



Institut national
de la recherche
scientifique

DISPOSITIF D'ALERTE ET DE VIGILANCE AUX EMBÂCLES DE GLACE (DAVE)

Karem Chokmani¹, Yves Gauthier¹, Rachid Lhissou¹, Valérie Plante Lévesque¹,
Fatemeh Maadeni¹, Marc-Antoine Persent¹, Jasmin Gill-Fortin¹, Dominic
Thériault¹, Tahiana Ratsimbazafy¹, Simon Tolszczuk-Leclerc², Serge Légaré³,
Dorothy Dunford⁴

¹ INRS Centre Eau Terre Environnement, Ville de Québec, Canada

² Service de géomatique d'urgence, RNCan, Ottawa, Canada

³ Ministère de la Sécurité Publique du Québec, Ville de Québec, Canada

⁴ Développement des Prévisions Nationales, ECCC, Montréal, Canada

Rapport final remis à :

Centre des sciences pour la sécurité de Recherche et développement pour la défense
Canada (RDDC CSS)

Dans le cadre du projet PCSS-2016-CP-2280, financé par le gouvernement du Canada

Rapport de Recherche R2137

Octobre 2022

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2022
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-983-8 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2024
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2024

Table des matières

Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Sommaire du projet	1
1. Objet	1
2. Contexte	1
3. Participants du projet.....	1
4. Méthodologie	2
4.1 Étapes du projet.....	2
4.2 Développement des bases de données	3
4.3 Développement d'un modèle de prédisposition aux embâcles	5
4.4 Développement d'un modèle de reconnaissance des patrons hydrométéorologiques propices aux embâcles.....	8
4.5 Développement des procédures d'intégration de l'information sur l'état de la glace recueillie par imagerie satellitaire	11
4.6 Observations terrain et modèle de base de données d'embâcles	20
4.7 Modules du système d'alerte :.....	21
5. Résultats.....	23
5.1 Base de données.....	23
5.2 Modèle de prédisposition.....	36
5.3 Modèle de détection des patrons hydrométéorologiques.....	39
5.4 Modèle d'évaluation du risque d'embâcle en lien avec l'état du couvert de glace	40
5.5 Système DAVE	47
5.6 Procédure de caractérisation d'en embâcle par drone.....	50
5.7 Transfert du système à Sécurité Publique Québec et validation.....	55
6. Conclusions	56
7. Références	58

Liste des figures

Figure 1 : Concept de base du projet DAVE	2
Figure 2: Localisation des rivières présentes dans la base de données historique des embâcles du Québec.	4
Figure 3 : Schéma conceptuel simplifié du modèle de prédisposition aux embâcles	7
Figure 4 : Schéma fonctionnel du modèle de prédisposition aux embâcles	8
Figure 5 : Schéma général du modèle Hydrométéo.....	10
Figure 6: Relation entre le type de couvert et les possibilités de débâcles et d'embâcles	12
Figure 7: Exemple de modèle de débâcles dynamiques pour la rivière Chaudière (Tiré de : Morse et Turcotte, 2018).	13
Figure 8: Schéma général de l'évaluation du risque d'embâcle en lien avec l'état du couvert de glace	18
Figure 9: Schéma du module de cartographie radar du couvert de glace	19
Figure 10 : Schéma du module d'estimation de l'état du couvert de glace.....	19
Figure 11 : Schéma du module d'évaluation du niveau de risque d'embâcle	20
Figure 12 : Schéma du module d'évaluation du niveau de risque d'embâcle	21
Figure 13: Schéma de fonctionnement du système DAVE	22
Figure 14: Rivière Gentilly (Bécancour).Réseau hydrographique brute (à gauche), Réseau hydrographique corrigé (à droite).	28
Figure 15: Imprécision causée par la dynamique fluviale (Rivière Malbaie)	29
Figure 16: Imprécision causée par une échelle inadéquate de numérisation d'origine (Rivière Yamaska).....	29
Figure 17: Extrait de la base de données.....	31
Figure 18: Exemple d'une carte de glace de la région de Montréal le 16 janvier 2012	32
Figure 19: Exemple de carte de prédisposition produite par le modèle (rivière St-François, Secteur Sherbrooke)	39
Figure 20: Précision du modèle CNN	40
Figure 21 : Carte de glace 22 janvier 2020, Rivière St-François	44
Figure 22 : Carte de l'état du couvert de glace à partir de l'image radar du 13 janvier 2020, Rivière St-François	45
Figure 23: Calcul du risque de glace	46
Figure 24 : Carte du risque de glace, Rivière St-François	46
Figure 25: Schéma conceptuel du système intégré d'alerte aux embâcles de glace	47
Figure 26: Calcul du risque global	49
Figure 27 : Carte du niveau de vulnérabilité, prévision du 04/02/2020, Rivière St-François	49
Figure 28 : Schéma de la procédure de caractérisation d'embâcle avec drone	51
Figure 29 : Exemple la cartographie d'un embâcle par drone sur la rivière l'Acadie (en haut : l'image RGB, en bas : la carte de l'épaisseur de glace obtenue)	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données météorologiques historiques	5
Tableau 2 : Paramètres pris en considération pour les développements préliminaires du modèle de prédisposition aux embâcles	6
Tableau 3 : Caractéristiques des modèles de cartographie des glaces de rivière.....	16
Tableau 4 : Caractéristiques des rivières (Tiré de Gauthier, Poulin et Bernier 2016).....	17
Tableau 5 : Caractéristiques des images (Gauthier, Poulin et Bernier 2016).....	18
Tableau 6: Caractéristiques techniques de la base de données DAVE-BDHE	23
Tableau 7: Contenu de la base de données DAVE-BDHE	23
Tableau 8: Caractéristiques techniques de la base de données DAVE-BDGR	26
Tableau 9: Description du contenu de la base de données DAVE-BDGR	26
Tableau 10 : Métadatas de la base de données DAVE – Hydrométéo	30
Tableau 11: Description des champs de la base de données DAVE-Hydrométéo.....	30
Tableau 12: Légende de la carte de glace (période de gel).....	32
Tableau 13: Légende de la carte de glace (période de fonte)	32
Tableau 14: Caractéristiques techniques de la base de données	33
Tableau 15: Description du contenu de la base de données	33
Tableau 16: Description du contenu de la base de données	34
Tableau 17: Cartes de prédisposition produites et leurs résultats de validations	37
Tableau 18: Caractéristiques du modèle CNN retenu.....	39
Tableau 19: Évaluation des algorithmes de cartographie des glaces de rivière.....	42
Tableau 20 : Schéma de la classification d'ensemble.....	43
Tableau 21 - Colonnes dans le shapefile des rivières.....	47
Tableau 22 : Matériel requis pour le survol de drone	52
Tableau 23 : Exemple de tableau synthèse des paramètres de vol	52

Sommaire du projet

1. Objet

Ce rapport final est préparé pour le Centre des sciences pour la sécurité de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC CSS) afin de rassembler les dossiers du projet; de diffuser de l'information, et de documenter les activités de suivi et les leçons apprises.

2. Contexte

Le Dispositif d'alerte et de Vigilance pour les embâcles de glace (DAVE) constitue un projet aux termes du Programme canadien de sûreté et de sécurité (PCSS) administré par le Centre des sciences pour la sécurité de RDDC CSS. Ce projet externe vise principalement le portefeuille suivant : Catastrophes naturelles.

Au Canada, une très forte proportion des inondations en rivière sont causées par les embâcles de glace. Les inondations engendrent des répercussions majeures en termes de sécurité publique et de dommages matériels aux infrastructures et aux propriétés. La compréhension et la modélisation des processus physiques associés à la débâcle et à la formation d'embâcles font déjà l'objet de nombreuses recherches. Malgré cet effort, en raison de la nature et de la complexité du phénomène, il existe très peu d'outils opérationnels permettant de prévoir la rupture du couvert de glace et la formation subséquente d'embâcles.

Le Dispositif d'alerte et de Vigilance pour les embâcles de glace (DAVE) comble un besoin exprimé par la communauté de pratique des catastrophes naturelles : disposer d'un outil de prédiction des risques associés aux embâcles de glace de rivières. Cet outil permettra en retour une gestion plus efficace des risques et des conséquences associés aux inondations, permettant une résilience augmentée de notre économie et de nos communautés.

3. Participants du projet

Les participants et partenaires du projet inclus :

- L'Institut National de Recherche Scientifique
- Ministère de la Sécurité Publique du Québec
- Sécurité publique Canada
- Environnement et Changement climatique Canada
- Ressources Naturelles Canada
- Défense Nationale

4. Méthodologie

L'outil développé par le projet DAVE (Figure 1) a été basé sur l'intégration de trois aspects : 1) les conditions actuelles du couvert de glace ; 2) les patrons hydrométéorologiques associés à la débâcle et 3) la prédisposition du chenal à la formation d'embâcles. Le premier caractérise le matériel susceptible d'être déplacé, c'est-à-dire la présence ou non de glace et son niveau de maturité (fragilité). Le second recherche l'élément déclencheur, c'est-à-dire la combinaison de conditions hydrométéorologiques propices à initier une débâcle et potentiellement, un embâcle. Le troisième identifie les sections de rivière où le cas échéant, le matériel déplacé est plus susceptible de bloquer et de former un embâcle. Chacun de ces éléments se voit attribuer un niveau de risque et c'est la combinaison de ces trois risques qui initie la vigilance ou déclenche l'alerte.

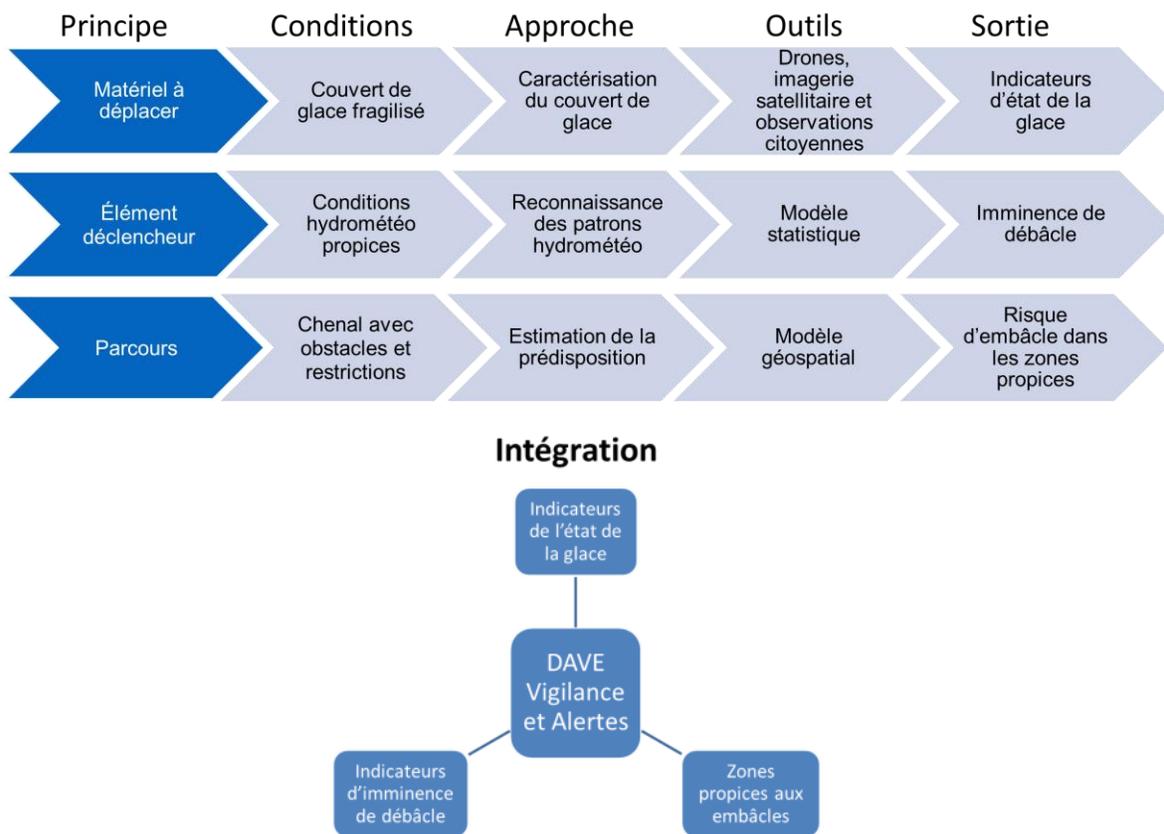


Figure 1 : Concept de base du projet DAVE

4.1 Étapes du projet

Dans le cadre de ce projet, les étapes suivantes ont été effectuées pour développer et opérationnaliser l'outil de prédiction des risques d'embâcles de glace de rivière :

1. Développement des bases de données nécessaires à la bonne marche du système ;
2. Développement d'un modèle opérationnel de prédisposition aux embâcles ;

3. Développement d'un modèle de reconnaissance des patrons hydrométéorologiques propices aux embâcles ;
4. Développement des procédures d'intégration de l'information sur l'état de la glace recueillie par imagerie satellitaire, par information géospatiale volontaire et par survols de drones (Étape 3, Tableau 1).
5. Développement d'un module de veille et d'alertes aux embâcles de glace basées sur les sorties des tâches précédentes ;
6. Transfert des connaissances générées vers les utilisateurs finaux à travers une période de rodage ainsi que par l'élaboration de guides techniques et l'organisation d'ateliers de formation et de soutien technique.

Les sections suivantes donneront des détails sur les méthodes utilisées pour accomplir ces tâches.

4.2 Développement des bases de données

A. Base de données historique des évènements d'embâcle au Québec

La base de données historique des évènements d'embâcle (BDHE) au Québec est la fondation nécessaire au développement du système DAVE. Réalisée par le ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSP), elle est utilisée pour le développement de chacun des modèles. Elle provient de la fusion de deux bases de données à savoir l'Historique des embâcles répertoriés au MSP (1985-2014) et l'Application Vigilance/inondation (hautes eaux): Observation terrain (2013-2017). Elle contient au moment du démarrage du projet DAVE, 995 évènements d'embâcles. Cette base de données est sous format d'une couche vecteur ponctuelle dont la table attributaire contient plusieurs champs à savoir le nom de la rivière, la date, les coordonnées géographiques et l'état de l'embâcle, elle couvre 150 rivières principalement du bassin du Saint-Laurent ([Figure 2](#))

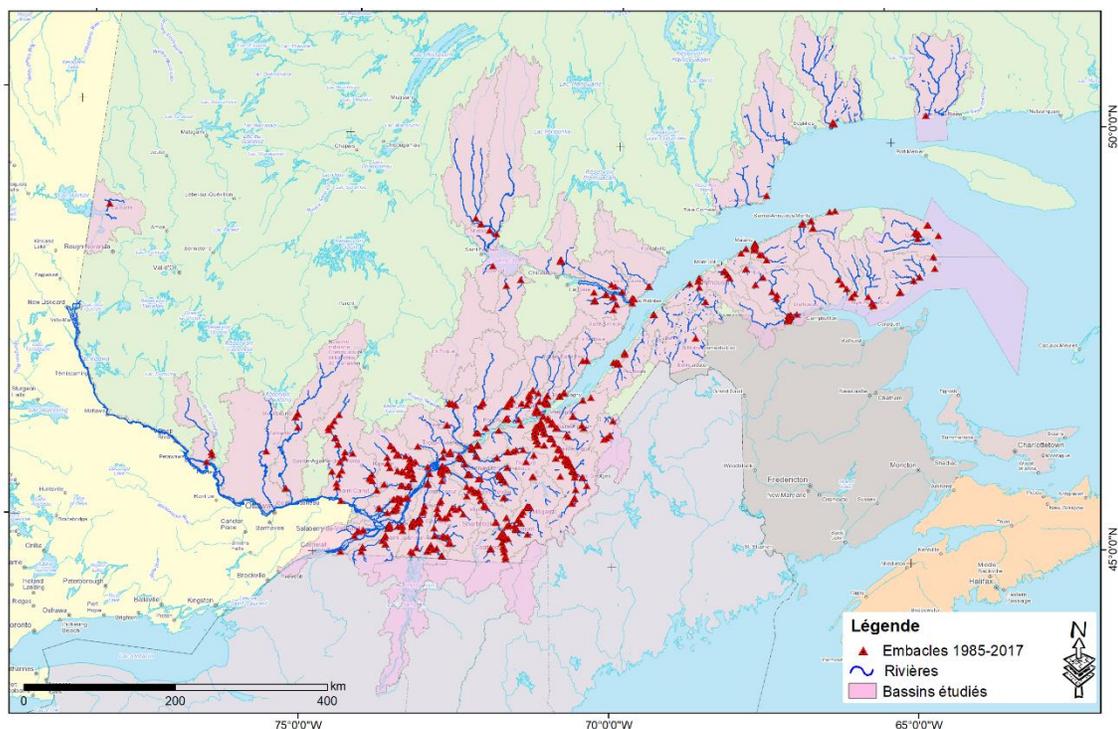


Figure 2: Localisation des rivières présentes dans la base de données historique des embâcles du Québec.

B. Base de données DAVE – Géomorphologie Rivières

En plus de la base de données sur les événements d'embâcles, la base de données « DAVE - Géomorphologie Rivières » ou BDGR, a été créée et utilisée dans le développement des autres modèles. Elle contient les polygones des rivières, leurs lignes centrales, les tributaires, les rapides, les ponts et les limites des bassins, pour toutes les rivières incluses dans la BDHE. Le réseau hydrographique du Québec a été collecté à partir de deux bases de données à savoir le Réseau Hydrographique National (RHN) et la GRHQ. La Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) est le référentiel commun de l'hydrographie au Québec. La GRHQ est plus correcte, cohérente et colligée, mais elle n'est pas encore disponible pour tout le Québec. Ainsi, notre zone d'étude est couverte par 37 bassins versants provenant de la GRHQ et 22 bassins versants du RHN. Les données comportent les unités de découpage hydrographique (polygone), le réseau hydrographique surfacique (Rivières en polygone) et le réseau hydrographique linéaire (ligne centrale).

C. Base de données DAVE - Hydrométéo

La base de données « DAVE – Hydrométéo » ou BDHM, a servi principalement au développement du modèle de patrons hydrométéorologiques. Elle contient les données énumérées au [Tableau 1](#).

Tableau 1 : Données météorologiques historiques

Donnée	Source	Couverture temporelle	Résolution spatiale
Température Min et Max *	Daymet (ORNL DAAC -NASA)	1979-2019	1 km
Précipitations liquides	Canadian Precipitation Analysis (CaPA)	2002-2019	10-15km
Précipitations liquides	North American Regional Reanalysis (NARR)	1979-2001	30 km
Radiation infrarouge émise par l'atmosphère	North American Regional Reanalysis (NARR)	1979-2019	30 km
Radiation infrarouge émise par la surface	North American Regional Reanalysis (NARR)	1979-2019	30 km
Accumulation de neige	North American Regional Reanalysis (NARR)	1979-2019	30 km

* la moyenne a été utilisée pour dériver le degré jour de gel et le degré jour de dégel.

D. Base de Données – DAVE – Conditions Glaces

La base de données « DAVE - Conditions de glace », ou BDCG, a pour objectif de regrouper, de documenter et de rendre disponibles pour l'étude, les cartes de glace du Ministère de la Sécurité publique du Québec de 2010 à 2017 (MSPQ). Elle a servi principalement au développement du modèle de caractérisation de l'état du couvert de glace. La base de données comprend également des données de validation, soit des photos (aériennes ou au sol) et des observations des conditions de glace lors de l'acquisition d'une image radar.

4.3 Développement d'un modèle de prédisposition aux embâcles

L'objectif du modèle de prédisposition est de déterminer où, en cas de mise en mouvement des glaces, celles-ci sont le plus susceptibles de bloquer dans le chenal et de causer un embâcle. Cette analyse se fait sur la base des paramètres morphologiques du chenal. Le modèle de prédisposition du projet DAVE est l'évolution d'un modèle de prédisposition préliminaire qui a été développé par l'INRS précédemment. L'approche et les performances du modèle initial sont décrites dans De Munck et al, 2017. Originellement, quatre facteurs sont intégrés: rétrécissement naturel, présence d'îles et de ponts, arrivée d'un tributaire et sinuosité. Dans le cadre de DAVE, des paramètres de pente ont été ajoutés. L'étalonnage du modèle original a été fait sur la rivière Chaudière (Québec) et la validation a été effectuée sur les rivières St-François (Québec) et l'Assomption (Québec) par la base de données historique des embâcles du Québec (BDHE), avec des observations de 1985 à 2016. Dans le cadre de DAVE, le modèle a été ré-étalonné sur les 11 rivières présentant au moins 20 embâcles historiques et appliqué et validé sur les 24 rivières qui en comptaient au moins 5.

A. Choix des paramètres d'entrée

Une revue de littérature a été faite pour dégager les paramètres affectant le plus le risque d'embâcle de glace dans les cours d'eau. Ces paramètres sont basés sur des caractéristiques morphologiques simples et statiques, qui sont les mieux documentés et issus de données facilement accessibles pour un large territoire tel que la province du Québec. Ces paramètres sont présentés dans le [Tableau 2](#) en fonction des données permettant de les calculer :

Tableau 2 : Paramètres pris en considération pour les développements préliminaires du modèle de prédisposition aux embâcles

Paramètres	Intégré dans	Source de données
Sinuosité du cours d'eau	Indice de Sinuosité	Polygone et Ligne centrale des rivières (Réseau Hydrographique DAVE)
Largeur du cours d'eau	Indice de Rétrécissement	Polygone et Ligne centrale des rivières (Réseau Hydrographique DAVE)
Présence d'îles	Indice de Rétrécissement	Réseau Hydrographique DAVE
Présence de pont ou de passerelle	Indice de Rétrécissement	Structure sur le réseau routier - transports Québec
Présence d'un affluent	Indice de Rétrécissement	Réseau Hydrographique DAVE
Présence des rapides	Indice des Rapides	Réseau Hydrographique DAVE
Pente du cours d'eau	Indice de pente	MNT LIDAR et Modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC)

B. Schéma conceptuel du modèle de prédisposition aux embâcles

Les rivières sont d'abord segmentées en tronçons de 250 mètres le long de la ligne centrale. À partir de cette segmentation, la géospatialisation des paramètres est faite en 4 indices : l'indice de rétrécissement, l'indice de sinuosité, l'indice de rupture de pente et l'indice des rapides. Ces derniers sont ensuite standardisés, pondérés et intégrés pour le calcul de l'indice final de prédisposition aux embâcles. La [Figure 3](#) schématise et résume les opérations réalisées par le modèle depuis les quatre indices (rétrécissement, sinuosité, pente et rapides) jusqu'à l'obtention de l'indice de prédisposition aux embâcles.

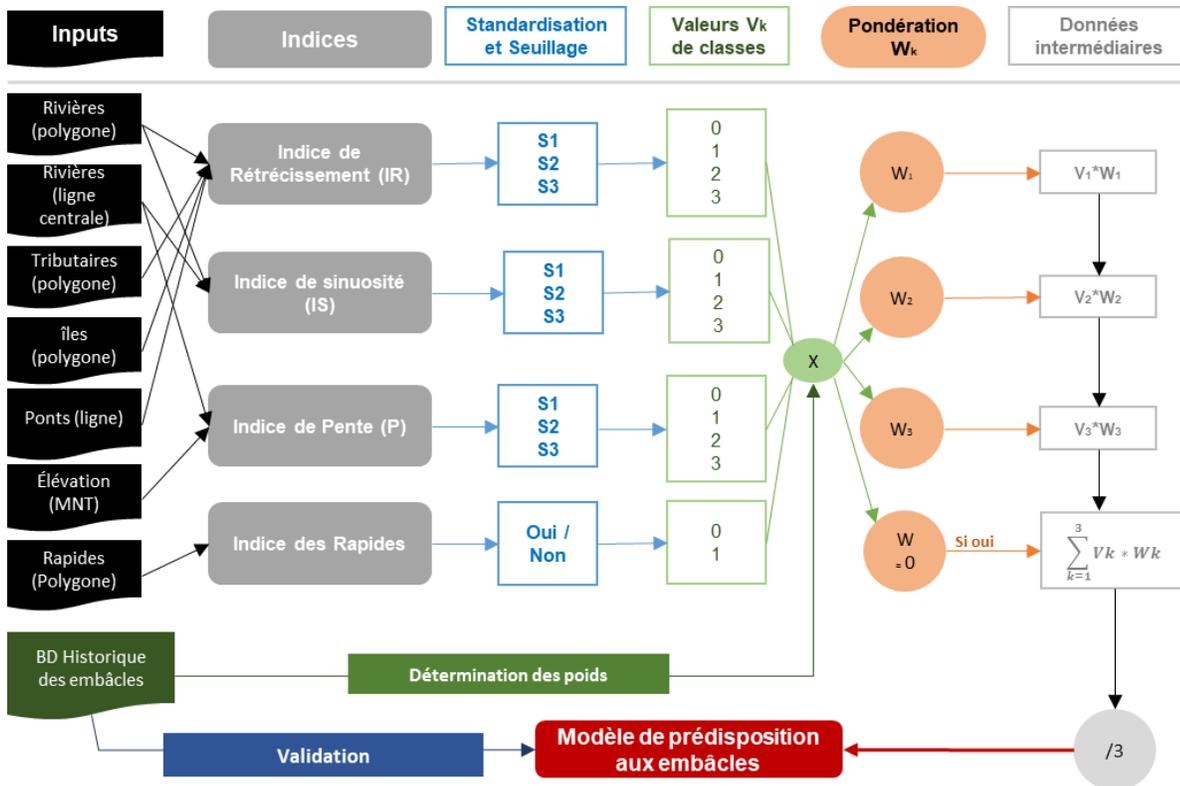


Figure 3 : Schéma conceptuel simplifié du modèle de prédisposition aux embâcles

Les valeurs de l'indice de prédisposition aux embâcles sont ensuite séparées en trois classes de prédisposition (Prédisposition Majeure, Modérée, et Faible). Ces classes ont été calibrées de manière à obtenir la classification la plus satisfaisante possible. La validation est effectuée à l'aide de la BDHE.

C. Analyse fonctionnelle

La fonction première du modèle est de cartographier les sites préférentiels de formation d'un embâcle. Les entrées principales du modèle sont la base de données géomorphologiques des rivières et la base de données historiques des embâcles alors que les sorties seront (Figure 4) :

- Une carte montrant la prédisposition (risque fort, modéré ou faible) du chenal à la formation d'un embâcle, par section de 250m.
- Les valeurs des indices de prédisposition aux embâcles de glaces, de sinuosité, de pente et de rétrécissement ayant servi au calcul de l'indice de prédisposition.
- Statistiques générales sur chaque rivière (fréquence d'embâcles par section, nombre de sections à risques etc...)

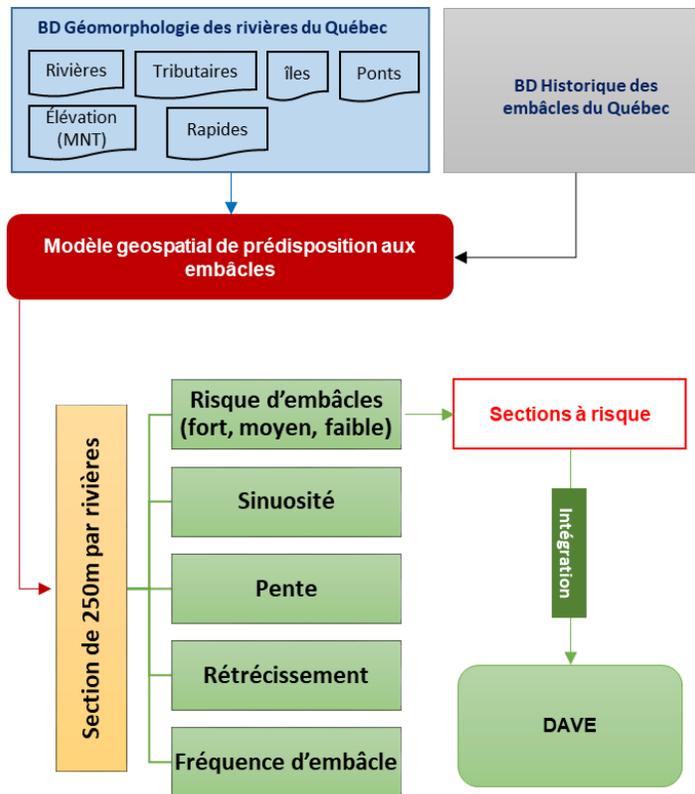


Figure 4 : Schéma fonctionnel du modèle de prédisposition aux embâcles

En plus de son intégration dans le système vigilance et alertes de DAVE, le modèle pourra jouer des fonctions complémentaires à savoir l'apport des informations précieuses pour le MSP et les municipalités situés le long des rivières étudiées pour l'aménagement du territoire, le zonage, la construction d'un pont ou l'évaluation d'assurance.

4.4 Développement d'un modèle de reconnaissance des patrons hydrométéorologiques propices aux embâcles

Cette composante du projet vise à développer un modèle de prévision des embâcles à partir des variables hydrométéorologiques (BDHM) prévalant avant les événements historiques d'embâcles du Québec (BDHE). Ce modèle peut être considéré comme un modèle de classification de séries chronologiques multivariées permettant de prédire l'occurrence d'événements d'embâcle. Afin de déterminer quelles conditions hydrométéorologiques conduisent à un embâcle ou à l'absence de formation d'embâcle, plusieurs scénarios hydrométéorologiques à des échelles temporelles variées doivent être testés et analysés.

La plupart des méthodes développées pour la classification des séries chronologiques ont une complexité de calcul élevée ou une faible précision de prédiction. Peu d'études ont utilisé des réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour la classification multivariée des séries chronologiques (Maadeni et al, 2020; Karim et al., 2018 et Zheng et al., 2014), mais elles donnaient des résultats

non seulement plus efficaces, mais aussi plus précis. Nous avons donc choisi d'appliquer cette méthode au problème de prédiction des embâcles de glace, car les CNN se sont souvent révélés être le meilleur outil pour la reconnaissance de patrons (Romaszko, 2015). Ainsi, notre méthode s'appuie sur la recherche de patrons distinctifs causant des embâcles dans les séries de données temporelles d'indicateurs hydrométéorologiques.

A. Choix des paramètres d'entrée

L'entraînement du modèle CNN utilise des données météorologiques historiques qui viennent de plusieurs sources selon leur qualité et leur couverture temporelle. Le Tableau 1 présentait ces données.

À travers l'évolution du travail, certaines décisions ont dû être prises par rapport aux données entrantes. L'inclusion du débit comme variable explicative s'avère très limitative au développement d'un modèle CNN robuste. En effet, les données historiques de débits correspondant aux sites des observations d'embâcles ne couvrent qu'une petite fraction de la base de données. Ceci réduit énormément la taille de l'échantillon disponible pour entraîner le modèle CNN. Dans un contexte opérationnel et prévisionnel, et bien qu'Environnement Canada produise des prévisions de débits sur le territoire à l'étude, celles-ci ne sont pas corrigées pour la présence d'un couvert de glace. Un modèle prévisionnel d'embâcle qui utiliserait ces débits comporterait donc des lacunes.

Il a donc été décidé de n'utiliser que les données qui sont rendues disponibles par le Centre Météorologique Canadien sur le serveur de données (<https://dd.weather.gc.ca/>) notamment les précipitations liquides en période hivernale qui sont dans les faits, la principale cause d'augmentation rapide du débit en rivières et par conséquent de l'initiation de la débâcle.

B. Modèle conceptuel

Le modèle Hydrométéo (Figure 5) est donc basé sur un réseau de neurones convolutif (CNN) qui combine les variables explicatives d'entrée de façon à reconnaître un patron propice à une débâcle menant à la formation d'un embâcle. Ceci passe d'abord par le développement d'un module d'entraînement du CNN. Ce module permettra de continuer à entraîner le CNN après chaque saison hivernale et la disponibilité de nouvelles observations sur les embâcles afin d'en améliorer continuellement la qualité prévisionnelle. Un deuxième module permet au modèle de fonctionner en mode prévisionnel.

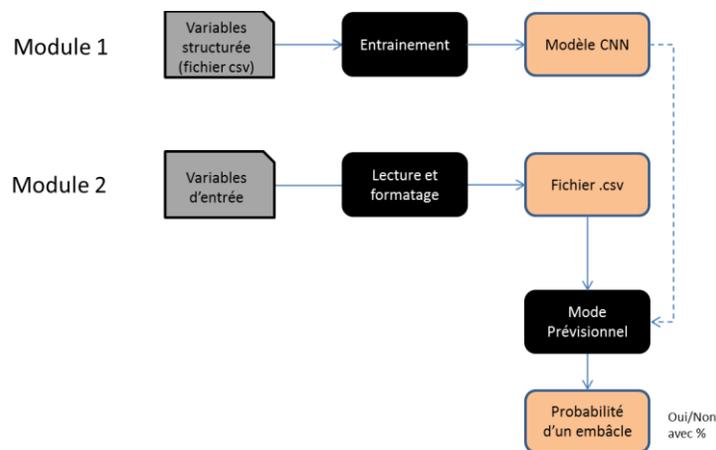


Figure 5 : Schéma général du modèle Hydrométéo

Le modèle CNN a été développé sous la bibliothèque Keras qui est assez facile à l'installation autant qu'à la manipulation du paramétrage du modèle CNN. D'autre part, plusieurs architectures et modèles CNN ont été testés:

- Un modèle hybride CNN1D + LSTM : un CNN en une seule dimension couplé avec un long short-term memory (LSTM)
- Un modèle CNN1D de 128 filtres et une activation RELU
- Un modèle CNN1D de 128 filtres avec une fonction d'activation TANH

Pour améliorer la précision des modèles, certains ajustements ont été effectués à savoir :

- Échantillons d'embâcles à partir du mois de janvier (pas d'échantillons comprenant une date en décembre) afin d'exclure les embâcles de frasil.
- Séparation des jeux de données par rivière afin d'obtenir dans le jeu de données d'entraînement, de validation et de test 70%, 15% et 15% des embâcles de chacune des rivières, respectivement.

Les paramètres d'entraînement adoptés sont :

Batchsize=32, Epochs = 2000, fonction d'optimisation : Adam, fonction de coût : Entropie-croisée binaire, mélange aléatoire des échantillons à chaque epochs.

Une sauvegarde du meilleur modèle sur la précision de la validation durant les 2000 epochs a été optée.

Pour l'effectif total des jeux de données finaux, nous avons utilisé :

Pour l'entraînement : 335 évènements non-embâcle et 325 évènements embâcle

Pour la validation : 58 évènements non-embâcle et 58 évènements embâcle

Pour le test : 78 évènements non-embâcle et 78 évènements embâcle

Ces évènements d'embâcles sont issus de la BDHE.

C. Analyse fonctionnelle

En mode opérationnel, le modèle récupère automatiquement les données disponibles en mode prévisionnel produites par le Système régional de prévision déterministe (SRDP) d'Environnement Canada à savoir les précipitations liquides en période hivernale, les températures minimales, températures maximales, radiations infra-rouge émises par l'atmosphère, les radiations infra-rouge émises par la surface et l'accumulation de neige au sol. Les données du SRDP sont en format GRIB2 avec 10 km de résolution spatiale.

Une première fonction récupère en temps réel, les variables explicatives retenues des deux dernières semaines, ainsi que leurs équivalents produits par le modèle de prévision régionale d'Environnement Canada pour les prochains jours. Nous avons développé les scripts pour extraire automatiquement ces variables d'entrée pour la portion de bassin en amont d'un point précis de la rivière. Au départ, chaque section avec forte prédisposition a été prise comme point de calcul des bassins, toutefois, il s'est avéré qu'il y a trop de redondance dans les bassins créés (résolution de 10 km variables explicatives versus des bassins calculés pour une section de 250 m) et le temps de calcul était trop élevé. C'est pour cela il a été décidé de calculer les bassins sur les sections ayant un grand changement de superficie dans le bassin comme par exemple à l'arrivée d'un tributaire. Comme exemple, cette méthode a donné pour des rivières comme Saint-François et Chaudière, 3 sous-bassins environ pour l'extraction des variables explicatives. Le modèle structure ensuite ces données dans la même forme que celle utilisée pour l'entraînement, notamment en les intégrant temporellement et spatialement.

Le modèle CNN analyse ensuite les données et sort pour chaque sous-bassin la probabilité de risque d'embâcle dans 0H, +24H et +48H, selon:

Probabilité < 0.5 -> LOW;

Probabilité entre 0.5 et 0.75 -> MED;

Probabilité >= 0.75 -> HIGH.

4.5 Développement des procédures d'intégration de l'information sur l'état de la glace recueillie par imagerie satellitaire

L'objectif général de ce volet est de déterminer les indicateurs de l'état de la glace favorisant les embâcles afin d'en effectuer leur détection. Ainsi, une partie des tâches visait à identifier quelles caractéristiques du couvert de glace pouvaient informer sur sa maturité, sa fragilité et sa propension à causer un embâcle. L'autre partie des tâches visaient à identifier comment ces caractéristiques pouvaient être inférées à partir des cartes de glace produites par imagerie radar satellitaire.

A. Indicateurs de l'état de la glace et risque d'embâcle

Le couvert de glace est considéré comme hypermature, lorsque la glace est stable, mais se détériore en raison de la fonte des neiges, de la diminution de l'albédo de surface et du réchauffement de l'eau. Ceci est compatible avec une rupture thermique et si une élévation soudaine du niveau de l'eau devait se produire, la glace se briserait en petits morceaux qui devraient être facilement transportés par le débit, d'où un risque faible d'embâcle. Une couche de glace mature est encore épaisse et cohésive, mais peut montrer des signes de fonte des neiges, de fractures dans la glace et de chenaux d'eau libre, en particulier le long des rives. Parce qu'il s'agit d'une couche de glace qui s'affaiblit, une augmentation rapide du débit et du niveau d'eau pourrait provoquer une rupture mécanique et les morceaux de glace étant plus épais, le risque d'embâcle augmenterait. Enfin, une couche de glace prémature ou consolidée, est généralement intacte et cohésive, montre peu de signes de fonte et est toujours recouverte de neige sèche. Pour une rupture mécanique, une très forte augmentation du débit et du niveau d'eau est nécessaire. Si cela se produit, des morceaux de glace plus gros peuvent s'avérer très difficiles à évacuer et se bloqueraient facilement. Mais l'énergie nécessaire pour créer la débâcle de ce type de couvert étant plus grande, le risque est considéré moyen.

Le lien entre l'état du couvert et le risque d'embâcle est donc une combinaison de différents facteurs. Les débâcles dynamiques découlant d'un changement soudain des conditions hydrométéorologiques sont celles qui risquent le plus d'entraîner un embâcle (Beltaos, 2003). Tel que décrit précédemment, ces débâcles sont associées à des couverts mature ou immature à la débâcle. Ce type de couvert se brise plus difficilement, car sa résistance est importante. Toutefois, si la force de mobilisation de la rivière est assez importante pour fracturer le couvert et le mettre en mouvement, les blocs de grandes tailles en résultant sont plus facilement contraints par les différentes prédispositions du chenal de la rivière (Beltaos, 2008). À l'inverse, si la résistance du couvert est faible, par exemple s'il est hypermature à la débâcle, le couvert se morcèle facilement et est évacué dans l'écoulement. La possibilité que le couvert de glace subisse une débâcle n'est donc pas la même que celle qu'un embâcle se forme (Figure 6).

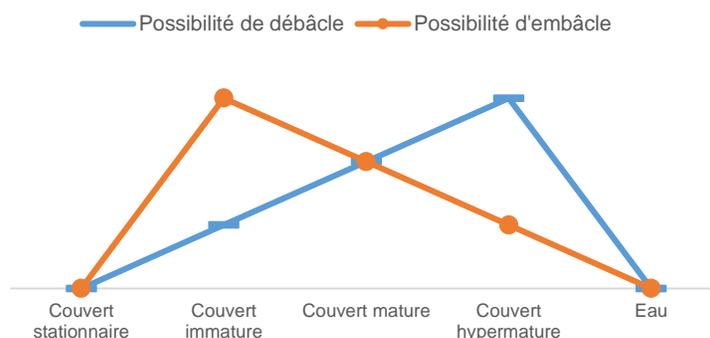


Figure 6: Relation entre le type de couvert et les possibilités de débâcles et d'embâcles

En présence d'un couvert qui se dégrade (couvert immature, mature ou hypermature), le débit s'insère dans cette relation et vient déterminer si un embâcle sera formé ou non. En effet, au-delà d'un certain seuil plutôt que de causer un embâcle, la glace mobilisée sera évacuée par la rivière. Ce seuil varie selon la résistance du couvert, celui-ci sera plus élevé pour un couvert immature et diminuera pour les types de couverts subséquents.

On pourrait donc détailler le risque comme suit :

- DÉBUT DE LA FORMATION
 - Couvert stationnaire → pas de risque de débâcle, pas de risque d'embâcles
- DÉBUT DE LA DÉGRADATION
 - Couvert immature → peu de risque de débâcle, risque important d'embâcles si débâcle
- Couvert mature → Risque de débâcle, risque d'embâcles
 - Couvert hypermature → Risque élevé de débâcle, peu de risque d'embâcles
- RETRAIT DU COUVERT
 - Absence de couvert → pas de risque de débâcle, pas de risque d'embâcles

Cette complexité de la combinaison « risque de débâcle » vs « risque d'embâcle » est aussi illustrée à la [Figure 7](#), tirée d'une étude de Morse et Turcotte (2018). Les 6 points y délimitent les zones des premiers mouvements de glaces (jaune, veille, débordements possibles) et de mouvements de glaces plus généralisés (rouge, alerte, débordements très probables).

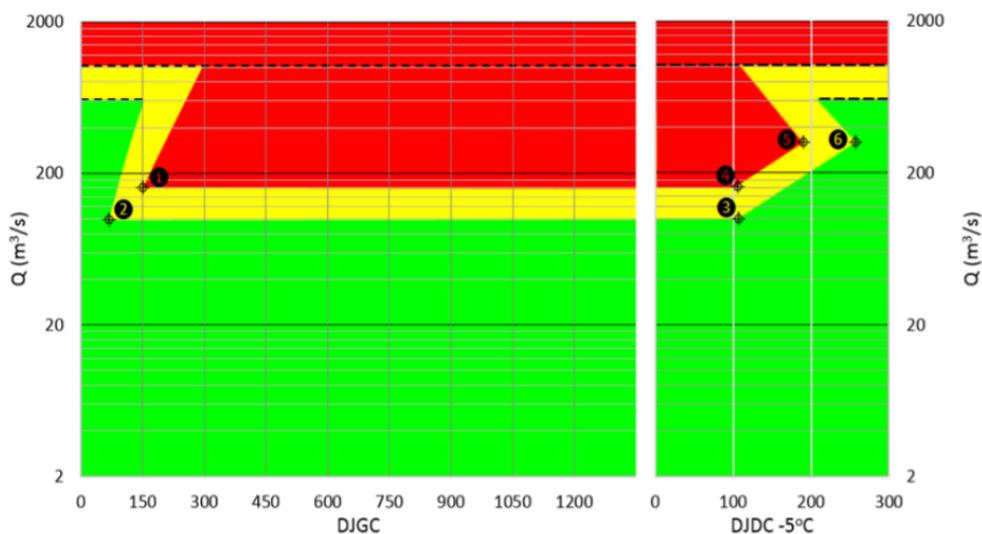


Figure 7: Exemple de modèle de débâcles dynamiques pour la rivière Chaudière (Tiré de : Morse et Turcotte, 2018).

Selon Morse et Turcotte (2018) :

« Au début de l'hiver, c'est la partie de gauche du graphique qui doit être utilisée.

- Les points 1 et 2 dictent le moment (DJGC et Q) à partir duquel des embâcles sont possibles ou très probables. En effet, tant qu'il n'y a pas de couvert de glace et tant qu'une crue ne mobilise pas le couvert de glace, aucun embâcle associé à une débâcle ne devrait survenir.
- Pendant l'hiver, il est établi, par simplicité, que le seuil de débâcle est largement indépendant de l'épaisseur du couvert de glace, tel que représenté par les DJGC, un comportement plutôt associé aux rapides. Donc, si le débit augmente au-delà du premier ou du deuxième seuil (jaune et rouge), des embâcles deviennent respectivement possibles ou très probables.
- Au printemps (établi à partir du 15 février pour toutes les rivières du projet), si des degrés-jours de dégel s'accumulent au-dessus de -5 C° (DJDC-5), c'est la partie de droite du graphique qui doit être utilisée.
- Les points 3 et 4 dictent le moment où le couvert commence à se dégrader, ce qui affecte le Q à partir duquel les glaces sont mobilisées et évacuées. La forme en flèche simule d'un côté, la perte de résistance du couvert qui devient moins apte à former des embâcles majeurs et de l'autre, la perte de résistance qui diminue le débit d'évacuation complète des glaces.

Enfin, les points 5 et 6 indiquent respectivement la fin possible et fort-probable de la période de glace, donc le début des conditions à l'eau libre (bref, des embâcles sont toujours possibles dans la zone jaune, mais ils ne sont plus fort probables si Q augmente). »

Ainsi, certains indicateurs de l'état de la glace sont de nature spatiale (aire de recouvrement totale et distribution des types de glace, localisation du front de glace), et d'autres sont de nature temporelle (vitesse de croissance ou de retrait de la glace, processus de dégradation (apparition d'eau, changement de caractéristiques). À cela, s'ajoutent des indicateurs indirects reliés aux conditions météorologiques (ex : degrés jours de dégel).

Le taux de recouvrement ou la distribution spatiale du couvert de glace sont très importants, car en l'absence de glace ou d'un couvert stationnaire, aucun embâcle n'est possible. La présence d'eau dans un tronçon indique une dégradation du couvert. La sensibilité interne du couvert peut être établie en fonction du type de glace qui le compose ainsi que de sa texture. Un couvert de glace lisse découlant d'une croissance thermique du couvert présentera une cohésion plus importante et sera donc moins sensible à la débâcle (Beltaos, 2008). À l'inverse, une glace rugueuse témoignera soit d'un couvert en processus de fonte ou composé de frasil aggloméré ce qui laisse entrevoir une plus grande fragilité (ibid.). Une variation du type de glace peut également témoigner d'une hausse de la sensibilité du couvert à la débâcle. Le passage d'un couvert de glace lisse à un couvert de glace microrugueux se produit lorsque la glace commence à fondre et change de texture (ibid.).

Ces indicateurs permettent donc de déterminer à l'échelle d'une section si un couvert est :

- 1) absent (eau majoritaire sur le tronçon),

- 2) hypermature (baisse de la concentration de glace sur la majorité d'un tronçon, changement du type de glace sur la majorité du tronçon) et que la débâcle s'annonce thermique,
- 3) mature (baisse de la concentration de glace sur une partie du tronçon, changement du type de glace sur une partie du tronçon) ou
- 4) immature (concentration de glace stable, type de glace stable) et que la débâcle pourrait être mécanique.

B. Algorithmes de cartographie du couvert de glace par imagerie radar

Malgré certaines limitations, le suivi de la glace de rivière par télédétection radar est très utile (Chu et Lindenschmidt 2016). L'imagerie radar est généralement préférée à l'imagerie optique, car elle est insensible aux nuages, pénètre la neige sèche et est sensible à la rugosité ou à la composition du couvert de glace (Cooley et Pavelsky 2016; Gauthier, Poulin et Bernier 2016).

Bien que l'application soit assez mature, des efforts sont encore nécessaires pour minimiser les erreurs de classification, notamment celles entre l'eau et la glace lisse (Gauthier Poulin Bernier 2016 ; Puestow et al 2017). Le dynamisme du couvert glaciaire en période de fonte est également un défi, car les conditions changent rapidement entre deux acquisitions d'images. Ainsi, il paraît important de diversifier les entrées du modèle pour améliorer la qualité de la cartographie des glaces, telles que la prise en considération des données météorologiques (Chu et Lindenschmidt, 2016 ; Puestow et al 2017).

Dans les dernières années, plusieurs algorithmes ont été développés indépendamment par différents groupes de recherche canadiens. Trois d'entre eux ont été retenus ici afin de développer un algorithme multi-sources de cartographie de la glace de rivière soit Ice-MAP-R de l'INRS, RIACT de C-Core et IceBC de Ressources naturelles Canada. Bien que tous utilisent des images satellitaires Radarsat, leurs données en entrée, méthodes de classification et légendes diffèrent (Tableau 3Tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques des modèles de cartographie des glaces de rivière

	Ice-MAP-R (Gauthier, Poulin et Bernier 2016)	RIACT (Puestow et al. 2017)	IceBC (Deschamps et al. 2015)
Intrants	Radarsat 1-2 – HH orthorectifiée Vecteur géoréférencé du chenal de la rivière Légende	Radarsat 2 HH-HV Vecteur géoréférencé du chenal de la rivière MNT Règles de classification	Radarsat 2 - HH Vecteur géoréférencé du chenal de la rivière MNT
Indicateurs	Rétrodiffusion Texture (Grey level co-occurrence matrix) (Grey level co-occurrence level)	Rétrodiffusion Texture (Grey level co-occurrence matrix) Angle d'incidence	Rétrodiffusion (db)
Procédure	Automatique Non-supervisée	Automatique Non-supervisée	Semi-automatique
Légendes	Hiver (Eau libre, eau et radeaux de frazil, glace noire, glace blanche, glace consolidée) Printemps (Eau libre, chenal ouvert eau sur glace, glace noire en dégradation, glace blanche en dégradation, glace consolidée en dégradation)	Eau libre Glace lisse Glace rugueuse	Eau libre Glace lisse (3 sous-divisions) Glace rugueuse (3 sous-divisions)
Classement	Cluster Fuzzy K-mean	Arbre de décision	Modèle empirique et semi-empirique
Logiciels et programmation	Python, Geomatica	Python, Geomatica, R	Python, Geomatica

Chaque groupe de recherche ayant mis en œuvre un algorithme a procédé à une évaluation des performances de celui-ci avec leur propre jeu de données de validation. La recension de leurs publications respectives permet donc de les comparer théoriquement et de constater leurs avantages et inconvénients.

Dans le cadre du projet DAVE, la stratégie adoptée n'est pas de modifier ces algorithmes, mais plutôt de les utiliser conjointement, par une technique d'estimation d'ensemble.

C. Estimation d'ensemble

L'estimation d'ensemble se définit comme la combinaison de plusieurs classificateurs entraînés séparément de manière à créer une seule prédiction finale (Saini et Ghosh 2017). Cette technique se base sur l'idée que, tant en télédétection que dans la vie de tous les jours, il est mieux d'utiliser l'avis de plusieurs experts pour prendre une décision. La classification des types de glace est en effet un problème où cette méthode s'applique bien, surtout que nous avons en notre possession trois algorithmes aux méthodes de classification différentes ayant chacun une certaine efficacité.

Pour réussir une estimation d'ensemble, deux composantes clés sont nécessaires, soit un algorithme pour générer les classeurs individuels et une méthode pour combiner les extraits. Deux approches par estimation d'ensemble ont été testées afin d'établir les composantes. La première, la sélection des classificateurs, nécessite que chaque classificateur devienne expert dans une portion précise de l'espace (Polikar 2006) : un modèle peut être alors plus efficace selon certaines caractéristiques de l'image (polarisation, angle d'incidence, etc.), ou plus efficace pour certaines conditions environnementales (période de gel, printemps, etc.).

Une seconde approche basée sur la fusion des classificateurs pourrait elle aussi être envisagée. Avec cette façon de faire, les classificateurs sont entraînés sur tout l'espace puis sont fusionnés afin que les classificateurs plus faibles deviennent forts. Plutôt que de s'appliquer dans un espace, cette méthode s'appliquerait dans les classes étiquetées en déterminant quel algorithme identifie le mieux une certaine classe ou quelles combinaisons de décision donnent le meilleur résultat. La classification se fait donc sur l'ensemble de l'image pour les trois algorithmes, puis une méthode est appliquée pour classer chaque pixel soit en mettant un poids pondéré à chaque décision, en donnant la classe majoritaire ou encore en en sélectionnant une seule.

Une série de cinq images provenant de trois rivières québécoises a été retenue pour développer le modèle d'estimation d'ensemble, elles couvrent la rivière Koksoak, Des Prairies et Chaudière (Tableau 4 et Tableau 5). Pour chaque acquisition, nous disposons de photographies en vol ou au sol permettant de caractériser le couvert de glace de façon générale.

Tableau 4 : Caractéristiques des rivières (Tiré de Gauthier, Poulin et Bernier 2016)

Rivière	Koksoak	Des Prairies	Chaudière
Localisation	58°00N, 68°45W	45°35N, 73°40W	46°30N, 71°10W
Écoulement	Du sud au nord vers la baie d'Ungava	Du sud-ouest au nord-est vers le fleuve Saint-Laurent	Du sud au nord, vers le fleuve Saint-Laurent
Longueur	130 km	45 km	185 km
Largeur du chenal	300 m – 3 km	300 m – 700 m	100-300 m
Saison de glace	Novembre – Juin	Décembre – Mars	Décembre-Avril
Type de glace prédominant	Agglomérée et consolidée	Thermique et agglomérée	Thermique et agglomérée
Marées	Oui	Non	Non

Tableau 5 : Caractéristiques des images (Gauthier, Poulin et Bernier 2016)

Image	Rivière	Date image	Observations	Mode	Angles
RS2_OK4305_PK56360_DK72284_F5_20090525_222906_HH_HV_SGF	Koksoak	25-05-2009	24-05-2009 Survol aérien	Ultra-fin	30-31°
RS2_OK8102_PK96526_DK95049_U18_20091113_104518_HH_SGF	Koksoak	13-11-2009	13-11-2009 Survol aérien	Ultra-fin	43-44°
RS2_OK17951_PK188926_DK178781_F23_20110204_224246_HH_HV_SGF	Des Prairies	04-03-2011	03-03-2011 Survol aérien	Fin	30-33°
RS2_OK10627_PK119150_DK115010_F23_20100302_223009_HH_HV_SLC	Chaudière	02-03-2010	03-03-2010 Photos au sol	Fin	30-33°
RS2_OK36149_PK350134_DK310226_F3_20121215_104858_HH_HV_SGX	Chaudière	15-12-2012	15-12-2012 Photos au sol	Fin	42-44°

D. Modèle conceptuel

Conceptuellement, le modèle multi-sources et multi-algorithmes de cartographie des glaces choisi est assez simple. La Figure 8 schématise le module final de cartographie de l'état de la glace et du risque d'embâcle, avec ses trois sous-modules. Le premier (Figure 9) se charge de la cartographie des types de glace par estimation d'ensemble. Le second (Figure 10) établit le niveau de maturité de ce couvert et le troisième (Figure 11) en infère un niveau de risque.

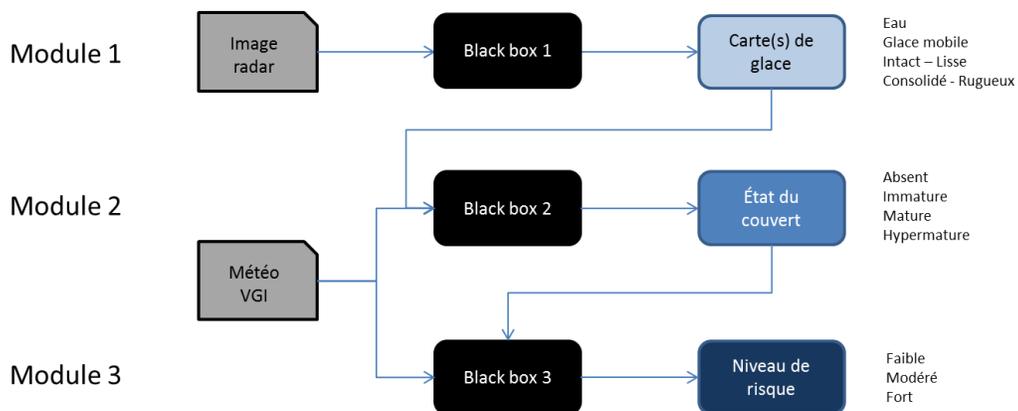


Figure 8: Schéma général de l'évaluation du risque d'embâcle en lien avec l'état du couvert de glace

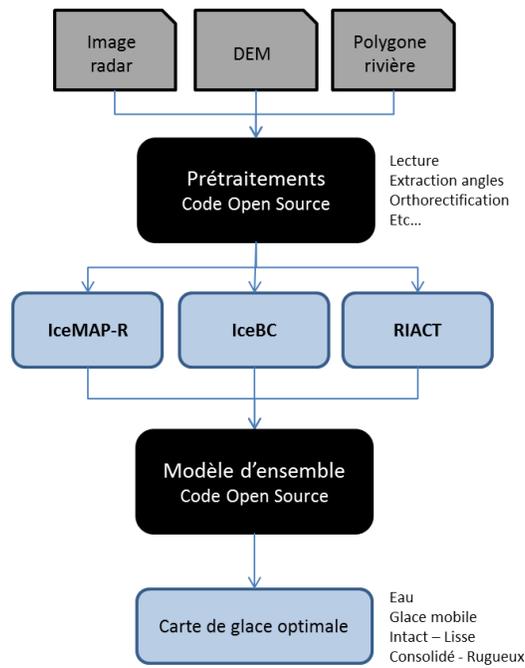


Figure 9: Schéma du module de cartographie radar du couvert de glace

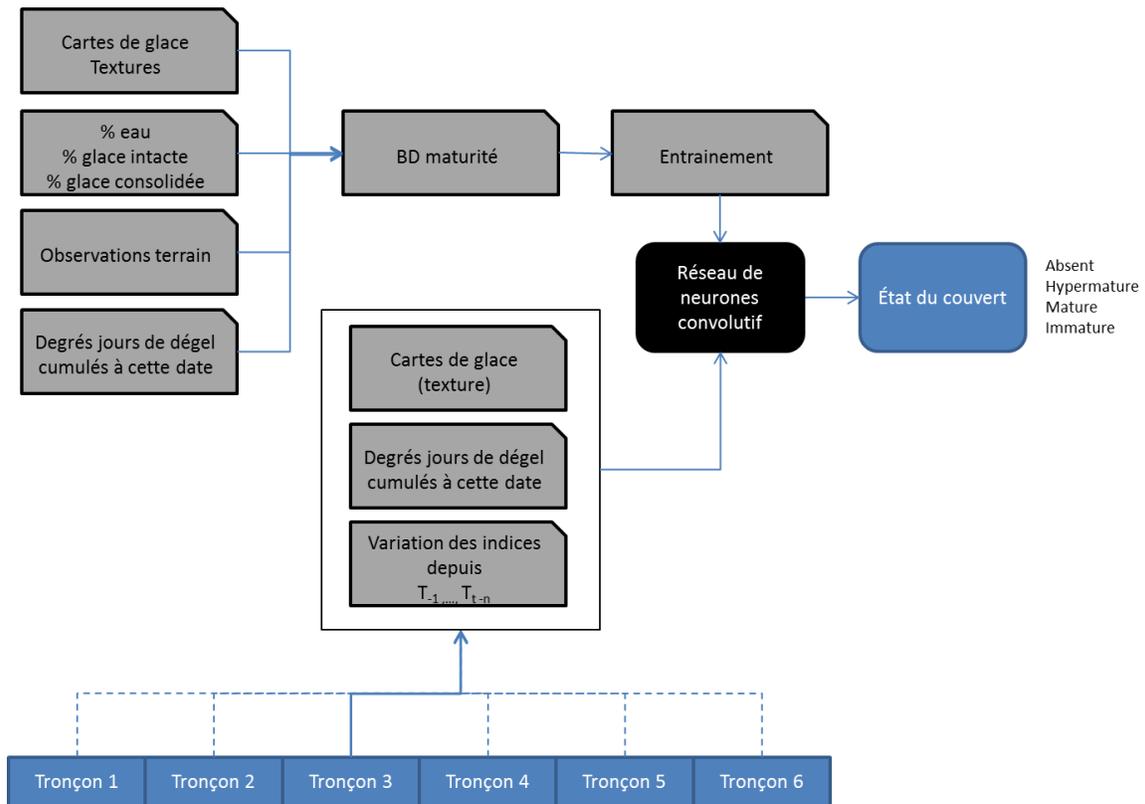


Figure 10 : Schéma du module d'estimation de l'état du couvert de glace

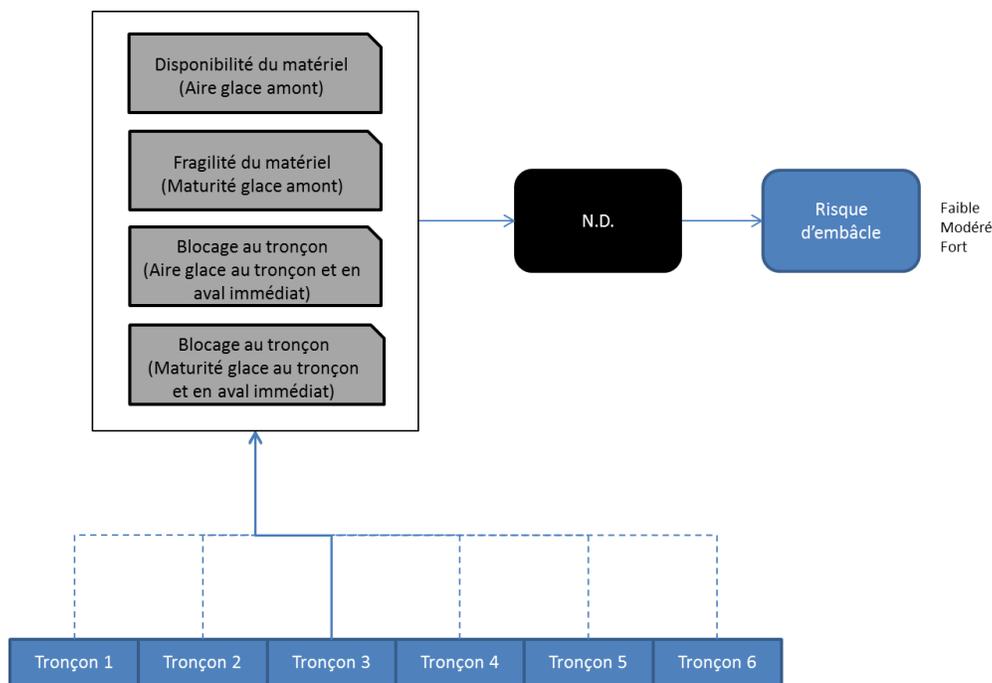


Figure 11 : Schéma du module d'évaluation du niveau de risque d'embâcle

4.6 Observations terrain et modèle de base de données d'embâcles

À partir des bases de données développées au Canada et en Amérique du Nord et avec consultations auprès d'experts, un modèle national de base de données d'embâcles de glace a été développé qui vise à établir des principes et des lignes directrices communs en matière de cartographie et de documentation des embâcles de glace.

Les objectifs étaient de a) répondre aux besoins de connaissances spécifiques à l'échelle nationale nécessaires à la gestion des risques de plaine inondable, b) fournir des données sur les embâcles à l'échelle nationale pour la recherche et c) soutenir la collecte d'informations en temps réel sur les embâcles au moyen des technologies de production participative (crowdsourcing).

En collaboration avec des intervenants clés de la communauté de pratique des glaces de rivière, une proposition de modèle national de base de données sur les événements d'embâcles a été élaborée. Le modèle de données est issu d'un processus de consultation qui s'est déroulé pendant la deuxième année du projet DAVE. Un webinaire a été tenu en anglais et en français le 12 décembre 2019 où les membres de l'association canadienne des ressources hydrique (ACRH) ainsi que les membres du Committee on River Ice Processes and the Environment ont assisté. Une version préliminaire du modèle ainsi qu'un questionnaire de rétroaction sur le modèle ont aussi

été partagés aux parties prenantes. Suite au processus de consultation, les commentaires sur le modèle initial ont été colligés pour produire le modèle final. Les résultats finaux du modèle ont été diffusés dans deux rencontres en personnes à la conférence 2019 du CRIPE à Gatineau ainsi qu'à une réunion des membres québécois de l'ACRH à Longueuil en novembre 2019. La [Figure 12](#) illustre le processus ayant mené à l'élaboration de la base de données nationale sur les embâcles.

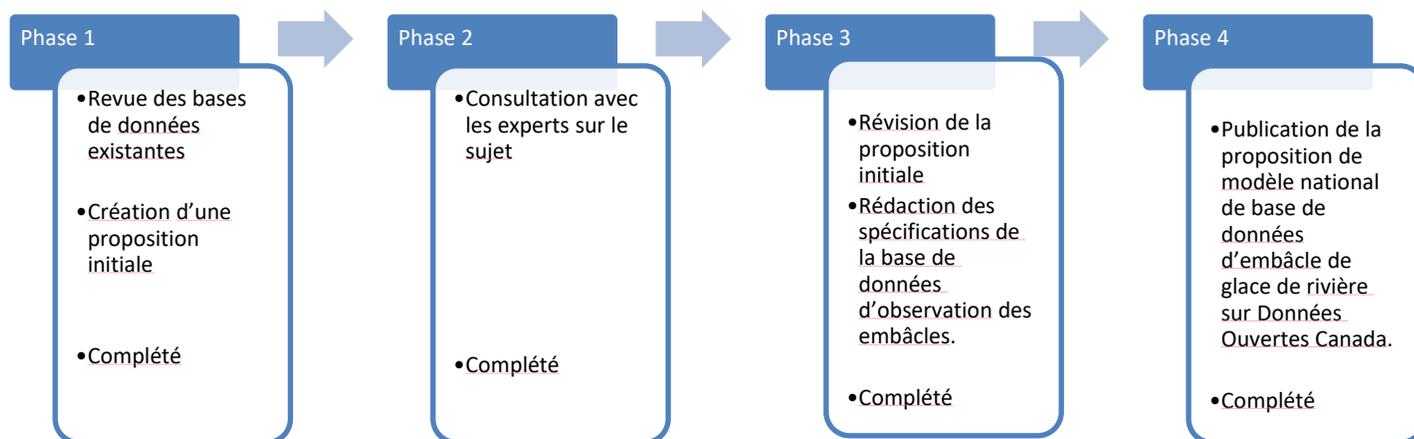


Figure 12 : Schéma du module d'évaluation du niveau de risque d'embâcle

Dans le cadre de ce projet, une application mobile permettant de recueillir des observations de terrain sur les embâcles de glace a été développée. L'application permet de fournir des observations aux opérateurs du modèle de prévision de la débâcle fluvial afin d'assurer l'intégrité et la qualité du système. Les observations ainsi recueillies sont stockées dans le modèle normalisé d'observations des embâcles.

4.7 Modules du système d'alerte :

Les composantes principales du système étant maintenant toutes réunies, les modules du système d'alerte les rassemblent en un système opérationnel de prédiction et d'alerte.

A. Schéma conceptuel du système d'alerte

La débâcle se produit lorsque la force de **mobilisation** du couvert devient supérieure à la force de **résistance** du couvert. Le modèle hydrométéorologique est en lien avec la force de mobilisation. Il indique à quel moment les conditions ayant historiquement mené à une débâcle causant un embâcle sont atteintes. Le signal de vigilance est alors émis pour l'ensemble d'une rivière. On évalue alors la force de résistance du couvert, avec le modèle de glace. Pour être efficace, l'acquisition des images radar et la caractérisation du couvert de glace doivent être faits le plus souvent possible. Enfin, comme le modèle de prédisposition a préalablement établi les zones ou

le couvert mobilisé pourrait bloquer et créer un embâcle, c'est sur ces zones seulement que l'on évalue le niveau de vigilance.

Le processus décisionnel du système DAVE est présenté à la [Figure 13](#).

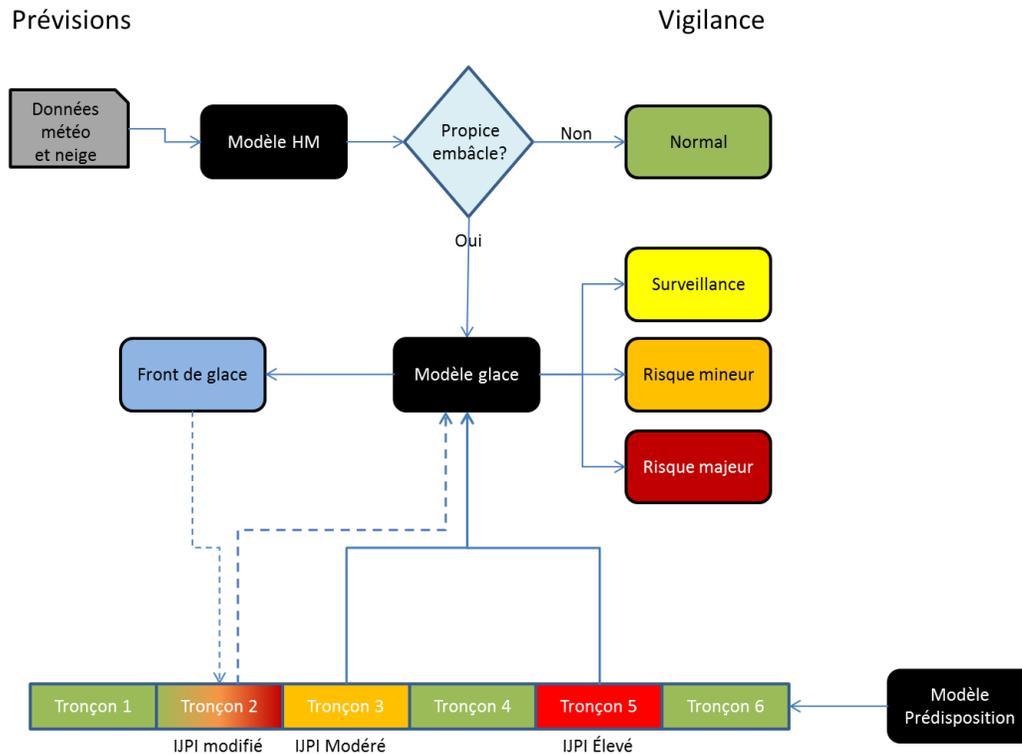


Figure 13: Schéma de fonctionnement du système DAVE

Les prévisions météo et l'état du couvert neigeux sont fournis en entrée. Étape 1 : Le **module hydrométéo**, basé sur le réseau de neurone convolutif développé dans le cadre du projet, détermine alors si les conditions générales sont propices à l'occurrence d'un embâcle. Dans la négative, le niveau de vigilance reste normal. Étape 2 : Dans l'affirmative, le **module de glace** est appliqué et détermine un niveau de risque (surveillance, mineur, majeur) pour chaque tronçon dont **l'indice de prédiposition** a préalablement été identifié comme modéré ou élevé. À cela s'ajoute une variante. Si le module de glace permet d'identifier la localisation d'un couvert de glace intact en aval d'une zone d'eau libre, le tronçon où se situe ce front de glace voit son indice de prédiposition relevé automatiquement à « élevé » et le module de glace (Étape 2) s'y applique donc, pour établir là aussi un niveau de risque en fonction de l'état du couvert.

Le résultat sera donc un shapefile de la rivière, où les sections préalablement identifiées comme modérément ou hautement prédisposées, présenteront un niveau de risque global d'embâcle allant de normal à risque majeur. La table d'attribut accompagnant ce shapefile donnera aussi les résultats individuels de chaque modèle.

5. Résultats

5.1 Base de données

A. Base de données historique des événements d'embâcle - BDHE

L'ensemble de données sur les embâcles a été fourni par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSPQ). Les données proviennent de rapports d'événements numériques ou sur support papier fournis par les autorités locales sous la juridiction du MSPQ de 1985 à 2014 et de l'Application Vigilance/inondation (hautes eaux): Observation terrain depuis 2013 à aujourd'hui. La base de données contient les embâcles signalés dans la province de Québec de 1985 à aujourd'hui. La base de données est téléchargée gratuitement sur le site de données Québec (www.donneesquebec.ca) sous format vectoriel. La base de données n'est pas validée et contient beaucoup d'imprécisions principalement dans la toponymie, la localisation et la datation. La correction de ces imprécisions est nécessaire pour calibrer et valider les modèles de prédisposition aux embâcles, de patrons hydrométéorologiques et de l'état de glace.

Source de la base de données brute :

<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/historique-publique-d-embacles-repertoires-au-msp>

Nombre d'événements contenus dans la base de données originale non-validée (janvier 2018) : 995.

Tableau 6: Caractéristiques techniques de la base de données DAVE-BDHE

Format	Fichier Shapefile Esri .shp (points)
Nombre de champs attributaires	14
Couverture spatiale	Tout le Québec
Couverture temporelle	1985-2018
Système de référence géodésique	WGS 84
Dernière mise à jour	25 janvier 2018
Auteur	Rachid LHISSOU (INRS)

La Base de Données **corrigée** de l'Historique des Embâcles (BDHE) comporte 850 embâcles et touche 150 rivières principalement au Sud du Québec.

Tableau 7: Contenu de la base de données DAVE-BDHE

FID	Identification de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (point)
no_seq_observation	id séquentiel unique de l'événement (auto)
no_seq_site	id séquentiel unique du site (auto)
nom_cours d'eau	Nom de la rivière
date_observation	Date la formation de l'embâcle

date_creation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Date de l'observation initiale réalisée au site (c'était peut-être de la glace lisse ou de l'eau libre ou tous les intermédiaires possibles entre les deux) si la source est Application Vigilance. ▪ Date de signalement si la source est historique des embâcles répertoriés au MSP (1985-2014)
commentaires	caractéristique/description physique de l'évènement
longueur	Longueur estimée de l'embâcle en mètres
longitude	Coordonnées longitude de l'embâcle
latitude	Coordonnées latitude de l'embâcle
municipalite	Nom de la municipalité
source	Provenance de la donnée : Historique des embâcles répertoriés au MSP (1985-2014) ou Application Vigilance
severite	Sévérité de l'embâcle selon les dégâts

Plusieurs vérifications de la base de données d'embâcles répertoriés au MSP ont été effectuées, précisément sur la toponymie des rivières, la position, la datation et la redondance. La Base de Données corrigée de l'Historique des Embâcles est nommée « DAVE – Historique d'embâcles » ou BDHE. Un nombre important d'embâcles redondants et/ou imprécis ont été effacés de la base de données (15% de la base de données brute).

La toponymie :

La toponymie des rivières a été corrigée en utilisant le Réseau Hydrographique National (RHN) de Ressources naturelles Canada (RNCAN), la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ - MERN) et le service de cartes Web Toporama (SCW-Toporama) du Secteur des sciences de la Terre (SST) de RNCAN. Les problèmes corrigés sont :

- Le nom du cours d'eau de plusieurs embâcles n'est pas donné;
- Le nom du cours d'eau est complètement faux;
- Le nom du cours d'eau est affecté par une faute de frappe ou une abréviation.

La position :

Plusieurs embâcles sont posés sur les rives à une petite distance (moins de 20 m) du polygone de la rivière en question. Dans ce cas, le point embâcle est déplacé à l'intérieur du polygone de la rivière. Dans d'autres cas, le point d'embâcle est posé plus loin sur la rive inondée à une distance entre 20 et 200 m, ceci a été corrigé en se basant sur des images à très haute résolution spatiale, la sinuosité et le rétrécissement de la rivière, les artéfacts, l'historique des embâcles dans le site en question et les archives de presse. L'interprétation de ces paramètres permet de définir la localisation correcte de l'embâcle. En outre, certains embâcles ont été posés trop loin de la rivière mentionnée à cause d'une faute de frappe dans la saisie de leurs coordonnées. Une correction d'un seul chiffre en longitude ou en latitude a permis de remettre l'embâcle à sa position exacte.

La datation :

Les embâcles sont documentés par leur date d'observation et de création. Toutefois, les deux champs «date_observation» et «date_creation» ne signifient pas la même chose pour les deux bases de données (Historique MSP et Application Vigilance).

Lorsque la source est l'Historique des embâcles répertoriés au MSP (1985-2014), date_observation représente la date du signalement alors que date_creation représente la date de la formation de l'embâcle.

Lorsque la source est l'Application Vigilance/inondation (hautes eaux): Observation terrain, date_creation correspond à la date de l'observation initiale réalisée au site (c'était peut-être de la glace lisse ou de l'eau libre ou tous les intermédiaires possibles entre les deux). Et date_observation correspond à une mise à jour de l'observation terrain sur ce site qui est maintenant un embâcle. À ce propos, une homogénéisation entre les deux sources a été faite. Par conséquent, le champ «date_observation» a été pris comme date de la formation d'embâcle et le champ «date_creation» comme date de signalement ou d'observation initiale du site en fonction de la source.

Par ailleurs, il existe certains cas où on vérifie la date de formation des embâcles en fouillant dans les archives de presse, notamment, lorsque la date de formation est manquante ou la présence de plusieurs embâcles avec des dates et des localisations rapprochées dans une section de rivière.

La redondance :

La base de données des embâcles contient beaucoup de doublons. Parfois cette redondance est due à la fusion de deux sources de données. Dans ce cas, la redondance affecte souvent la position et la date. Ainsi, les embâcles doublons ont été retirés de la base de données tout en gardant leurs informations qui ne sont pas redondantes à savoir les commentaires et la sévérité. Ces dernières sont ainsi insérées dans la table attributaire de l'embâcle retenu. La redondance provient également de la double saisie des opérateurs du suivi des embâcles. Dans ce cas, les doublons sont supprimés au complet. En outre, la redondance peut être due à un embâcle observé pendant plusieurs jours via l'Application Vigilance. Seulement, la première observation de l'embâcle est retenue en mentionnant dans le champ commentaire le nombre de jours de la présence de l'embâcle comme illustré dans la figure suivante :

B. Base de données de la géomorphologie des rivières - BDGR

Les polygones des rivières, leurs lignes centrales, les tributaires et les limites des bassins versants des sites d'étude sont obtenus sous format Géodatabase à partir des données du RHN téléchargeables gratuitement depuis le site de Géogratis (RNCAN, 2017) et des données GRHQ téléchargeables gratuitement depuis le site de Géoboutique (MERN, 2017). Les deux bases de

données ont été redressées, fusionnées et mises à jour. Une meilleure précision de la géomorphologie des rivières aboutira à une meilleure calibration des modèles à développer.

Source de la base donnée brute :

RHN : http://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/vector/index/html/index_produits_geospatiaux_fr.html

GRHQ : <http://geoboutique.mern.gouv.qc.ca>

Tableau 8: Caractéristiques techniques de la base de données DAVE-BDGR

Format	Fichier Geodatabase Esri .gdb
Nombre de classes	6
Couverture spatiale	Sud du Québec
Couverture temporelle	Jusqu'à 2017
Système de référence géodésique	NAD_1983_Quebec_Lambert
Dernière mise à jour	19 janvier 2018
Auteur	Rachid LHISSOU (INRS)

Tableau 9: Description du contenu de la base de données DAVE-BDGR

Champs de la classe d'entité des rivières «Rivieres_P»	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (polygone)
UH	Classe d'entités surfaciques représentant l'Unité Hydrographique (UH) ou bassin versant drainant la rivière.
IDEH	Identifiant de l'Entité Hydrographique
TOPONYME	Nom du cours d'eau
DATE_MAJ	Date de la dernière mise à jour
SOURCE	Base de données de provenance
SHAPE_Length	Longueur du cours d'eau
SHAPE_Area	Superficie du cours d'eau

Champs de la classe d'entité des tributaires «Tributaires_P»	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (polygone)
UH	Unité Hydrographique (UH) ou bassin versant drainant la rivière.
IDEH	Identifiant de l'Entité Hydrographique
TOPONYME	Nom du cours d'eau
DATE_MAJ	Date de la dernière mise à jour
SOURCE	Base de données de provenance
SHAPE_Length	Longueur du cours d'eau
SHAPE_Area	Superficie du cours d'eau

Champs de la classe d'entité des lignes centrales «Rivieres_L»	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (Linéaire)
UH	Unité Hydrographique (UH) ou bassin versant drainant la rivière.
IDEH	Identifiant de l'Entité Hydrographique

TOPONYME	Nom du cours d'eau
DATE_MAJ	Date de la dernière mise à jour
SOURCE	Base de données de provenance
SHAPE_Length	Longueur du cours d'eau
Champs de la classe d'entité des unités hydrographiques «UH»	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (Polygone)
CODE UH	Code de l'Unité hydrographique (UH)
Champs de la classe d'entité des Rapides	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (Polygonale, Linéaire et ponctuelle)
UH	Unité Hydrographique (UH) ou bassin versant contenant les rapides.
IDEH	Identifiant de l'Entité Hydrographique
TOPONYME	Nom du cours d'eau
DATE_MAJ	Date de la dernière mise à jour
SOURCE	Base de données de provenance
Champs de la classe d'entité des Écueils	
OBJECTID	Identifiant de l'entité géométrique
Shape	Géométrie (Polygonale, Linéaire et ponctuelle)
UH	Unité Hydrographique (UH) ou bassin versant contenant les Ecueils.
IDEH	Identifiant de l'Entité Hydrographique
TOPONYME	Nom du cours d'eau
DATE_MAJ	Date de la dernière mise à jour
SOURCE	Base de données de provenance

Plusieurs vérifications de la base de données ont été effectuées

La toponymie

La toponymie des rivières a été vérifiée et corrigée en utilisant le RHN, la GRHQ et SCW-Toporama. La toponymie RHN est disponible sur le réseau linéaire. Ainsi, une jointure spatiale permettant de migrer la toponymie vers le réseau polygonale, a été réalisée. Concernant la GRHQ, la toponymie est déjà intégrée dans la couche polygonale des rivières. En outre, plusieurs problèmes ont été corrigés à savoir:

- Le nom du cours d'eau n'est pas donné;
- Le nom du cours d'eau est complètement faux ou ayant une toponymie ancienne;

En fin de compte, les 59 bassins versants de la zone d'étude ont été corrigés et colligés en termes de noms des rivières et d'identifiants des noms pour le réseau linéaire et polygonal.

La morphologie

Plusieurs rivières ayant des embâcles et des stations hydrométriques ne sont pas numérisées. La largeur de ces rivières est assez importante (entre 10 et 20 mètres), mais elles sont cachées par les arbres. Ainsi, elles ont été numérisées et validées à partir d'une image à haute résolution spatiale en fin d'hiver où elles ne sont pas cachées. Il existait également des rivières affectées partiellement par ce problème. À ce propos, plusieurs rivières qui passent d'un polygone à une polyligne ont été corrigées (Figure 14).

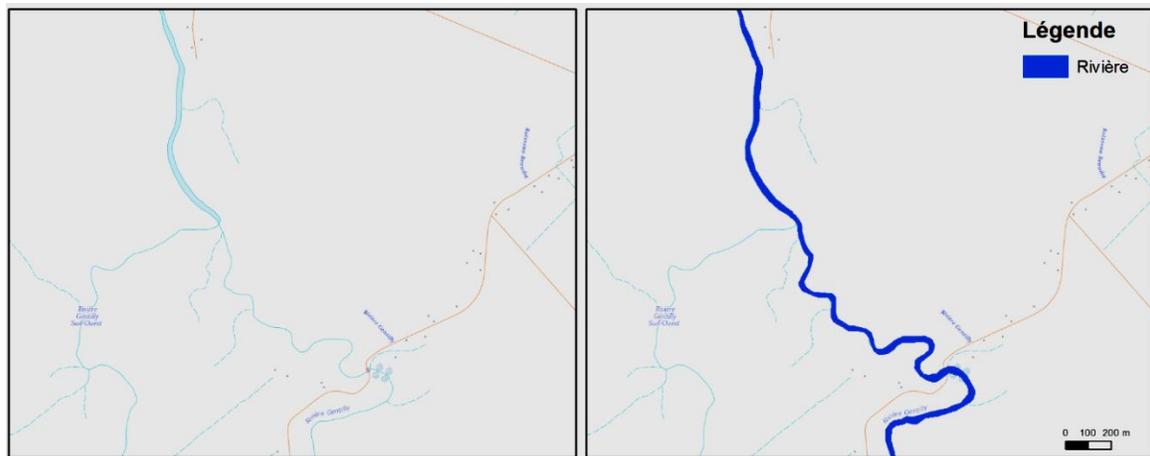


Figure 14: Rivière Gentilly (Bécancour). Réseau hydrographique brute (à gauche), Réseau hydrographique corrigé (à droite).

Par ailleurs, la majorité des polygones des rivières du RHN et de la GRHQ ainsi que les lignes centrales ont été redressés suite à des imprécisions causées soit par la dynamique fluviale (Figure 15) ou par une échelle inadéquate de numérisation d'origine (Figure 16). La vérification et le redressement des rivières ont été effectués à l'aide des images récentes à haute résolution spatiale multidates.

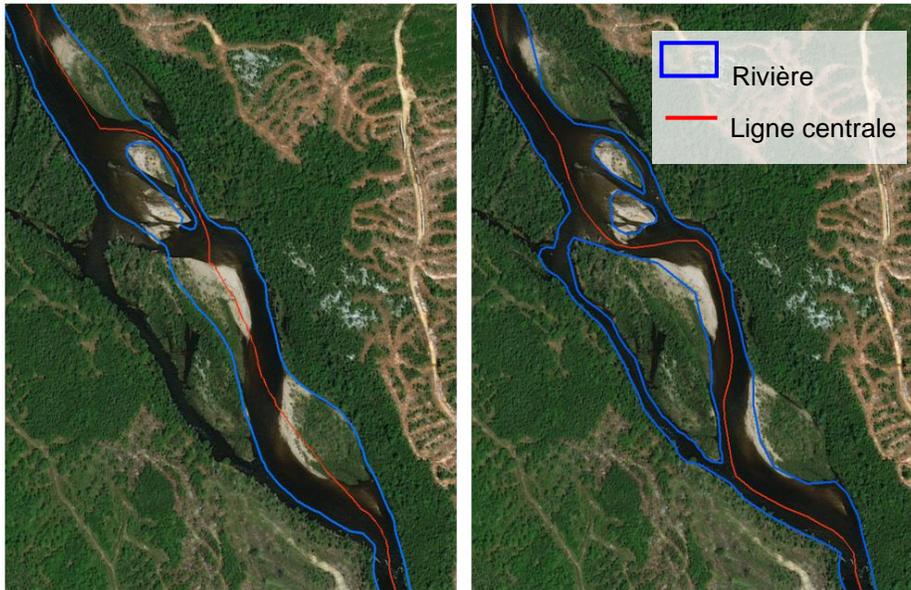


Figure 15: Imprécision causée par la dynamique fluviale (Rivière Malbaie)

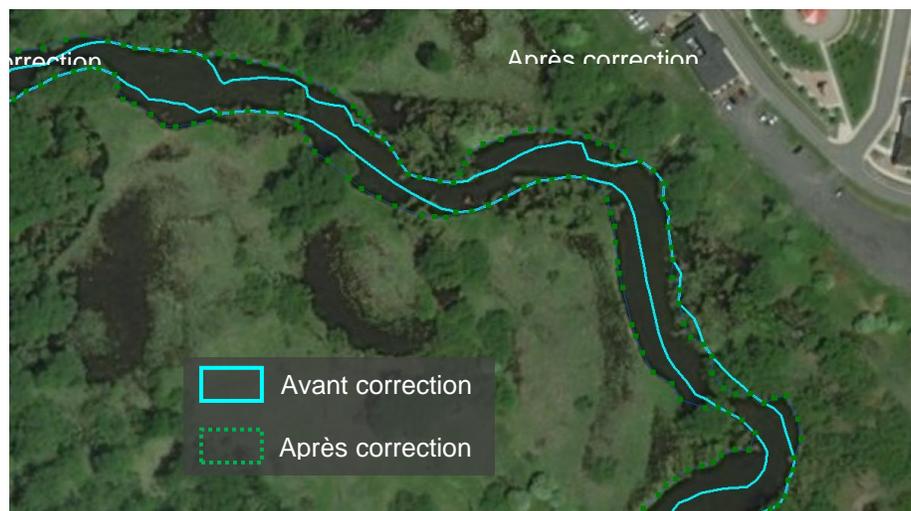


Figure 16: Imprécision causée par une échelle inadéquate de numérisation d'origine (Rivière Yamaska)

C. Base de données Hydrométéorologique - BDHM

La base de données « DAVE – Hydrométéo » a été construite à partir des données énumérées au [Tableau 1](#). Les précipitations liquides, les températures minimales, températures maximales, degrés-jours de gels, degrés-jours de dégels, radiations infra-rouge émises par l'atmosphère, les radiations infra-rouge émises par la surface et l'accumulation de neige au sol ont été extraites pour chaque évènement d'embâcle en utilisant le polygone de son sous-bassin pour les 15 jours précédant l'embâcle. Également, l'extraction de ces variables météorologiques a été faite sur des dates ou des années n'ayant pas des évènements d'embâcles. L'extraction se fait par un code Python qui enregistre la base de données sous format CSV. Ce dernier est utilisé après pour l'entraînement et la validation du modèle CNN.

Après ne pas avoir considéré les embâcles de frasil (embâcles de décembre), la Base de Données DAVE – Hydrométéo comporte 471 enregistrements (de 15 jours des variables météorologiques) pour des cas embâcles et 471 enregistrements pour des cas non-embâcles.

Caractéristiques techniques de la base de données

Tableau 10: Métadonnées de la base de données DAVE – Hydrométéo

Format	Fichier CSV
Nombre de feuillets	1
Couverture spatiale	Québec Méridional
Couverture temporelle	1985-2018
Nombre d'évènements	471 embâcles et 471 non-embâcles
Dernière mise à jour	23 janvier 2019
Auteur	Dominic Theriault, Rachid Lhissou (INRS),

Description du contenu de la base de données

Tableau 11: Description des champs de la base de données DAVE-Hydrométéo

ID_embacle/ID_non-embacle	Identifiant de l'embacle
Date	Date d'acquisition de la variable climatique
ID_Riviere	Identifiant de la rivière en question
Nom_riviere	Nom de la rivière
PresenceEmbacle	0 = série de 15 jours sans embacle / 1 = série de 15 jours avec embacle
AREA	Superficie du sous-bassin de l'embacle
meanPRCP	Moyenne des précipitations
sumPRCP	Somme des précipitations
Tmin	Température minimale
Tmax	Température maximale
DegrejourGel	Degré jour de gel
DegrejourRechauffement	Degré jour de réchauffement
RadiationUp	radiations infra-rouge émises par la surface
RadiationDown	radiations infra-rouge émises par l'atmosphère
Snowdepth	Accumulation de la neige

Extrait de la base de données

La [Figure 17](#) montre un extrait de la base de données. Les premières 15 lignes représentent une série de 15 jours des variables climatiques qui n'ont pas donné lieu à un embâcle. Au total 471 séries qui précèdent un embâcle et 471 qui ne le sont pas.

Dispositif d'alerte et de vigilance aux embâcles de glace (DAVE) : Rapport Final

ID_embacle	Date	ID_Riviere	Nom_riviere	PresenceEm	AREA	meanPRCP	sumPRCP	Tmin	Tmax	DegrejourGe	DegrejourRe	RadiationUp	RadiationDo	Snowdepth
1	2017-02-10	119	Rivière du Loup	0	729.213102	2.68805565	24.1925008	-23.4303448	-15.0827586	-630.44519	0	181.328125	184.5625	55.4599609
1	2017-02-11	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.14898612	1.34087507	-23.4558621	-15.2972414	-648.937256	0	183.195313	223.992188	55.6679688
1	2017-02-12	119	Rivière du Loup	0	729.213102	1.29572226	11.6615003	-21.3855172	-11.9455172	-660.997375	0	193.421875	235.507813	56.0839844
1	2017-02-13	119	Rivière du Loup	0	729.213102	9.92877833	89.359005	-16.3613793	-8.8	-668.733765	0	156.132813	266.03125	63.2011719
1	2017-02-14	119	Rivière du Loup	0	729.213102	3.36533353	30.2880018	-18.94	-7.28206897	-677.291382	0	203.578125	221.976563	61.1835938
1	2017-02-15	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.18058334	1.62525009	-18.6193103	-5.75241379	-684.49231	0	164.257813	273	36.8300781
1	2017-02-16	119	Rivière du Loup	0	729.213102	10.3929172	93.5362549	-13.08	-6.21034483	-689.843628	0	178.992188	249.726563	40.5585938
1	2017-02-17	119	Rivière du Loup	0	729.213102	1.47204441	13.2483997	-10.2296552	-6.14896552	-697.14801	0	217.273438	204.5	41.5019531
1	2017-02-18	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.18350001	1.65150008	-11.76	-1.82344828	-707.3396	0	214.976563	230.851563	40.9726563
1	2017-02-19	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.5349111	4.81419992	-6.01103448	5.35724138	-708.799072	0	231.054688	300.671875	43.3535156
1	2017-02-20	119	Rivière du Loup	0	729.213102	3.15538883	28.3984995	-7.75517241	2.42827586	-712.8479	0	226.46875	218.875	37.6679688
1	2017-02-21	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0	0	-17.8572414	1.0337931	-722.79718	0	203.898438	208.851563	31.1113281
1	2017-02-22	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.06102778	0.54925003	-12.5110345	3.88344828	-724.779053	0	207.914063	271.101563	24.296875
1	2017-02-23	119	Rivière du Loup	0	729.213102	0.03733334	0.33600003	-5.02206897	9.24206897	-726.638123	0	227.875	264.984375	25.8066406
1	2017-02-24	119	Rivière du Loup	0	729.213102	2.58975016	23.3077514	-2.52413793	10.8586207	-727.673096	0	226.085938	280.03125	18.03125
1	2017-02-25	119	Rivière du Loup	0	729.213102	4.27416668	38.4675012	-1.82344828	10.2358621	-727.673096	1.05435181	226.765625	276.875	16.4199219
2	1985-01-26	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-17.0857495	-11.3013572	-618.421722	0	163.191406	245.304688	13.5507813
2	1985-01-27	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	1.65885256	2689	-19.1221468	-10.5835904	-632.22321	0	179.613281	219.242188	13.1328125
2	1985-01-28	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-17.6835287	-7.6273905	-645.097198	0	189.554688	218.488281	13.265625
2	1985-01-29	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-22.2785318	-9.08297347	-659.826019	0	201.253906	182.679688	13.3710938
2	1985-01-30	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-20.8753856	-10.4716225	-674.014557	0	203.289063	176.554688	13.4609375
2	1985-01-31	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	2.53423812	4108	-26.3568785	-6.04040716	-689.752838	0	189.292969	169.164063	13.0039063
2	1985-02-01	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	5.39049969	8738	-11.7020358	-3.29395435	-697.435822	0	178.648438	271.488281	23.984375
2	1985-02-02	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0.5872918	952	-12.9367674	-6.52066626	-704.82486	0	176.453125	267.855469	25.375
2	1985-02-03	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-22.0533621	-11.90438	-718.695587	0	181.472656	202.828125	25.4296875
2	1985-02-04	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-22.7668106	-12.534855	-735.893707	0	188.449219	196.476563	24.890625
2	1985-02-05	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0.98704503	1600	-23.1233806	-11.6906231	-752.173492	0	185.808594	199.203125	24.0195313
2	1985-02-06	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0	0	-22.9327576	-12.758174	-769.696442	0	166.730469	204.683594	23.6835938
2	1985-02-07	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	0.92535472	1500	-29.722702	-13.9685379	-792.556671	0	188.164063	137.175781	23.5429688
2	1985-02-08	18	Rivière Chaudière	0	1613.56066	5.7974732	8587	-24.5357802	-16.0419494	-814.483368	0	173.477656	198.03125	23.2303125

Figure 17: Extrait de la base de données

D. Base de données Conditions de glace - BDCG

Cette base de données a pour objectif de regrouper, de documenter et de rendre disponibles pour étude, les cartes de glace du Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSPQ).

Ces cartes sont générées depuis 2010 à partir d'images satellites haute résolution Radarsat-2 ainsi que de l'algorithme de classification IceMAP-R (Ice Mapping Automated Procedure from Radar data) conçu par l'INRS.

Source de l'algorithme : <https://github.com/EGS-SGU/ICEmap-R>

Ce traitement permet de générer des cartes présentant 5 classes (de l'eau libre à la glace consolidée) dont l'interprétation (légende) varie selon les conditions d'acquisition (période de gel ou de fonte, [Tableau 12 et 13](#)). Les cartes générées sont disponibles pour visualisation en ligne et par un service de cartographie web WMS sur le portail gouvernemental Données Québec.

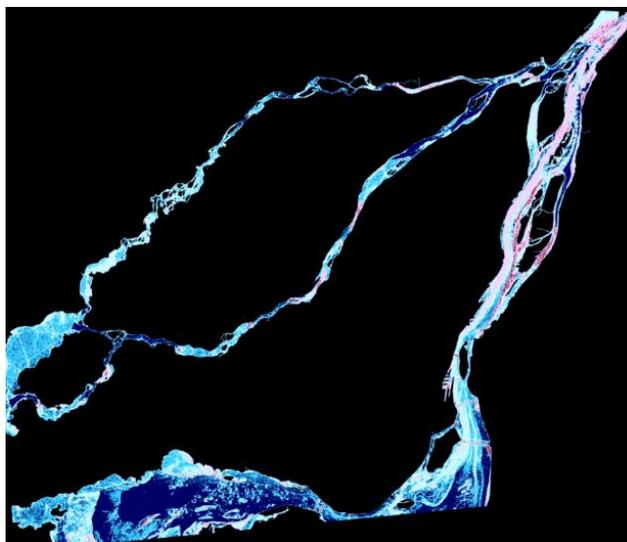


Figure 18: Exemple d'une carte de glace de la région de Montréal le 16 janvier 2012

Source : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/carte-de-glace-image-satellite-radarsat-2>

Les cartes de glace sont produites en format GeoTIFF. Chaque carte fait habituellement entre 50 et 500 Mb, selon la zone couverte.

Tableau 12: Légende de la carte de glace (période de gel)

Type de glace	Légende (couleur et regroupement de classes)	Rugosité de surface de la glace
Eau libre	1,2	Faible
Eau et radeaux de frasil	3	Légère à moyenne
Glace noire (thermique)	4,5	Faible
Glace blanche (frasil aggloméré)	6,7	Légère à moyenne
Glace consolidée (blocs et amoncèlements)	8,9	Moyenne à forte

Tableau 13: Légende de la carte de glace (période de fonte)

Type de glace	Légende (couleur et regroupement de classes)	Rugosité de surface de la glace
Eau libre	1	Faible
Chenal ouvert et eau sur glace	2	Faible
Glace noire en dégradation	3,4	Faible à Légère
Glace blanche en dégradation	5,6,7	Légère à moyenne
Glace consolidée en dégradation (blocs et amoncèlements)	8,9	Moyenne à forte

En plus de répertorier les cartes de glace produites par le MSPQ, la base de données croise cette information avec les événements de la base de données historique des embâcles du Québec. Si un embâcle s'est produit dans les 30 jours suivant la production d'une carte de glace d'une rivière donnée, l'analyse consiste à déterminer pour toutes les cartes de glace de cette période, les classes de glace dominantes pour chaque tronçon de 250 mètres. Dans le cas des rivières L'Assomption, Chaudière et Saint-François, l'information a été extraite systématiquement pour toutes les cartes.

Tableau 14: Caractéristiques techniques de la base de données

Format	Fichier MS Excel (.xmls)
Nombre de feuillets (onglets)	12
Couverture spatiale	Sud du Québec
Couverture temporelle	2010-2017
Nombre d'entrées	379
Dernière mise à jour	23 janvier 2018
Auteur	Valérie Plante-Lévesque (INRS)

Le premier feuillet *carte_portail* contient des informations concernant 379 cartes de glace produites par le Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSPQ) pour 21 rivières.

Tableau 15: Description du contenu de la base de données

Champs du feuillet *carte_portail*

id_carte	Identification à partir des champs date et nom_troncon
date	Date d'acquisition des images
nom	Nom du fichier lors du téléchargement
nom_tronc	Nom du tronçon selon le km_debut et km_fin
riv	Nom de la rivière
km_debut	Distance de l'exutoire au début du tronçon
km_fin	Distance de l'exutoire à la fin du tronçon
legend	Type de légende utilisé (gel ou fonte)
emb_carte	Nombre d'embâcles présents sur la carte selon la base de données du MSPQ
id_emb	Champ no_seq_obs de la base de données des embâcles permettant la jointure entre les deux fichiers
jour_pre-embacle	Nombre de jours avant le prochain embâcle selon le MSPQ (seulement si moins de 30 jours)
classe_dom	Le classeur contient une analyse des classes de glace dominantes pour chaque tronçon aux 250 m dans un feuillet subséquent
nb_photos	Nombre de photos de validation existantes
date_photos	Date de la prise de photos de validation
obs_ter	Indique si des données observations existent
angle_im	Angle d'acquisition de l'image (<i>à venir</i>)
mode_im	Mode d'acquisition de l'image (<i>à venir</i>)
heure_im	Heure d'acquisition de l'image (<i>à venir</i>)
temp	Température de l'air au moment de l'acquisition (<i>à venir</i>)
notes	Notes sur la carte

Les autres feuillets présentent les conditions de glace avant et pendant les embâcles des 11 rivières pour lesquelles l'analyse a été effectuée. Lorsque plus d'une carte de glace a été analysée, on retrouve les champs *moyenne*, *mode*, *max* et *min* qui présentent les statistiques de distribution par tronçon donnée selon les cartes.

Les vérifications et corrections suivantes ont été effectuées :

- Vérification des noms des fichiers
- Correction des doublons
- Vérification de la légende utilisée
- Vérification de la date

Au total, après vérification, on dispose de plus de 400 cartes de glace concernant 21 rivières.

Les ajouts suivants ont été faits :

- Ajout dans le nom du fichier, de la distance à l'exécutoire du premier segment de la rivière sur la carte
- Calcul des classes dominantes par tronçon de 250m
- Liaison avec la base de données d'embâcles
- Liaison avec données de validation

E. Base de données d'embâcles de glace au Canada - BDEC

La Base de données d'embâcles de glace au Canada (BDEC) a été développée dans le but de standardiser la cartographie et la documentation des événements d'embâcles de glaces au Canada. Les événements d'embâcles de glace sont enregistrés dans la base de données sous la forme d'un point polygone avec des informations qualitatives et quantitatives.

Le modèle national offre plusieurs bénéfices :

- Accès plus facile aux informations sur les embâcles de glace avec du matériel pertinent intégré dans la base de données.
- Aide à la recherche et à l'analyse du niveau régional jusqu'au niveau national.
- Permet de meilleures opportunités de recherche sur les aspects financiers et sociaux des embâcles.
- Permet de poursuivre les recherches sur l'association entre les changements climatiques et les embâcles de glace.
- Fournit des conseils techniques et une planification de l'atténuation des risques.
- Permet le développement potentiel d'un système de prévision des embâcles de glace.

Le BDEC est maintenu en partenariat avec les organisations fournissant des données. Les observations de l'évènement d'embâcle sont validées et mises à jour au mieux.

Les données de la CIJDB sont disponibles sans frais sur le site Web du gouvernement ouvert du Canada (<https://ouvert.canada.ca/fr/cartes-ouvertes>) ou ici pour téléchargement : ftp://data.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/EGS/National_Ice_Jam_Database/

Voici un résumé du modèle BDEC, tous les détails techniques sont disponibles dans les spécifications techniques de la base de données

Le tableau suivant décrit les attributs contenus dans la classe d'entité:

"Ice_Jam_Event_Observations_dembacles_de_glace", stocké dans "Canadian_Ice_Jam_DB_BD_dembacle_de_glace_au_Canada.gdb."

Tableau 16: Description du contenu de la base de données

Nom	Type	Description
-----	------	-------------

IndexNumber	Entier long	Numéro séquentiel de l'observation
Agency_en	Texte	Agence (en)
Agency_fr	Texte	Agence (fr)
ReportedBy	Texte	Nom de l'agence ou la base de données
DateTimeSub	Date	Date et heure de soumission
DateTimeObs	Date	Date et heure de l'observation
Latitude	Double	Latitude
Longitude	Double	Longitude
RiverName_en	Texte	Nom de la rivière (en)
RiverName_fr	Texte	Nom de la rivière (fr)
WatershedID	Texte	Numéro identifiant du bassin versant (Relevés hydrologiques du Canada)
Municipality	Texte	Municipalité
Province	Texte	Province
GeophysicalSetting	Texte	Caractéristiques hydro-géomorphologiques
Regulation	Texte	Régime hydrique(en)
Regulation_fr	Texte	Régime hydrique (fr)
JamLength	Entier court	Longueur de l'embâcle de glace
IceThickness	Texte	Épaisseur de morceaux de glace (en)
IceThickness_fr	Texte	Épaisseur de morceaux de glace (fr)
JamType	Texte	Type d'embâcle (en)
JamType_fr	Texte	Type d'embâcle (fr)
JamCondition	Texte	Condition de l'embâcle au moment d'observation (en)
JamCondition_fr	Texte	Condition de l'embâcle au moment d'observation (fr)
JamDuration	Entier court	Durée de l'embâcle en jours
Severity	Texte	Severité de l'embâcle de glace (en)
Severity_fr	Texte	Severité de l'embâcle de glace (fr)
Impacts	Texte	Impacts de l'embâcle de glace
Cause	Texte	Cause de l'embâcle de glace
Description	Texte	Description générale
ClassificationProduct	Texte	Lien du produit de classification des glaces de rivière
WeatherStation	Texte	Numéro identifiant du station de météo le plus proche
HydroStationCode	Texte	Code de la station météo la plus proche

Afin de faciliter la collecte de données sur les événements d'embâcles, une application mobile (Android) d'observation de terrain a aussi été développée. L'application propose un formulaire d'observation aux utilisateurs ainsi que la possibilité d'acquérir des images de terrain géo-référencées par la même occasion. L'application permet la transmission des observations en temps réels, mais elle offre aussi la possibilité de modérer le contenu des images par l'utilisation d'un modèle d'intelligence artificielle qui permet d'accepter uniquement les soumissions pertinentes au sondage.

L'application mobile de collecte de données est disponible à cette adresse :

ftp://data.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/EGS/CGI_IGV/

5.2 Modèle de prédisposition

Le modèle de prédisposition a été complété.

IJPI-2 (Ice Jam Predisposition Index-2) vise à localiser les zones sujettes à la formation des embâcles de glace dans les principales rivières de la province de Québec. Il est issu de l'amélioration de l'indice de prédisposition des embâcles (IJPI) établi par De Munck et al (2017) et développé par l'INRS sur trois rivières du Québec : la rivière Chaudière, la rivière Saint-François et la rivière L'Assomption. En effet, de nouveaux facteurs géomorphologiques, notamment la présence de rapides et le gradient du chenal, ont été intégrés aux anciens facteurs de l'IJPI. De plus, nous avons étendu le nombre de rivières pour la calibration à 11 pour bien calibrer le modèle IJPI. Les facteurs géomorphologiques ont été calculés sur des segments à espacement régulier pour chaque rivière.

Le module contient deux boîtes à outils qui fonctionnent sous ArcGIS :

Toolbox_IJPI2_DAVE_Pretraitements permettant de préparer les données vectorielles de rivière pour calculer l'indice de prédisposition des embâcles IJPI2. Notamment, cet outil permet de découper la rivière en sections de longueur souhaitée et de calculer pour chaque section sa sinuosité, largeur et pente, il permet aussi d'importer les largeurs de ses tributaires.

Toolbox_IJPI2_DAVE_Calcul permet de calculer le risque de formation d'embâcle des chenaux de rivières et peut s'appliquer indépendamment à chaque rivière du Québec. Il permet également de valider les résultats à l'aide de la base de données historique des embâcles (1985-2017) et fournit des statistiques générales sur chaque rivière (nombre d'embâcles, nombre des sections par risques, embâcles, présence de ponts, présence de tributaires et les paramètres de précision).

Un exemple de sortie du modèle est présenté à la [Figure 19](#). Le modèle a été appliqué sur 24 rivières. Les cartes sont livrées en format SHP, KML et PDF. Le [Tableau 17](#) liste les rivières et les statistiques associées. Les 2 colonnes de droites représentent les pourcentages de vrais positifs, c'est-à-dire les embâcles de la base de données qui sont effectivement dans une zone à prédisposition forte ou modérée, et les pourcentages de faux négatifs, c'est-à-dire les embâcles de la base de données qui se retrouve dans une zone que le modèle considérerait à prédisposition faible.

Tableau 17: Cartes de prédisposition produites et leurs résultats de validations

Rivière	Précision globale	Rappel	Par tronçon (section)								Par embâcle	
			VP	% VP	FP	% FP	VN	% VN	FN	% FN	% VP	% FN
Assomption	0.4	0.77	20	0.03	401	0.59	254	0.37	6	0.01	0.8	0.2
Beaurivage	0.52	0.67	16	0.06	114	0.45	117	0.46	8	0.03	0.67	0.33
Becancour1	0.58	0.73	11	0.02	237	0.42	318	0.56	4	0.01	0.77	0.23
Becancour2	0.47	0.5	1	0.01	37	0.51	33	0.46	1	0.01	0.5	0.5
Chateauguay	0.53	1	16	0.05	151	0.47	152	0.48	0	0	1	0
Chaudière	0.59	0.83	43	0.05	333	0.4	447	0.54	9	0.01	0.85	0.15
Montmorency	0.67	0.53	9	0.03	97	0.31	201	0.64	8	0.03	0.59	0.41
Nicolet	0.54	0.63	10	0.02	248	0.45	288	0.52	6	0.01	0.72	0.28
Ristigouche	0.45	0.53	9	0.03	137	0.52	109	0.41	8	0.03	0.54	0.46
Sainte_Anne	0.44	0.77	10	0.02	254	0.55	191	0.42	3	0.01	0.75	0.25
St_Francois	0.53	0.64	21	0.02	387	0.46	424	0.5	12	0.01	0.63	0.37
Yamaska	0.62	0.68	15	0.02	260	0.37	413	0.59	7	0.01	0.71	0.29
Matane	0.48	0.88	14.00	0.05	133.00	0.52	109.00	0.42	2.00	0.01	0.85	0.15
Nicolet Sud-Ouest	0.51	0.62	8.00	0.02	248.00	0.48	256.00	0.50	5.00	0.01	0.67	0.33
L'Acadie	0.56	0.73	11.00	0.10	45.00	0.41	51.00	0.46	4.00	0.04	0.71	0.29
Rouge	0.46	0.80	12.00	0.01	492.00	0.53	413.00	0.45	3.00	0.00	0.81	0.19
Noire	0.42	0.25	2.00	0.01	200.00	0.56	149.00	0.42	6.00	0.02	0.25	0.75
Etchemin	0.55	0.55	6.00	0.01	215.00	0.44	265.00	0.54	5.00	0.01	0.50	0.50
des Prairies	0.44	0.58	7.00	0.03	113.00	0.54	84.00	0.40	5.00	0.02	0.62	0.38
aux Saumons	0.42	0.60	3.00	0.04	47.00	0.55	33.00	0.39	2.00	0.02	0.60	0.40
Jacques-Cartier	0.55	0.70	7.00	0.01	260.00	0.44	317.00	0.54	3.00	0.01	0.70	0.30
Ouareau	0.48	0.86	6.00	0.01	209.00	0.52	186.00	0.46	1.00	0.00	0.90	0.10
Richelieu	0.64	0.50	4.00	0.01	180.00	0.35	320.00	0.63	4.00	0.01	0.44	0.55
Saint-Charles	0.55	1.00	4.00	0.03	64.00	0.45	73.00	0.52	0.00	0.00	1.00	0.00

Dans l'ensemble, les résultats du modèle sont très prometteurs. Même dans une forme simplifiée et en tenant compte de paramètres surtout stables dans le temps, le modèle représente bien la nature de la rivière et les endroits où la morphologie a un impact sur l'occurrence d'embâcles. Il existe toutefois certaines limitations à son application. Le modèle ne concerne que les embâcles qui font suite à une débâcle et non pas les embâcles de frasil. Également, c'est un modèle simplifié pour pouvoir être appliqué rapidement, à partir de données facilement accessibles. Il ne simule pas les processus physiques, mais localise plutôt les endroits où la morphologie du chenal est propice

à l'initiation d'un embâcle. Il donne un premier aperçu de ces zones à risque, qui pourrait être raffiné à partir de données de meilleure résolution ou de connaissances locales permettant de tenir compte de phénomènes spécifiques à la rivière en question.

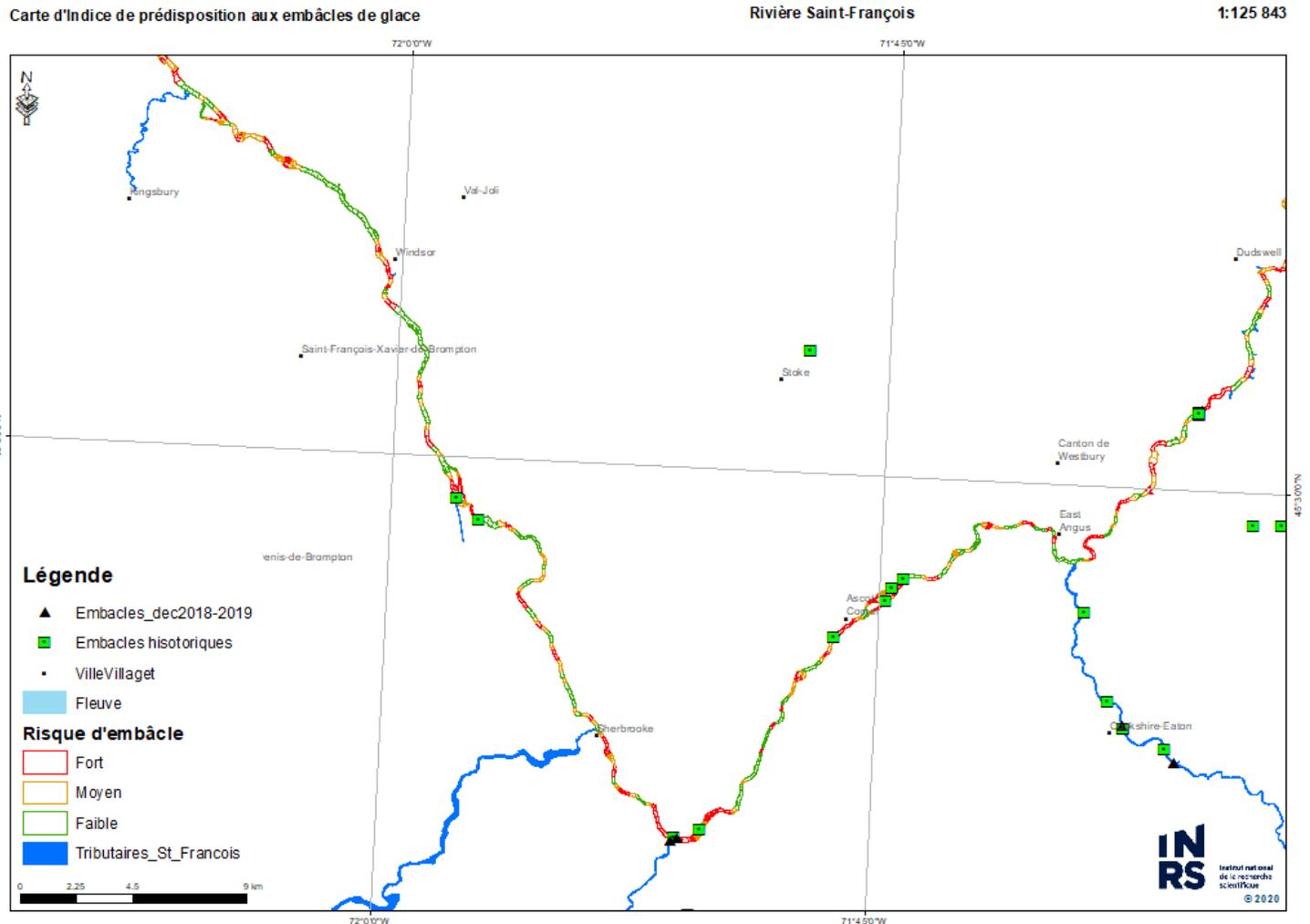


Figure 19: Exemple de carte de prédisposition produite par le modèle (rivière St-François, Secteur Sherbrooke)

5.3 Modèle de détection des patrons hydrométéorologiques

Un réseau de neurones convolutif a été entraîné afin de détecter les patrons météorologiques susceptibles de mener à une débâcle suivie d'un embâcle (Tableau 18).

Tableau 18: Caractéristiques du modèle CNN retenu

Type	CNN1D + LSTM
Initialisation des paramètres	Glorot uniforme
Régularisation de la couche de convolution	L2(0.001)
	1 couche de convolution avec 32 filtres de taille 5 (regarde 5 jours à la fois et se déplace avec un pas de 1 (stride=1)).
Activation	LeakyRelu
	LSTM(128)
	Dropout(0.3)
	Perceptron de sortie avec activation sigmoïde (classification binaire).

La précision du modèle avec le jeu d'entraînement est de 90 à 100% et elle est de 70 à 80% avec le jeu indépendant de validation (Figure 20).

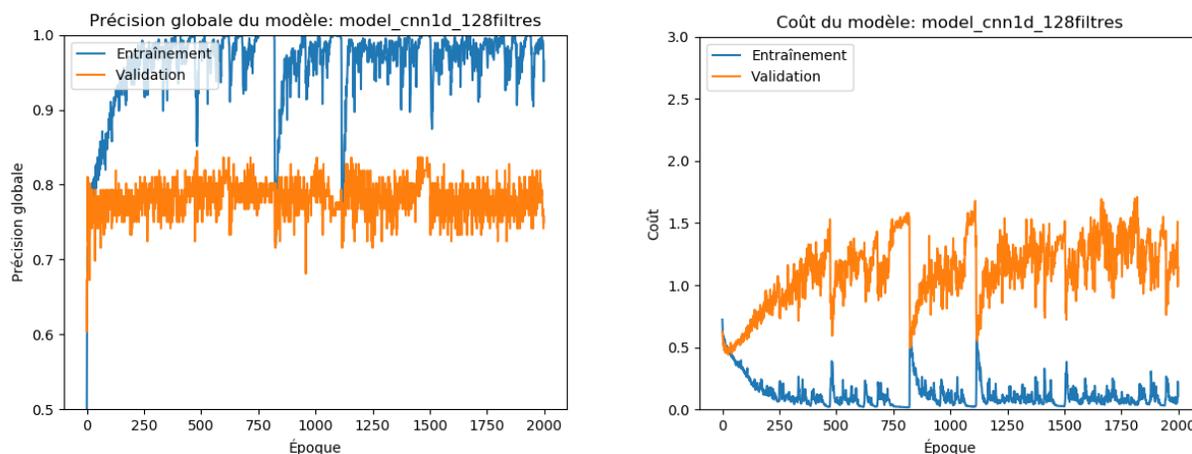


Figure 20: Précision du modèle CNN

[modeleHydroMeteo.py](#) : Script comportant la partie opérationnelle du modèle CNN hydrométéo. Le script formate les données CSV pour être exécuté par le modèle qui retourne une possibilité d'embâcle selon les patrons hydrométéo entre 0 et 1.

5.4 Modèle d'évaluation du risque d'embâcle en lien avec l'état du couvert de glace

Le modèle d'évaluation du risque d'embâcle en lien avec l'état du couvert de glace a été complété. Il comprend trois modules. Le premier (Figure 9) se charge de la cartographie des types de glace par estimation d'ensemble. Le second (Figure 10) établit le niveau de maturité de ce couvert et le troisième (Figure 11) en infère un niveau de risque.

A. Module de cartographie radar

Il comprend trois étapes : 1) Pré-traitement des images radar à partir du logiciel libre SNAP; 2) Classification des images selon trois différents algorithmes de cartographie du couvert de glace; 3) Combinaison par approche d'ensemble de ces trois résultats en une carte optimale du couvert de glace.

Le module est programmé en Python. Une fonction de pré-traitement a été programmée afin de préparer l'image radar brute pour chacun des algorithmes, chaque algorithme de source indépendante a été adapté pour fonctionner automatiquement et en parallèle avec les autres, au sein du module de cartographie radar. Le module comprend :

Dave_carto_glace.py: Script principal qui appelle les autres scripts et fonctions.

cartoglace_ibc.py : Script qui effectue les pré-traitements de l'image RADARSAT-2 pour l'algorithme IceBC

ibc.py : Script qui produit la carte de glace avec l'algorithme IceBC

cartoglace_imr.py: Script qui effectue les pré-traitements de l'image RADARSAT-2 pour l'algorithme IceMap-R

imr.py : Script qui produit la carte de glace l'algorithme IceMAP-R

cartoglace_riact.py: Script qui effectue les pré-traitements de l'image RADARSAT-2 pour l'algorithme RIACT

riact.py : Script qui produit la carte de glace l'algorithme RIACT

estim_ensemble.py : Script du modèle d'ensemble qui classe chaque pixel en fonction des 3 algorithmes selon un arbre de décision

Le Tableau 19 présente les points forts et les points faibles des trois algorithmes indépendants.

Tableau 19: Évaluation des algorithmes de cartographie des glaces de rivière

	Ice-MAP-R (Gauthier, Poulin et Bernier 2016; Gauthier et al, 2010)	RIACT (Puestow et al. 2017)	IceBC (Deschamps et al. 2015)
Avantages	Peu influencé par l'angle et l'orientation de l'image. Résultats stables pour différentes résolutions spatiales.	Légende simple. Détection des embâcles.	Exploite la sensibilité des images SAR pour différencier la rugosité du couvert de glace lors de la fonte
Erreurs de classification identifiées	Surestimation de l'eau vs glace thermique Agglomérée vs consolidée. Fausse classification si vents ou rapides. Effet de taille et concentration du frasil Effet glace humide et neige.	Sous-estimation de l'eau. Eau et glace lisse. Faux négatifs et faux positifs dans Eau.	Eau libre et glace lisse. Neige ou eau sur glace sont classifiées comme eau. Vent et rapides entraînent une rugosité et classe l'eau sous glace rugueuse. Transition entre l'hiver sec et le printemps humide
Inconvénients	Neige humide affecte les résultats. Changement de légende manuel à la période de fonte (glissement du centroïde). Logiciel commercial (Geomatica). Veine d'eau invisible, car résolution plus petite que l'image..	Pour minimiser l'effet de l'angle de l'angle d'incidence, un cycle RADARSAT complet doit passer (24 jours)	Angle sous 30° inutilisable. Utilisé à partir de 36° Ne s'applique qu'à la fonte du couvert. Dépendant de plusieurs logiciels commerciaux. Interface difficile à installer et utiliser.
Améliorations à envisager	Validation (Réexécution) Terminologie Nombre de classes Utilisation de la polarisation double	Validation sur autres rivières Random forest au lieu d'un arbre de décision. Approche régionale plutôt que par pixels. Inclure les conditions environnementales dans l'arbre de décision	Analyser la texture pour pouvoir utiliser les angles entre 29 et 36. Intégrer Sentinel-1 pour accroître le nombre d'images.

Le modèle d'ensemble a été retravaillé en fonction des nouvelles données de validation disponibles (Saint-François, Yamaska, Athabaska). Le nouveau schéma, intégré au code, est présenté au [Tableau 20](#).

Tableau 20 : Schéma de la classification d'ensemble

Classification	Glace-MAP-R	RIACT	GlaceBC	Confiance dans l'estimation
Eau libre (1)	1 ou 2	1	1, 102, 103, 104 ou 105	Haute
Eau libre (1)	3	1	1, 102, 103, 104 ou 105	
Frasil (2)	3	1 ou 2	102, 103, 104 ou 105	
Glace lisse (3)	3	2	2, 3, 4, 102, 103, 104 ou 105	Moyenne Haute
Glace lisse (3)	4	2	2, 3, 4, 102, 103, 104 ou 105	
Micro-rugueuse (4)	5 ou 6	2 ou 3	5 ou 6	
Glace rugueuse (5)	5 ou 6	2	7, 8 ou 9	
Glace rugueuse (5)	7, 8 ou 9	3	7, 8 ou 9	
Eau libre (1)	1, 2 ou 3	1		
Eau libre (1)	1, 2 ou 3		1, 102, 103, 104 ou 105	
Frasil (2)	3	2		
Frasil (2)	3		2, 3, 4	
Glace lisse (3)	4, 5 ou 6	2		
Glace lisse (3)	4, 5 ou 6		2, 3, 4, 102, 103, 104 ou 105	
Micro-rugueuse (4)	5 ou 6		5 ou 6	
Glace rugueuse (5)	5, 6, 7, 8 ou 9	3		
Glace rugueuse (5)	5, 6, 7, 8 ou 9		7, 8 ou 9	
Glace rugueuse (5)		3	7, 8 ou 9	Moyenne Basse
Micro-rugueuse (4)		3	5 ou 6	
Eau libre (1)	1 ou 2			
Eau libre (1)	4			Basse
Eau libre (1)		2		
Glace rugueuse (5)			7, 8 ou 9	
Glace rugueuse (5)	7, 8 ou 9			
Micro-rugueuse (4)			5 ou 6	

La Figure 21 montre un exemple de carte de glace finale produite par le module. Les cartes sont produites en format TIFF géoréférencé.

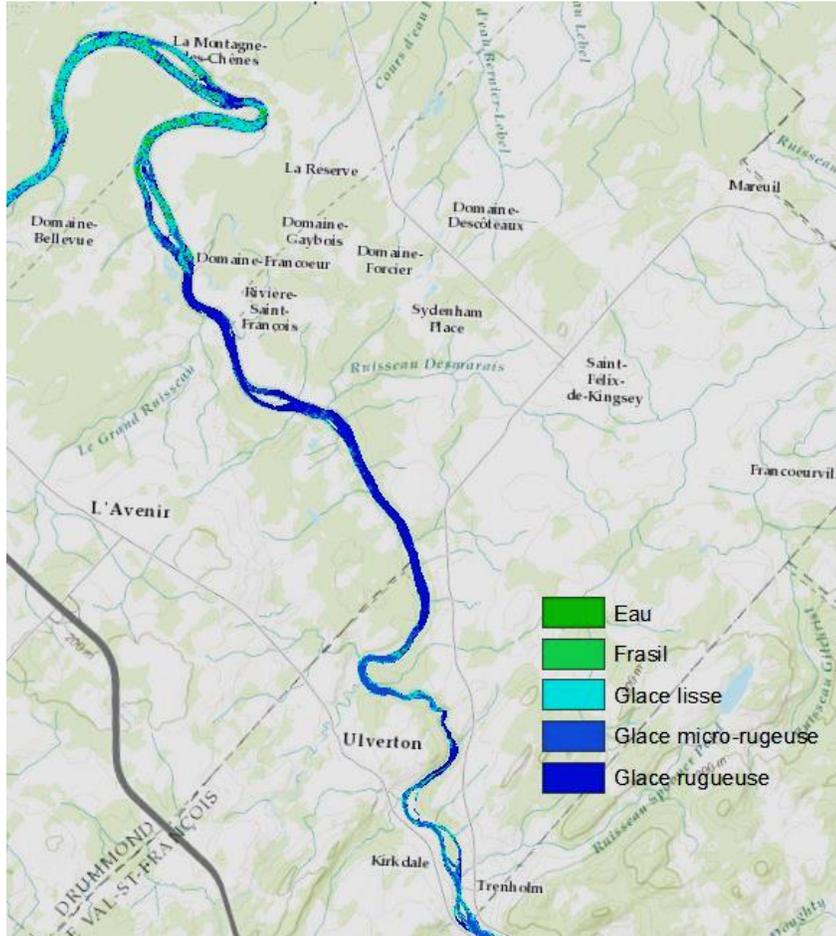


Figure 21 : Carte de glace 22 janvier 2020, Rivière St-François

B. Module d'estimation de l'état du couvert de glace

Intégré au système d'alerte par le script [calculGlace.py](#).

Le script se base sur les 4 classes de la carte de glace : 1 = Eau ; 2 = Glace lisse; 3 = Glace microrugueuse ; 4 = Glace rugueuse afin de déterminer le niveau de maturité du couvert de glace.

Dans sa version initiale, l'état de maturité du couvert est calculé pour chaque tronçon selon le nombre de pixels de chaque classe :

- Moins de 50% de glace (classe 2, 3 et 4) = Couvert absent
- 50 à 75% de glace = Couvert hypermature
- 75% et plus de glace (Majorité glace classe 3 ou 4) = Couvert mature
- 75% et plus de glace (Majorité glace classe 2) = Couvert consolidé ou prématuré

La Figure 22 montre un exemple d'état du couvert de glace produite par le module. Les cartes sont produites en format TIFF géoréférencé. L'état du couvert est évalué pour

chaque section, le résultat est un shapefile dont la table attributaire (Figure 22) contient toute les informations nécessaires entre autres la date de l'image radar utilisée.

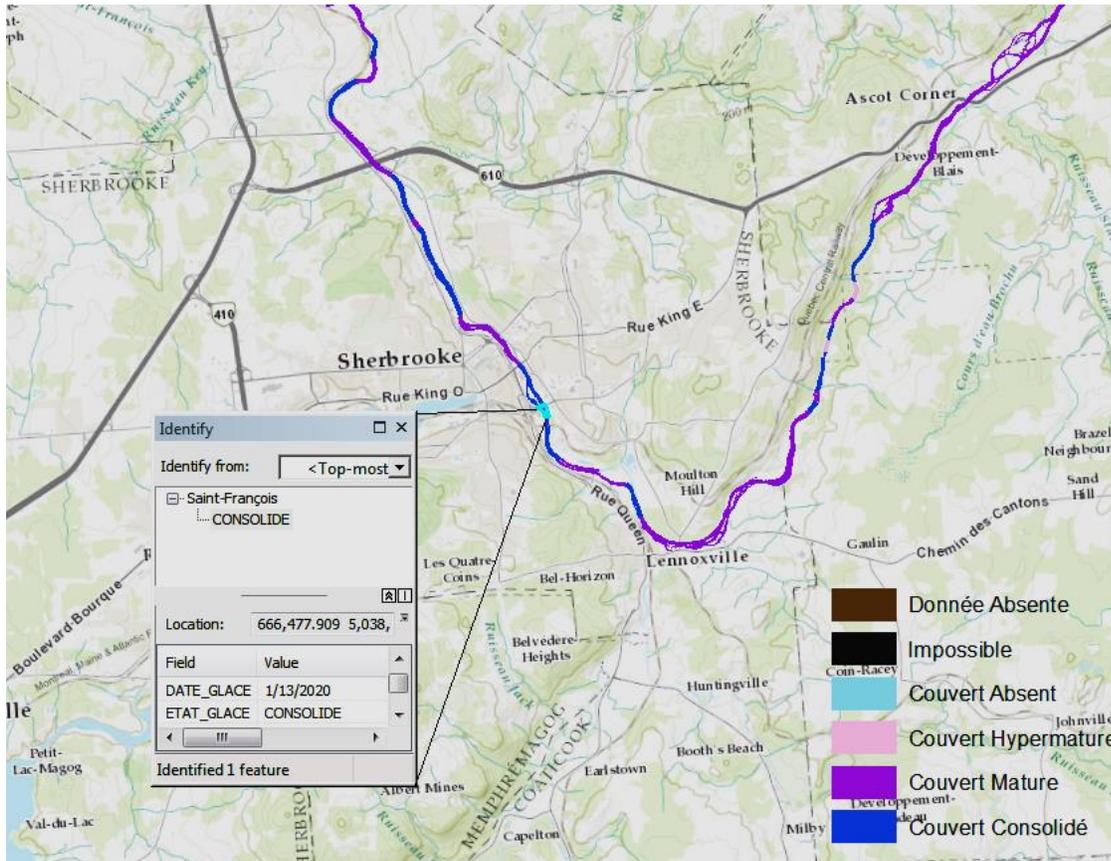


Figure 22 : Carte de l'état du couvert de glace à partir de l'image radar du 13 janvier 2020, Rivière St-François

C. Module d'évaluation du niveau de risque d'embâcle

Intégré au système d'alerte par le script [calculGlace.py](#).

Le risque (Figure 28) est calculé pour chaque tronçon en fonction de l'état de glace en amont sur une distance définie. Présentement, une distance de 10% de la longueur de la rivière est utilisée.

Il est à noter que cette étape est facilement modifiable dans le système. Cela permettra de tenir compte de développements futurs.

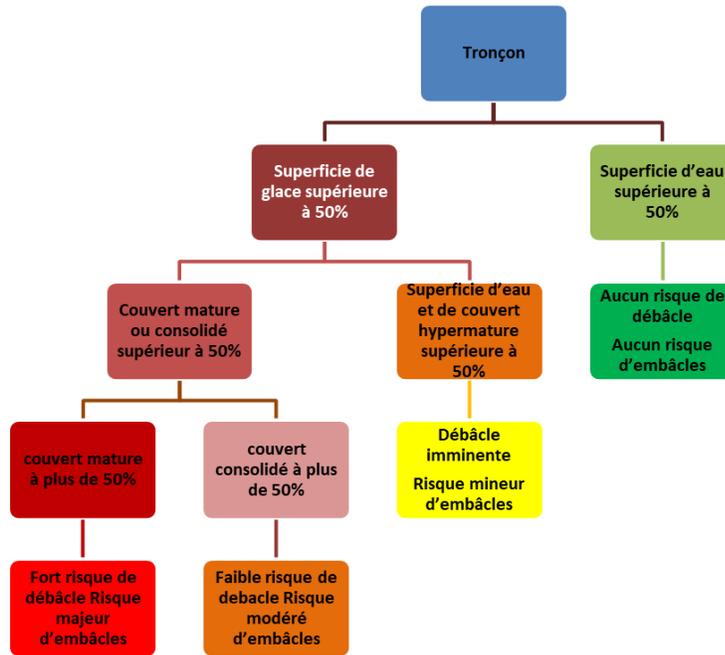


Figure 23: Calcul du risque de glace

La Figure 24 montre un exemple de la carte de risque produite par le module. Les cartes sont produites en format TIFF géoréférencé.

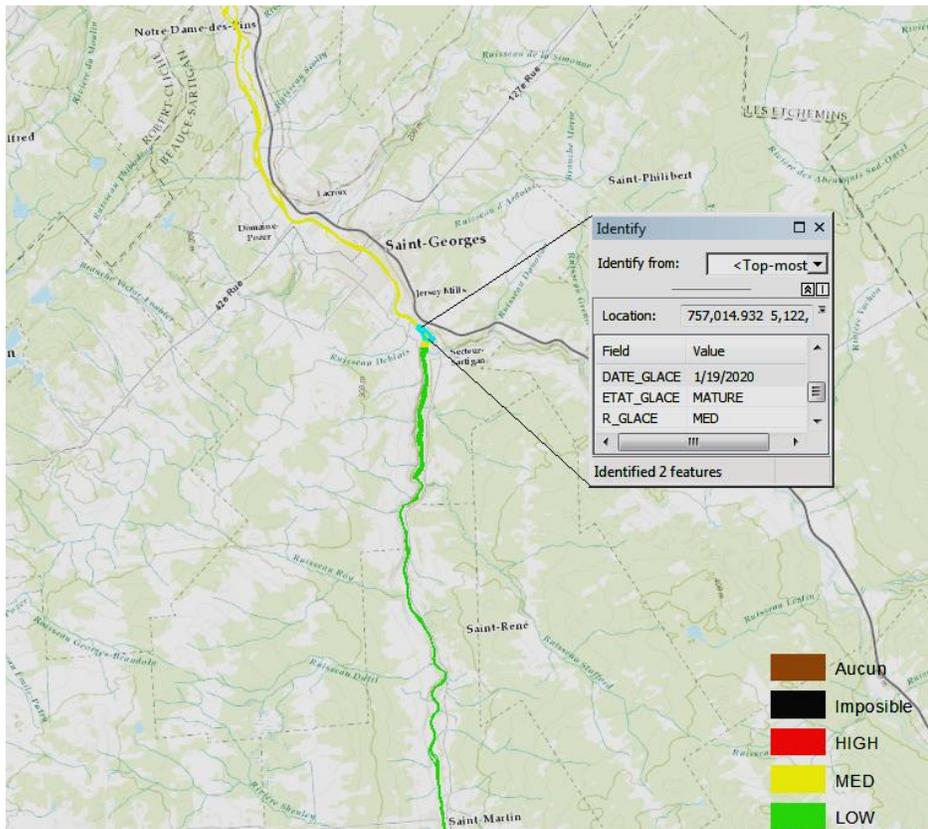


Figure 24 : Carte du risque de glace, Rivière St-François

5.5 Système DAVE

La première version du système d'alerte DAVE a été complétée. Il est schématisé à la [Figure 25](#).

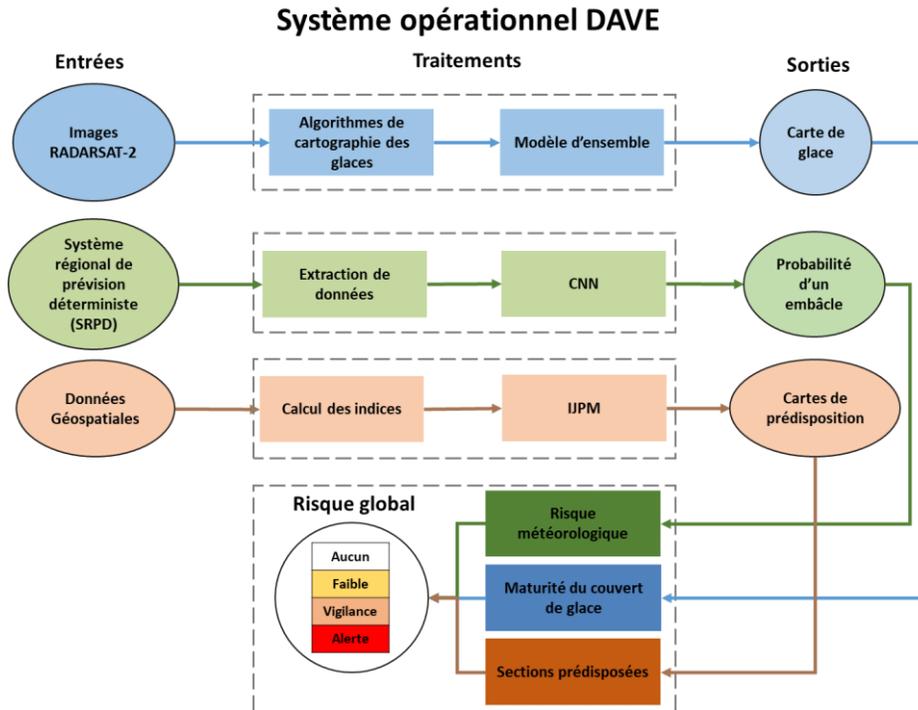


Figure 25: Schéma conceptuel du système intégré d'alerte aux embâcles de glace

Le système DAVE (*Dave.py*) programmé en python intègre les trois modèles finaux et calcule un état d'alerte : Aucune, Faible, Vigilance, Alerte. Il peut être lancé manuellement ou automatiquement. Les résultats sont stockés au fur et à mesure dans les shapefile des rivières ([Tableau 21](#)) et peuvent ensuite être visualisés via un projet ArcGIS avec différents résultats intermédiaires : état de la glace, risque de glace, risque de prédisposition, risque hydrométéo 0H, 24H et 48H et les niveaux d'alerte globale.

Tableau 21: Colonnes dans le shapefile des rivières

R_PREDISPO	Risque calculé pour la prédisposition
ETAT_GLACE	État de maturité du couvert de glace
DATE_GLACE	Date de l'image RS2 utilisée pour le calcul de la maturité du couvert et du risque de glace
R_GLACE	Risque calculé pour la glace
P_HYDRO_0	Probabilité de débâcle selon le modèle hydrométéo pour 0H, 24H et 48H
P_HYDRO_24	
P_HYDRO_48	
R_HYDRO_0	Risque calculé pour le modèle hydrométéo pour 0H, 24H et 48H
R_HYDRO_24	
R_HYDRO_48	
ALERTE_0	Niveau d'alerte du système DAVE pour 0H, 24H et 48H
ALERTE_24	
ALERTE_48	

Le module principal appelle les modules suivants :

A. *Modèle Hydrométéo*

[telechargementDonneesEC.py](#) et **[ExtractionDonneesECBassin.py](#)**: En premier lieu, les données météorologiques sont téléchargées et extraites du Système régional de prévision déterministe (SRPD). Les données de la journée et des 48 prochaines heures sont téléchargées via l'adresse suivante : https://dd.meteo.gc.ca/model_gem_regional/10km/grib2/ et les données des 15 derniers jours via le serveur suivant <http://hpfx.collab.science.gc.ca/>. En deuxième lieu, les données et statistiques sont formatées pour être exécutées par le modèle hydrométéo.

Les données nécessaires pour le modèle hydrométéo sont l'accumulation de pluie, la profondeur de neige, le flux infrarouge arrivant à la surface et l'énergie infrarouge sortant de l'atmosphère, les températures minimum et maximum ainsi que les degrés jours de gel et de réchauffement qui sont calculés à partir de la moyenne des températures. Les statistiques (moyenne, minimum, maximum) sont calculées par sous-bassins versants.

Pour les degrés jours de gel et de réchauffement, les données non disponibles avec le SRPD (historique d'environ 1 mois) sont téléchargées avec les données du North American Regional Reanalysis (NARR). L'historique des températures est stocké dans le fichier texte correspondant au nom de la rivière et du numéro du sous-bassin dans le dossier log \ temperature.

Le modèle CNN (**[modeleHydroMeteo.py](#)**) est ensuite exécuté. Le modèle hydrométéo est exécuté par sous-bassins versants pour chaque rivière. Ces bassins sont préalablement déterminés selon un changement important de la superficie du bassin versant à chaque tronçon. Le script **[calculRisqueHydroMeteo.py](#)** calcule un risque issu du modèle hydrométéo pour 0H, 24H et 48H pour chacun des sous-bassins de chaque rivière. Le risque est déterminé comme LOW ($p < 0.5$), MED ($0.5 \leq p < 0.75$) ou HIGH ($p \geq 0.75$).

B. *Modèle de glace*

Le script du modèle de glace (**[ImagesRS2.py](#)**) a été conçu pour fonctionner en permanence et sortir les cartes de glace en continu. C'est lui qui gère les images et appelle les différentes fonctions décrites à la section 5.4.

C. *Calcul de l'alerte*

À partir des risques des trois modules (prédisposition, hydrométéo et glace), un risque global est calculé (**[Alerte.py](#)**) afin d'émettre une alerte. La méthode utilisée est l'analyse multicritère hiérarchique (AMH). Le poids de chaque indicateur de vulnérabilité est de 0,64 pour la glace, 0,28 pour le modèle hydrométéo et de 0,07 pour la prédisposition (**Figure 26**). L'alerte est ensuite émise selon le niveau de vulnérabilité : Aucune (< 1), Faible (1 à 1,66), Vigilance (1,67 à 2,33) et Alerte ($> 2,34$) sous format d'un shapefile et l'exemple de carte finale de l'alerte du 04/02/2020 est montré dans la **Figure 27**.

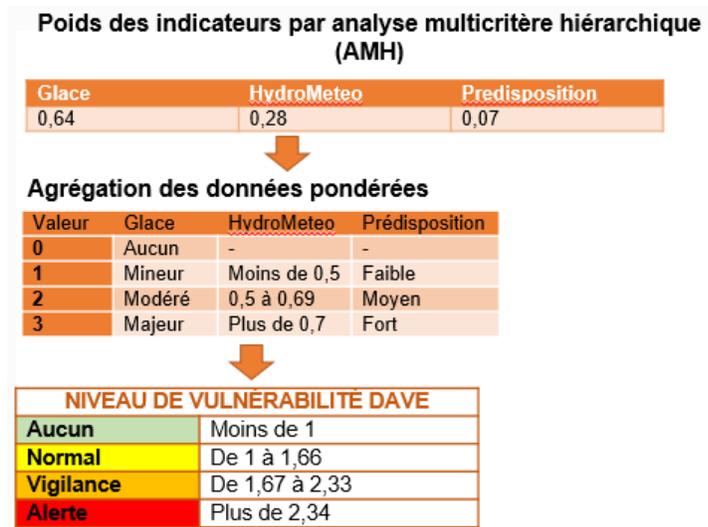


Figure 26: Calcul du risque global

Note: Le modèle de prédisposition est exécuté sur les rivières d'intérêt avant l'exécution du système DAVE. Le risque (LOW | MED | HIGH) est stocké dans les shapefiles des rivières dans le champ R_PREDISPO.

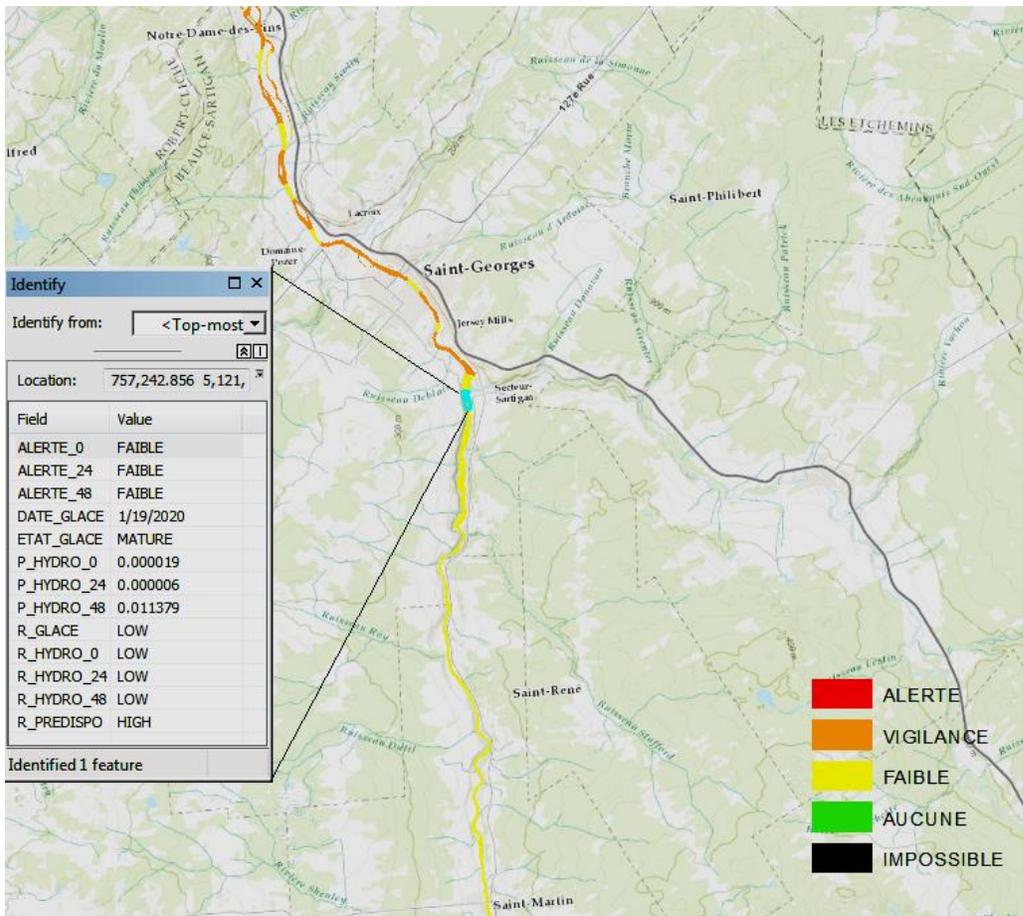


Figure 27 : Carte du niveau de vulnérabilité, prévision du 04/02/2020, Rivière St-François

5.6 Procédure de caractérisation d'en embâcle par drone

Dans le cadre du projet DAVE, le déploiement de drones lors de la présence d'embâcle fait partie de la procédure étudiée par l'INRS afin d'ajouter et de diversifier l'information disponible pour les gestionnaires. La procédure d'abord commence par la planification d'une campagne de terrain. Cette dernière aura pour but de prendre des photos aériennes d'un embâcle de glace à l'aide d'une caméra aéroportée par drone. Les éléments observés seront :

- Le volume de glace
- La hauteur/largeur/longueur de l'embâcle
- Pied et tête de l'embâcle

Le calcul du volume de glace se fera en couplant l'information d'un MNT (LIDAR) de la rivière et l'information acquise avec le déploiement du drone. Le MNT sera extrait de la couche LIDAR de la région où l'embâcle se formera. Le profil, la profondeur et le niveau plein bord de la rivière pourront être déterminés et seront des éléments essentiels à fusionner avec les données terrain afin de calculer le volume de glace de l'embâcle. La profondeur sera calculée comme étant la différence entre le lit de la rivière et son niveau plein bord. Ce niveau correspond au débit maximal que le lit mineur peut supporter avant de déborder dans la plaine inondable. Il varie d'un cours d'eau à l'autre en fonctions des caractéristiques intrinsèques de la rivière. La récurrence du niveau plein bord est de deux ans. Pour le calcul, il faudra tenir pour acquis que l'embâcle bloque entièrement la rivière.

La hauteur, la largeur, la longueur ainsi que le pied et la tête de l'embâcle seront déterminés avec la prise de ces photos. Ensuite, une modélisation en trois dimensions avec les techniques photogrammétriques. Cette reconstruction permet de chercher des informations supplémentaires intéressantes dans l'idée d'augmenter l'efficacité de gestion dans le cas d'un embâcle problématique.

La [Figure 28](#) récapitule les étapes principales de la procédure envisagée pour la caractérisation d'embâcle par drone.

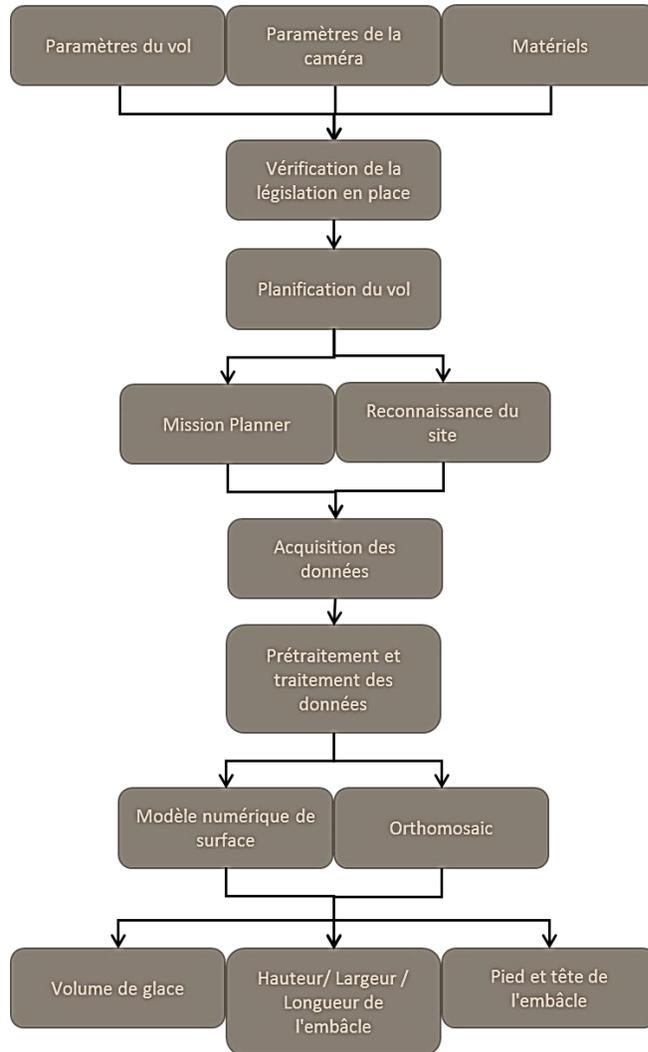


Figure 28 : Schéma de la procédure de caractérisation d'embâcle avec drone

Matériels

La première étape consiste à rassembler le matériel nécessaire à la campagne de terrain et à s'assurer de leurs fonctionnalités. De plus, la caméra et le drone devront être paramétrés selon les spécificités du terrain pour avoir une prise de photo optimale. Le déploiement expérimental a été effectué en hiver 2019. L'acquisition des images a été réalisée à l'aide d'un drone, de modèle Observer. Ce drone sera piloté par un membre de l'équipe du laboratoire de Télédétection Environnementale par Drone (TED) de l'INRS dirigé par le professeur Karem Chokmani. Notons que le laboratoire TED dispose de tout l'équipement (drones, caméras, logiciels, GPS, etc.), de l'autorisation COASP (certificat d'opération aérienne spécialisée permanente) et de l'expertise (pilotage de drone, traitement et analyse de données de télédétection). Le tableau ci-après récapitule le matériel nécessaire pour la caractérisation des embâcles de glace par drone.

Tableau 22 : Matériel requis pour le survol de drone

<p>Caméra : Sony A6000</p> 	<p>Drone : Observer-6</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • Bâche • Ordinateur • Logiciel Mission Planner • Logiciel Pix4D 	<p>GPS-RTK</p> 

Paramètres de vol

Il faudra déterminer les paramètres utilisés par le drone. La hauteur est un paramètre essentiel à déterminer de telle façon que la précision du modèle soit centimétrique. Le recouvrement doit être aux alentours de 80% pour assurer une bonne précision de mosaïquage ainsi la qualité du produit 3D. Quant au trajet et la ligne de vol du drone, le trajet doit être idéalement parallèle à la rivière, le nombre de lignes de vol dépend de la largeur de la rivière. Le tableau suivant un exemple des vols testés

Tableau 23 : Exemple de tableau synthèse des paramètres de vol

Altitude (m)	Focale (mm)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Résolution (cm)	Recouvrement (%)	Nombres de lignes	Vitesse (m/s)	Temps (min)
100	16	146.9	97.5	2.93	80	7	5	13.15

Paramètres de la caméra

Les images numériques devront être prises par une caméra fixée au drone. Au minimum, une nacelle supportant la caméra devra être installée pour avoir une bonne stabilité afin d'avoir des images de qualités. Pour ce qui est de la caméra, trois paramètres sont importants à fixer avant le déploiement du drone.

- Vitesse d'obturation (Temps pendant lequel l'obturateur de la caméra laisse passer la lumière)
- L'ouverture (Diamètre d'ouverture du diaphragme)
- ISO (Mesure de la sensibilité à la lumière du capteur de la caméra)

La caméra utilisée devra donc avoir les options pour modifier ces paramètres. Il est important de bien calibrer la caméra pour avoir des photos optimales en haute résolution. Dans notre cas, les images sont acquises à l'aide d'une caméra RVB Sony A6000 (24,3 MP). La vitesse d'obturation est de minimum 1/400 seconde, l'ouverture de F5 et l'ISO aura un plafond de 400. Les images sont acquises à une altitude de 100 mètres ce qui nous donnera une résolution entre un et deux centimètres. Les images sont stockées au format JPEG (réglage de la meilleure qualité) en utilisant 8 bits par pixel pour chaque canal de couleur (RVB).

Planification du vol

Cette étape inclut la création du plan de vol avant le déplacement sur le terrain. Ce plan a été fait à partir du logiciel gratuit Mission Planner. Le logiciel permettra de faire un tracé précis des lignes de vols et des points où prendre les photos. En entrant les paramètres définis à la première étape, le logiciel calculera le nombre de photos, la résolution spatiale, la distance parcourue par le drone, la dimension des photographies et le temps de vol nécessaire pour faire le tracé.

La planification des points de contrôle au sol (GCP) est importante. Bien qu'ils ne soient pas nécessaires dans toutes les situations, les GCP augmentent considérablement la précision globale du modèle 3D final. Après les avoir répartis de manière stratégique (des deux côtés de la rivière), il faudra déterminer leurs coordonnées GPS. Un récepteur GPS RTK est utilisé pour positionner les points de contrôle au sol qui serviront au géoréférencement des images acquises par drone.

Déploiement du drone et acquisition de données

Sur le terrain, le drone sera contrôlé par un pilote ayant la formation nécessaire. Le plan de vol et les paramètres déterminés pour la caméra et le drone seront appliqués durant l'acquisition. Cette préparation permettra de faire voler le drone en mode automatique. Si un imprévu survient, il y aura possibilité de les modifier pour s'adapter à la réalité du terrain. Des mesures et observations (volume et taille des morceaux de glace, hauteur d'eau, etc.) au sol doivent être prises afin de documenter, valider et évaluer les résultats des images de drone.

Prétraitement et traitement de données

Le contrôle de qualité s'effectue avant la modélisation photogrammétrique et évite d'avoir des résultats inexacts ou de faibles qualités en raison d'image floue ou d'un chevauchement inefficace entre deux photos. Elle a pour but d'observer :

- La couverture générale prise par les images
- La qualité de l'exposition (luminosité)
- Netteté de l'image après chaque mission de vol

Les images de faible qualité devront être exclues de l'analyse. L'ensemble de photographies accepté subit ensuite un traitement photogrammétrique avec le logiciel Pix4D.

Le logiciel Pix4D nous permettra de créer une modélisation 3D de l'embâcle grâce aux photos prises sur le terrain. Le résultat pourra être sous forme de :

- Nuage de points
- Maillage 3D (3D mesh)
- Construction structurelle d'un modèle 3D constitué de polygones. Les maillages utilisent des points de référence dans les axes x, y, z pour définir des formes avec la hauteur, la largeur et la profondeur.
- Image Orthomosaic

La dernière étape nécessite le traitement des données générées par ces différents résultats. Dans notre cas, le volume de glace, la longueur de l'embâcle seront déterminés par les informations acquises à partir du modèle 3D et par des calculs spatiaux sous ArcGIS. La Figure ci-après montre l'exemple de la carte de l'épaisseur de glace effectuée sur l'embâcle que nous avons observé sur la rivière l'Acadie en hiver 2019.

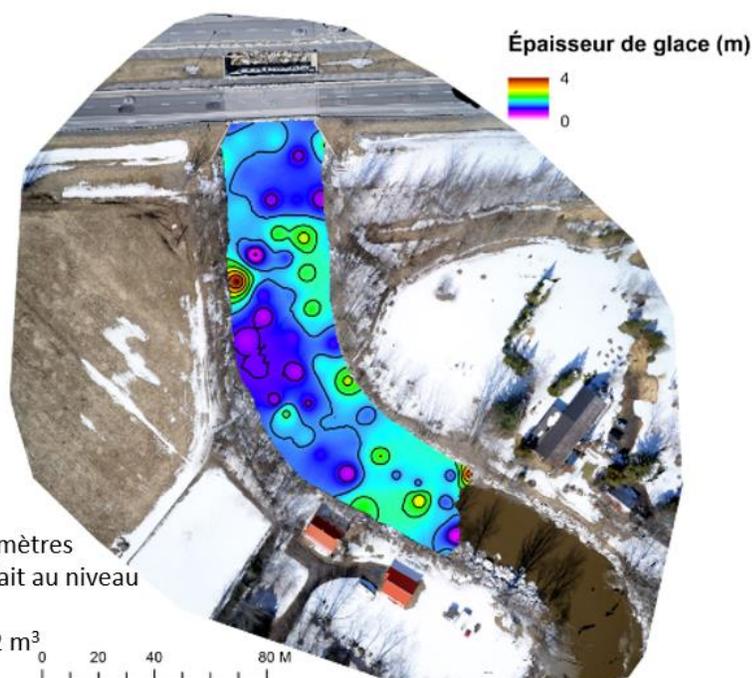
	Photos	Distance de vol (km)	Résolution (cm)	Recouvrement (%)
L'Acadie	212	0.604	1.95	80

Paramètres de la caméra

- Vitesse d'obturation : 1/800
- Ouverture : F5
- ISO : Automatique

Caractéristiques

- Longueur: 165 mètres
- Largeur moyenne: 32,57 mètres
- Pied de l'embâcle: localisé
- Tête de l'embâcle: localisé



- Épaisseur moyenne: 1,53 mètres
- Le calcul de volume s'est fait au niveau du pixel
- Volume de glace: 8802, 22 m³

Figure 29 : Exemple la cartographie d'un embâcle par drone sur la rivière l'Acadie (en haut : l'image RGB, en bas : la carte de l'épaisseur de glace obtenue)

5.7 Transfert du système à Sécurité Publique Québec et validation

Le 2 mars 2020, l'équipe de l'INRS s'est déplacée dans les bureaux du Ministère de la Sécurité publique (MSP) du Québec pour livrer la version finale du système DAVE, en faire l'installation sur les systèmes du MSP ainsi que pour former l'équipe de géomatique du ministère. Quelques changements et adaptations furent nécessaires et effectués par l'INRS suite à cette rencontre. Le service de Géomatique d'Urgence a aussi reçu une copie de la version finale du système. Au cours des

prochaines années, le MSP travaillera à poursuivre le travail de validation du système afin d'en achever la transition vers un système opérationnel.

Le printemps 2020 devait permettre une première validation du système. DAVE a été enclenché en mars pour fonctionner en continu, sur l'ensemble des rivières du Québec. Les données et prévisions météorologiques étaient récupérées quotidiennement sur les serveurs d'Environnement et Changement Climatique Canada et analysées par le modèle DAVE-Hydrométéo. Toutes les images Radarsat-2 acquises par le MSP étaient récupérées et analysées par le modèle DAVE-Glace. Aucune alerte n'a toutefois été émise. L'hiver 2019-2020 a été plutôt clément et l'état du couvert de glace peut être considéré comme moins à risque. De même, le printemps 2020 a été plutôt froid et la fonte s'est produite graduellement, conditions moins propices à une débâcle dynamique. Au final, un seul embâcle notable s'est produit en 2020, soit le 4 avril sur la rivière Chaudière. Celui-ci n'a pas été détecté par DAVE. Par contre, aucun faux positif n'a été émis. À ce moment-ci, les analyses post-événements ne sont pas complétées. Un élément est toutefois connu. Le nombre d'images Radarsat-2 allouées au MSP était cette année, très limité et la rivière Chaudière n'était pas couverte entre la mi-mars et le 5 avril. L'analyse de l'état du couvert de glace ne pouvait donc être à jour. Avec l'arrivée des images de la constellation RADARSAT (RCM), la disponibilité d'images sera plus grande la saison prochaine. Le système devra toutefois être adapté pour pouvoir utiliser ce nouveau format d'images.

6. Conclusions

Le système DAVE permet d'augmenter la résilience des infrastructures ainsi que leurs fonctions critiques à notre économie en cas de catastrophe. Grâce à ce dernier, la circulation des biens et des personnes sera supportée par un outil de prise de décision donnant une information détaillée et à jour de la situation avant et pendant les catastrophes liées aux embâcles.

Le développement de DAVE et son intégration éventuelle dans les processus opérationnels du MSPQ et du Service de Géomatique d'Urgence de Ressources Naturelles Canada, répond au besoin du Canada de développer des capacités d'anticipation et d'alerte relativement aux embâcles.

DAVE s'inscrit directement dans la vision du projet VIGILANCE du Centre des opérations gouvernementales du ministère de la Sécurité publique du Québec. VIGILANCE vise le développement de technologies intégrant, de façon interopérable, le maximum de données (météorologiques, hydrologiques et historiques). La mise en interrelation de ces données permet une meilleure anticipation des phénomènes pouvant menacer des collectivités, en vue de mobiliser plus rapidement les intervenants du système de sécurité civile, de les informer sur les conséquences possibles et de promulguer des conseils de comportements aux populations augmentant ainsi la *résilience* de nos communautés.

Cette approche opérationnelle et appliquée permet ainsi la mise en place d'un système transférable et reproductible sur l'ensemble du Canada. DAVE fournira donc un niveau d'alerte qui pourra indiquer entre autres, les secteurs où une surveillance accrue est recommandée à l'échelle locale. Il viendra ainsi en support aux décideurs pour mieux anticiper les formations d'embâcles et prendre des décisions éclairées afin de réduire les impacts sur l'ensemble du territoire. Finalement, la mise en place d'une base de données nationale sur les embâcles permettra de fournir une évaluation du risque basé sur l'historique des phénomènes d'embâcles à l'échelle canadienne, permettant ainsi d'adopter des politiques *basées sur des faits*.

DAVE crée des *communautés solides*. Les observations citoyennes permettront de valider et d'améliorer la qualité de la classification du couvert de glace tout en augmentant l'engagement citoyen dans ses institutions. En proposant un mode bidirectionnel d'interaction avec le citoyen : (Entrant) application mobile d'observation des conditions de glace en temps réel (Volunteer Geospatial Information (VGI), Drones) et (Sortant) produits de glace issus de l'imagerie satellitaire, il est possible d'effectuer un suivi à grande échelle du niveau de vigilance aux embâcles. DAVE devient un outil important d'aide à la décision, non seulement pour les experts, mais aussi pour le citoyen. Les informations dynamiques et les alertes issues de DAVE permettront aux intervenants locaux de mieux anticiper les événements d'embâcles, d'augmenter leur propre vigilance et de réduire ainsi les conséquences de ce type d'évènements au niveau des populations et des infrastructures. La participation des populations riveraines à travers les outils de VGI instaurera aussi une culture de vigilance et de gestion de risque.

Concernant la diffusion des résultats, plusieurs activités et publications ont été accomplies inclus les articles de revue, des travaux de congrès et ainsi que de toutes les activités de couverture médiatique. Voici une liste de ces publications :

De Munck, S., Gauthier, Y., Bernier, M., Chokmani, K., and Légaré, S. 2017. River predisposition to ice jams: a simplified geospatial model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1033-1045, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1033-2017>.

Gauthier, Y., Chokmani, K., Raymond, S., Decker, V., Tolszczuk-Leclerc, S., Fortin, V., and Légaré, S. 2017. DAVE: A geospatial tool to better anticipate ice jams. Affiche présentée au 19th Workshop on the hydraulics of ice-covered rivers, à Whitehorse (Yukon). Juillet, 2017

Gauthier, Y., Lhissou, R., Plante Lévesque, V., Maadeni, F., Persent, M.-A., Chokmani, K., Thériault, D., Ratsimbazafy, T., Gill-Fortin, J., Tolszczuk-Leclerc, S., Légaré, S., and D.Dunford, 2020. Forecasting river ice jams risk: the DAVE approach. Proceedings of the 25th IAHR International Ice Symposium, Trondheim, Norway, 14-18 June, 2020 (Delayed to November 2020).

Maadeni, F., Lhissou, R., Chokmani, K., and Légaré, S. 2019. Hydro-meteorological pattern recognition of ice jams. 20th Workshop on the hydraulics of ice-covered rivers, à Ottawa (Ontario), Juin 2019

Maadeni, F., Lhissou, R., Chokmani, K., Raymond, S. and Y. Gauthier, 2020. Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: a review. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 174, June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.

Plante Lévesque, V., Gauthier, Y., Tolszczuk-Leclerc, S., van der Sanden, J., Droin, H., Chokmani, K., Bernier, M. 2019 Comparative Analysis of River Ice Mapping Tools from Satellite Radar Data. 20th Workshop on the hydraulics of ice-covered rivers, à Ottawa (Ontario), Juin 2019 <https://www.cripe.ca/docs/proceedings/20/Plante-Lévesque-et-al-2019.pdf>

Plante Lévesque, V. et K. Chokmani, 2020. Mém'Eau, le Bulletin de l'Association des Gestionnaires Régionaux des Cours d'eau du Québec (AGRCQ). Volume 7, Numéro 1, Page 6-7, Mars 2020.

Plante Lévesque, V., Gauthier, Y., Ratsimbazafy, T., Gill-Fortin, J., Persent, M.-A., Tolszczuk-Leclerc, et K. Chokmani, 2020. La cartographie par estimation d'ensemble de la glace de rivière pour améliorer la gestion du risque d'embâcles. Affiche présentée au colloque du Centre d'Études Nordiques, UQAM, Montréal, Février 2020.

Persent, M.-A., Chokmani, K., and Lhissou, R. (2019), In-situ ice jam characterization by unmanned aerial vehicle (UAV). Affiche présentée au 20th Workshop on the hydraulics of ice-covered rivers, à Ottawa (Ontario), Juin 2019

Persent, M.-A., Thériault, D., Plante Lévesque, V., Poulin, J., Gauthier, Y., Légaré, S., et K. Chokmani, 2020. Développement d'une méthode opérationnelle de caractérisation d'embâcles de glace par photogrammétrie. Affiche présentée au colloque du Centre d'Études Nordiques, UQAM, Montréal, Février 2020.

Tolszczuk-Leclerc, S., Muise, P. and Gauthier, Y. 2019. Proposal for a National Ice Jam Database Model. Affiche présentée au 20th Workshop on the hydraulics of ice-covered rivers, à Ottawa (Ontario), Juin 2019

Média :

Fabries C., 2020. Inondations par embâcles de glace: un logiciel à la rescousse. Journal Le Soleil, 2 janvier 2020. <https://www.lesoleil.com/actualites/inondations-par-embacles-de-glace-un-logiciel-a-la-rescousse-ea6908152db0fde81f028cfd172855dc>.

7. Références

- Beltaos, S. (2008). River ice breakup (édité par S Beltaos). Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, LLC.
- Beltaos, S. et Burrell, B. C. (2003). Climatic change and river ice breakup. Canadian Journal of Civil Engineering, 30(1), 145-155. doi:10.1139/I02-042
- Chu, Thuan et Karl-Erich Lindenschmidt. 2016. « Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada. » Remote Sensing of Environment 181: 65-81. doi:10.1016/j.rse.2016.03.041. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425716301456>.
- Cooley, Sarah W. et Tamlin M. Pavelsky. 2016. « Spatial and temporal patterns in Arctic river ice breakup revealed by automated ice detection from MODIS imagery. » Remote Sensing of Environment 175: 310-322. doi:10.1016/j.rse.2016.01.004.
- De Munck, S., Gauthier, Y., Bernier, M., Chokmani, K., and Légaré, S.: River predisposition to ice jams: a simplified geospatial model, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 1033-1045, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1033-2017>, 2017.
- Gauthier, Y, M Tremblay, M Bernier et C Furgal. 2010. « Adaptation of a radar-based river ice mapping technology to the Nunavik context. » Canadian Journal of Remote Sensing 36 (sup1): S168--S185. doi:10.5589/m10-018. <http://dx.doi.org/10.5589/m10-018>.
- Gauthier, Yves, Jimmy Poulin et Monique Bernier. 2016. « IceMAP-R: Ice Mapping Automated Procedure from Radar data. » <http://espace.inrs.ca/4027/1/R1664.pdf>.

- Karim, F., Majumdar, S., Darabi, H. and Chen, S. (2018). LSTM Fully Convolutional Networks for Time Series Classification. *IEEE Access*, 6, pp.1662-1669.
- Maadeni, F., Lhissou, R., Chokmani, K., Raymond, S. and Y. Gauthier, 2020. Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: a review. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 174, June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.
- Morse et Turcotte, 2018. Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (Volet A)
- Polikar, Robi. 2006. « Ensemble based systems in decision making. » *IEEE Circuits and Systems Magazine* 6 (3): 21-44. doi:10.1109/MCAS.2006.1688199. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1688199&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1688199.
- Puestow, Thomas, Andrew Cuff, Martin Richard, Simon Tolszczuk-leclerc, Samuel Proulx-bourque, Alice Deschamps, Joost Van Der Sanden et Sherry Warren. 2017. « The River Ice Automated Classifier Tool (RIACT). » *Proceedings of the 19th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. <http://cripe.ca/docs/proceedings/19/Puestow-et-al-2017.pdf>.
- Romaszko L. (2015) Signal Correlation Prediction Using Convolutional Neural Networks. *Journal of Machine Learning Research*, 46, pp.45-56.
- Saini, Rashmi et S.K. Ghosh. 2017. « Ensemble classifiers in remote sensing: A review. » In 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 1148-1152. s.l.: IEEE. doi:10.1109/CCAA.2017.8229969. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8229969/>.
- Zheng Y., Liu Q., Chen E., Ge Y., Zhao J.L. (2014) Time Series Classification Using Multi-Channels Deep Convolutional Neural Networks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8485 LNCS, pp. 298-310.