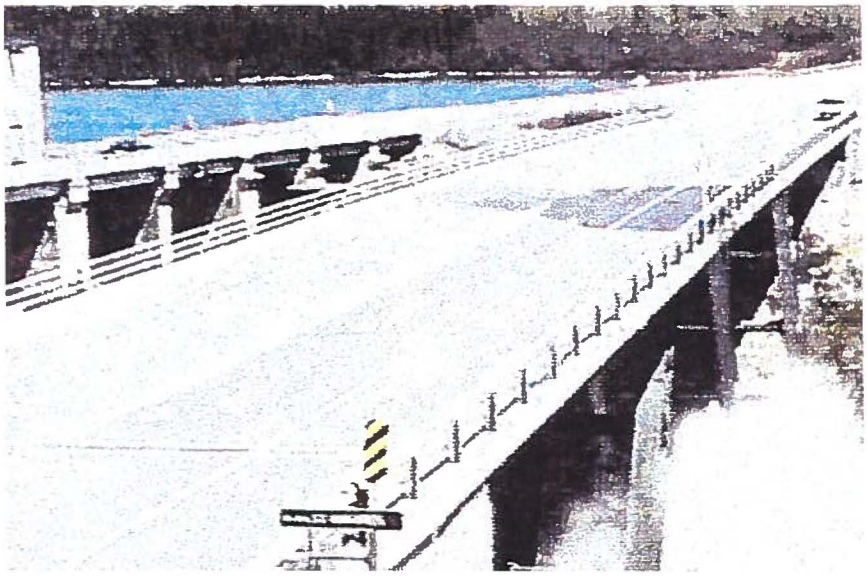
Hydro Québec

Aménagement hydroélectrique de la Sainte-Marguerite-3



Mouillage sur le pont de la route 138 causé par les embruns de la rivière Sainte-Marguerite

Direction principale Projets d'équipement - SEBJ
Administration de projets Sainte-Marguerite

Mars 1998

Préparé par :

Pierre McComber
Département de génie mécanique
École de technologie supérieure

Alain Paradis
Département de génie mécanique
École de technologie supérieure

Mars 1998

Remerciements

Les auteurs de ce rapport remercient leurs collaborateurs d'Hydro-Québec, soit monsieur Jean Laflamme, ingénieur en météorologie responsable du programme d'essais, ainsi que messieurs Yvon Côté et Yves St-Pierre, techniciens en électronique responsables de l'instrumentation et de l'acquisition des données. Ils sont aussi reconnaissants à monsieur Laurent Bilodeau des informations et des commentaires pertinents qu'il leur a fournis relativement aux aspects hydrauliques. Ils remercient également monsieur Duc. N. Nguyen, ingénieur en conception des installations, qui a édité le rapport sous une forme qui en permettrait une diffusion élargie aux divers intervenants impliqués dans le dossier des embruns.

Sommaire

Situé sur la route 138 immédiatement en aval du barrage de la Sainte-Marguerite-2, un pont traverse la rivière Sainte-Marguerite. Au moment des crues printanières et automnales, le pont est occasionnellement mouillé par les embruns que produit l'eau passant par l'évacuateur de crue. Le givre qui pourrait alors se former sur la chaussée du pont pourrait menacer la sécurité routière. Afin de satisfaire à la condition 36 du décret provincial autorisant le projet Sainte-Marguerite-3, la présente étude a été réalisée dans un double but : pour évaluer les conditions menant à la formation des embruns et au mouillage du tablier et de la structure du pont après l'entrée en service de la centrale de la Sainte-Marguerite-3 d'une part et pour identifier les possibilités qui permettraient d'éviter tout risque de givrage du pont en hiver d'autre part.

L'étude a permis de constater que les risques associés au givrage du pont peuvent être gérés efficacement en contrôlant la formation des embruns générés lors de chaque déversement effectué en hiver. En effet, l'importance des débits déversés par l'évacuateur de crue et la position relative de ses vannes constituent les facteurs déterminants dans le contrôle de la formation des embruns.

Ce contrôle, qui pourra être intégré aux procédures d'exploitation qui s'appliquent à la manœuvre des vannes, inclut les points suivants :

- ouvrir les vannes de gauche au lieu des vannes de droite à des hauteurs qui permettront aux colonnes d'embruns de rester sous le tablier du pont ;
- choisir le mode de déversement le plus approprié au contexte hydraulique du réservoir, soit le mode continu ou le mode discontinu ;
- tenir compte des conditions météorologiques susceptibles de causer la formation des embruns avant toute manœuvre de déversement.

Pour mettre ces points en application, il faudrait toutefois que les vannes et les treuils de l'évacuateur subissent une réfection et que davantage de vannes soient chauffées.

La direction et la vitesse du vent, qui sont également des facteurs importants quant au phénomène de mouillage du pont, ont été écartées du contrôle de la formation des embruns à cause de leur caractère aléatoire.

L'étude a également permis de suggérer d'autres mesures à envisager pour faire face à la problématique du givrage du tablier du pont. Elles consisteraient principalement à détecter promptement le moindre givrage du tablier, à prévenir les automobilistes et les responsables de l'entretien routier dès qu'il y apparaît du givre ainsi qu'à y épandre du sel au besoin.

Bref, les conditions menant au mouillage et par conséquent au givrage du tablier du pont sont assez connues pour être contrôlées. Il est évident que la diminution du givrage sur le tablier du pont devrait contribuer à la réduction du givrage de sa structure.

Table des matières

Remerciements i
Sommaire iii
1 Introduction 1
1.1 Contexte de l'étude 1
1.2 Objectif de l'étude 1
1.3 Démarche de l'étude 2
2 Description du site et de la problématique 3
2.1 Description du site 3
2.1.1 Ouvrages 3
2.1.2 Contexte hydrologique 4
2.2 Description de la problématique 5
2.2.1 Proximité du pont et de l'évacuateur de crue 5
2.2.2 Effets des embruns sur la végétation 5
2.2.3 Influence du relief 6
3 Instrumentation d'essais 7
3.1 Tour météo 7
3.2 Caméras vidéo 8
3.3 Mires graduées 8
3.4 Autres équipements 8
3.4.1 Drapeaux 9
3.4.2 Bacs d'accumulation 9
3.4.3 Entonnoirs 10
4 Programme et procédures d'essais 11
4.1 Mesure de la quantité d'embruns produite 11
4.2 Mesure de la quantité d'embruns se déposant sur le tablier 11
4.3 Mesure de la quantité d'embruns pouvant mouiller les béquilles 12
5 Analyse du phénomène des embruns 11
5.1 Caractérisation des embruns 13
5.2 Résultats des essais préliminaires de l'automne de 1996 14
5.3 Résultats des essais du printemps de 1997 15
5.4 Informations obtenues des enregistrements vidéo 19
5.4.1 Caractéristiques des colonnes d'embruns 20
5.4.2 Corrélation entre la hauteur des embruns et le débit déversé total 20
5.4.3 Corrélation entre la hauteur des embruns et la hauteur d'ouverture des vannes 21
5.4.4 Influence de l'humidité relative et de la convection naturelle 24
5.5 Influence de la direction et de la vitesse du vent 25
5.5.1 Effet thermodynamique du vent sur les colonnes d'embruns 26
5.5.2 Données sur le vent 26
5.5.3 Observations sur la vitesse du vent 26
5.5.4 Observations sur la direction du vent 27

5.6 Conditions de mouillage du pont 28
5.6.1 Mouillage du tablier 28
5.6.1.1 Cas du 7 novembre 1996 28
5.6.1.2 Cas du 3 juin 1997 28
5.6.1.3 Cas du 4 juin 1997 29
5.6.1.4 Cas du 17 juin 1997 29
5.6.2 Mouillage de la structure 29
5.7 Synthèse des résultats 30
6 Propositions de gestion des risques de givrage 33
6.1 Risques de givrage 33
6.2 Gestion des risques 33
6.2.1 Contrôle de la formation des embruns par la gestion de l'ouverture des vannes 33
6.2.1.1 Gestion basée sur les risques de givrage 33
6.2.1.2 Gestion adaptée au contexte hydraulique 34
6.2.1.3 Gestion adaptée aux conditions météorologiques défavorables 35
6.2.2 Mesures propres à l'amélioration de la sécurité routière 35
6.2.3 Surveillance de la structure 36
7 Conclusion 39
Références 41

Annexes

Annexe A Observations sur le mouillage
Annexe B Analyse thermodynamique des embruns
Annexe C Formation et transport des embruns
Annexe D Contexte hydrologique durant les mois froids

Liste des tableaux

Tableau 1 Résultats des essais préliminaires du mois de novembre de 1996 14
Tableau 2 Résultats des essais du mois de juin de 1997 16
Tableau D-1 Débit moyen mensuel prévu pour la centrale de la Sainte-Marguerite-3 durant les mois froids D-1
Tableau D-2 Débit moyen à évacuer à la centrale de la Sainte-Marguerite-2 ..... D-2
Tableau D-3 Marnage du réservoir dans des situations de déversement discontinu quotidien D-5

Liste des figures

Figure 1 Schéma du barrage et du pont de la rivière Sainte-Marguerite 4
Figure 2 Cotes de hauteur des embruns 13
Figure 3 Représentation de la direction du vent par rapport au pont 14
Figure 4 Cotes des embruns par rapport au débit déversé total 21
Figure 5 Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 1 22
Figure 6 Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 2 22
Figure 7 Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 3 23
Figure 8 Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 4 23
Figure 9 Directions du vent susceptibles de former du givrage sur le pont 25
Figure 10 Analyse multivariable du mouillage du pont 32
Figure 11 Risques de givrage associés à l'ouverture des vannes 37
Figure A-1 Changement d'orientation du vent entre 11 h et 12 h A-4
Figure A-2 Mouillage de la bordure de béton A-5
Figure A-3 Chaussée mouillée sur le barrage A-7
Figure B-1 Contour utilisé pour calculer l'effet du mélange de l'air et des embruns B-1
Figure C-1 Vitesse terminale des gouttelettes en fonction de leur grosseur C-2
Figure C-2 Solution par éléments finis triangulaires pour le relief de la rivière Sainte-Marguerite à la hauteur du pont C-5

Liste des photos

Photo 1 Effets des embruns sur la végétation de la rive droite 6
Photo 2 Tour météo 7
Photo 3 Autres instruments installés sur le pont 9
Photo 4 Mouillage sur toute la largeur de la chaussée 19
Photo A-1 Embruns passant entre les piliers du pont (caméra n° 1) A-2
Photo A-2 Embruns passant entre les piliers du pont (caméra n° 2) A-3
Photo A-3 Eau qui coule à la surface des piliers du pont A-3
Photo A-4 Jet propulsé très haut causant le mouillage de la chaussée A-6

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Sur la route 138, un pont traverse la rivière Sainte-Marguerite immédiatement en aval du barrage de la centrale hydroélectrique de la Sainte-Marguerite-2. Au moment des crues de printemps et d'automne, le pont est occasionnellement mouillé par les embruns que produit l'eau passant par l'évacuateur de crue. L'entrée en service de la centrale de la Sainte-Marguerite-3 en 2001 viendra modifier le régime d'écoulement de la rivière en accroissant le débit qui passe par l'évacuateur de crue de la Sainte-Marguerite-2. La fréquence et la quantité des embruns formés en hiver s'en trouveront également augmentées, de même que les risques de givrage du pont.

En effet, la centrale de la Sainte-Marguerite-2 peut présentement turbiner un débit soutenu d'environ 62 m^3/s. Après l'entrée en service de la centrale de la Sainte-Marguerite-3, le débit moyen de la rivière en hiver le dépassera et l'excédent d'eau passant par l'évacuateur atteindra un débit moyen mensuel d'environ 110 m^3/s en janvier. Durant quelques jours, ce débit pourrait atteindre occasionnellement 300 m^3/s. Par conséquent, l'évacuateur de crue de la Sainte-Marguerite-2, présentement exploité sans égard au mouillage possible du pont, pourrait alors créer plus fréquemment des embruns susceptibles de mouiller le pont en hiver et ainsi nuire à la sécurité routière.

Dans ce contexte, les effets des embruns sur la sécurité routière font l'objet de la condition 36 du décret gouvernemental autorisant le projet Sainte-Marguerite-3. En effet, cette condition stipule que « Hydro-Québec doit compléter l'étude sur les risques de formation d'embruns pouvant nuire à la sécurité routière sur le pont-route en question causés par le fonctionnement régulier de l'évacuateur de crue du barrage SM-2 et qu'elle doit réaliser, s'il y a lieu, des mesures d'atténuation pour y remédier ».

1.2 Objectif de l'étude

L'étude visait à

- évaluer les conditions menant à la formation des embruns ainsi qu'au mouillage[1] du tablier et de la structure du pont ;
- identifier les possibilités permettant d'éviter tout risque de givrage[2] du pont en hiver dont, entre autres, le contrôle adéquat de la formation des embruns.

---

(1) Par mouillage, on entend la présence d'eau sur le tablier ou la structure du pont résultant du contact de ces composantes avec des gouttelettes d'eau emportées par le vent.

(2) Par givrage, on entend la présence de glace sur le tablier ou la structure du pont résultant du contact de ces composantes avec des gouttelettes d'eau emportées par le vent quand la température de l'air ambiant est inférieure à 0°C.

1.3 Démarche de l'étude

Étant donné que les essais réalisés dans le cadre de l'étude ont été effectués en automne et en été, il était alors question de n'étudier que le phénomène de mouillage. Puisque le phénomène de givrage dépend étroitement du phénomène de mouillage, l'étude du mouillage du pont devrait permettre d'en expliquer le givrage, car le mouillage se transforme nécessairement en givrage quand la température de l'air ambiant descend sous le point de congélation.

Le printemps constitue la période considérée comme étant la plus propice à la simulation d'embruns, alors que le surplus d'eau disponible au réservoir Sainte-Marguerite permettrait la réalisation de divers essais d'ouverture des vannes de l'évacuateur de crue. Cependant, afin de vérifier certaines conditions de mouillage et de planifier des essais plus approfondis, quelques essais préliminaires d'ouverture des vannes ont été réalisés à l'automne de 1996. Des essais plus élaborés, comportant une cinquantaine de manœuvres de vannes, ont été effectués durant la période de crue du printemps de 1997.

2 Description du site et de la problématique

2.1 Description du site

2.1.1 Ouvrages

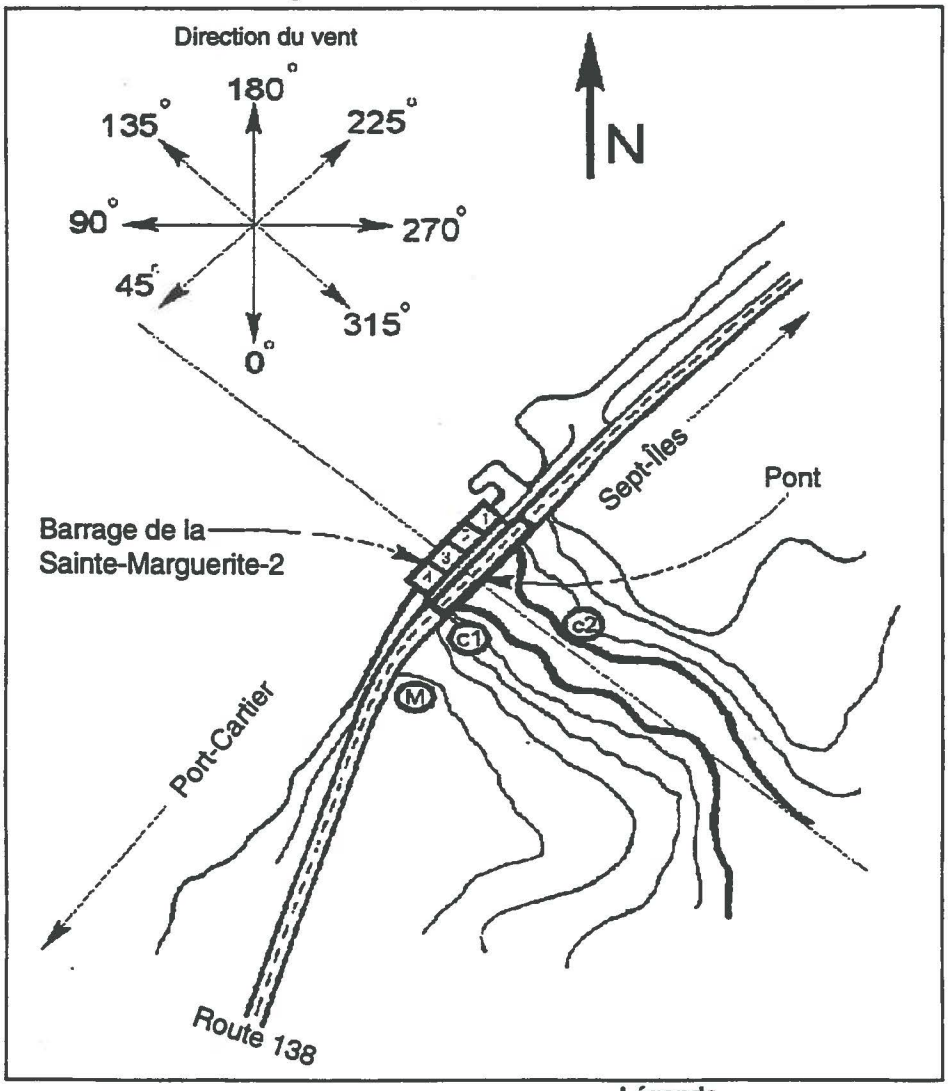
Situé sur la route 138, le pont traverse la rivière Sainte-Marguerite à environ 30 km de Sept-Îles, en direction de Port-Cartier (figure 1[3]). Il se trouve en aval du barrage hydroélectrique de la Sainte-Marguerite-2 qui appartient à la Gulf Power Corporation et il franchit une gorge mesurant environ 25 m de profondeur, 50 m de largeur (au fond) et 150 m de largeur (à la hauteur du pont).

L'évacuateur de crue, situé à environ 30 m en amont du pont, est muni de quatre passes à vannes droites de 280 m^3/s chacune, totalisant une capacité d'évacuation de l'ordre de 1 120 m^3/s. Il est également doté d'une vanne submergée, d'une capacité de quelque 80 m^3/s, qui n'est pas utilisée en hiver[4]. Ses vannes sont numérotées de 1 à 4 et elles mesurent 9,144 m de largeur sur 6,096 m de hauteur. Aucune des vannes n'est chauffée, mais les pièces encastrées de la vanne n° 3 le sont. Celle-ci est donc la seule vanne qui pourrait servir en hiver.

(3) Beauchemin-Beaton-Lapointe Inc, 1993

(4) Bilodeau, L., 1997

Figure 1
Schéma du barrage et du pont de la rivière Sainte-Marguerite



Légende
1-4 : Vannes
M : Station météorologique
C1-C2 : Caméras vidéo[5]

2.1.2 Contexte hydrologique

En hiver, la rivière Sainte-Marguerite alimente le réservoir de la centrale hydroélectrique de la Sainte-Marguerite-2 à un débit moyen de quelque 35 m^3/s, dont environ 11 m^3/s proviennent du bassin versant non régularisé du réservoir. Présentement, la centrale de la Sainte-Marguerite-2 peut turbiner à un débit soutenu de quelque 62 m^3/s et à un débit maximal d'environ 68 m^3/s. En période de crue, le débit de la rivière peut fréquemment fluctuer entre 450 m^3/s et 730 m^3/s.

[5] Deux autres caméras étaient situées au-dessus des vannes n° 3 et n° 4.

Avec l'entrée en service de la centrale de la Sainte-Marguerite-3, le régime d'écoulement de la rivière sera modifié. En hiver, le débit moyen dépassera les 62 m^3/s utilisables par la centrale de la Sainte-Marguerite-2 et l'excédent d'eau passant par l'évacuateur atteindra un débit moyen mensuel d'environ 110 m^3/s en janvier. Occasionnellement, ce débit pourrait atteindre une moyenne de 300 m^3/s durant quelques jours[6].

2.2 Description de la problématique

2.2.1 Proximité du pont et de l'évacuateur de crue

Érigé entre 1988 et 1989, le pont a été ouvert à la circulation en septembre 1989. Il s'agit d'un pont à béquilles inclinées (53°) de 79 m d'ouverture dont la structure mesure 128 m de longueur sur 14,2 m de largeur et dont la chaussée atteint 13,3 m de largeur. Sa charpente métallique est principalement composée de quatre poutres à âme pleine et d'un ensemble de contreventements reliant les éléments principaux. Les béquilles qui servent de piliers aux deux extrémités sont formées de quatre poutres métalliques consolidées entre elles par des poutres transversales fixées à trois hauteurs.

L'évacuateur de crue de la Sainte-Marguerite-2, présentement exploité sans égard au mouillage possible du pont, semble créer des embruns susceptibles de mouiller le pont en hiver et ainsi nuire à la sécurité routière. En plus d'être une cause de givrage du tablier du pont en hiver, les embruns ont aussi la réputation de causer le givrage d'une partie de la structure du pont. Le givre s'y s'accumulerait du côté sud-ouest et surchargerait ainsi le pont tout en le déséquilibrant.

2.2.2 Effets des embruns sur la végétation

La présence de givrage dû aux embruns peut facilement être déduite en examinant l'état de la végétation qui se trouve sur la rive droite (photo 1) : les arbres sont dénudés et les arbustes sont inexistants dans la partie la plus exposée aux embruns.

[6] Bilodeau, L., 1997

Photo 1
Effets des embruns sur la végétation de la rive droite

2.2.3 Influence du relief

Le relief qui se trouve sous le pont et dans la région immédiatement en aval de celui-ci semble jouer un rôle déterminant dans la formation des embruns. Ceux-ci proviendraient du choc causé par le puissant jet d'eau qui fouette les rochers du fond de la crevasse. À l'instar d'une vague qui frappe un rocher, l'eau gicle vers le haut en formant une colonne d'embruns de hauteur variable. Il appert que le relief situé sous le pont présenterait un creux au fond, du côté sud-ouest du pont, là où se forment régulièrement de telles colonnes. Les colonnes d'embruns possèdent un aspect transitoire et cyclique, typique des tourbillons créés par la turbulence. En hiver, la formation de glace pourrait modifier ce relief et, par conséquent, affecter le processus de formation des embruns.

3 Instrumentation d'essais

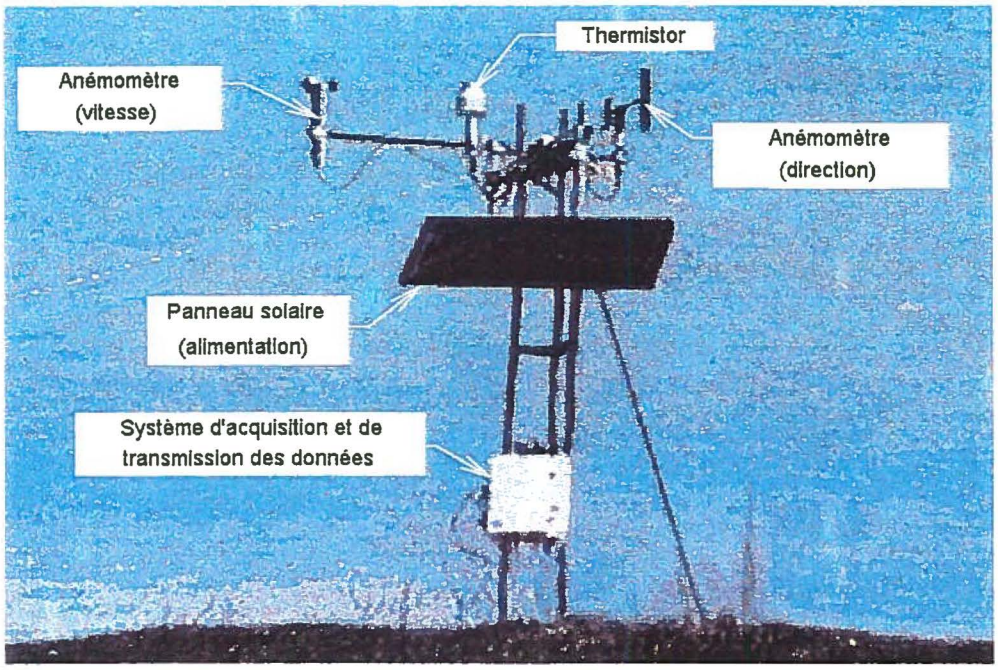
Les essais préliminaires effectués au mois de novembre de 1996 ont permis de préciser les besoins en instrumentation pour ceux du mois de juin de 1997. En 1996, une tour météo était disponible sur le site ; en 1997, celle-ci l'était toujours, en plus d'un givromètre et d'un autre thermistor. Ces instruments ont été installés sur des supports permettant de mesurer à environ 10 m sous le tablier du pont et vis-à-vis la béquille ouest. La formation de glace due au gel des embruns qui devait être mesurée avec le givromètre ne l'a pas été, à cause de circonstances créées par le retard de la crue de 1997.

Les équipements de contrôle et de transmission du givromètre et du thermistor installés sous le pont de même que les deux magnétoscopes reliés aux caméras ont été entreposés dans une roulotte aménagée près du barrage.

3.1 Tour météo

La tour météo a été installée sur la rive droite, soit au sud-ouest du pont, à environ 25 m de la route (photo 2). Sur celle-ci ont été fixés un anémomètre pour mesurer la vitesse et la direction du vent ainsi qu'un thermistor pour mesurer la température. Les données relatives à ces trois paramètres (données moyennes de toutes les 15 minutes) ont été enregistrées quotidiennement durant le mois de novembre, de 5 h à 14 h ; elles ont été récupérées vers 9 h 30 le 7 novembre 1996, avant le démantèlement de la tour qui a été remontée au mois de mai de 1997, pour les essais du mois de juin. Des données météorologiques sont donc disponibles pour l'ensemble des essais qui ont été effectués.

Photo 2
Tour météo



3.2 Caméras vidéo

Tous les essais d'ouverture de vannes ont été enregistrés sur vidéo pour permettre une étude poussée des effets de chacune des combinaisons d'ouverture sur la formation des colonnes d'embruns. À cet égard, les cinq caméras vidéo qui ont été utilisées ont permis d'étendre la connaissance spatiale de plusieurs colonnes, tant par rapport à leur position qu'à leur dimension. Deux caméras vidéo fixes ont été installées sur la structure de soutien des mécanismes de levage des vannes (figure 1) ; l'une a couvert la zone située sous le pont, près des béquilles ouest, et l'autre, munie d'un dispositif permettant d'en ajuster l'orientation à distance, a couvert le tablier du pont. De ces endroits, les caméras ont pu enregistrer la hauteur qu'atteignent les embruns. Les trois autres caméras, dont l'une d'elles a couvert divers angles de vue, ont été utilisées manuellement par des opérateurs.

3.3 Mires graduées

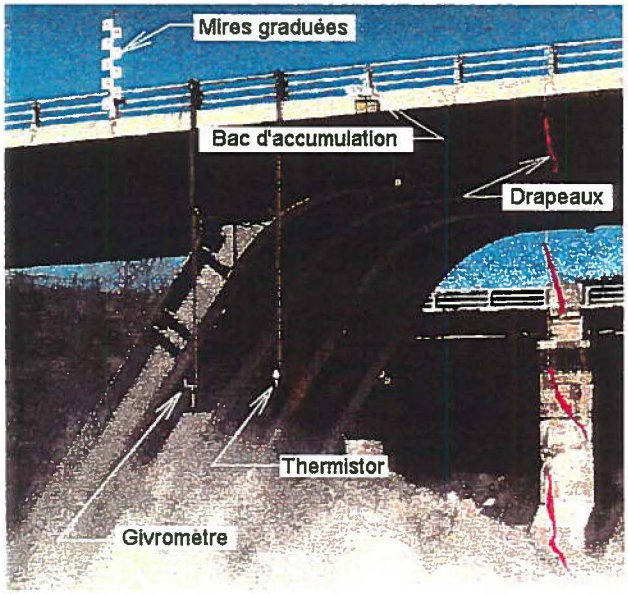
Deux mires graduées d'environ 3 m ont été installées sur le pont pour évaluer, à partir des caméras vidéo, la hauteur atteinte par les colonnes d'embruns. La première mire a été placée à quelques mètres à l'ouest de la jonction de la béquille ouest et des poutres principales et la deuxième, au centre du pont.

3.4 Autres équipements

En plus de la tour météo, des caméras vidéo et des mires graduées, d'autres instruments ont été utilisés dans le but de recueillir des données, soit (photo 3)

- des drapeaux ;
- des bacs d'accumulation ;
- des entonnoirs.

Photo 3
Autres instruments installés sur le pont



3.4.1 Drapeaux

Lors des essais préliminaires du mois de novembre de 1996, six cordes munies de petits drapeaux équidistants ont été suspendues sous le pont pour y observer la direction du vent. La trop petite taille des drapeaux n'a cependant pas donné les résultats escomptés. Pour les essais du mois de juin de 1997, seulement deux cordes ont été employées, mais les drapeaux ont été remplacés par des fanions d'environ deux mètres de longueur sur une vingtaine de centimètres de largeur. Les résultats s'en sont trouvés largement améliorés.

3.4.2 Bacs d'accumulation

Pour évaluer la quantité d'embruns pouvant se déposer sur le tablier du pont, trois bacs de plastique mesurant chacun 0,375 m^2 ont été installés le long du pont, à des endroits susceptibles de recevoir des embruns. Ces bacs ont été montés sur des supports métalliques fixés à la rambarde du pont et au dessus du vide.

3.4.3 Entonnoirs

Dans le but d'acquérir des mesures relatives à la répartition de la quantité d'eau qui peut atteindre les béquilles, un montage spécial a été employé. Ce montage consistait en une corde d'une trentaine de mètres de longueur sur laquelle quatre entonnoirs en plastique ont été répartis ; pour augmenter la surface d'exposition aux embruns, la corde a été recouverte de cylindres en polystyrène expansé. Les petits orifices par lesquels passait la corde ont été bouchés pour faire en sorte que chaque entonnoir serve de réservoir. Pour éviter des pertes d'eau dues au ballottage, chacun des entonnoirs a été rempli de papier buvard destiné à y retenir l'eau.

4 Programme et procédures d'essais

Les essais relatifs à l'ouverture des vannes de l'évacuateur de crue de la Sainte-Marguerite-2 ont été conçus de façon à recueillir des données permettant

- de caractériser la quantité d'embruns produite en fonction de diverses hauteurs d'ouverture ;
- de quantifier les embruns qui se déposent sur le tablier du pont lorsqu'il y a mouillage ;
- de quantifier les embruns pouvant mouiller les béquilles.

4.1 Mesure de la quantité d'embruns produite

En regard de la production des embruns, un nombre défini d'essais relatifs à l'ouverture des vannes a été planifié dans le programme d'essais. Chaque essai devait permettre de combiner l'ouverture de vannes données à des hauteurs différentes, de manière à obtenir les débits déversés par chaque vanne et le débit total déversé par l'ensemble des vannes. Après chaque ouverture, les vannes devaient être immobilisées pendant une durée qui suffirait à l'observation et à l'enregistrement, le cas échéant, des embruns ainsi produits.

Lors des essais préliminaires du mois de novembre 1996, la vanne n° 4 (située à l'extrême ouest) était hors d'usage. Au début des essais du mois de juin 1997, l'accent a donc été mis sur l'ouverture de cette vanne. Après les premiers essais, il a été remarqué qu'elle avait une grande influence sur la formation d'importantes colonnes d'embruns. C'est la raison pour laquelle tous les essais effectués entre le 2 juin et le 5 juin 1997 ont comporté l'ouverture de la vanne n° 4 à des hauteurs variées. Lors des essais du 17 juin, les vannes n° 2 et n° 4 n'étaient plus utilisables et les essais ont porté sur les vannes n° 1 et n° 3 seulement.

4.2 Mesure de la quantité d'embruns se déposant sur le tablier

Les mesures relatives au mouillage du tablier du pont ont été obtenues grâce aux bacs d'accumulation décrits précédemment (article 3.4.2).

La détermination d'un taux de mouillage précis devait s'établir non seulement à partir de la quantité d'eau en cause, mais aussi en fonction de la durée d'accumulation de cette eau, ce qui n'était pas évident à mesurer. En effet, il pouvait être difficile de déterminer le moment précis où débutait le mouillage du tablier. La procédure utilisée a consisté à récupérer l'eau recueillie dans les bacs en la versant directement dans des contenants étalonnés et à essuyer les bacs à l'aide de feuilles de papier absorbant. Le tout a ensuite été pesé pour en déduire la masse d'eau ainsi amassée.

4.3 Mesure de la quantité d'embruns pouvant mouiller les béquilles

Les mesures relatives au mouillage des béquilles ont été obtenues grâce aux entonnoirs décrits précédemment (article 3.4.3).

La mesure de la quantité d'embruns pouvant mouiller les béquilles demandait que ce soit effectué un échantillonnage de mouillage tenant compte de la hauteur des embruns. La base d'un pilier étant susceptible de recevoir plus d'eau que son sommet, puisqu'elle est exposée à de grosses gouttelettes, il fallait donc procéder à un échantillonnage vertical. Lors du premier échantillonnage, la descente de la corde le long des béquilles, de même que sa remontée, s'est avérée très difficile à réaliser ; le type d'embruns observé s'apparentait plus à un « ressac » qui remplissait les entonnoirs qu'à des embruns légers qui s'agglomeraient à la surface de la corde. Les cylindres en polystyrène expansé ont cessé d'être utilisés puisque la difficulté à les manipuler les a rendu presque inutiles. Les entonnoirs ont été numérotés de 1 à 4 à partir de celui du bas et ils ont été placés à 5,3 m l'un de l'autre.

5 Analyse du phénomène des embruns

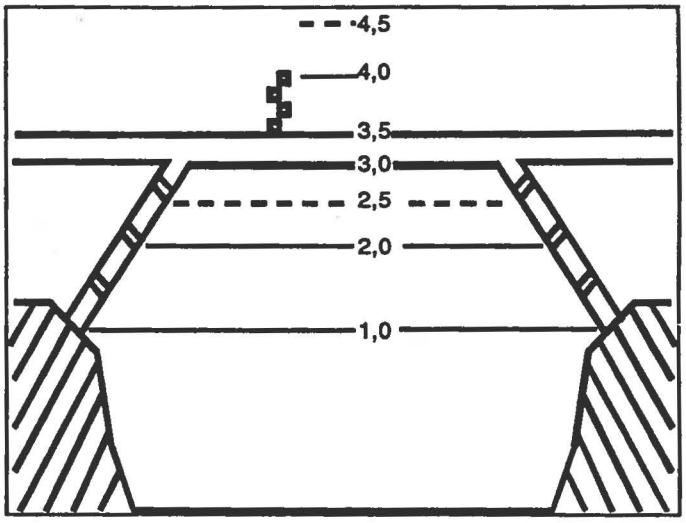
5.1 Caractérisation des embruns

Pour différencier les divers cas d'embruns enregistrés sur bandes vidéo et correspondant aux essais relatifs à l'ouverture des vannes, il fallait trouver une façon rigoureuse de les caractériser. À cet effet, plusieurs caractéristiques ont été envisagées, entre autres la position des colonnes d'embruns par rapport au pont, leur largeur, leur épaisseur, leur hauteur, leur degré d'opacité.

La caractéristique la plus appropriée à l'étude semblait être la hauteur maximale atteinte par les colonnes d'embruns. Cette hauteur, qui peut être définie sous forme de cote, permettrait alors de quantifier la partie cyclique du phénomène. De plus, elle possède généralement une relation avec l'intensité des embruns et surtout, elle exprime une certaine possibilité de mouillage du tablier, du moins dans les cas où les vents favorisent le phénomène.

Ainsi, des cotes ont été définies pour les enregistrements obtenus avec la caméra n° 2, la mieux placée de toutes les caméras (figure 2). Une cote de 1,5 à 2 correspond à la hauteur maximale qu'atteignent les embruns à la hauteur des piliers de la structure. Une cote de 2,5 à 3,5 correspond à la hauteur du tablier et une cote supérieure à 4, à toute hauteur dépassant le tablier du pont (dans ce dernier cas, il est plausible que les gouttelettes retombent sur le tablier). En résumé, plus la cote est élevée, plus la probabilité de mouillage du tablier l'est aussi. Une cote a été attribuée pour chaque essai et les cas de mouillage ont également été indiqués.

Figure 2
Cotes de hauteur des embruns



5.2 Résultats des essais préliminaires de l'automne de 1996

Des mesures préliminaires ont été prises à l'automne de 1996 dans le but de vérifier les conditions de mouillage et de prévoir les essais supplémentaires à effectuer lors de la période de crues printanières de 1997 (tableau 1). Seules la vanne n° 2 et la vanne n° 3 ont pu être utilisées à ce moment, ce qui a quand même permis l'observation d'un cas de mouillage du tablier du pont. En effet, le 7 novembre 1996, le vent a soufflé à quelques reprises du sud-est, causant le mouillage du tablier, de la rampe et de la structure du pont ainsi que d'une partie de la route malgré une vitesse relativement faible (6 km/h). Dans des conditions de températures hivernales, il y aurait eu formation de glace sur le pont.

La figure 3 explique le symbole utilisé dans le tableau pour indiquer la direction du vent par rapport au pont.

Figure 3
Représentation de la direction du vent par rapport au pont

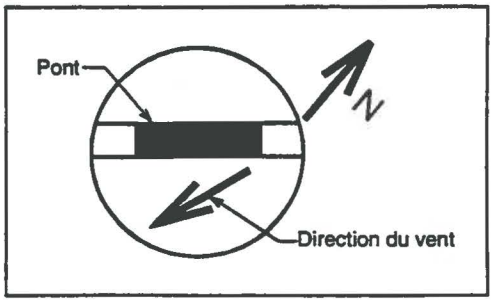


Tableau 1
Résultats des essais préliminaires du mois de novembre de 1996

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
6 novembre	0	0	10	0	175	14		9 h 40	2,00
	0	0	20	0	279				2,50
	0	10	10	0	360	11		13 h 12	3,00
7 novembre	0	10	12	0	385	6		8 h 50	3,50

5.3 Résultats des essais du printemps de 1997

Les essais effectués au mois de juin de 1997 ont permis de vérifier plusieurs combinaisons d'ouverture des quatre vannes (tableau 2). Le rapport détaillé de ces essais est fourni à l'annexe A.

Les essais ont commencé le 2 juin à compter de 16 h 15, après que l'opérateur nécessaire à la manœuvre des vannes ait terminé sa journée normale de travail à 16 h. Après une entente conclue avec lui, celui-ci a collaboré aux essais jusqu'à 17 h 20. En moyenne, chaque essai a duré une quinzaine de minutes. Comme chacun nécessitait la manœuvre des quatre vannes, il était difficile d'en raccourcir la durée, d'autant plus que les vannes n'étaient pas en bon état (beaucoup de vibrations et de bruits). Dans le cadre des six essais effectués durant la journée, il a été possible d'observer un mouillage important de la structure (béquille ouest).

Les essais du 3 juin ont été effectués en deux séries. La première série de neuf essais a eu lieu de 9 h à 11 h 38 et la deuxième série de sept essais a débuté à 16 h pour se terminer à 16 h 46. À 15 h 30, un échantillonnage d'embruns a été pris pendant 16 minutes près de la béquille ouest.

Le 4 juin, une série de neuf essais a débuté à 9 h 45 pour se terminer à 10 h 56. La durée de chacun a varié entre 4 et 18 minutes, selon le nombre de vannes à manœuvrer pour arriver à la combinaison d'ouverture voulue. Une deuxième série de cinq essais s'est échelonnée de 14 h 30 à 15 h 40. À 14 h 45, la quantité d'embruns a été mesurée près de la béquille ouest pendant 10 minutes. Après la deuxième série d'essais, la vanne n° 4 ne pouvait plus fermer complètement et la vanne n° 2 était hors d'usage.

Aucune manœuvre de vannes n'a été faite le 5 juin (l'essai indiqué au tableau 2 pour cette date n'est qu'une observation faite pour les vannes laissées ouvertes par l'opérateur pour la nuit).

Comme les vannes n° 2 et n° 4 ne fonctionnaient toujours pas le 17 juin, les essais effectués ce jour-là se sont limités aux manœuvres des vannes n° 1 et n° 3 pour ainsi couvrir une autre plage d'essais. Une série d'essais requérant un minimum de manœuvres a donc été effectuée. Puisque les hauteurs d'ouverture variaient peu d'un essai à l'autre, l'écoulement se stabilisait rapidement en régime « permanent » et la durée des essais a pu être écourtée. Il aura donc été possible de procéder à 14 essais durant cette journée.

Tableau 2
Résultats des essais du mois de juin de 1997

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
2 juin	0	20	20	0	443,2	20		16 h 15	3,00
	15	15	15	15	866,7				
189,7'	13	13	13	13	728,8	25		16 h 35	3,00
	10	10	10	10	561,4	23		16 h 54	3,50
	10	0	0	10	280,7	23		17 h 10	3,00
	10	0	0	5	216,7	23		17 h 20	2,00
	1	0	0	,5	34,5	23		17 h 22	[illegible]
3 juin	1	0	16	,5	264,9	20		9 h	1,50
	5	5	5	5	315,8	18		10 h 30	3,00
	3	3	3	3	193,6	18		10 h 50	1,50
	8	8	8	8	478,8	17		11 h	2,75
	8	8	8	10	504,3	17		11 h 10	2,75
	8	8	8	12	532,3	17		11 h 15	2,75
	8	3	3	12	389,7	17		11 h 20	2,50
	8	0	0	12	292,9	8		11 h 25	3,50
	8	0	0	10	264,9	8		11 h 38	4,50
	0	0	0	10	145,2	14		16 h	2,00
	0	5	0	10	224,1	14		16 h 10	3,50

Tableau 2
Résultats des essais du mois de juin de 1997 (suite)

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
3 juin	0	5	5	10	303,1	14		16 h 22	3,00
	0	0	5	10	224,1	8		16 h 35	2,50
	0	0	10	10	290,4	8		16 h 41	2,75
190.3'	0	0	8	10	264,9	8		16 h 46	2,50
4 juin	0	0	9,5	10	295,3	10		8 h 50	4,50
	0	10	10	10	454,9	12		9 h 45	3,00
191,1'	10	10	10	10	606,5	11		9 h 55	3,50
	10	10	10	13	651,7	11		10 h 12	3,00
	10	10	13	13	697,0	13		10 h 34	3,00
	0	10	13	13	545,3	13		10 h 38	2,75
	0	0	13	13	393,7	13		10 h 45	2,50
	0	0	10	13	348,5	13		10 h 53	2,50
	0	0	10	10	303,3	14		10 h 56	2,50
	0	0	13	10	348,5	7		14 h 30	2,50
	0	5	13	10	431,0	5		15 h 05	2,00
	0	10	13	10	500,1	5		15 h 22	2,00
	10	10	13	10	651,7	4		15 h 30	2,50

Tableau 2
Résultats des essais du mois de juin de 1997 (suite)

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
3 juin	10	10	13	5	582,6	4		15 h 40	2,00
5 juin 191,4'	0	0	13	8	327,0	6		matinée	3,50
17 juin	5	0	0	1	103,2	3		13 h 15	2,00
	5	0	0	0	84,2	2		13 h 40	1,50
191,5'	10	0	0	0	154,9	2		13 h 47	2,50
	15	0	0	0	239,1	3		13 h 58	3.00
	15	0	5	0	323,3	3		14 h 10	4,00
	15	0	10	0	393,9	3		14 h 17	4,00
	15	0	15	0	478,2	3		14 h 26	2,50
	10	0	15	0	393,9	7		14 h 34	3,50
	5	0	15	0	323,3	7		14 h 45	4,00
	0	0	15	0	239,1	7		14 h 52	3,00
	0	0	10	0	154,9	5		15 h 07	3,00
	0	0	7	0	114,1	5		15 h 12	3,00
	0	0	5	0	84,2	5		15 h 15	2,75
	0	0	16	0	244,5	5		15 h 21	2,00

5.4 Informations obtenues des enregistrements vidéo

Les enregistrements vidéo des essais effectués pendant les mois de novembre de 1996 et de juin de 1997 constituent un moyen par excellence pour assister à la formation des embruns sous le pont, pour en voir ensuite la trajectoire et pour en analyser la persistance, bref pour expliquer le phénomène de mouillage du pont. À partir du visionnage de ces enregistrements, certaines caractéristiques propres aux embruns ont pu être précisées. La description détaillée de certains cas de mouillage est fournie à l'annexe A.

En résumé, les faits suivants ont été constatés :

- une partie des embruns composés de fines gouttelettes excède parfois la hauteur du tablier du pont ;

- un vent faible (de l'ordre 6 km/h), dont la direction est défavorable au rabattement des embruns vers le pont (nord-est), peut suffire à mouiller le tablier du pont (photo 4).

Photo 4
Mouillage sur toute la largeur de la chaussée

De ces faits, il est possible de déduire que les trois conditions suivantes doivent simultanément exister pour qu'il y ait d'abord mouillage, puis givrage du pont :

- le débit d'eau déversé doit être suffisamment grand pour créer des embruns à une hauteur importante, soit à la même hauteur que le tablier du pont ou à une hauteur supérieure à celui-ci (la combinaison d'ouverture des vannes pourrait accentuer cette condition) ;

- le vent doit souffler dans une direction susceptible de repousser les embruns vers le pont (mouillage) ;

- la température de l'air ambiant doit être sous le point de congélation (givrage).

5.4.1 Caractéristiques des colonnes d'embruns

Les enregistrements vidéo montrent que la hauteur atteinte par les colonnes d'embruns dépend du débit déversé ou de la hauteur d'ouverture des vannes. En les visionnant, il est possible de constater qu'au départ, il existe un mouvement ascendant causé par le choc du jet d'eau frappant la surface du bassin et des rochers qui l'entourent. Il y a par la suite un autre mouvement ascendant qui s'explique par la convection naturelle, c'est-à-dire qui résulte de la différence de température entre l'air ambiant et la température de l'eau. Il est également possible de voir les grosses gouttes retomber rapidement en suivant des trajectoires paraboliques et les petites gouttes continuer leur ascension.

La puissance du jet d'eau à la sortie des vannes dépend du niveau d'eau dans le réservoir et du débit déversé que contrôle l'ouverture des vannes. Compte tenu que le niveau d'eau varie peu dans le réservoir, il existe probablement une corrélation entre la hauteur atteinte par les embruns et le débit déversé total produit par l'ouverture de toutes les vannes, lequel est proportionnel à la puissance potentielle. La recherche d'une telle corrélation doit être considérée préalablement à l'examen des effets des embruns engendrés par la combinaison d'ouverture des vannes pour atteindre ce débit.

Les colonnes d'embruns se forment sur la rive droite, soit au sud-ouest du pont, ce qui a pour effet de favoriser le mouillage d'un côté du pont et d'une béquille en particulier. Cela permet de supposer que l'ouverture d'une vanne donnée peut faire varier l'importance et la hauteur des colonnes d'embruns.

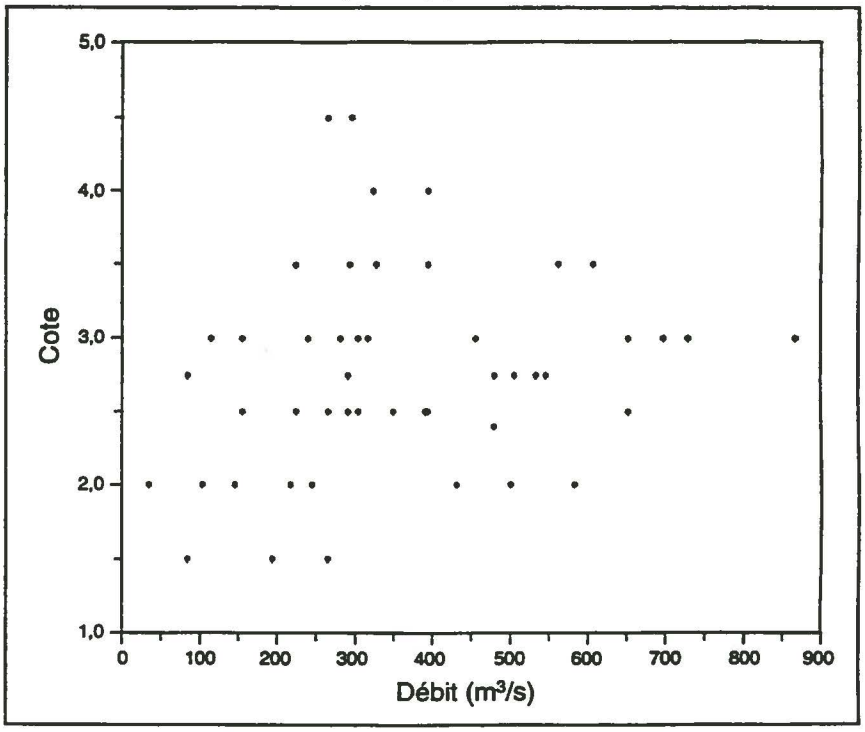
5.4.2 Corrélation entre la hauteur des embruns et le débit déversé total

Puisqu'il existe probablement une corrélation entre la hauteur atteinte par les embruns et le débit déversé total produit par l'ouverture de toutes les vannes, il y avait lieu de vérifier si les cotes de hauteur des embruns pouvaient être mises en rapport avec un tel débit.

La figure 4 montre les résultats obtenus en traçant la hauteur des embruns par rapport au débit déversé total. Un coefficient de corrélation faible a cependant été obtenu par régression linéaire. En effet, pour un débit déversé faible, la hauteur des embruns est faible, mais pour un débit déversé de l'ordre de 300 m^3/s, les embruns peuvent atteindre des hauteurs importantes. Il semble donc exister un seuil au-dessus duquel l'augmentation du débit déversé total ne contribue plus à faire monter les embruns davantage.

Lors des essais préliminaires, il a été confirmé que le pont a effectivement été mouillé lorsque le débit déversé se situait à environ 300 m^3/s et que le vent poussait les embruns vers le pont malgré sa faiblesse.

Figure 4
Cotes des embruns par rapport au débit déversé total



5.4.3 Corrélation entre la hauteur des embruns et la hauteur d'ouverture des vannes

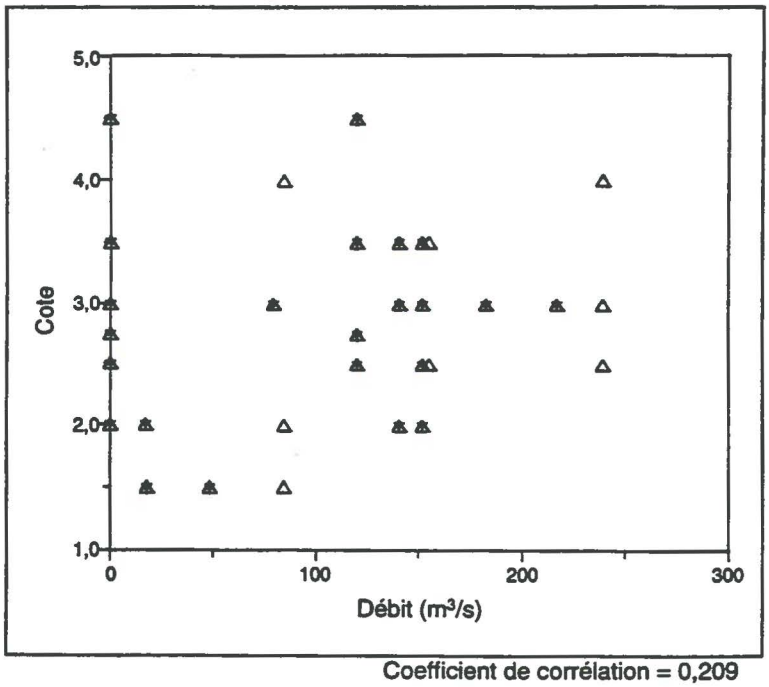
Compte tenu qu'il y a quatre vannes qui peuvent être utilisées pour déverser un débit, il y avait lieu de vérifier les effets de diverses hauteurs d'ouverture de celles-ci sur la hauteur atteinte par les embruns.

Les figures 5, 6, 7 et 8 montrent les résultats obtenus en traçant les cotes des embruns par rapport à l'ouverture de chacune des vannes. Le nuage de points est très dispersé, ce qui confirme pour la plupart des cas un coefficient de corrélation très faible fourni par régression linéaire.

Cependant, un cas intéressant a été noté : il s'agit de la vanne n° 4 où le coefficient de corrélation est le plus élevé. Ce cas semble confirmer le fait que l'ouverture de cette vanne est plus susceptible de créer des embruns dont la hauteur risque de mouiller le pont. Il faudra donc éviter l'utilisation de cette vanne pour déverser des débits élevés.

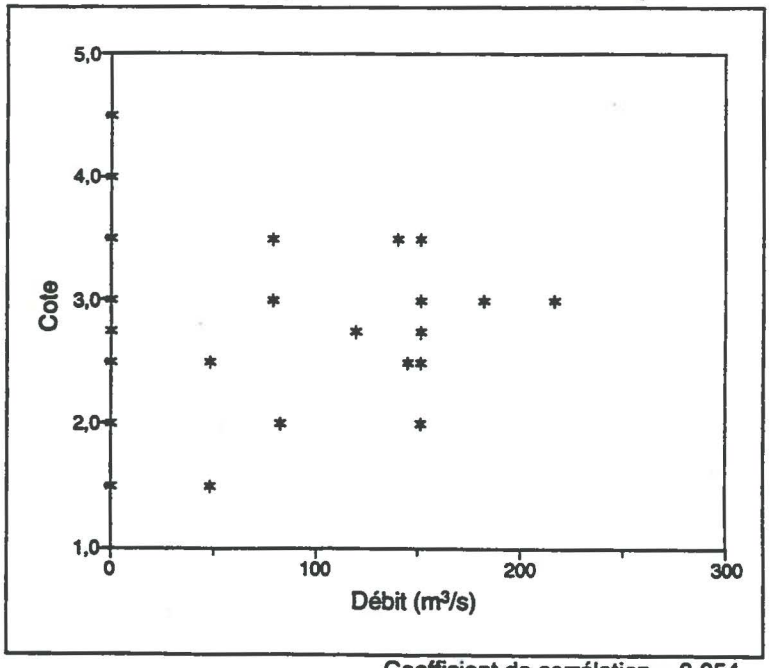
De plus, il semble que les vannes n° 3 et n° 4 doivent être surveillées quant à la formation des colonnes d'embruns. L'ouverture de celles-ci à une hauteur de quelque 7 pieds pour un débit déversé de l'ordre de 300 m^3/s a produit une colonne d'embruns susceptible de s'élever davantage que dans les cas où la hauteur d'ouverture est supérieure ou inférieure à ces quelque 7 pieds.

Figure 5
Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 1



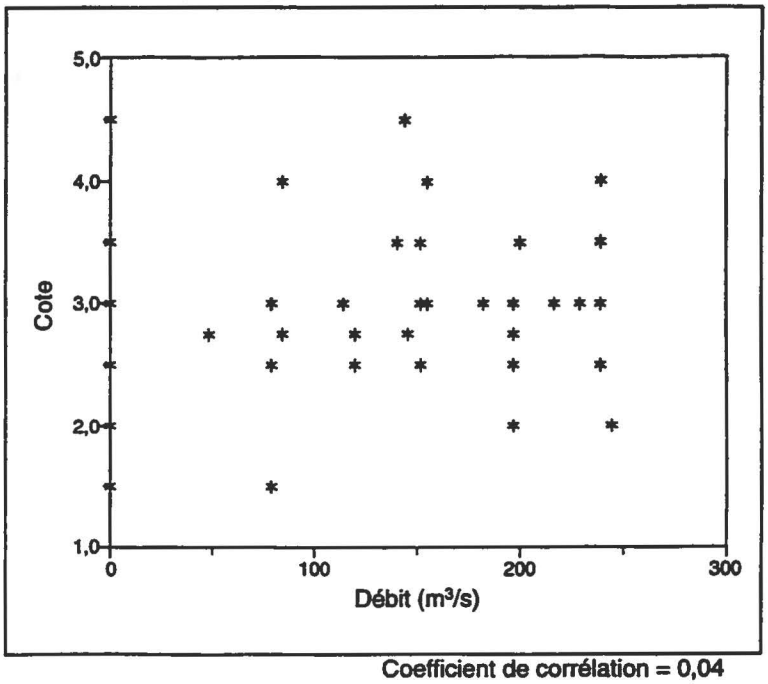
Coefficient de corrélation = 0,209

Figure 6
Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 2



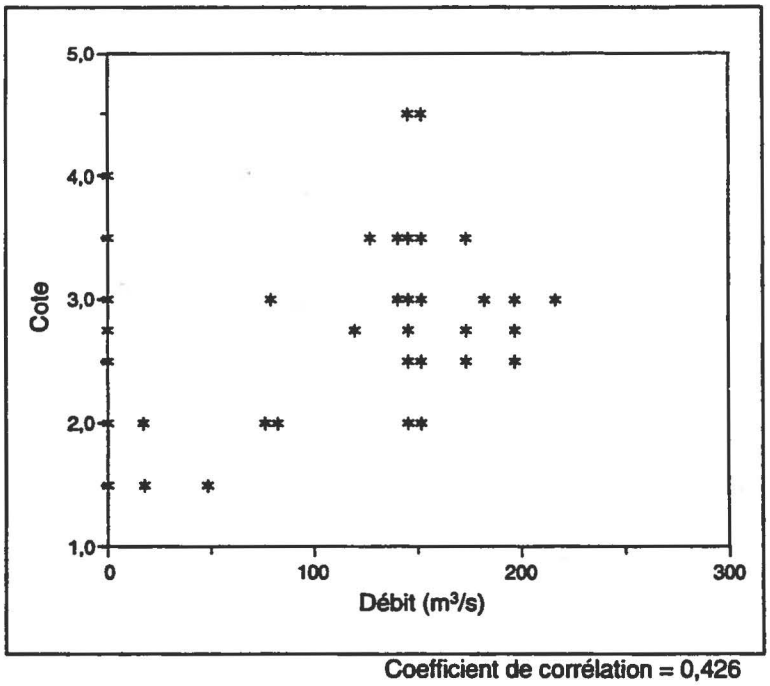
Coefficient de corrélation = 0,054

Figure 7
Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 3



Coefficient de corrélation = 0,04

Figure 8
Cotes des embruns par rapport aux débits déversés par la vanne n° 4



Coefficient de corrélation = 0,426

5.4.4 Influence de l'humidité relative et de la convection naturelle

D'une façon générale, la production d'embruns provient d'un microclimat impliquant une perturbation violente de l'interface entre le plan d'eau et l'air ambiant. Ce microclimat résulte d'effets thermodynamiques complexes difficiles à analyser.

Il a été observé que les embruns tendent à persister les matins où il y a du brouillard, c'est-à-dire où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé. La persistance des embruns est donc fonction du taux d'humidité de l'air ambiant, ce qui expliquerait pourquoi la fréquence des mouillages augmente la nuit ou tôt le matin. Le jour par contre, la vitesse d'évaporation de gouttelettes plus fines qui montent haut varie selon le taux d'humidité. L'annexe B décrit les effets du taux d'humidité sur la quantité d'eau liquide dans l'air.

Il semble également que les températures relatives de l'eau et de l'air ambiant jouent un certain rôle que le visionnage des enregistrements vidéo ne peut vérifier que partiellement. Ce rôle est lié à la convection naturelle ainsi qu'à l'évaporation ou à la condensation des embruns en fonction du taux d'humidité.

Une colonne d'embruns se forme à partir du mélange de l'eau et de l'air ambiant. Si la température de l'eau est supérieure à celle de l'air ambiant, tôt le matin par exemple, la colonne qui se forme et qui monte d'abord grâce à la puissance mécanique est à une température supérieure à celle de l'air ambiant et elle a donc tendance à monter par convection naturelle comme un ballon. En effet, la convection naturelle repose sur la poussée d'Archimède qui s'exerce sur l'air chaud à densité réduite. Ceci a donc comme effet d'augmenter la tendance de la colonne à monter, si la température de l'eau est supérieure à celle de l'air ambiant, ou de la diminuer, si la température de l'eau est inférieure à celle de l'air ambiant. Il faut toutefois remarquer que les variations de température diurne, c'est-à-dire l'écart entre la température froide de la nuit et la température chaude du jour, sont plus prononcées en été qu'en hiver. En hiver par contre, les variations de température diurne sont davantage influencées par les changements de température de l'air ambiant que par les changements de température de l'eau. L'annexe B décrit plus en détail les effets de la convection naturelle sur l'accélération ascendante des colonnes d'embruns.

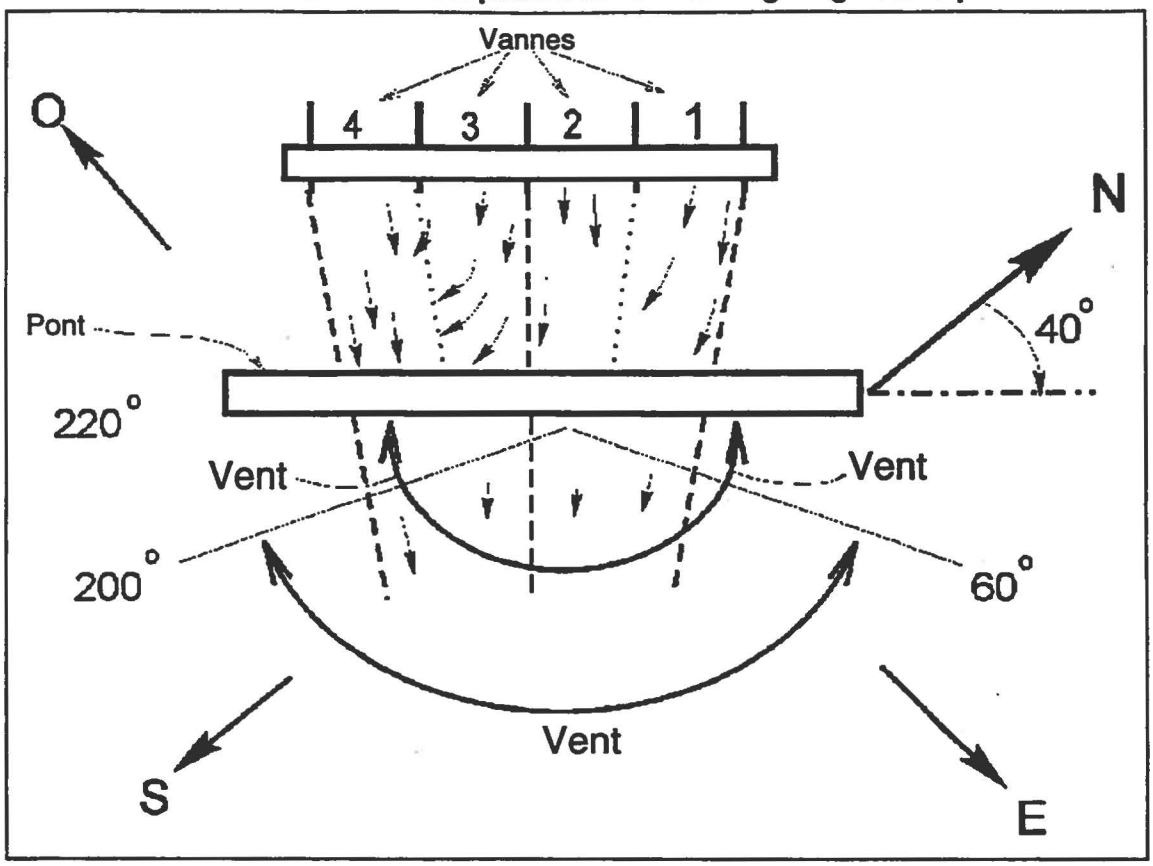
Les deux effets thermodynamiques décrits ci-dessus ont une probabilité d'occurrence plus élevée en hiver qu'en été. Ils sont reconnus comme étant une cause de formation de glace sur les ponts qui se trouvent au-dessus des cours d'eau découverts. Chaque hiver, ce phénomène s'observe à quelques reprises sur le pont Champlain, quand le Saint-Laurent est encore libre de glace. Parce que l'eau est plus chaude que l'air ambiant, un brouillard se lève et persiste lorsque le taux d'humidité est élevé ; si le vent le pousse vers le pont, il devient susceptible d'y causer de la glace. Le même phénomène risque de se produire en hiver sur le pont qui traverse la rivière Sainte-Marguerite et, puisque le taux d'humidité y est généralement plus élevé en hiver, il faut s'attendre à ce que l'évaporation des embruns soit moindre.

En résumé, les effets du microclimat sur la formation des embruns peuvent être importants. Jusqu'à maintenant, les conditions hivernales n'ont pas été examinées et il serait souhaitable de poursuivre l'étude en réalisant un certain nombre d'essais lorsque le taux d'humidité est élevé et que les températures sont sous le point de congélation.

5.5 Influence de la direction et de la vitesse du vent

Étant donné que les embruns se créent légèrement en aval du pont, la direction du vent en influence grandement le déplacement vers le pont (figure 9). Un vent dominant du nord-ouest éloigne les embruns du pont, mais un vent dont la direction se trouve entre le nord-est et le sud-ouest, soit entre 40° et 220°, est susceptible de ramener les embruns vers le pont et d'en provoquer le mouillage. Le vent le plus susceptible d'augmenter sensiblement la probabilité de mouillage du pont est celui du sud-est (environ 130°), car il est en quelque sorte perpendiculaire à la structure du pont.

Figure 9
Directions du vent susceptibles de former du givrage sur le pont



La vitesse du vent est également importante puisque plus le vent est fort, plus les grosses gouttelettes sont entraînées loin. L'annexe C présente les calculs de simulation qui ont été réalisés pour vérifier cette hypothèse.

Par ailleurs, des mesures relatives à la vitesse et à la direction du vent ont été prises au cours d'une période suffisamment longue pour évaluer le risque que celui-ci représente. Également, des données recueillies à la station de Sept-Îles ont permis de bien établir la récurrence des vents à risque ; il en ressort que les vents dont la direction et la vitesse sont les plus susceptibles de provoquer le mouillage du pont sont relativement peu fréquents et qu'il serait donc possible de diminuer les débits déversés au minimum à ces moments. Cependant, la gestion des débits à partir d'une variable aléatoire telle que le vent est problématique. En effet, non seulement la vitesse et la direction changent continuellement, mais aussi changent-elles rapidement, avec un certain facteur de pointes. À un certain moment pendant les essais, la direction du vent a changé d'environ 180° en environ une heure. L'annexe A fournit la description de cet événement.

5.5.1 Effet thermodynamique du vent sur les colonnes d'embruns

Les colonnes d'embruns ascendantes perdent plus ou moins rapidement leur énergie et se mélangent à l'air ambiant. Ce mélange peut, selon le taux d'humidité et la température, favoriser l'évaporation de l'eau ou la condensation de la vapeur. À ce moment, le vent agit d'une façon importante sur les embruns qui persistent en les entraînant dans une direction particulière. L'annexe B fournit un exemple de calculs relatifs à cet effet thermodynamique du vent.

5.5.2 Données sur le vent

La direction du vent la plus susceptible de provoquer le mouillage du pont n'a pas été observée d'une façon continue durant les essais ; il faudrait vérifier s'il n'y aurait pas de mouillage encore plus significatif dans les cas où le vent souffle perpendiculairement au pont, même si les débits déversés sont faibles. Cependant, des données relatives au vent ont été recueillies pendant une période assez longue et la fréquence des vents les plus susceptibles de provoquer le mouillage du pont a pu être déterminée. Il existe également un rapport[7] qui, à partir de données recueillies à l'aéroport de Sept-Îles, indique que le vent est assez souvent inoffensif.

5.5.3 Observations sur la vitesse du vent

Lorsque le vent ramène les embruns vers le pont, des gouttelettes se dispersent au-dessus et au-dessous de celui-ci en raison de la présence de l'obstacle que forme son tablier. Les gouttelettes qui montent finissent par perdre leur composante ascendante due à la vitesse d'entraînement et la gravité les fait retomber sur le tablier du pont.

[7] Thiémonge, N. et Bilodeau, N., 1997 (SH-97-086)

Lors des essais du mois de juin de 1997, des vents assez forts qui ramenaient les embruns sous le pont avant qu'ils n'aient dépassé le tablier ont été remarqués. Il semble donc exister une plage de vitesse critique au-delà de laquelle la probabilité de mouillage est moindre. Cependant, comme le vent est sujet à fluctuation et que la fréquence des colonnes d'embruns est périodique, il est difficile de précisément spécifier la vitesse à partir de laquelle il n'y a plus de risque de mouillage. En conséquence, il convient de réduire au minimum la probabilité de mouillage chaque fois que la direction du vent est susceptible d'en causer, et ce, quelle que soit la vitesse du vent. L'annexe A décrit entre autres le mouillage qui s'est produit le 2 juin sous un vent du nord-est (13°).

5.5.4 Observations sur la direction du vent

Les drapeaux qui ont été placés sous le pont n'ont pas fourni beaucoup d'informations utiles au cours des essais préliminaires du mois de novembre de 1996. En effet, le vent soufflait vers l'aval durant cette période et les drapeaux étaient un peu trop petits. Quand le vent souffle ainsi, la gorge où se forment les embruns devient une zone de circulation où de faibles vents se déplacent dans des directions variant en fonction des turbulences qui s'y forment. Les drapeaux ont alors indiqué des directions aléatoires, associées à la formation des embruns à proximité du pont. De plus, puisque les drapeaux ne pouvaient être vraiment observés qu'à partir des caméras fonctionnant en gros plan, il n'a pas été possible d'obtenir une vue d'ensemble. Compte tenu de l'aspect fortement aléatoire des vents, il aurait fallu observer simultanément l'ensemble des drapeaux en gros plan, ce qui est évidemment impossible à faire avec une seule caméra. Heureusement, les embruns, en particulier les gouttelettes les plus fines, sont transportés par le vent, ce qui permet une visualisation de l'effet d'entraînement du vent, à la condition toutefois de considérer que les grosses gouttelettes subissent également une force de gravité qui les fait dévier.

Au moment où les vannes ont été ouvertes, le tourbillon d'évacuation et la formation des embruns ont provoqué un mélange d'air et d'eau (le comportement de l'air varie selon qu'il y a évacuation d'eau ou non). Comme les embruns cachaient partiellement les drapeaux, les enregistrements vidéo montrent peu quant à la direction du vent sous le pont.

Lorsque le vent souffle dans le même sens que l'écoulement, soit vers l'aval, il se forme un tourbillon qui tend à faire remonter les embruns ; dans un tel cas toutefois, ceux-ci dépassent difficilement la hauteur du pont, là où se trouve le principal courant d'écoulement de l'air.

Au cours des mesures prises au mois de juin de 1997, les drapeaux ont clairement indiqué que quand la direction du vent est perpendiculaire au pont, cela est susceptible d'en causer le mouillage.

5.6 Conditions de mouillage du pont

5.6.1 Mouillage du tablier

Pour que se produise le mouillage du tablier du pont, il faut que

- les colonnes d'embruns atteignent une hauteur suffisante ;
- le vent dominant entraîne les embruns au-dessus du pont, d'où une partie des gouttelettes retombera sur le tablier sous l'effet de la gravité.

Le visionnage des enregistrements vidéo permet de constater que lorsque les vents sont forts, les embruns ne mouillent pas le tablier puisqu'ils passent au-dessous du pont. L'annexe C présente une simulation numérique des vitesses de l'air, soit ce qui correspond aux trajectoires approximatives suivies par les gouttelettes les plus fines, qui permet, à l'aide de certaines hypothèses simplificatrices, d'évaluer le mouillage du pont. Il faut noter qu'à cause de la complexité du phénomène, la réalisation d'une simulation complète et réaliste est pratiquement impossible et que c'est la raison pour laquelle l'analyse a été avant tout basée sur l'observation des enregistrements vidéo plutôt que sur la simulation.

5.6.1.1 Cas du 7 novembre 1996

Un essai préliminaire effectué le 7 novembre 1996 a permis de constater, quand le vent souffle vers l'amont à une vitesse aussi faible que 6 km/h, que les embruns sont ramenés vers le pont et qu'ils en mouillent le tablier et la structure.

5.6.1.2 Cas du 3 juin 1997

Lors des essais du 3 juin 1997, l'accumulation d'eau dans les bacs était régulièrement contrôlée, ce qui a permis de déterminer avec une certaine précision le début de l'échantillonnage. La masse d'eau totale accumulée à ce moment a atteint 244,6 g, ce qui représente 652 g/m^2 pour une durée d'échantillonnage de 30 minutes, soit un taux de 1,305 kg/m^2 à l'heure.

Le premier des deux essais faits avec les entonnoirs suspendus a duré 16 minutes. À ce moment, la vanne n° 1 était ouverte de 8 pieds, les vannes n° 2 et n° 3 étaient fermées et la vanne n° 4 était ouverte de 10 pieds. La quantité d'eau récoltée dans chacun des quatre entonnoirs différait ; elle était de 928,9 g dans l'entonnoir n° 1, de 810,1 g dans l'entonnoir n° 2, de 454,8 g dans l'entonnoir n° 3 et l'entonnoir n° 4 était vide. Il est important de noter que lors de la remontée de la corde, il est probable qu'une certaine quantité d'eau ait été perdue, surtout en ce qui concerne l'entonnoir n° 1 qui était très plein, le papier buvard n'ayant pas réussi à y retenir toute l'eau.

5.6.1.3 Cas du 4 juin 1997

Le 4 juin 1997, le mouillage a commencé avant que les observateurs n'arrivent sur place, vers 8 h 40. Il a donc été impossible de déterminer la durée exacte de l'accumulation d'eau dans les bacs. Cependant, puisque la hauteur d'ouverture des vannes avait été la même toute la nuit, il est réaliste de supposer que la quantité d'embruns en cause était constante et que seul le vent pouvait faire en sorte qu'ils atteignent le pont. Durant toute la nuit, la direction du vent avait pourtant été telle qu'elle éloignait les embruns du pont. Puisque le vent a tourné à compter de 8 h, il est plausible de croire que l'accumulation d'eau a commencé à ce moment. Le prélèvement de l'échantillon s'est fait vers 8 h 56 avec comme résultat une quantité d'eau de 180,74 g, soit un taux de 492 g/m^2 à l'heure.

Comme le mouillage continuait, un deuxième prélèvement a été fait 30 minutes plus tard, présentant cette fois une meilleure précision quant à la durée de l'exposition aux embruns, soit un taux de 140,16 g/m^2 à l'heure.

Le deuxième des deux essais faits avec les entonnoirs suspendus a duré 11 minutes. À ce moment, les vannes n° 1 et n° 2 étaient fermées, la vanne n° 3 était ouverte de 13 pieds et la vanne n° 4, de 10 pieds. La quantité d'eau récoltée dans chacun des quatre entonnoirs différait beaucoup des résultats précédemment obtenus : elle était de 1,004 kg dans l'entonnoir n° 1, de 0,0151 kg dans l'entonnoir n° 2, de 2 g dans l'entonnoir n° 3 et l'entonnoir n° 4 était vide. Ces résultats démontrent que le côté sud-ouest du pont, c'est-à-dire la rive droite, est nettement susceptible d'être mouillé.

5.6.1.4 Cas du 17 juin 1997

Le mouillage complet du pont s'est produit le matin du 17 juin 1997. Cependant, ses coupures nettes de chaque côté des voies de circulation et au joint d'étanchéité semblent indiquer qu'il serait dû à la condensation formée sur la structure d'acier du tablier au point de rosée d'une part et à l'évaporation rapide de la zone où circulent les voitures d'autre part.

5.6.2 Mouillage de la structure

Par rapport à la structure du pont, les embruns les plus fréquents et les plus denses se présenteraient du côté de la béquille sud-ouest qui constitue la partie la plus exposée. La formation de glace devrait donc y être plus importante que sur les autres parties de la structure.

Le problème du mouillage de la structure est d'autant plus complexe qu'il ne s'agit pas seulement d'exposition et de fréquence du phénomène : il implique également une question de persistance, puisque la glace qui s'y forme en hiver peut rester assez longtemps pour qu'une accumulation significative se produise. Pour évaluer la persistance, les données de température recueillies à l'aéroport de Sept-Îles pourraient être utilisées[8]. Comme la glace recouvre la structure pendant quelques semaines au cours des mois de janvier et février, il serait facile d'en vérifier la persistance sur les piliers au cours des prochains hivers.

5.7 Synthèse des résultats

La figure 10 illustre les principaux résultats obtenus à la suite de l'ensemble des essais. En abscisse est représentée la somme des hauteurs d'ouverture des vannes n° 1 et n° 2 et en ordonné, la somme des hauteurs d'ouverture des vannes n° 3 et n° 4. La représentation graphique des cotes de hauteur maximale atteinte par les embruns aurait normalement nécessité une représentation complexe à trois dimensions ; pour éviter cette complexité, la valeur de la cote a été indiquée immédiatement à côté du point décrivant les ouvertures des vannes.

Les cotes accompagnées d'un cercle plein correspondent aux essais où le vent soufflait vers l'aval et les croix, à ceux où le vent soufflait vers l'amont, soit dans la direction produisant le mouillage du pont. Les cotes soulignées indiquent les cas où le vent était supérieur à 11 km/h et les cotes encerclées, ceux où le mouillage du tablier a été observé.

Six zones représentant les probabilités de mouillage en fonction de la hauteur d'ouverture totale d'une paire de vannes ont été estimées à partir de la valeur des cotes, soit

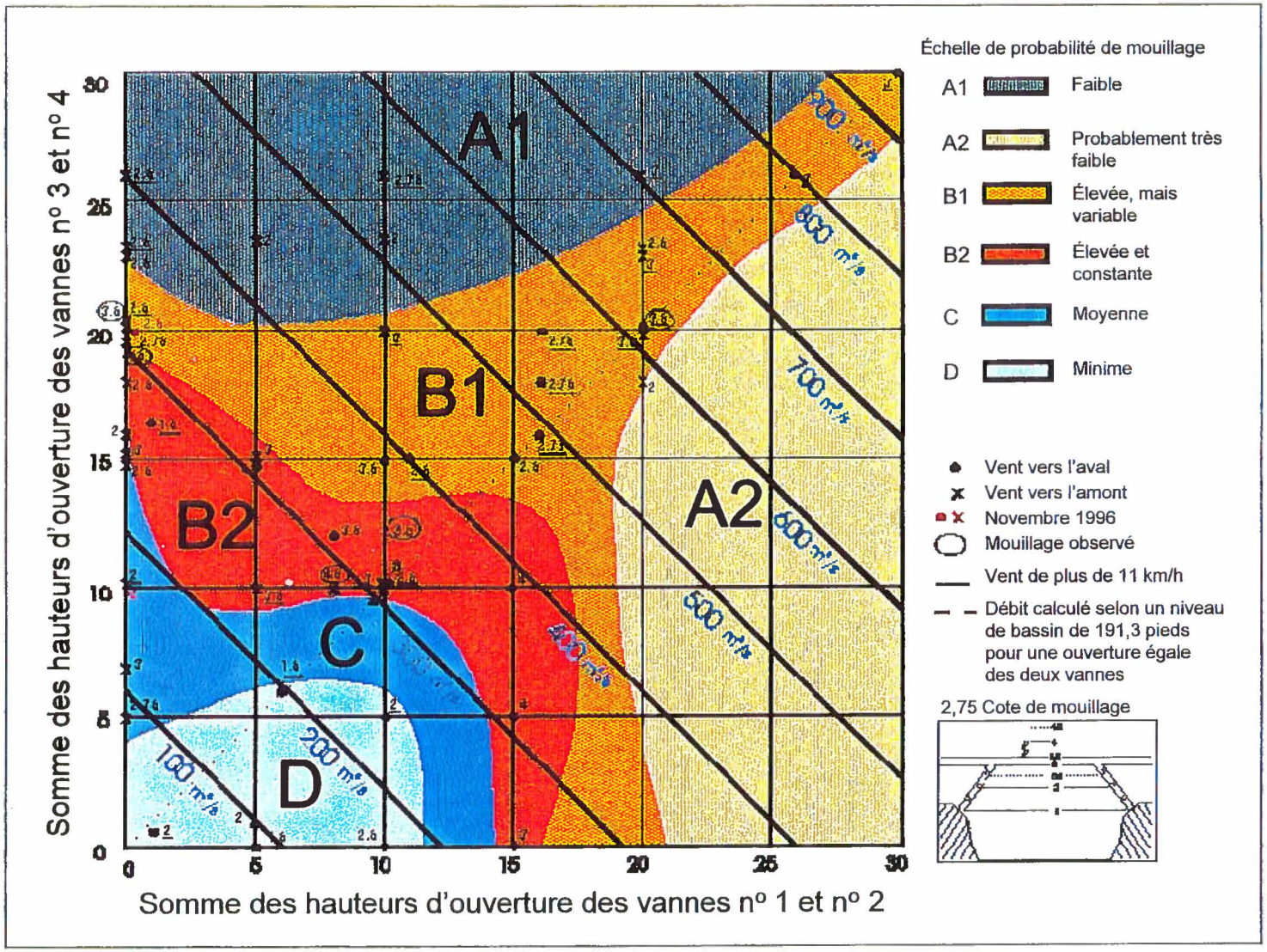
- la zone A1, où la probabilité de mouillage est faible ;
- la zone A2, où la probabilité de mouillage est probablement très faible ;
- la zone B1, où la probabilité de mouillage est élevée, mais variable ;
- la zone B2, où la probabilité de mouillage est élevée et constante ;
- la zone C, où la probabilité de mouillage est moyenne ;
- la zone D, où la probabilité de mouillage est minime.

[8] Thiémonge, N. et Bilodeau, N., 1997 (SH-97-086)

Lors des essais, il a été remarqué que, dans les zones A1 et A2, ce n'est pas lorsque les vannes sont ouvertes au maximum que la cote atteinte par les embruns est la plus élevée. En fait, il n'y a pas de cote supérieure à 3 quand les débits déversés sont forts. La zone D est celle où les débits déversés sont faibles et où la probabilité de mouillage est minime. Pour augmenter les débits déversés tout en conservant une probabilité de mouillage minimale, il sera préférable d'ouvrir les vannes n° 1 et n° 2 plutôt que les vannes n° 3 et n° 4.

La représentation simplifiée présentée à la figure 10 peut permettre la gestion du problème grâce au contrôle de l'ouverture des vannes, étant donné qu'il est possible de prévoir le mouillage du pont qui s'ensuit. Il faut noter que la précision de la représentation est tributaire du nombre d'essais qui ont pu être faits. Compte tenu du grand nombre de variables impliquées dans le phénomène, des essais supplémentaires seraient requis, particulièrement pour confirmer que la probabilité de mouillage dans la zone A2 est effectivement très faible, même quand les débits déversés sont forts. De plus, quand il s'agira de déverser des débits importants au cours de périodes relativement courtes, il faudra profiter des vents dominants de l'ouest et surtout s'assurer que la formation de glace sur le tablier du pont fasse l'objet d'une surveillance supplémentaire.

Figure 10
Analyse multivariable du mouillage du pont



6 Propositions de gestion des risques de givrage

Les diverses probabilités de mouillage du tablier et de la structure du pont peuvent être qualitativement transposées en risques de givrage pour lesquels plusieurs solutions sont envisageables dans le but de les gérer.

6.1 Risques de givrage

La figure 11 montre les risques de givrage du pont en fonction de la hauteur d'ouverture des vannes. Cette représentation est une transposition des probabilités de mouillage illustrées à la figure 10 ; elle a pour but d'établir une grille de décision qui pourrait faire partie des procédures utilisées par les opérateurs du barrage de la Sainte-Marguerite-2 et elle suppose que les conditions hivernales n'augmenteront pas significativement la formation des embruns. Les zones à faible risque de givrage sont faciles à identifier : elles correspondent à des hauteurs d'ouverture importantes ou faibles de la vanne n° 1, de la vanne n° 2 ou de cette paire de vannes quand les hauteurs d'ouverture des vannes n° 3 et n° 4 sont très faibles.

6.2 Gestion des risques

Les risques associés au givrage du pont peuvent être gérés efficacement en contrôlant la formation des embruns générés lors de chaque déversement effectué en hiver et en mettant en application un ensemble de mesures propres à l'amélioration de la sécurité routière.

6.2.1 Contrôle de la formation des embruns par la gestion de l'ouverture des vannes

Le contrôle de la formation des embruns est considéré comme une mesure importante du processus de contrôle de formation du givre sur le tablier du pont et, par ricochet, sur sa structure. Cette mesure se traduit principalement par la gestion de l'ouverture des vannes qui devra être adéquatement adaptée au contexte hydraulique du site de même qu'aux conditions météorologiques les plus contraignantes qui prévaudraient durant les périodes requises à la manœuvre des vannes.

6.2.1.1 Gestion basée sur les risques de givrage

La manœuvre des vannes pourrait être effectuée conformément aux indications de la figure 11, laquelle pourrait être intégrée aux procédures d'exploitation du barrage de la Sainte-Marguerite-2.

Les deux vannes de gauche, soit les vannes n° 1 et n° 2, devraient être utilisées plutôt que les vannes de droite, d'où l'importance qu'elles soient opérationnelles et en bon état durant tout l'hiver.

D'une façon générale, les vannes devraient être ouvertes de manière à ce que la somme de leurs hauteurs d'ouverture correspondent à celles identifiées dans la zone A1 (risque faible), dans la zone A2 (risque probablement très faible) ou dans la zone D (risque minime).

Il faut remarquer que c'est seulement à l'usage que les hauteurs d'ouverture à utiliser seraient identifiées avec plus de précision et qu'ainsi la formation des embruns serait mieux contrôlée. Il serait particulièrement important de vérifier les hauteurs d'ouverture relatives à la zone A2 qui n'ont pas pu l'être durant les essais.

6.2.1.2 Gestion adaptée au contexte hydraulique

La gestion de l'ouverture des vannes devra être adéquatement adaptée au contexte hydraulique du site une fois que la centrale de la Sainte-Marguerite-3 sera entrée en service.

Selon l'étude hydraulique[9 et 10] intégralement reproduite à l'annexe D, l'évacuateur de crue de la Sainte-Marguerite-2 peut fonctionner en mode de déversement continu et en mode de déversement discontinu, lequel pourrait être adopté quotidiennement.

Mode de déversement continu

L'évacuateur de la Sainte-Marguerite-2 déversera un débit qui s'ajustera sur le débit moyen de la Sainte-Marguerite-3 et du bassin versant intermédiaire situé entre les sites de la Sainte-Marguerite-2 et de la Sainte-Marguerite-3.

L'ajustement du débit d'évacuation de la Sainte-Marguerite-2 se fera à partir d'un suivi du niveau du réservoir ainsi que d'après un historique de production en amont récent, d'après les prévisions de production pour les heures et les jours qui viennent et d'après les conditions météorologiques. L'utilisation du mode de déversement continu visera alors à minimiser la fréquence des manœuvres relatives aux vannes, à réduire l'ampleur du marnage ou à trouver un compromis entre les deux objectifs.

Dans une telle situation, le débit d'évacuation se situera entre 69 m^3/s et 109 m^3/s du mois de décembre au mois de mars, quand la centrale de la Sainte-Marguerite-2 fonctionnera, et il présentera exceptionnellement des excursions variant de 0 m^3/s à 310 m^3/s.

Mode de déversement discontinu

Le réservoir Sainte-Marguerite a une capacité de rétention qui permet de concentrer les manœuvres d'évacuation en deçà de périodes fixes et de fermer complètement les vannes en dehors de ces périodes.

---

(9) Bilodeau, L., 1997

(10) Bilodeau, L., 1997 (SH-97-322)

Par exemple, la tranche de niveau s'échelonnant de 57 m à 58 m permet d'emmagasiner quelque 27 hm^3 d'eau à un niveau maximum d'exploitation de 58,5 m. Ce volume correspond à un débit de 312 m^3/s soutenu durant 24 heures.

Il a été démontré[11] qu'avec un marnage de 2,5 m, il sera possible d'étaler les déversements sur des intervalles d'environ sept jours en présence d'un débit moyen de 160 m^3/s au site de la Sainte-Marguerite-3. Les déversements dureront alors entre 15 et 39 heures, selon qu'ils sont faits avec deux vannes ou avec quatre vannes.

Il sera également possible de procéder à des déversements discontinus quotidiens. Dans une telle situation, le marnage sera à 0,24 m en présence d'un débit de 160 m^3/s au site de la Sainte-Marguerite-3, pour un déversement de 333 m^3/s qui durera huit heures, pendant les heures de clarté.

Pendant que l'évacuateur de la Sainte-Marguerite-2 restera fermé, le niveau du réservoir sera à la hausse. Lorsque l'évacuateur sera ouvert, le débit d'évacuation sera ajusté à une valeur suffisamment élevée pour que le niveau du réservoir baisse, ce qui permet de refermer l'évacuateur.

Le mode de déversement discontinu quotidien permettra de concentrer les manœuvres d'évacuation pendant les heures de travail régulières, soit pendant les heures de clarté où l'inspection visuelle des installations est facile à faire.

Ainsi, de la même façon que pour les hauteurs d'ouverture des vannes, c'est seulement à l'usage que le mode de déversement le plus approprié pourrait être déterminé par rapport à la problématique de formation des embruns.

6.2.1.3 Gestion adaptée aux conditions météorologiques défavorables

Pour contrôler la formation des embruns, il est suggéré que l'ouverture des vannes soit réduite au minimum dans des conditions météorologiques défavorables (figure 11, zone D). Ces conditions sont présentement identifiées comme étant: les périodes où le vent souffle vers l'amont et où la température est près du point de rosée, ce qui favorise la condensation propice à la persistance des embruns.

6.2.2 Mesures propres à l'amélioration de la sécurité routière

Face à la problématique de givrage du tablier du pont, certaines mesures supplémentaires pourraient être envisagées. Ces mesures consisteraient à détecter promptement le moindre givrage qui s'y trouverait, à avertir les automobilistes et les responsables de l'entretien routier dès l'apparition du givrage ainsi qu'à épandre du sel au besoin.

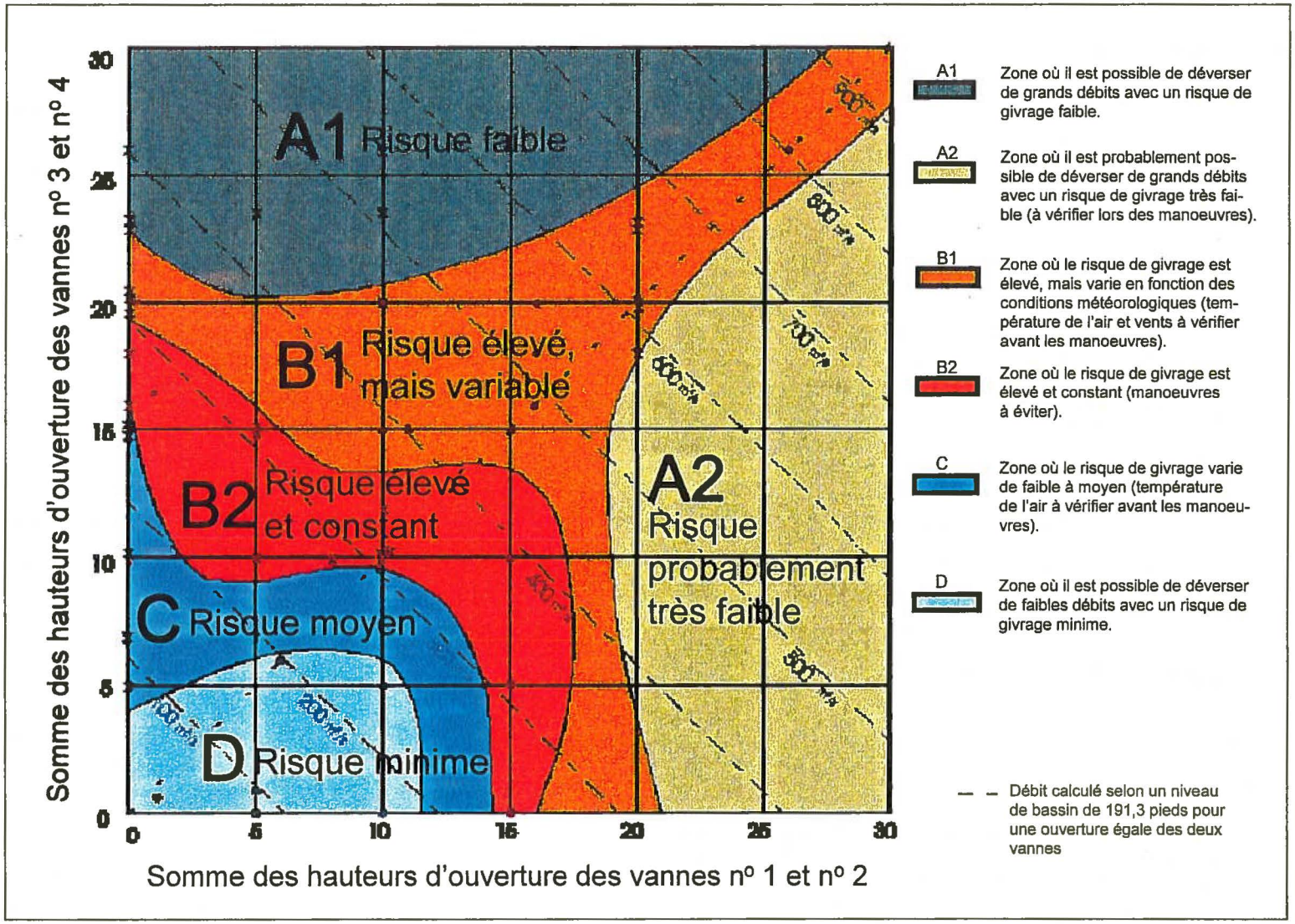
---

[11] Thiémonge, N. et Bilodeau, L., 1997 (SH-97-110)

6.2.3 Surveillance de la structure

Quant à la problématique de givrage de la structure du pont, quelques mesures pourraient être considérées. Il s'agirait d'abord d'y effectuer des inspections périodiques et fréquentes lors des périodes de déversement. De plus, une caméra de surveillance pourrait être installée en permanence pour permettre aux opérateurs du site de surveiller le degré d'accumulation du givre sur la structure.

Figure 11
Risques de givrage associés à l'ouverture des vannes



7 Conclusion

La campagne d'essais qui a eu lieu au cours de la présente étude était destinée à produire des embruns dans le but de les caractériser le plus scientifiquement possible. Grâce à la manœuvre des vannes de l'évacuateur de crue du barrage de la Sainte-Marguerite-2 effectuée dans le cadre de cette campagne, l'étude a permis de recueillir un ensemble de données particulièrement intéressantes qui clarifient la problématique des embruns, celle du mouillage du pont affecté et, indirectement, celle de son givrage.

En effet, il a été possible de dégager les deux principales constatations suivantes :

- quand les débits déversés sont faibles ou élevés, les embruns n'atteignent pas le tablier du pont ;

- à débits déversés égaux, l'ouverture des deux vannes de droite mènerait à la formation d'embruns plus imposants que ceux produits par l'ouverture des deux vannes de gauche.

Le mouillage du tablier se produirait donc chaque fois que certains débits déversés font en sorte que les colonnes d'embruns atteignent une hauteur supérieure à celle du tablier et que le vent dominant les entraîne au-dessus du pont d'où l'effet de la gravité les fait retomber.

Il est donc pertinent de conclure que les risques associés au givrage du pont peuvent être efficacement gérés en contrôlant la formation des embruns lors de chaque déversement hivernal. Quoique la direction et la vitesse du vent constituent des facteurs importants quant au phénomène de mouillage du pont, elles ne font pas partie dudit contrôle à cause de leur caractère aléatoire. À cet effet, trois volets entrent plutôt en ligne de compte :

- l'ouverture des vannes de gauche au lieu des vannes de droite, à des hauteurs qui permettront aux embruns de rester sous le tablier du pont ;

- après l'entrée en service de la centrale de la Sainte-Marguerite-3 en 2001, le choix du mode de déversement le plus approprié au contexte hydraulique du réservoir ;

- avant toute manœuvre de déversement, la prise en compte des conditions météorologiques susceptibles de causer la formation des embruns.

En plus de proposer des façons de contrôler les embruns, l'étude suggère des mesures pour faire face à la problématique du givrage du tablier du pont. Celles-ci consisteraient principalement à détecter promptement le moindre givrage du tablier, à en prévenir les automobilistes et les responsables de l'entretien routier le plus tôt possible ainsi qu'à épandre du sel au besoin.

En résumé, les conditions menant au mouillage et par conséquent au givrage du tablier du pont sont assez connues pour être contrôlées. Il est en effet évident que la diminution du mouillage du tablier devrait contribuer à réduire le givrage de la structure.

Références

Beauchemin-Beaton-Lapointe Inc, 1993, *Pont sur la rivière Sainte-Marguerite (route 138), Prévention de la formation et de l'accumulation de glace*

Bilodeau, L., 1997, *Contexte hydrologique durant les mois froids*, Communication du 9 octobre aux auteurs, Hydro-Québec

Bilodeau, L., 1997, *Contribution au rapport de l'École de Technologie Supérieure et commentaires sur la version préliminaire du 21 octobre*, Communication du 30 octobre à D. N. Nguyen, Hydro-Québec, SH-97-322

Bisson, J., *SM-3 - Zones à débit réduit entre le barrage SM-3 et le réservoir SM-2*, Communication du 16 avril à G. Corfa, Hydro-Québec, SH-96-139

Décret gouvernemental, 1994, *Rivière Sainte-Marguerite, études complémentaires*, Note technique n° 15, Aménagement SM3, apports révisés.

Finstad, K. J., Lozowski, E. P. et Makkonen, L., 1988, *On the Median Volume Diameter Approximation for Droplet Collision Efficiency*, J. of Atmos. Sci., vol. 45, No. 24, pp. 4008-4012

Gauvin, A., 1993, *Rapport sur l'impact du projet de harnachement de la rivière Sainte-Marguerite (SM3) au pont sur la route 138*, Ministère des Transports, P0-86-15703

Létourneau, R., 1997, *Évacuateur Sainte-Marguerite-2, Rapport de visite*, Service Appareillage mécanique, Hydro-Québec

McComber, P. et Paradis, A., 1993, *Étude de givrage aux chutes Montmorency*, Rapport de recherche pour ROCHE Ltée

Robitaille, F., 1996, *Projet de la Sainte-Marguerite-3, Pont de la route 138 sur la Sainte-Marguerite, Embrun à la Sainte-Marguerite-2*, Hydro-Québec

Sparks, D. et Fagherazzi, L., 1996, *SM3 - Plan de production type*, Communication du 10 janvier, direction Planification de la production, Hydro-Québec

Thiémonge, N. et Bilodeau, L., 1997, *Analyse des données anémométriques et de la température de l'air de l'aéroport de Sept-Îles*, Hydro-Québec, SH-97-086

Thiémonge, N. et Bilodeau, L., 1997, *Marnage et débit d'évacuation du réservoir SM-2 en hiver après la mise en service de SM-3*, Hydro-Québec, SH-97-110

Annexe A
Observations sur le mouillage

Les observations sur le pont de la rivière Sainte-Marguerite ont permis de constater un mouillage du tablier ou des piliers du pont à quelques reprises. Ces observations de mouillage ont été résumées plus haut mais sont décrites ici avec des détails supplémentaires.

7 novembre 1996

Au cours des essais préliminaires, le 7 novembre, pendant l'essai la direction du vent a été du sud-est à quelques reprises et a permis d'observer le mouillage du tablier du pont malgré une vitesse de vent relativement faible (6 km/h). En fait, pour l'essai du 7 novembre, on a constaté le mouillage d'une partie de la route ainsi que de la rampe et de la structure. Dans des conditions de températures au dessous du point de congélation, il y aurait eu formation de glace sur le pont.

Les mesures de direction du vent indiquent que du vent du nord-est a été obtenu le matin du 7 novembre plus précisément de minuit à six heures. Le plus souvent le vent était de l'est pendant cette période et allant au sud-est (105° et 104° à deux reprises). Le vent était toutefois revenu au nord-est, soit 40° pour l'essai du 7 novembre. La valeur enregistrée du vent est moyennée sur une période de 15 min. La vitesse et la direction du vent peut donc fluctuer dans les périodes qui séparent les lectures.

On a observé à cette occasion le mouillage partiel du tablier du coté sud-ouest.

2 juin 1997

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
2 juin	15	15	15	15	866,7	20,0		16 h 15	
	13	13	13	13	728,8	25,0		16 h 35	
	10	10	10	10	561,4	23,0		16 h 54	

Le lundi 2 juin, les essais d'ouverture des vannes ont commencé par l'ouverture de toutes les vannes à une hauteur de 4,57 m, au deuxième essai toutes les ouvertures ont été ramenées à 3,96 m, à ce moment on peut observer des jets d'embruns qui s'élèvent assez haut sous le pont au centre et près des béquilles ouest (du côté de Port-Cartier). C'est au troisième essai (16 h 54) alors que les quatre vannes étaient ouvertes de 3,05 m chacune qu'on a pu remarquer le début de mouillages importants des piliers de la béquille ouest. On observe à ce moment des colonnes d'embruns au centre du pont et qui atteignent le niveau du tablier. Du côté ouest près des béquilles le même type de jet projette l'eau quelques fois jusque sous le tablier mais le plus souvent un peu plus haut que le niveau de la troisième poutre transversale des béquilles. Ces jets sont quelques fois projetés sur les béquilles et occasionnent un fort mouillage de celles-ci. Il est difficile de préciser si ces jets sont poussés par le vent ou si c'est tout simplement l'angle de poussée du jet qui les projette sur les béquilles, il est toutefois bon de remarquer qu'aux essais précédents (surtout l'essai no 2) les jets étaient aussi hauts et près des béquilles ouest qu'à l'essai no 3 sans l'atteindre. Les données sur les vitesses et directions de vent nous indiquent que pour les essais no 1 et no 2 les directions du vent étaient de 358° et 346° (42° et 54° au nord du pont) , alors qu'à 17 h au moment du mouillage des béquilles le vent était à un angle de 13° (27° au nord du pont) ce qui pourrait permettre de repousser les embruns sur les piliers. Un observateur (caméra no 1) posté près des béquilles ouest pouvait remarquer à ce moment de fortes bourrasques de vent en provenance du nord-est.

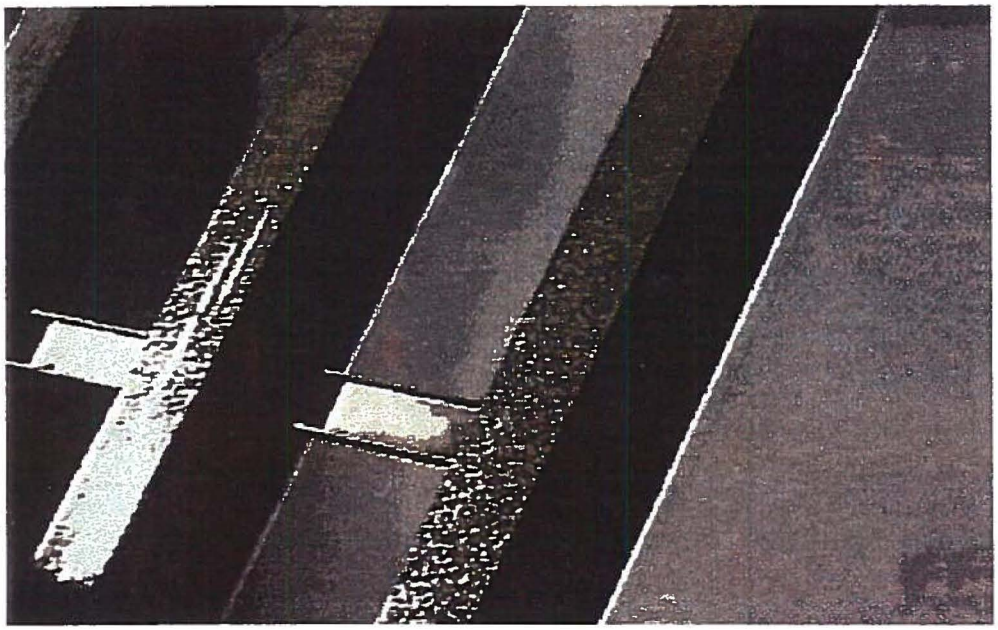
Les mêmes conditions d'ouvertures de vannes (quatre vannes ouvertes à 10 pieds) ont été testées le 4 juin à 9 h 55 alors que le débit d'évacuation était supérieur mais le vent d'une orientation différente soit d'environ 108° (68° au sud du pont) sans observer de mouillage des piliers. À partir de la caméra n° 1 on a pu observer à certains moments des « vagues » d'embruns assez lourds frapper les béquilles ou même passer entre les poutres des béquilles. On peut aussi observer l'eau couler abondamment sur le dessus des poutres. Les reproductions suivantes (photos A-1, A-2 et A-3) illustrent ces différents cas.

Les piliers du côté est sont restés secs durant ces essais.

Photo A-1
Embruns passant entre les piliers du pont (caméra n° 1)

Photo A-2
Embruns passant entre les piliers du pont (caméra n° 2)

Photo A-3
Eau qui coule à la surface des piliers du pont



3 juin 1997

Le 3 juin au matin plusieurs essais ont été effectués avec différentes combinaisons d'ouverture de vannes, toutefois on ne remarque pas de mouillage du tablier avant 11 h 32, et à ce moment seul le mouillage de la bordure de béton peut être confirmé. Cependant des enregistrements vidéo effectués un peu plus tard nous confirme qu'à un tel mouillage de la bordure correspond un léger mouillage de la chaussée.

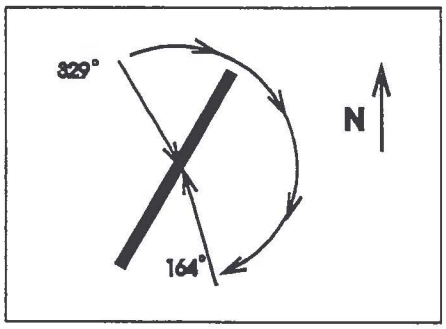
Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
3 juin	8	0	0	12	292,9	8,0		11 h 25	
	8	0	0	10	264,9	8,0		11 h 38	

Vents :

- à 11 h on enregistre sur l'anémomètre un vent de 17 km/h avec une orientation de 329° ;
- à 11 h 30 le vent de 8 km/h est à ce moment orienté à un angle de 56° ;
- à 12 h le vent est de 14 km/h et à 164°.

En une heure le vent a tourné de 194° (figure A-1), comme en une demi-heure le changement de direction est à peu près de moitié (87° / 195° = 45 %) on peut possiblement considérer ce changement comme constant et estimer ainsi la variation de l'angle du vent à environ 3,25°/minute.

Figure A-1
Changement d'orientation du vent entre 11 h et 12 h



À partir de cette estimation nous pouvons avoir une idée générale de l'orientation du vent à un moment donné pour cet événement.

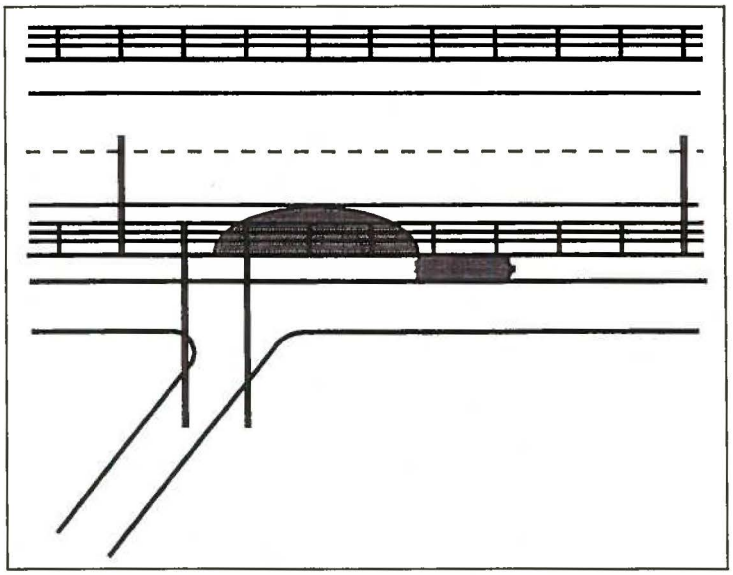
11 h 26

On peut observer sur le vidéo que les embruns montent jusqu'au niveau de la bordure de béton mais celui-ci est toujours sec.

11 h 32

À partir de la caméra n° 1 on peut voir que la béquille ouest se fait mouiller par un léger nuage d'embruns poussé par le vent. Au même moment, à partir de la caméra n° 2 on peut voir pour la première fois que la bordure de béton est mouillée (figure A-2) et, comme mentionné plus haut, de ce fait une petite partie de la chaussée. À partir de ce moment quand l'eau monte suffisamment haut, le béton se mouille. D'après l'estimation faite plus haut cette situation correspondrait environ à un vent d'un angle de 62,5° (22,5° par rapport au pont).

Figure A-2
Mouillage de la bordure de béton

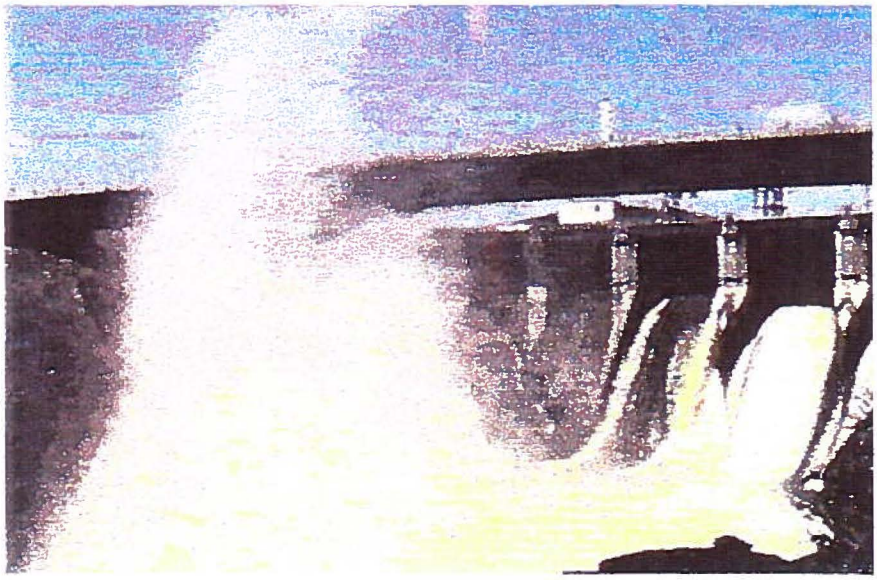


Jusqu'à 11 h 44 la chaussée ne sera mouillée que sur une petite partie de l'accotement sud.

11 h 44

Un jet très fort propulse l'eau très haut avec beaucoup d'énergie ce qui provoque le mouillage de la chaussée sur toute sa largeur (photo A-4). Il s'agit d'embruns très denses (lourds) qui montent assez haut pour qu'ils puissent à l'aide du vent atteindre le dessus du pont. On peut évaluer à ce moment l'angle du vent environ entre 101° et 107° (entre 61° et 67° par rapport au pont).

Photo A-4
Jet propulsé très haut causant le mouillage de la chaussée



4 juin 1997

Date	Ouverture des vannes (pi)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4		Vitesse (km/h)	Direction		
4 juin	0	0	9,5	10	295,3	10,0		8 h 50	

À l'arrivée (8 h 45), la surface du pont est mouillée près de la béquille ouest sur l'accotement seulement, toutefois 10 minutes plus tard nous avons noté que la chaussée était mouillée sur toute sa largeur. Durant la nuit, à partir de 21 h le 3 juin jusqu'à 8 h les vents ont été constamment en direction du nord c'est-à-dire entre 310° et 325° à des vitesses entre 5 km/h et 22 km/h. À partir de 8 h les vents enregistrés changent de direction et ont à ce moment une composante du sud à 99° (59° par rapport au pont) et atteignent la vitesse de 10 km/h. Si l'on considère que le la direction du vent a une influence importante pour le mouillage et que les débits évacués sont restés constant depuis la veille, on peut estimer que le début du mouillage de la chaussée ne remonte avant 8 h le 4 juin. À 9 h, une mesure de l'eau contenue dans le bac d'accumulation situé dans la zone mouillée est effectuée et nous donne un total de 182,74 g d'eau ce qui représente un mouillage de 482 $g/m^2/h$. Un nouvel échantillonnage est effectué entre 9 h et 9 h 30 et nous donne cette fois la mesure nettement inférieure de 140,16 $g/m^2/h$.

On peut observer sur l'enregistrement vidéo montrant le dessus du pont des jets d'embruns moyennement lourds projetés au dessus du niveau du pont et qui mouillent celui-ci sur l'accotement entre les deux règles de mesure.

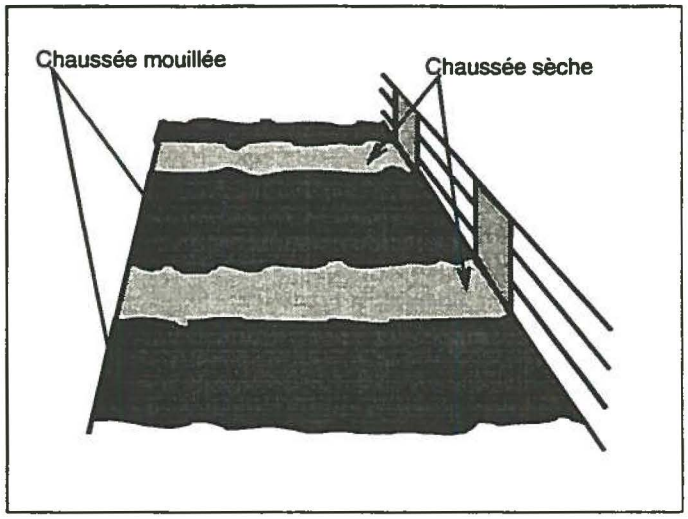
Les températures extérieures ont varié du minimum de 4,3 °C à 4 h 30 jusqu'à 10,7 °C à 8 h.

5 juin 1997

Date	Ouverture des vannes (pied)				Débit total (m^3/s)	Vents		Heure	Cote
	nº 1	nº 2	nº 3	nº 4		Vitesse (km/h)	Direction		
5 juin	0	0	13	8	327,0	6,0		a.m.	

À l'arrivée à 8 h 30 on constate que la chaussée est mouillée sur toute la largeur et la longueur du pont, entre les joints d'expansion. Comme on peut voir sur la figure A-3, la chaussée sur le barrage est mouillée sur toute sa largeur sauf pour certaines bandes vis-à-vis des blocs de béton verticaux d'un peu plus de 1 m de large. Ceci nous assure que ce mouillage n'est pas dû à des précipitations durant la nuit, et peut nous indiquer que le vent aurait transporté des embruns sur la chaussée du barrage aux endroits non protégés du vent. Toutefois, on peut observer que les bandes sèches sont perpendiculaires à la bordure mais le vent n'aurait été perpendiculaire au barrage (et au pont) que de 5 h 30 à 6 h 30 (vitesse de 5 km/h) et le reste du temps il aurait joué entre 10° et 60° par rapport au pont.

Figure A-3
Chaussée mouillée sur le barrage



Les béquilles ouest sont mouillées jusqu'au dessus de la troisième poutre transversale (à partir du bas des béquilles). Les béquilles du côté est sont mouillées jusqu'entre la première et la deuxième poutre transversale.

Les températures extérieures ont été constantes entre 7,2 °C et 8,4 °C durant la nuit.

18 juin 1997

La chaussée du barrage est mouillée de même que celle du pont sur toute sa longueur et sur les accotements des deux côtés mais est sèche sur les deux voies. Il est peu probable que ce mouillage ait été provoqué par les embruns, le vent ayant toujours été du nord depuis 1 h 30 jusqu'à notre arrivée sur les lieux vers 6 h 30, de plus il y a eu de la pluie la journée précédente qui a peut être continué durant une partie de la nuit. Cependant, il est intéressant de noter que la chaussée n'est mouillée que dans les limites du pont ou du barrage et est sèche à peu près à l'extérieur des joints d'expansions.

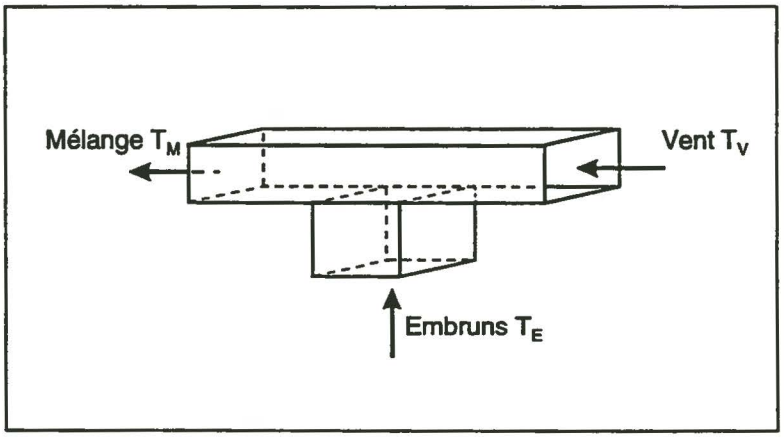
Annexe B
Analyse thermodynamique des embruns

Sur le site on a pu observer que le matin, lorsque la température est froide et que l'humidité relative est plus élevée, les embruns ont une persistance accrue. Cette observation souligne l'importance de l'effet thermodynamique sur les embruns. On sait que l'air ambiant possède une température et une humidité relative qui peut favoriser ou défavoriser l'évaporation ou la condensation. D'autre part l'eau de la rivière a également une température différente. Les embruns lors de leur création sont mélangés rapidement à l'air, une partie de l'eau retombe rapidement alors qu'une autre partie dont la vapeur d'eau approche la saturation remonte et se mélange à l'air ambiant. Il s'agit d'un problème multivariable complexe puisque les conditions d'évaporation et de condensation sont fonction des températures respectives de l'eau et de l'air ambiant, du degré d'humidité de l'air, de la vitesse du vent ou même de l'ensoleillement. En effet, dans ce dernier cas, le soleil procure aux gouttelettes par rayonnement l'énergie nécessaire à l'évaporation.

Afin de mieux apprécier l'effet thermodynamique sur les embruns, on compare deux cas types d'un modèle simplifié favorisant soit l'évaporation ou soit la condensation : celui où les embruns sont à une température plus élevée, et celui où les embruns sont à une température plus faible. Dans chaque cas, on suppose une différence de température de 5 °C entre les embruns et l'air ambiant. Ces deux cas illustrent bien le phénomène en ordre de grandeur. Une vérification plus complète demanderait d'examiner beaucoup plus de situations mais en faisant plusieurs hypothèses sur des paramètres non mesurés.

La figure B-1 montre le contour utilisé pour appliquer la conservation de masse et d'énergie à cette analyse. Ce contour suppose une zone de mélange avec deux entrées et une sortie. Pour les embruns, on fait l'hypothèse[12] d'un mélange d'air saturé et d'un contenu d'eau liquide de 0,5 g/m^3. On suppose alors une température des embruns T_E. Pour l'entrée de l'air ambiant, on suppose une température de vent T_V et un taux d'humidité φ. Le mélange se produit de sorte que l'on suppose un équilibre thermique et une température du mélange à la sortie T_M. Avec ces hypothèses on peut appliquer entre les entrées et la sortie un bilan de masse et d'énergie en présence d'évaporation ou de condensation. Pour cette application du bilan de masse et d'énergie au contour, on doit connaître les sections d'entrée A = 10 m^2 et les vitesses moyennes d'entrée. Les vitesses choisies pour les exemples sont V_v = 3 m/s pour le vent et sont V_E = 1 m/s pour les embruns. Il s'agit de choix de valeurs plausibles pour illustrer le phénomène par un exemple.

Figure B-1
Contour utilisé pour calculer l'effet du mélange de l'air et des embruns



[12] Finstad et al., 1988

Cas d'évaporation

Le premier cas susceptible de se produire est une situation favorisant l'évaporation des embruns. Ceci demande une température du vent supérieure à la température des embruns qui montent. Par exemple, supposons que la température de l'air ambiant est de TV = 20 °C et celle des embruns saturés est de TE = 15 °C. Cette situation peut se produire le jour au moment où la température ambiante et donc du vent est plus élevée que la température des embruns qui montent. Dans un tel cas, on obtient que le 0,5 g/m^3 pourra s'évaporer et le mélange de sortie aurait alors une température de 15,58 °C et un taux d'humidité de φ = 74 %. Ainsi la température du vent n'augmente presque pas et le contenu d'eau liquide s'évapore complètement.

Si la situation se présente un jour ensoleillé, il y aura de plus un effet d'énergie fournie par le rayonnement par le soleil qui augmentera encore plus la tendance à l'évaporation des embruns.

Cas de condensation

Le deuxième cas type est celui où la température extérieure est plus basse que celle des embruns. Par exemple, on observe cette situation tôt le matin ou en hiver. Alors non seulement il n'y aura pas d'évaporation mais de plus le refroidissement de la colonne d'embruns déjà saturée provoque une condensation sous forme liquide d'une partie de la vapeur saturée. Ceci augmente la quantité d'eau liquide dans la colonne d'embruns qui se mélange à l'air et peut donc causer éventuellement un plus grand mouillage du pont. Prenons les valeurs de températures suivantes: l'embrun à T_E = 15 °C et l'air ambiant à T_V = 10 °C. Dans un tel cas, on obtiendra pour le mélange une température de près de T_M = 14 °C , toujours d'air saturé. La condensation provoque alors une augmentation d'eau liquide de 0,66 g/m^3 En supposant un contenu liquide initial de 0,5 g/m^3, cette valeur constitue une augmentation de près de 33 % du mélange. Cette situation pourrait être assez fréquente en hiver.

Effet de la convection

S'il y a une différence de température entre la bouffée d'embruns et l'air ambiant, il y aura une poussée d'Archimède qui cause un mouvement de convection naturelle. Cette convection naturelle est susceptible de s'ajouter à la convection forcée causée par le mouvement de l'air. La masse volumique de l'air varie avec la température à 20 °C ρ_a = 1,187 kg/m^3 alors que à 15 °C on obtient plutôt ρ_a = 1,207 kg/m^3. Cette différence causera une accélération de 0,165 m/s^2 à un volume d'air de 1 m^3. Cette accélération sera vers le haut pour une température d'embruns plus chaude et vers le bas pour une température d'embruns plus froide.

Comparaison de l'effet sur le nuage d'embruns

Cette analyse de ces deux cas type indique que dans une condition d'évaporation le nuage d'embruns pourrait disparaître rapidement par évaporation. Au contraire, dans une condition inverse on obtient une augmentation du contenu liquide des embruns au contact de l'air. Ainsi la persistance des embruns nécessaire pour obtenir le mouillage du tablier est diminuée par les conditions d'évaporation plus fréquente en été. Dans ces même conditions, la convection naturelle retarderait l'ascension des embruns.

Par contre en hiver, il y a un risque de givrage du tablier du pont, la situation la plus courante en serait une de persistance des embruns et même de condensation supplémentaire résultant en une augmentation du contenu d'eau liquide du nuage d'embruns. De plus, la même différence de température entre les embruns et l'air ambiant résulte en une convection naturelle qui fera monter plus facilement les embruns au niveau du tablier. En résumé, l'analyse thermodynamique indique que le risque de mouillage serait plus fréquent en hiver c'est-à-dire au moment même où également il y a risque de gel sur le tablier du pont.

Annexe C
Formation et transport des embruns

Le phénomène de formation et de transport des embruns à la sortie de l'évacuateur du barrage de la Sainte-Marguerite-2 est complexe et aléatoire. On doit se baser largement sur les vidéos enregistrés sur place pour mieux comprendre ce phénomène. Cet annexe traite de certains aspects mécaniques du phénomène alors que l'annexe B traitait des aspects thermodynamiques.

Pour faciliter la compréhension, on peut décomposer le phénomène suivant les différentes étapes nécessaires au mouillage en commençant au niveau de la rivière pour arriver au mouillage du tablier ou de la structure du pont. Ces aspects sont les suivants :

- la vitesse d'entraînement des gouttes ;
- la formation des embruns ;
- la distribution des vitesses de vent ;
- le transport du nuage d'embruns.

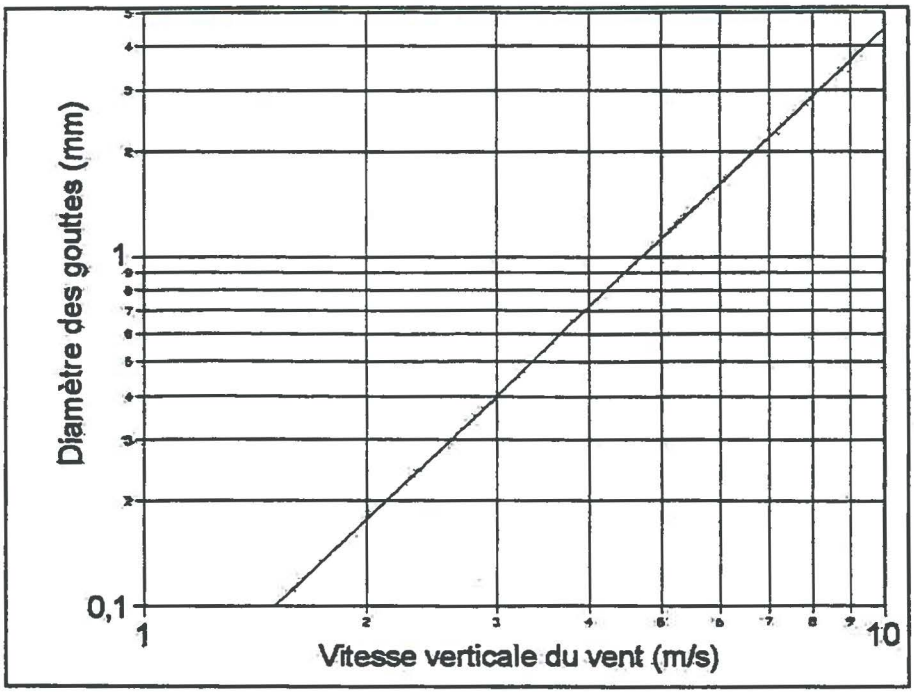
Vitesse d'entraînement d'une gouttelette suivant sa grosseur

L'effet du vent sur une goutte varie suivant la grosseur de celle-ci et aussi suivant la vitesse du vent. Afin de mieux comprendre ce phénomène, il faut d'abord évaluer la vitesse terminale d'une goutte suivant sa grosseur. On appelle la vitesse terminale d'une goutte la vitesse à laquelle cette goutte tombe dans l'air au repos. Cette vitesse est atteinte lorsque la force de gravité, qui varie suivant la masse est balancée par la force de frottement de l'air, qui elle varie suivant le diamètre ou le diamètre au carré, selon que l'écoulement est laminaire ou turbulent. Le calcul de cette vitesse est donc essentiel pour comprendre comment les gouttelettes plus fines suivent le mouvement de l'air, montent plus haut et finalement sont entraînées par le vent sur le tablier du pont. Un calcul a été fait et est présenté à la figure C-1. Cette figure montre la relation entre la vitesse terminale et le diamètre des gouttelettes.

On constate qu'un vent de 4,7 m/s est suffisant pour soulever une gouttelette de 1 mm alors que la gouttelette de 100 µm ne demande qu'un vent d'environ 1,5 m/s. De plus, on a pu déterminer à partir des vidéos la vitesse ascendante des bouffées d'embruns pour fin de comparaison. Cette vitesse est maximale initialement mais diminue avec la hauteur atteinte. Ces vitesses varient de 7 m/s le plus souvent jusqu'à 14 m/s dans le cas de la bouffée d'embruns qui est montée le plus haut. Les vitesses de cet ordre sont largement suffisantes pour faire monter même les gouttes d'embrun.

Les gouttelettes ont différentes grosseurs, en effet le diamètre est une variable aléatoire donnée par une distribution de probabilité. On utilise habituellement pour l'étude du phénomène de givrage le diamètre volumique moyen, dvm, c'est-à-dire le diamètre correspondant à la probabilité cumulative de 0,5 pour le volume des gouttelettes[13]. On utilise cette forme de moyenne puisque le givrage dépend avant tout de la quantité d'eau qui frappe la structure et donc du volume total des gouttelettes. On connaît mieux le diamètre volumique moyen des nuages souvent mesuré. Cependant pour les embruns causés par les vagues Finstad et al. (1988) estiment ce diamètre à dvm = 70 µm. C'est un diamètre volumique certainement applicable à un nuage d'embruns facilement entraîné par un vent même faible. Il faut supposer que la gravité aura fait retomber les plus grosses et que les plus petites seront ainsi entraînées même par un vent faible.

Figure C-1
Vitesse terminale des gouttelettes en fonction de leur grosseur



Formation des embruns

Le phénomène de formation des embruns est trop complexe pour être analysé d'une façon détaillée. On peut cependant observer sur vidéo cette formation pour en déduire les principales caractéristiques. Le phénomène est certainement aléatoire mais il semble également périodique.

[13] Finstad et al., 1988

Le courant de l'eau à la sortie des vannes projette l'eau sur la surface du bassin et sur des rochers dans le fond de la gorge provoquant la formation d'embruns comme dans le cas d'une vague. L'eau est donc projetée vers le haut. La puissance du jet d'eau cause l'impact sur les rochers et donne l'énergie de chaque bouffée d'embruns. C'est une transformation de l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique qui donne l'impulsion initiale vers le haut au jet. Les embruns sont donc formés avec initialement une vitesse ascendante. L'air est également mis en mouvement à la surface du jet d'eau et cet air par continuité devra accompagner l'eau dans son ascension. Il s'agit donc au départ d'un double entraînement puisque l'eau et l'air s'entraîne mutuellement.

Les plus grosses gouttes retombent, mais une partie des gouttelettes continuent à monter plus haut sous l'effet d'une vitesse ascendante de l'air avoisinant. La partie périodique du phénomène est probablement associée au fait que les gouttes les plus lourdes retombent rapidement inversant le mouvement vers le bas à la base de la colonne alors que les gouttelettes plus fines continuent à monter. Mais ces grosses gouttes une fois retombées permettent de nouveau au phénomène de ce reproduire d'où l'explication possible d'une certaine périodicité dans le phénomène ce qui a pu être observé sur les vidéos.

Les observations ont démontré qu'il y a des colonnes d'embruns qui montent plus ou moins haut dans différentes conditions de vent et de température d'où la définition d'une cote qui a été utilisée plus haut dans l'analyse des observations. En l'absence de vent la colonne d'embruns atteint une certaine hauteur puis retombe par gravité à la même place. S'il y a du vent, on peut supposer un mélange avec l'air ambiant poussé par le vent qui fait que ce vent prend la relève et entraîne par la suite les plus fines gouttelettes dans la direction principale du vent.

Il suffit en somme que la bouffée d'embruns transporte en montant les gouttelettes assez haut pour qu'ensuite le vent prenne la relève et entraîne un nuage plus ou moins dense de gouttelettes.

Distribution des vitesses à la hauteur du pont

La vitesse et la direction du vent joue un rôle capital pour le transport de l'embrun jusqu'au pont. Prenons les deux cas extrêmes suivant la direction moyenne du vent: le cas ou le vent est perpendiculaire au pont mais dans la direction aval pour le premier cas et la direction amont pour le second.

Dans le premier cas, compte tenu de l'existence d'une gorge dans laquelle circule la rivière après le pont un vent dans la direction aval conserverait les vitesses moyennes acquises au niveau du barrage et du pont. Cependant dans le ravin, il y aurait forcément des décollements et formation de tourbillons et de turbulences. Mais par contre la composante de vent à une hauteur du pont serait de nature à éloigner les embruns du pont, même si plus bas à cause des turbulences l'effet est fortement aléatoire et donc plus difficile à prédire.

De toutes les directions possibles pour le vent c'est la direction amont perpendiculaire au pont qui est la plus intéressante, c'est-à-dire le second cas. Il s'agit de la direction qualifiée de susceptible au mouillage, tel que mentionné plus haut dans le rapport. Dans cette situation, le vent s'engouffre dans le ravin et donne un vent à vitesse plus stationnaire dans la direction du pont. De plus il y aura, à cause du relief, accélération du vent et aussi ajout d'une composante verticale ascendante, les deux effets se combinant pour favoriser le transport des embruns sur le tablier du pont.

Une solution du problème d'écoulement bidimensionnel dans une direction perpendiculaire à la rivière a été faite pour estimer l'effet du relief dans ce second cas. La figure C-2 donne les valeurs du vent et ses directions par rapport à la localisation du pont. La solution est obtenue pour une vitesse éloignée et en amont de 1 m/s. Si les vitesses observées sont plus grandes, on peut simplement multiplier les résultats par le facteur approprié. Il s'agit d'une solution par éléments finis triangulaires de l'écoulement à potentiel en deux dimensions. On suppose une vitesse uniforme aux limites et une forme approximative du profil de la gorge. Dans cette analyse, la vitesse exacte à proximité du pont n'a pas été calculée pour deux raisons. D'une part, à cause de la forme non profilée, la solution demande beaucoup de petits éléments et donne des résultats imprécis, et l'écoulement à potentiel ne peut donner de bons résultats pour les écoulement avec décollements. Mais, de plus, c'est la vitesse d'entraînement à une certaine distance où se localisent les embruns qui compte plutôt que directement à proximité. Pour ces raison la solution apparaissant à la figure C-2 a été obtenue en négligeant l'effet du pont sur l'écoulement de façon à faire ressortir l'effet du relief de la gorge sur le mouvement de l'air lorsque le vent est dans la direction amont.

Les résultats de cette simulation indiquent une augmentation des vitesses de l'ordre de 10 % autour du pont, mais surtout une composante ascendante causée par le relief qui est de nature à favoriser le transport des embruns vers le tablier.

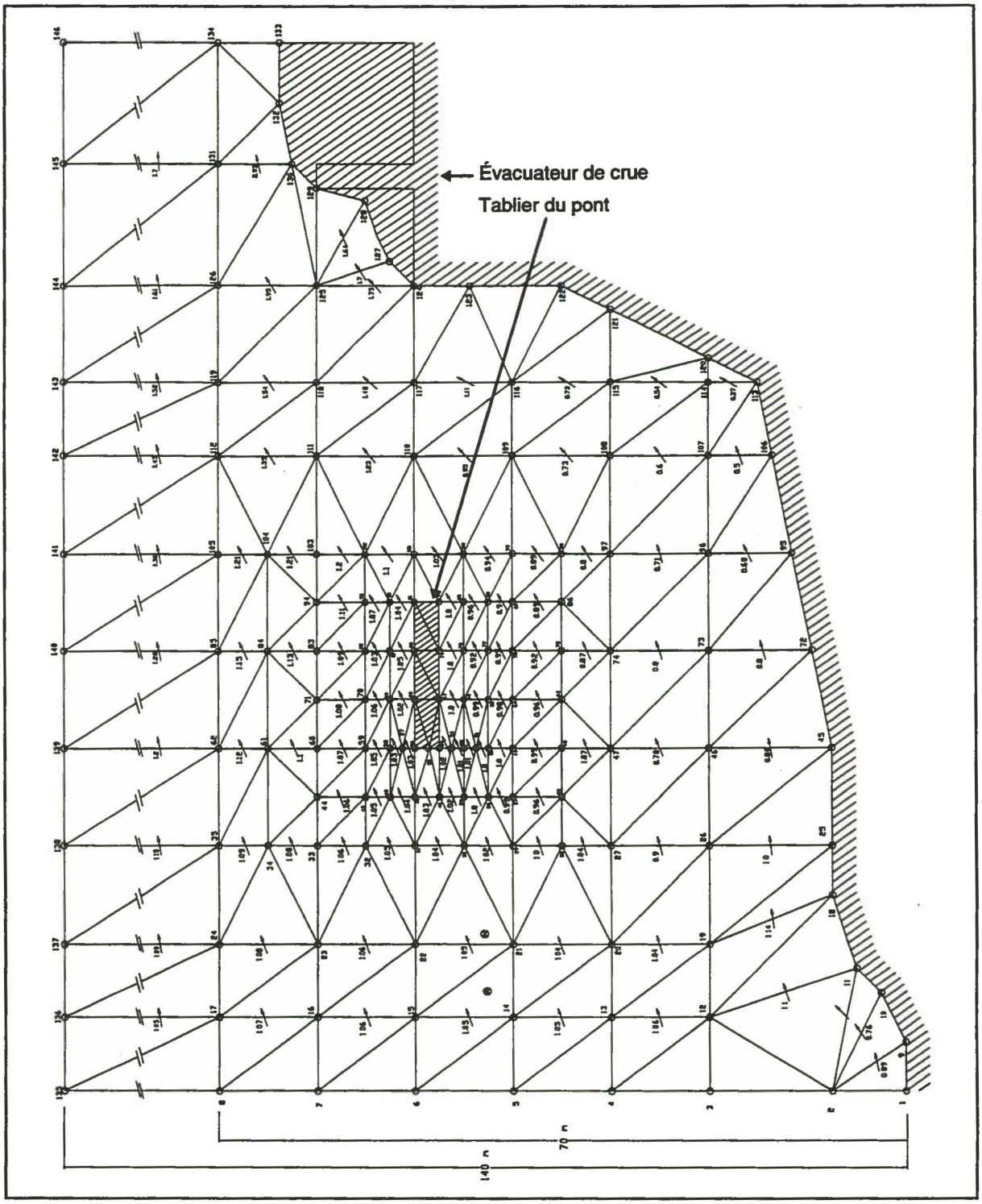
Transport du nuage d'embruns

On peut obtenir la vitesse d'entraînement totale du vent sur les gouttes par sommation de la vitesse du vent de la figure C-2 avec la vitesse d'ascension des embruns. Le principe de superposition s'applique bien à des écoulements de fluide, avec des pertes par frottement négligeables, auxquels on a affaire ici.

Pour le cas où le vent est dans la direction amont, les gouttes sont transportées vers le pont si toutefois elles atteignent un niveau suffisant. Si les gouttelettes sont entraînées au-dessus du pont, l'écoulement de l'air sera à peu près parallèle au pont sinon il devra y avoir décollement et zone de recirculation en surface du tablier. Dans ce cas, les gouttelettes même fines pourront retomber par gravité sur le tablier n'ayant plus pour les soutenir de vitesse ascendante du vent. Le mouillage du tablier se produit quand une gouttelette poursuit une trajectoire qui se termine sur le tablier du pont. Toutefois, si la vitesse de vent est forte elle devient importante par rapport à la vitesse ascendante et par conséquent elle peut pousser l'embrun en dessous du pont plutôt qu'au dessus. Cette situation a pu être observée sur les vidéos.

Mais on peut noter que le phénomène reste fortement aléatoire. S'il y a coïncidence avec l'ascension des embruns et un coup de vent alors il y a aura mouillage du pont. Mais l'ascension des embruns aussi bien que la pointe dans la vitesse de vent sont deux phénomènes aléatoires qu'il est difficile de prévoir.

Figure C-2
Solution par éléments finis triangulaires pour le relief de la rivière Sainte-Marguerite à la hauteur du pont



Annexe D
Contexte hydrologique durant les mois froids

Mode d'exploitation futur de la centrale de la Sainte-Marguerite-3

La centrale de la Sainte-Marguerite-3 servira essentiellement à la demande d'électricité de pointe hivernale. Le patron d'exploitation saisonnière qui est actuellement préconisé[14] correspond à des débits mensuels de 120 m^3/s à 160 m^3/s entre décembre et mars (tableau D-1).

Tableau D-1
Débit moyen mensuel prévu pour la centrale de la Sainte-Marguerite-3 durant les mois froids

Mois	Débit mensuel moyen* (m^3/s)
Novembre	110
Décembre	140
Janvier	160
Février	150
Mars	120
Avril	90
Mai	65

* Les valeurs proviennent du cas de calcul « oct_2g_s » et correspondent à des débits minimums garantis. Les valeurs présentées ici ont été arrondies.

Au cours d'une journée donnée de la pointe annuelle, deux modes de production horaire sont envisagés ici pour la centrale de la Sainte-Marguerite-3 :

- production en fonction de la pointe habituelle de la demande journalière ;

  Dans cette situation, la plus coutumière, la centrale fonctionnerait à deux groupes durant les heures de pointe journalière et à un seul groupe aux autres moments[15].

  Par exemple, pour un débit journalier moyen de 160 m^3/s, la centrale pourrait fonctionner durant 16 heures avec un seul groupe à 120 m^3/s et durant 8 heures à 240 m^3/s, avec deux groupes à 120 m^3/s par groupe.

- production en cas de demande exceptionnelle.

  Pour des raisons variées telles un bris majeur sur une partie du réseau d'Hydro-Québec, l'aménagement pourrait exceptionnellement avoir à répondre à une demande urgente et soutenue ainsi qu'à un débit élevé pouvant atteindre théoriquement 300 m^3/s, durant une ou plusieurs journées consécutives.

---

[14] Décret gouvernemental, 1994

[15] Sparks, D. et Fagherazzi, L., 1996

Caractéristiques du site de la Sainte-Marguerite-2

Le réservoir de la Sainte-Marguerite-2 reçoit la somme du débit émis par l'aménagement de la Sainte-Marguerite-3 et du débit d'apport hydrologique du bassin versant intermédiaire entre les aménagements de la Sainte-Marguerite-2 et de la Sainte-Marguerite-3 (évalué à 11 m^3/s[16 et 17], soit la moyenne des débits de novembre à avril).

Le niveau maximal d'exploitation du réservoir de la Sainte-Marguerite-2 est de 58,5 m. Sa capacité d'emmagasinement est d'environ 27 hm^3 par mètre de réserve autour du niveau de 58 m.

Le site de la Sainte-Marguerite-2 est équipé d'une centrale hydroélectrique d'un débit nominal maximal d'environ 68 m^3/s et d'un débit nominal soutenu d'environ 62m^3/s[16], et d'un évacuateur de crue muni de quatre passes de 280 m^3/s chacune (total de 1 120 m^3/s au niveau de 58,5 m) et d'une vanne submergée. Lorsque le niveau du réservoir est suffisamment élevé, l'excès de débit qui provient de l'amont et qui ne peut pas passer par la centrale doit passer par l'évacuateur de crue.

La moyenne du débit à acheminer par évacuateur est présentée au tableau D-2. Elle correspond au débit moyen soutenu à la centrale de la Sainte-Marguerite-3 de 160 m^3/s lequel correspond au débit mensuel moyen du tableau D-1. Elle s'étend entre environ 130 m^3/s et 170 m^3/s si la centrale de la Sainte-Marguerite-2 est hors fonction, et entre 70 m^3/s et 110 m^3/s si elle est en fonction au débit maximal soutenu. Selon le mode de gestion qui sera adopté à l'aménagement de la Sainte-Marguerite-2, pour une journée d'hiver donnée, le débit à y évacuer pourrait cependant être aussi bas que zéro et aussi haut que 1 120 m^3/s, débit maximal de l'évacuateur.

Tableau D-2
Débit moyen à évacuer à la centrale de la Sainte-Marguerite-2

Mois	Débit à évacuer si la centrale est hors fonction (m^3/s)	Débit à évacuer si la centrale en fonction (m^3/s)
Décembre	151	89
Janvier	171	109
Février	161	99
Mars	131	69

* Le débit du bassin versant intermédiaire entre les aménagements de la Sainte-Marguerite-2 et de la Sainte-Marguerite-3 a été fixé à 11 m^3/s.

** Le débit des mois de novembre, avril et mai du tableau D-1 n'est pas repris ici parce que le bassin intermédiaire fournira un débit très variable et habituellement nettement plus grand que la valeur de 11 m^3/s qui est utilisée ici.

*** Noter aussi que le débit d'une journée donnée peut être très différent de la moyenne mensuelle. Le cas du débit soutenu à 300 m^3/s en constitue un exemple; le débit à évacuer à l'aménagement de la Sainte-Marguerite-2 serait alors de 311 m^3/s (si la centrale est hors fonction) ou de 249 m^3/s (si la centrale est en fonction).

---

[16] Thiémonge, N. et Bilodeau, L., 1997 (SH-97-110)

[17] Bisson, J., 1997

Mode d'exploitation de l'évacuateur de la Sainte-Marguerite-2

L'évacuateur de la Sainte-Marguerite-2 peut s'opérer sur deux modes :

- en mode continu ;

  L'évacuateur de la Sainte-Marguerite-2 utilise un débit qui s'ajuste sur le débit moyen de la Sainte-Marguerite-3 et du bassin versant intermédiaire entre les aménagements de la Sainte-Marguerite-2 et de la Sainte-Marguerite-3.

  L'ajustement du débit d'évacuation se fait par un suivi du niveau du réservoir de la Sainte-Marguerite-2. Il tient compte aussi de l'historique récent de production en amont de la Sainte-Marguerite-3, des prévisions de production pour les heures et les jours qui viennent et des conditions météorologiques. Le mode de gestion visera alors à minimiser soit la fréquence des manoeuvres des vannes, soit l'ampleur du marnage, soit un compromis de ces deux paramètres.

  Dans cette situation, le débit à évacuer par l'aménagement de la Sainte-Marguerite-2 reste habituellement voisin des valeurs données dans le tableau D-2. Il présente exceptionnellement des excursions entre 0 m^3/s et 310 m^3/s (environ).

- en mode discontinu.

  Le réservoir de la Sainte-Marguerite-2 a une capacité de rétention de l'eau qui permet de concentrer les opérations d'évacuation sur des périodes délimitées et de fermer complètement les évacuateurs en dehors de ces périodes.

  Par exemple, la tranche de niveau allant de 57 m à 58 m permet d'emmagasiner environ 27 hm^3 d'eau ; le niveau maximum d'exploitation est de 58,5 m. Ce volume correspond à un débit de 312 m^3/s soutenu durant 24 heures.

  Il a été montré[18] qu'avec un marnage de 2,5 m sur le réservoir de la Sainte-Marguerite-2, il est possible de distancer les déversements sur des intervalles d'environ 7 jours en présence d'un débit moyen de 160 m^3/s à l'aménagement de la Sainte-Marguerite-3. Les déversements durent alors de 15 heures (avec quatre vannes pleinement ouvertes) à 30 heures (avec deux vannes pleinement ouvertes), selon qu'on les fait avec deux ou quatre passes.

  Il est également possible de procéder à un déversement quotidien. Ceci est examiné dans la section suivante. Dans cette situation, le marnage du réservoir de la Sainte-Marguerite-2 est inférieur à 0,24 m en présence d'un débit de 160 m^3/s à l'aménagement de la Sainte-Marguerite-3 et pour un déversement de 333 m^3/s pendant huit heures, durant les heures de clarté.

[18] Thiémonge, N. et Bilodeau, L., 1997 (SH-97-110)

Gestion journalière du déversement à la Sainte-Marguerite-2

Pendant que l'évacuateur est fermé, le niveau du réservoir de la Sainte-Marguerite-2 est à la hausse. Lorsque l'évacuateur est ouvert, son débit est ajusté à une valeur suffisamment élevée pour que le niveau du réservoir soit ramené à une valeur plus basse, qui permet de refermer l'évacuateur.

Le mode de déversement discontinu permet, par exemple, de concentrer les opérations d'évacuation durant les heures de clarté et les heures régulières de travail, durant lesquelles l'inspection visuelle des installations est facile.

Le tableau D-3 indique quel serait le marnage du réservoir de la Sainte-Marguerite-2 si on procédait à des opérations discontinues de déversement soit quotidiennes, soit aux deux jours, et chaque fois, soit en quatre heures, soit en huit heures. On envisage aussi deux situations: la centrale de la Sainte-Marguerite-2 est en opération au débit maximal soutenu et elles est à l'arrêt.

Si la centrale est totalement à l'arrêt, le marnage typique est plutôt de 0,36 m et 0,46 m (déversement de huit heures ou de quatre heures). Le débit déversé doit alors être d'environ 1 030 m^3/s ou 515 m^3/s (durée de huit heures ou de quatre heures).

Le tableau D-3 présente la relation entre la durée de déversement, le débit à déverser et le marnage du réservoir de la Sainte-Marguerite-2 pour des évacuations quotidiennes discontinues en présence d'un débit moyen de 160 m^3/s à la centrale de la Sainte-Marguerite-3, de 61 m^3/s à la centrale de la Sainte-Marguerite-2 et de 11 m^3/s sur le bassin versant non régularisé de la Sainte-Marguerite-2. Il montre qu'une évacuation quotidienne de quatre heures demande un débit de 666 m^3/s et s'accompagne d'un marnage de 0,30 m sur le réservoir. Une évacuation quotidienne de huit heures dans les mêmes conditions demande un débit de 333 m^3/s et s'accompagne d'un marnage de 0,24 m. Les durées de quatre et huit heures constituent des exemples. D'autres durées sont aussi envisageables.

Le calcul de marnage présenté ici suppose que la centrale de la Sainte-Marguerite-3 émet un débit continu de 160 m^3/s. Si elle émet un débit modulé et que la pointe de ce débit se produit à peu près en même temps que le déversement (par exemple durant les heures de clarté), le marnage du réservoir sera plus faible que ce qui est indiqué au tableau D-3.

Tableau D-3
Marnage du réservoir dans des situations de déversement discontinu quotidien

État de la centrale de la Sainte-Marguerite-2	Durée du déversement (h)	Débit déversé (m^3/s)	Marnage (m)
La centrale est en fonction.	24	109	0
La centrale est hors fonction.	24	171	0
La centrale est en fonction.	8	333	0,24
La centrale est hors fonction.	8	513	0,36
La centrale est en fonction.	4	666	0,30
La centrale est hors fonction.	4	1332	0,46
La centrale est en fonction (le débit de la centrale de la Sainte-Marguerite-3 est de 300 m^3/s).	8	666	0,30
La centrale est hors fonction (le débit de la centrale de la Sainte-Marguerite-3 est de 300 m^3/s).	8	1332	0,46