de topographie laser semble sous-estimer systématiquement la topographie de quelques décimètres.

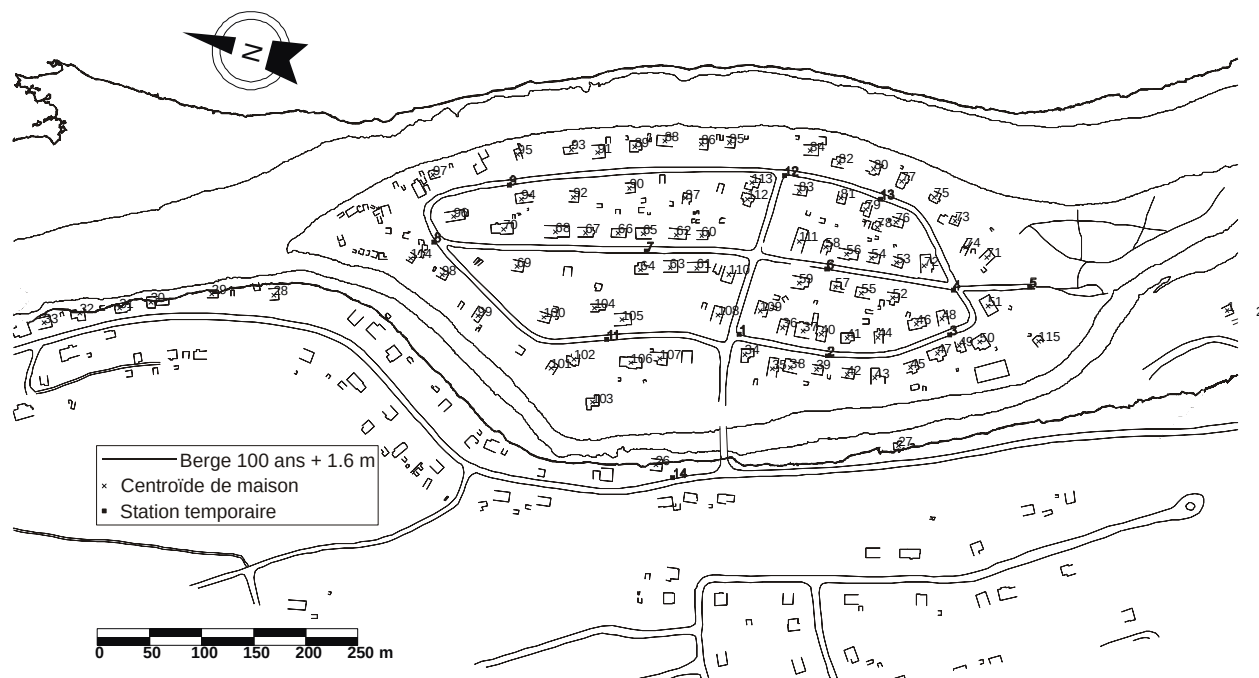


Figure 115 : Planimétrie du secteur de l'Île Enchanteresse

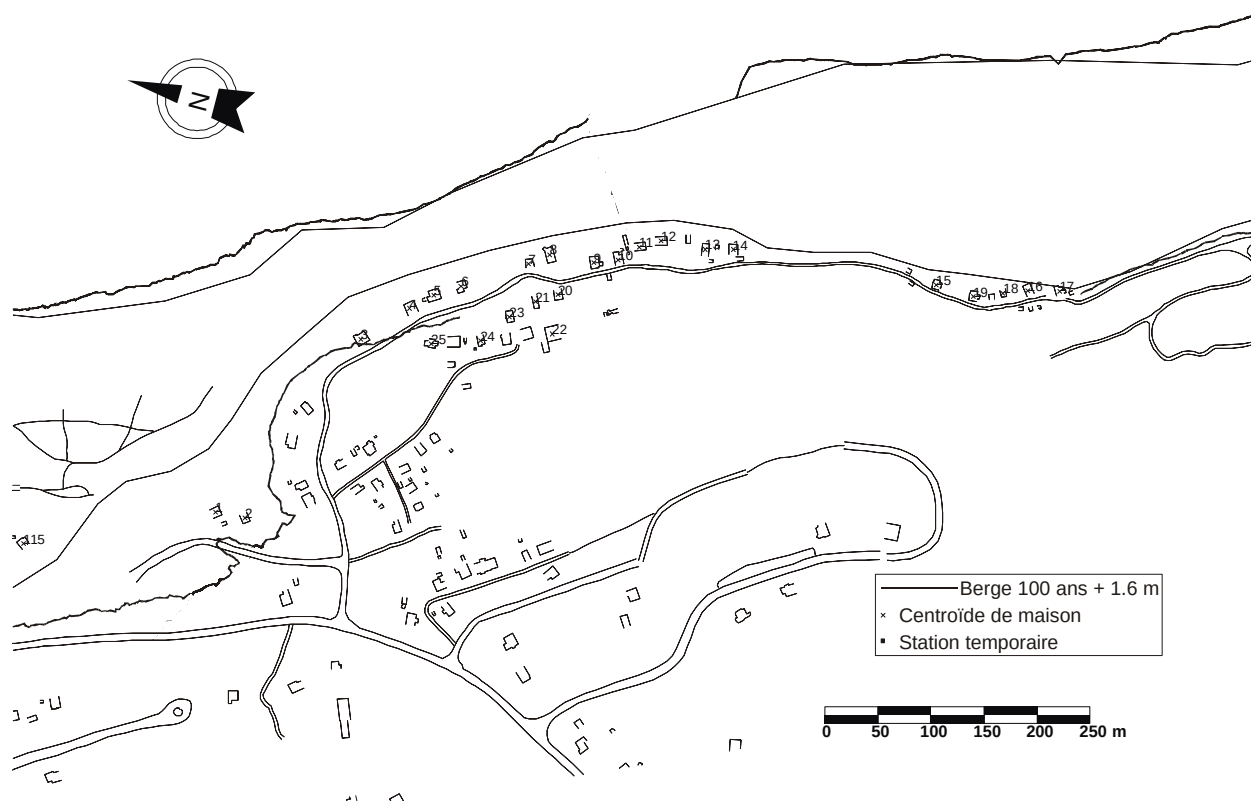


Figure 116 : Planimétrie du secteur de la rue des Deux-Rapides

Tableau 27: Validation des stations topographiques temporaires et comparaison des jeux de données topographiques

# Station temporaire	INRS-Eau	Laser aéroporté	Écart INRS-Laser	Ville de Beauport	Écart INRS-Beauport
1	176,10	175,56	0,53	175,94	0,16
2	176,25	175,75	0,50	175,96	0,29
3	174,96	174,68	0,28	174,64	0,32
4	174,84	174,65	0,20	174,51	0,34
5	173,06	172,61	0,45	172,55	0,51
6	176,10	175,69	0,41	175,97	0,12
7	177,03	176,50	0,53	176,88	0,15
8	177,83	177,63	0,20	177,50	0,33
9	177,48	177,21	0,27	177,41	0,07
11	176,36	175,81	0,55	176,31	0,05
12	176,10	175,79	0,31	176,12	-0,02
13	175,59	175,19	0,41	175,29	0,30
14	181,58	N/d	N/d	N/d	N/d
15	193,44	193,03	0,41	N/d	N/d
16	188,34	187,91	0,43	188,01	0,33
17	184,68	184,29	0,39	N/d	N/d
18	179,99	179,43	0,55	179,90	0,08
19	180,15	179,72	0,43	N/d	N/d
20	173,20	172,93	0,27	172,83	0,37
21	172,28	171,74	0,54	171,78	0,50
22	171,75	171,31	0,44	171,44	0,32
23	171,89	171,52	0,38	172,26	-0,37
24	173,20	N/d	N/d	173,05	0,15
25	170,97	170,20	0,77	171,10	-0,13
26	170,33	169,82	0,51	N/d	N/d
Écart max		0,77		0,51	
Écart min		0,20		-0,37	
Moyenne			0,42		0,19

6.5.3 Le stock de résidences

Au total, 112 résidences ont été retenues pour évaluer la vulnérabilité à l'eau libre dans les secteurs de l'Île-Enchanteresse et Deux-Rapides en fonction du critère expliqué en 6.5.1. De ce nombre, 24 résidences se situent dans le secteur de la rue des Deux-Rapides pour une valeur totale de \$ 872 670 selon le rôle d'évaluation de l'an 2000. La valeur moyenne des résidences dans ce secteur est donc de \$36 361. 88 résidences ont été retenues dans le secteur de l'Île Enchanteresse. De ce nombre, 8 sont situées sur l'avenue Sainte-Brigitte et les autres sont directement sur l'Île Enchanteresse. La valeur moyenne des résidences du secteur de l'Île Enchanteresse est de \$41 464 pour une valeur totale de \$3 648 790. Seule la valeur des bâtiments est considérée. La valeur du terrain n'est pas prise en considération.

De plus, la valeur donnée ici correspond au rôle d'évaluation réputé refléter la valeur marchande. Il a été démontré dans l'étude de pré-faisabilité que l'incertitude quant aux risques d'inondation diminue la valeur marchande (dommages d'incertitude). Pour le calcul des dommages directs, il a été choisi d'utiliser une évaluation majorée équivalent à la valeur de remplacement. La valeur de remplacement, comme dans le premier rapport, est estimée à 1,667 fois la valeur au rôle. L'évaluation totale de la valeur de remplacement dans la rue des Deux Rapides se situe donc à hauteur de 1,46M\$ (valeur moyenne de 60 614\$) tandis qu'à l'Île-Enchanteresse, la valeur totale passe à 6,08M\$ pour une moyenne par résidence de 69 120\$.

6.5.4 Hauteurs de submersion en fonction du débit

Connaissant les niveaux d'eau correspondants aux récurrences 1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans sur les secteurs considérés, il est possible à l'aide des fonctionnalités du MODELEUR, de transposer par interpolation cette information au centroïde des résidences. La cote des premiers planchers des résidences étant connue suite à la campagne de terrain, la hauteur de submersion est obtenue simplement en soustrayant le niveau du premier plancher du niveau d'eau associé à la récurrence considérée. Une valeur moyenne de 1,9 m est ajoutée à la hauteur de submersion lorsqu'il y a présence d'un sous-sol.

La Figure 117 illustre les différentes composantes et variables de base composant la « hauteur de submersion » (H).

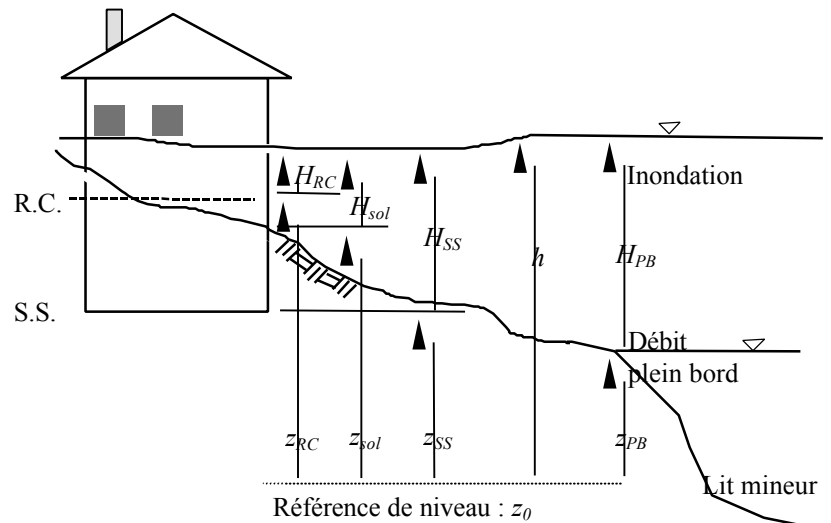


Figure 117 : Variable définissant la hauteur de submersion

6.6 Calcul du risque moyen annuel relié aux inondations à l'eau libre

Le risque comporte deux composantes, l'aléa qui représente l'aspect physique ou hydrologique de l'événement et la vulnérabilité qui se rapporte aux dommages résultants des inondations, la définition mathématique suivante a été utilisée pour calculer le risque lors de cette étude :

$$R = \int D(P) * dP$$

Où :

R : risque moyen annuel unitaire;

D : coûts unitaires des dommages (économiques ou autres) ou des interventions;

P : probabilité au dépassement (annuelle) des aléas;

dP : incrément de probabilité annuelle au dépassement;

Cette équation est illustrée par le graphique suivant :

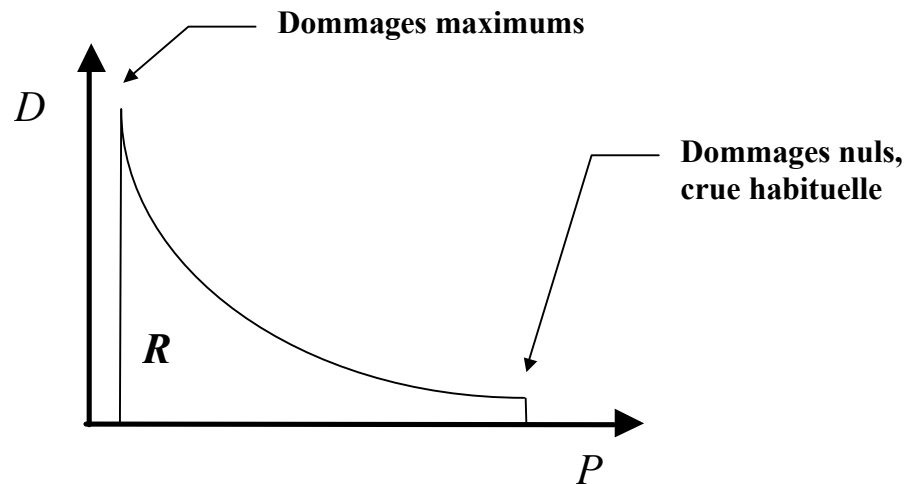


Figure 118 : Interprétation graphique du risque

Le dommage réel est le produit du dommage unitaire (taux d'endommagement) par l'évaluation de la résidence. Concrètement, le calcul des dommages moyens annuels unitaires pour les niveaux d'eau correspondant à chacune des périodes de retour (1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans) a été effectué pour chacune des résidences. Pour ce faire, on a utilisé la loi de Gompertz qui varie en fonction de la hauteur de submersion et de deux paramètres α et β (Leclerc et coll., 1997). Les deux paramètres changent selon que la résidence ou le groupe de résidences à l'étude comporte un sous-sol ou non et ait une valeur foncière de plus ou moins 50 000 \$. La valeur de ces paramètres a été déterminée en collaboration avec l'équipe de la Chaire d'Hydrologie Statistique de l'INRS-Eau lors de l'étude de 1997 (Figure 119) d'après les données recueillies sur le bassin des rivières Chicoutimi et aux Sables et du lac-réservoir Kénogami suite aux crues du Saguenay en 1996. Étant donné le contrôle étroit exercé sur les pointes de crues dans ces milieux et la relative rareté des dommages d'inondation, les résidences ayant servi à établir ces lois n'étaient pas réputées subir des dommages d'incertitude affectant la valeur marchande. C'est donc une valeur marchande assez près de la valeur de remplacement qui a servi de référence pour établir ces lois. L'expression mathématique de la loi de Gompertz est la suivante:

$$d = \frac{k e^{\alpha H}}{e^{\beta H} + 1}$$

Où

H est la hauteur de submersion

k : la valeur de référence de la propriété

α et β : les paramètres de la loi

Figure 119 : Paramètres de la loi de Gompertz pour le calcul du taux d'endommagement en fonction de la submersion

valeur de la maison	sous-sol	?	?
< \$50000	sans	-1.1	3.0
< \$50000	avec	-3.1	1.7
> \$50000	sans	-0.8	1.7
> \$50000	avec	-1.4	0.6

La probabilité pour chacun des niveaux d'eau (période de retour) étant déjà connue, il suffit par la suite d'intégrer l'ensemble des dommages annuels unitaires calculés en fonction de leur probabilité pour obtenir le risque moyen annuel unitaire pour chacune des résidences. Ainsi, pour avoir une évaluation monétaire de ce risque, il suffit de multiplier la valeur foncière de chacune des maisons par son risque et de faire la somme des résultats obtenus pour chacune des résidences. En sommant l'ensemble de ces risques individuels pour une zone, on obtient la valeur de risque moyen annuel total pour l'ensemble de cette zone. On peut de nouveau revenir à la forme unitaire pour l'ensemble de la zone en divisant le dommage moyen annuel total par la valeur foncière totale. Ce taux d'endommagement peut, bien sûr s'exprimer en pourcentage.

6.7 Résultat

Le risque moyen annuel total sur les deux secteurs en considérant la valeur de remplacement plutôt que la valeur au rôle des maisons se chiffre à \$626. Le risque moyen annuel d'inondations à l'eau libre est donc marginal sur les secteurs de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides. Fait à noter, ces secteurs étant reconnus comme étant à risque pour les inondations causées par des embâcles de glace, un grand nombre de demeures n'ont pas de sous-sol. De plus, la hauteur du premier plancher est relativement haute par rapport au terrain. Il semble que les résidents se sachant dans un secteur à risque, se prémunissent contre les inondations en surélevant leur maison. Ainsi, une certaine résidence faisant partie de l'échantillon pourtant située dans la zone d'inondation de récurrence 20 ans déterminée par le ministère, n'engendre aucun coût de dommage même pour une crue de récurrence 1/100 ans car elle n'a pas de sous-sol et le premier plancher est très haut par rapport au terrain environnant.

6.8 Équité

L'équité du risque est, comme nous l'avons vu dans le rapport de pré-faisabilité, formé par la répartition des coûts des dommages en fonction des divers intervenants affectés. Dans le cas d'un

dommage moyen annuel à l'eau libre aussi faible pour l'ensemble des secteurs visés, il est peu probable que des réclamations aux pouvoirs publics ou indemnisations soient effectuées. Dans ce cas, l'équité ne concerne que les résidents et l'ensemble des dommages subis n'incombe qu'à eux.

6.9 Conclusion

Dans le cas où le scénario de la relocalisation de l'ensemble des résidents des secteurs de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides serait retenu afin de permettre l'implantation d'une structure de contrôle des embâcles à cette hauteur de la rivière, on ne peut anticiper de gain significatif additionnel, par le retrait des éléments vulnérables, qui serait attribuable à la résolution du problème des risques de crues à l'eau libre.

Cette solution demeure donc non rentable sur le strict plan économique ainsi qu'il avait été démontré dans l'étude de pré-faisabilité.

7 Conclusions et recommandations

7.1 Sur le choix d'une méthode d'intervention

L'étude détaillée en laboratoire du comportement des différents dispositifs envisagés pour contrôler la débâcle sur la rivière Montmorency et les risques inhérents à de tels aléas a permis d'expliciter un type de solution innovatrice permettant de répondre aux exigences particulières de ce cours d'eau caractérisé par de fortes pentes.

La solution proposée, une estacade fixe à filet est constituée de piliers implantés dans le lit mineur du cours d'eau assortis d'un filet rétractable permettant de capter la glace en dévalaison et de la retenir jusqu'à un débit dit *de conception* se situant au niveau de 200 m³/s. Au-delà de cette valeur considérée comme suffisante pour que la rivière évacue elle-même son couvert de glace jusqu'à son embouchure (*débit d'évacuation*), le dispositif est prévu pour relâcher graduellement et par surpassement l'embâcle formé dans son bief d'accumulation permettant d'éviter une trop grande sur-élévation du niveau d'eau dans ce tronçon.

L'autre type principal de solution considérée était la mise en place d'estacades flottantes avec filet, un dispositif également innovateur qui a prouvé son efficacité en laboratoire pour le contrôle des glaces. Cependant, pour être mise en œuvre sur un cours d'eau, cette solution exige une certaine profondeur afin d'assurer une certaine flottabilité et le déploiement effectif du dispositif, une condition que l'on ne retrouve pas dans les sites envisagés sur la rivière Montmorency à cause de sa trop forte pente et des faibles profondeurs qu'on y retrouve. Par contre, la recherche a permis de valider ce type de solution pour des milieux qui, par leur caractéristiques morphologiques, satisferaient aux exigences du dispositif.

Pour le deux types de solutions étudiées, plusieurs conclusions ont pu être tirées à l'égard des paramètres structuraux auxquels devra satisfaire la conception de telles estacades, notamment, le caractère *hydrostatique* des forces de poussée exercées sur l'ouvrage et la hauteur d'application de ces forces lesquels déterminent la résistance de l'ouvrage. Les études en laboratoire ont également permis d'optimiser certains paramètres comme la taille et la disposition du filet.

Le comportement réel sur le terrain va dépendre de la conception finale. Lors de cette conception finale, d'autres tests en maquette pourraient être bénéfiques. Par contre, il restera toujours des inconnus comme, par exemple, comment le frasil se fusionnera aux câbles et quel impact cela pourra avoir sur l'écoulement? Si la grosseur des mailles est de l'ordre de 2 m, nous croyons que l'effet sera minime. Il s'agit toutefois là d'un élément à suivre une fois le prototype construit.

7.2 Sur le choix d'un site d'implantation

Bien que les sites # 1 et 2 identifiés en phase de pré-faisabilité répondaient adéquatement aux critères morphologiques posés au départ pour l'implantation de l'estacade (présence d'une plaine de débordement en rive gauche), ils ont dû être écartés en cours d'étude suite aux analyses de risque résiduel qui ont démontré l'existence de dommages potentiels significatifs dans les tronçons jouxtant l'ouvrage et devant subir les embâcles, une problématique qui n'existe pas dans la situation actuelle. Le principe d'équité supposant la *non-transférabilité du risque* a donc prévalu sur l'opportunité d'utiliser ces sites.

Par contre, suite aux études en laboratoire, la présence d'une plaine de débordement qui était recherchée en phase de pré-faisabilité pour faciliter l'évacuation du trop-plein de débit en situation d'embâcle n'est pas apparue comme essentielle pour la réalisation de l'ouvrage proposé si bien que de nouveaux sites ont pu être recherchés au-delà des sites #1 et 2. Tout au plus, l'absence d'une telle caractéristique oblige-t-elle à dimensionner l'ouvrage pour un débit de conception plus élevé transitant par la section de l'ouvrage. Un nouveau site situé plus haut sur la rivière en amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte a pu être identifié pour l'implantation de la structure. La morphologie, l'extension spatiale et l'absence présumée d'éléments vulnérables aux inondations dans le bief d'accumulation en amont de ce site permettent de valider ce lieu du point de vue de l'efficacité technique et de l'absence de risques résiduels.

Si la localisation de ce site loin en aval du tronçon fournissant la glace en dévalaison (grands rapides) permet d'en intercepter la majeure partie lors de la débâcle, son relatif éloignement des principaux sites à protéger, notamment l'Île-Enchanteresse et les secteurs résidentiels en aval ne permet pas d'exclure la possibilité d'embâcles résiduels constitués par la glace comprise entre l'estacade et les sites en question. Cependant le volume très réduit de glace disponible (typiquement 10-20% du volume en situation actuelle) associé à une moins grande vulnérabilité du couvert de glace de ces tronçons au décrochement (plus faible pente, meilleure prise du couvert, débit déclencheur plus élevé) nous portent à croire que la fréquence et la sévérité de tels embâcles seront réduits considérablement sinon complètement éliminés.

7.3 Sur la faisabilité basée sur les autres critères

Au-delà de la faisabilité technique, divers autres critères ont été examinés pour déterminer la l'opportunité d'intervenir comme proposé : rapport coût/bénéfice, impacts environnementaux, etc. Les conclusions à ces égard sont résumées ci-après.

L'analyse comparée des coûts intégrés du risque dans l'hypothèse du *statu quo* et du coût de l'intervention proposée en tenant compte du risque résiduel permettent d'anticiper un gain global de l'ordre de 30 000 \$ annuellement pour l'ensemble des intervenants ayant à faire face à ce problème. Le dégagement d'une telle marge permet d'envisager un mode de financement équitable dont pourront bénéficier tous les organismes ou individus qui assument à l'heure actuelle le coût du risque. À ce gain s'ajoute un accroissement très significatif de la sécurité pour les populations riveraines et la perspective d'un problème récurrent pratiquement résolu. Un avantage important

de la solution proposée est qu'elle n'est pas réalisée au détriment de population riveraine qui n'auraient pas jusqu'à ce jour eu à subir de tels risques.

Du point de vue environnemental, le dispositif proposé est conçu pour causer le minimum d'impact écologique sur le cours d'eau qui, dans le tronçon d'implantation n'est pas de toute façon considéré comme un milieu nécessitant des protections particulières sur le plan de la vie aquatique. Par ailleurs, si l'impact visuel n'est pas négligeable, il est très localisé et surtout présent durant la saison hivernale au moment où le filet est mis en fonction. Quant aux usages récréatifs, comme le canot-kayak, le filet n'interfère pas du tout avec cet usage vu qu'il est retiré de l'eau durant la saison de pratique.

7.4 Sur la faisabilité d'une relocalisation des populations de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides

Dans le cas où le scénario de la relocalisation de l'ensemble des résidents des secteurs de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides aurait été retenu afin de permettre l'implantation d'une estacade à cette hauteur de la rivière, on ne peut anticiper de gain significatif additionnel, par le retrait des éléments vulnérables, qui serait attribuable à la résolution du problème des risques de crues à l'eau libre. Cette solution demeure donc non rentable sur le strict plan économique ainsi qu'il avait été démontré dans l'étude de pré-faisabilité.

7.5 Sur la bonification du système d'alerte précoce

L'analyse des conditions favorables au déclenchement d'une débâcle dynamique a permis d'identifier les gammes de conditions hydrologiques et météorologiques les plus susceptibles de conduire à des embâcles dommageables sur la rivière Montmorency. L'analyse combinée de diverses variables mesurables comme le débit, la précipitation ou la température de l'air dans les jours et les heures où ces conditions tombent dans les gammes favorables a permis de construire un tableau synthétisant les règles opérant en la matière. En appui à l'alerte précoce, l'utilisation d'un tel tableau dans un contexte opérationnel est de nature à assurer une meilleure sécurité aux populations riveraines, sinon à leur bien.

7.6 Sur la méthodologie utilisée pour l'étude

La présente recherche a permis de faire évoluer l'état de l'art dans plusieurs directions liées au contrôle des risques d'inondation par embâcles. Dans la phase de pré-faisabilité, une méthode originale a été développée permettant de procéder à l'analyse intégrée des coûts annuels des risques liés aux embâcles. La classification des événements historiques en terme de sévérité par rapport aux dommages, l'établissement de probabilités empiriques événementielles et par tronçon et la prise en compte des dommages d'incertitude qui affectent la valeur marchande des propriétés

riveraines et conséquemment l'assiette fiscales des pouvoirs locaux sont autant d'innovations qui ont pu être développées dans le cadre de la présente recherche.

Sur le plan de la recherche expérimentale, ce projet a permis de développer une méthodologie originale d'analyse en laboratoire de l'efficacité et des conditions d'application de dispositifs de contrôle des glaces en dévalaison dans les cours d'eau nordiques. Ainsi, l'utilisation d'un modèle à géométrie variable a permis de conduire des études génériques par rapport à la morphologie des cours d'eau étudiés. La mise en place de dispositifs de mesure en continu des contraintes structurelles sur les composantes des ouvrages a permis d'en définir le comportement statique et dynamique en plus de fournir des indications précises sur les forces en présence et leur mode d'application.

De plus, le projet a permis de découvrir l'existence d'une quantité très appréciable de données et d'informations relatives aux risques d'inondations par embâcles sur la rivière Montmorency. Quoique de qualité très variable et de nature très hétérogène, les données recueillies ont conduit à la mise en place d'une base de données historiques qui, sans aller jusqu'à égaler la qualité, la continuité et l'homogénéité des séries hydrologiques utilisées pour l'étude des crues à l'eau libre, a tout de même permis de procéder à l'analyse de la genèse des embâcles et du risque qu'ils représentent. Tout nous porte à croire qu'une telle entreprise de regroupement des données disponibles est également possible sur d'autres rivières à risque au Québec. Dans le même ordre d'idée, le projet a mis en évidence le besoin de travailler à documenter de telles problématiques de manière continue dans l'avenir avec la préoccupation de constituer des séries chronologiques systématiques et plus homogènes.

8 Bibliographie

- Ashton, G. D. (1996).** River and lake ice engineering, *Water Resources Publications*
- Barabé, G. (1978).** Rivière Montmorency – Observations de l'Embâcle de 1978 et analyse de solution. Rapport du Ministère des Richesses naturelles, Services des Interventions, Division des Études hydrauliques. Août, 30 pp.
- Beltaos, S. (1999).** Flow through the voids of breakup ice jams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. **26**(2): 177-185.
- Boucher, J.-P. et Picard, F. (1994).** Cartographie des zones inondables - Rivière Montmorency, du rapide des Trois Saults jusqu'à l'île Enchanteresse. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction du milieu hydrique, Service de l'hydrologie et de la cartographie, Rapport no DH-94-01, 25 pages + annexes.
- BPR Groupe Conseil (1994).** Rivière Montmorency – Recherche de solutions aux problèmes d'inondations. Pour les municipalités de Beauport, Boischatel et Sainte-Brigitte de Laval.
- Burgi, P.H. (1975).** Hydraulic model studies of ice booms to control river ice. *IAHR, Proceedings of third international symposium on ice problems*, 165-174.
- Calkins, D.J. (1978).** Arching of model ice floes at bridge piers. *IAHR symposium on ice problems: Proceedings*, part 1. Lulea, Sweden. 497-503.
- CRREL (2000).** Cold Region Research and Engineering Laboratory. URL : <http://www.CRREL.usace.army.mil/ierd/webcams/hardwick/hardwick.html>.
- Delcourt H. (2002).** Infrastructure à filet pour le contrôle des embâcles - Application au cas de la rivière Montmorency. Mémoire de maîtrise. Dépt. de Génie civil, Université Laval.
- Doyon, B. (2001).** Débâcles et embâcles de la rivière Montmorency : examen rétrospectif. Rapport d'étude préparé par *Recherches++* dans le cadre du présent projet.
- Francoeur, J. (2002).** Développement d'une estacade-filet pour la protection contre les embâcles – Application à la rivière Montmorency. Mémoire de maîtrise. Dépt. de Génie civil, Université Laval.
- Guilbert, Guy (1992).** Rapport interne ou notes de terrain. Direction régionale de Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec

- Guilbert, Guy (1993).** Rapport interne ou notes de terrain. Direction régionale de Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec
- Guilbert, Guy (1999).** Rapport interne ou notes de terrain. Direction régionale de Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec
- Hausser (1964)** (cité dans Michel & Abdelnour)
- Heniche, M., M. Leclerc, Y. Secretan et T. Ouarda (1999).** Travaux d'atténuation des risques de crue à l'eau libre de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets – PHASE 2. Mise à jour de l'analyse hydrologique, dimensionnement des travaux d'atténuation et risques résiduels pour les résidences. Étude réalisée pour le compte de la Ville de Beauport. Rapport scientifique INRS-Eau #R555, Mars, 176 pp.
- Laganière, Marcel et Pierre Larouche, (1992).** Plan d'ensemble des travaux remédiateurs de la rivière Chaudière. Ministère des Ressources naturelles du Québec.
- Leclerc M., B. Doyon, Y. Secretan, M. Heniche, M. Lapointe et P. Boudreau (1998).** Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets. Pour le compte de la ville de Beauport. Rapport scientifique INRS-Eau #R522a. 120 p.
- Leclerc M., J. Marion, M. Heniche, T. Ouarda et Y. Secretan (1997).** Prédiction des dommages résidentiels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi, aux Sables et du lac Kénogami. Rapport scientifique INRS-Eau #R511. 108 p.
- Leclerc, M., B. Morse, J. Francoeur, M. Heniche, P. Boudreau et Y. Secretan (2001).** *Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices* – Rapport de la Phase I – Préfaisabilité- Document de travail présenté au Comité de suivi. Rapport conjoint enregistré à l'INRS-Eau R577, et à l'Université Laval - Département de Génie civil, Janvier, 118 pages.
- Lever, J. H., Gooch, G., Tuthill A. & Clark, C (1997).** Low-Cost Ice-Control Structure, *Journal of cold regions engineering*, septembre
- Lever, J.H. & G. Gooch (1999).** Cazenovia Creek Ice control Structure: A Comparison of Two Concepts. Proceedings of the 10th Workshop on River Ice: River Ice Management With a Changing Climate: Dealing with Extreme Events. Winnipeg, Manitoba. June 8-11. pp. 303-317
- Lever, J.H., Gooch, G. et Daly S. (2000).** Cazenovia Creek Ice-Control Structure. *ERDC/CRREL TR-00-14*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH.
- MacDonald, E.G. & Hopper H.R. (1971).** Hydraulic model simulation of ice jamming during diversion of the Nelson River. The Engineering Institute of Canada, Annual general Meeting, Quebec city, Quebec

- Michel, B. & Abdelnour, R. (1975).** Break-up of solid river ice cover. *IAHR, Third international symposium on ice problems*, 253-259.
- Ministère des Richesses naturelles du Québec (1965).** Plan d'ensemble des travaux remédiateurs de la rivière Chaudière.
- Picard, F. J.-P. Boucher et Louis Hébert (1990).** Cartographie des zones inondables - Rivière Montmorency à l'île Enchanteresse. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction du milieu hydrique, Service de l'hydrologie et de la cartographie, Rapport no MH-89-14, 15 pp + annexes
- Ponts Jacques-Cartier et Champlain Inc. (PJCCI). (2001).** URL : www.pjcci.ca
- Secretan, Y., M. Leclerc, S. Duchesne et M. Heniche (2001).** Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. Accepté pour publication dans la *Revue internationale des sciences de l'eau*.
- Secretan, Y., M. Leclerc, Y. Roy et collaborateurs multiples (1996).** Logiciel MODELEUR. Développé pour le compte du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement (MEF) et HMS-Énergie inc.
- Tuthill, Andrew M. (1995).** Structural Ice Control Review of Existing Methods. CRREL special report 95-18, Hanover, NH.
- Verreault, P. (1990).** Problématique d'inondation par embâcle sur la rivière Montmorency dans le secteur de l'Île-Enchanteresse. Ministère de l'Environnement. Note technique. Juillet, 6 pp.
- White, Katleen D. (1996).** A New Ice Jam Database. *Water Resources Bulletin*. April. 32(2):341-348
- Zufelt, J.E. & Ettema R. (1996).** Model ice properties. *CRREL report 96-1*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH.

Annexe 1 : Classification de la sévérité des embâcles

La classification suivante a été proposée dans le rapport de pré-faisabilité. Elle est reprise ici afin de faciliter la lecture du présent rapport.

1. *Niveau 0 (aucun)*: aucun embâcle signalé cette année-là;
2. *Niveau 1 (négligeable)*: embâcles légers plus ou moins annuels ou bi-annuels causant une surélévation momentanée du niveau d'eau à l'amont sans toutefois dépasser celui du débit plein bord et pour lequel aucun dommage n'a été rapporté;
3. *Niveau 2 (léger)*: embâcles plus importants causant un début d'inondation (dépassement du débit plein bord), ou nécessitant un déploiement de moyens préventifs importants et pour lequel des dommages légers ont été rapportés (typiquement 0-5% du stock immobilier pour une zone homogène) ou serait susceptible de se produire avec les éléments vulnérables actuels; un taux unitaire d'endommagement de 2,5% est utilisé pour cette classe.
4. *Niveau 3 (moyen)*: embâcles encore plus importants causant ou pouvant causer des inondations assez importantes et des dommages significatifs sans cependant atteindre des niveaux de destruction trop considérables (typiquement 5-20% du stock de la zone homogène); 12,5% est utilisé comme taux unitaire.
5. *Niveau 4 (majeur)*: embâcles très sévères accompagnés de forts ruissellements avec un potentiel de destruction allant de 20% jusqu'à 50% du stock concerné (ex : 1992 à l'Île-Enchanteresse, près de 30% de dommage par rapport à la valeur au rôle et incluant la part assumée par les riverains); une valeur unitaire moyenne de 25 % est retenue.
6. *Niveau 5 (catastrophique)*: embâcles majeurs ayant un potentiel de destruction allant de 50 % à la totalité du stock immobilier présent et causant des dommages importants aux berges (érosion, glissements de terrain) ainsi qu'aux infrastructures publiques (voirie, services publics, ouvrages en rive). Des embâcles comme ceux de 1947 à l'Île-Enchanteresse et de 1957 aux Trois-Sauts sont visés par cette classe. Une valeur de 75% de dommages est retenue pour les calculs.

Annexe 2 : Estimation des coûts de la solution
