

Projet IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation des Niveaux d'Eau

Rapport d'étape 1

R2228

Chercheur principal : Karem Chokmani
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement
karem.chokmani@inrs.ca

Financement OURANOS-InfoCrue

Le 27 octobre 2022

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

ISBN : 978-2-89146-990-6 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2025

Table des matières

Mise en contexte	6
Méthodologie	6
Activités réalisées	7
1. Mise en place de la base de données.....	7
2. Classification de la probabilité d'eau	10
3. Estimation des hauteurs sur toute la plaine inondable	17
Activités à venir	22
4. Calcul de l'incertitude.....	22
5. Validation des résultats	22
6. Codage.....	23
Plan de travail et calendrier	24
Annexe A.....	25
Bibliographie / référence	37

Liste des figures

Figure 1 : Processus méthodologique pour le développement d'IRENE	7
Figure 2 : Zone d'intérêt.....	7
Figure 3 : Histogramme des largeurs de zones tampon. À noter que pour une largeur de zone tampon, la rivière correspondante a une largeur équivalente au double.	11
Figure 4 : Exemples d'histogramme de valeurs de rétrodiffusion sous les polygones de plans d'eau et leur zone tampon. A) Distribution pouvant être modélisée par la somme de deux composantes. B) Distribution ne pouvant être séparée en deux composantes	12
Figure 5 : histogramme des valeurs du mode de la classe eau pour toutes les distributions bi-modales (57 177 distributions).....	13
Figure 6 : histogramme des valeurs du mode de la classe eau pour les distributions bi-modales dont la taille de la zone tampon est plus grande ou égale à 50 m (19 448 distributions)	13
Figure 7 : Modèle gaussien représentant les distributions des valeurs de mode pour la classe eau en fonction d'un seuil de taille de zone tampon. Les tailles plus grandes ou égales aux seuils sont considérées dans le modèle.	14
Figure 8 : Modèle gaussien représentant les distributions des valeurs de mode pour la classe terre en fonction d'un seuil de taille de zone tampon. Les tailles plus grandes ou égales aux seuils sont considérées dans le modèle.	14
Figure 9 : Fonction d'appartenance de forme Z.....	15
Figure 10 : Classification de la probabilité d'occurrence de l'eau à partir de l'image Sentinel-1. Gauche : Image visible du cours d'eau (date indéterminée). Milieu : Image Sentinel-1 du 1 ^{er} juin 2019. Droite : Probabilité d'occurrence de l'eau d'après l'image Sentinel-1 (noir = 0%, blanc = 100%).....	16
Figure 11 : Approche HAND (tirée de Nobre et al., 2011).....	17
Figure 12 : Schématisation du processus de désagrégation spatiale en utilisant les probabilités déterminées par l'imagerie Sentinel-1 et les élévations du modèle HAND	18
Figure 13 : Désagrégation spatiale en combinant les probabilités d'occurrence de l'eau à une résolution de 10 m et un modèle HAND à une résolution de 1 m. (Note : les couleurs du modèle HAND ont été rehaussée pour montrer le détail des zones de basse valeur. Les couleurs ne correspondent pas avec la disposition linéaire montrée dans la légende).....	19
Figure 14 : Calcul de la profondeur de submersion	20
Figure 15 : Profondeur de submersion obtenue en soustrayant les valeurs du HAND d'une surface d'élévation constante (par rapport au HAND).....	20
Figure 16 : Processus de classification des zones submergées (Rivière Chaudière, 26 avril 2019, zone de 3 km x 6 km). A) image Sentinel-1, B) probabilité d'appartenance à la classe eau, C) modèle HAND dérivé du MNT, D) image du secteur (date indéterminée), E) étendu de la surface submergée, et F) profondeur de submersion de la zone inondée.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de Sentinel-1	8
Tableau 2 : Autres données pertinentes au projet	10
Tableau 3 : Calendrier de réalisation révisé des activités du projet	24
Tableau 4 : Statistiques des données de niveau d'eau pour les 105 stations retenues	25
Tableau 5 : Statistiques des données de niveau d'eau correspondant aux images S1, pour les 105 stations retenues.....	32

Liste des acronymes

API : Application Programming Interface

CSV : Comma Separated Values

DEH : Direction de l'Expertise Hydrique

FDP : Fonction de Densité de Probabilité

GEE : Google Earth Engine

HAND : Height Above Nearest Drainage

INRS : Institut National de la Recherche Scientifique

IRENE : Imagerie Radar pour l'Estimation du Niveau d'Eau

LIDAR : Light Detection And Ranging

MELCC : Ministère de l'environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques

MNT : Modèle Numérique de Terrain

Mise en contexte

Le projet IRENE vise développer une approche satellitaire opérationnelle permettant de créer des stations virtuelles de niveau d'eau. Il s'agit d'obtenir, sans intervention sur le terrain, le niveau d'eau en différents points de la plaine inondable pour une section de rivière non jaugeée et ce, pour une résolution spatiale qui se rapproche de celle du modèle numérique de terrain LIDAR (~1 m). La méthode vise à utiliser des images radar disponibles gratuitement et en temps quasi-réel.

Afin d'atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques sont :

- Pour une image radar satellitaire donnée, fournir les estimations du niveau d'eau/profondeurs de submersion sur une série de points jugés optimaux, avec la meilleure qualité possible et avec les incertitudes qui s'y rattachent;
- Identifier la portée spatiale d'application (conditions optimales et secteurs prometteurs) et détailler les limitations techniques de la méthode ;
- Indiquer la démarche nécessaire pour appliquer la méthode sur de nouveaux bassins.
- Développer un prototype d'outil automatisé pour appliquer la méthode développée;

Le but de ce rapport d'étape est de présenter une mise à jour de l'avancement du projet, des activités réalisées et de discuter des problèmes rencontrés s'il y a lieu. Il sera suivi d'une rencontre avec le comité de suivi ce qui permettra de recueillir les commentaires et suggestions des membres de ce comité.

Méthodologie

La figure 1 présente le processus méthodologique proposé pour atteindre les objectifs. Il est basé sur l'application de concepts connus et sur l'intégration innovante de divers travaux déjà menés à l'INRS. La première étape consiste à estimer la probabilité d'eau libre en zone dégagée à partir de l'image radar, la seconde combine ce produit avec un modèle HAND (Height Above Nearest Drainage) afin de produire une carte de l'eau libre à 1m de résolution et la troisième étape estime la profondeur de submersion sur différents points d'eau libre sur la plaine inondable. La méthode inclut le calcul de l'incertitude sur les résultats et l'évaluation des limites d'application. Les différentes étapes sont décrites ci-après à travers les activités à réaliser.

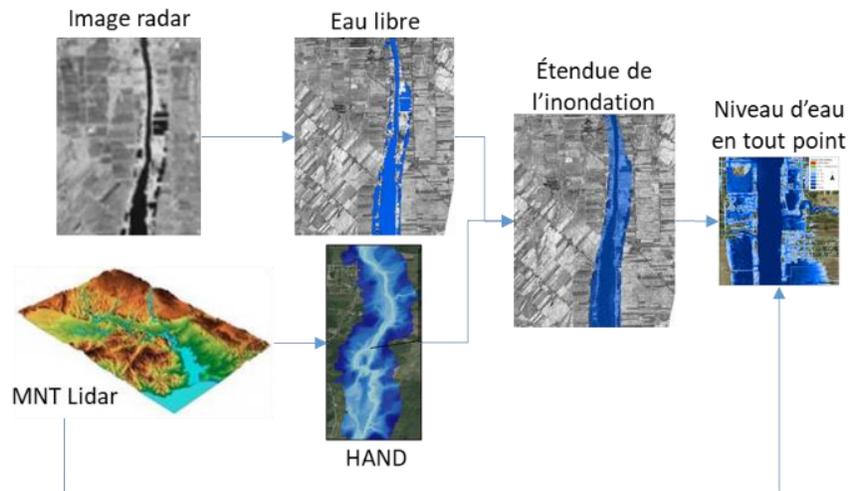


Figure 1 : Processus méthodologique pour le développement d'IRENE

Activités réalisées

1. Mise en place de la base de données

La première activité fut de mettre en place la base de données utilisables dans le cadre du projet. Pour se faire, nous avons défini la zone d'étude comme étant la partie méridionale du Québec, limité à l'ouest par la rivière des Outaouais, au sud par la frontière canado-américaine et à l'est aux environs de la rivière Chaudière (Figure 2). Quant à la limite nord, elle a été fixée arbitrairement aux environs de la latitude 46.3°N afin d'inclure le sud des bassins versants situés au nord du fleuve Saint-Laurent, sans pour autant s'étendre trop au nord où les enjeux des inondations sont moins présents. C'est à l'intérieur de cette zone que s'est effectuée la recherche des données nécessaires au développement et à la validation de la méthode.

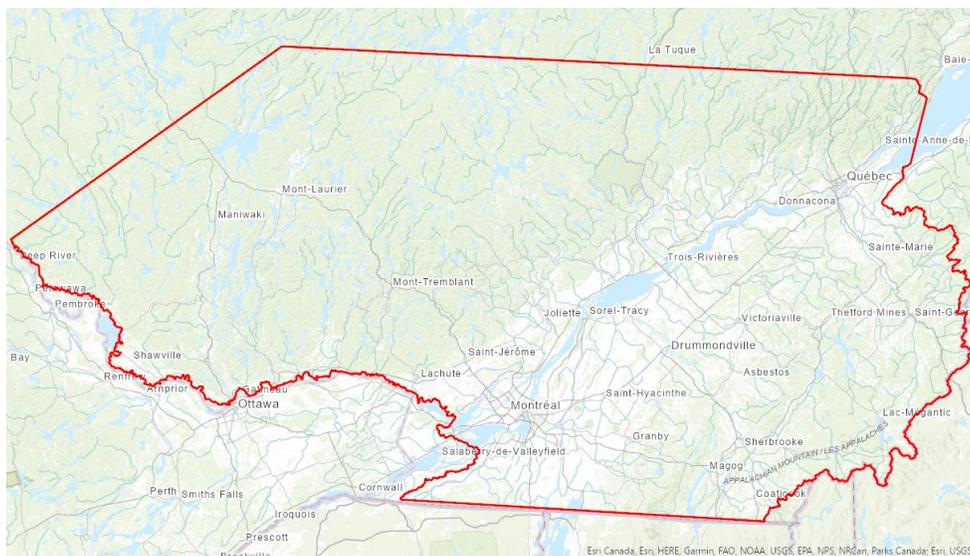


Figure 2 : Zone d'intérêt

Pour le développement de la méthode IRENE, les quatre principaux jeux de données utilisés sont les suivants : données sur les **niveaux d'eau**, **données satellites radar**, **modèle numérique de terrain** et représentation cartographique des **cours d'eau**. Une description sommaire des jeux de données est présentée plus bas mais une version plus détaillée est présente dans le rapport du livrable 1 (Chokmani, 2022).

Données satellites radar

L'imagerie utilisée pour le développement de la méthode est celle issue des satellites de la série Sentinel-1 (Tableau 2). Les données couvrent régulièrement le sud du Québec depuis 2015.

Tableau 1 : Caractéristiques de Sentinel-1

Propriétaire	Satellites	Fréquence	Opération	Résolution spatiale	Couverture en mode IW	Polarisations en mode IW	Répétitivité
Agence spatiale européenne (ESA)	Sentinel 1A Sentinel 1B	Bande C (5.4GHz)	2014- aujourd'hui 2016- aujourd'hui	5m x 20m	250 km	VV + VH et HH + HV	6 jours

Les données de Sentinel-1 sont gratuites et accessibles en ligne, via plusieurs applications. Dans le cadre du projet, nous utiliserons Google Earth Engine (<https://developers.google.com/earth-engine>). Il s'agit d'une plateforme infonuagique qui permet le traitement à grande échelle d'images satellites pour détecter les changements, cartographier les tendances et quantifier les différences à la surface de la Terre. Pour les données Sentinel-1 disponibles sur GEE, un certain nombre de prétraitements ont déjà été appliqués (<https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1>). Ainsi, nous n'avons pas à télécharger chaque image pour appliquer ces prétraitements et pouvons utiliser la plateforme pour effectuer un certain nombre de traitements supplémentaires, entre autres, l'application de filtres et de masques, le découpage sur les zones d'intérêt ainsi que le calcul de statistiques.

Données de niveau d'eau

Pour les données de niveau d'eau, nous avons regardé les données disponibles du côté du gouvernement du Québec et de celui du Canada. De ces données, nous avons conservé les stations satisfaisant les critères suivants :

- Stations situées à l'intérieure de la zone d'étude
- Stations diffusant les niveaux d'eau dans un système géodésique
- Stations en opération après 2015

À ces stations, nous avons ajouté une dizaine de stations du système de surveillance de la rivière Chaudière et gérées par le COBARIC.

L'information sur les stations présentée dans le rapport accompagnant la livraison de la base de données est reprise à l'annexe A.

Modèle numérique de terrain

Afin d'évaluer le niveau d'eau à l'intérieur d'une plaine inondable, un modèle numérique de terrain (MNT) de grande précision est souhaitable. Pour le projet IRENE, nous utiliserons les MNTs dérivés du LiDAR générés dans le cadre du projet d'acquisition de données par le capteur LiDAR à l'échelle provinciale (Leboeuf, 2015). Ces données possèdent une résolution spatiale de 1 m et sont diffusées gratuitement sur le site de données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>). Le modèle numérique de terrain servira à la fois au calcul du modèle HAND et à la détermination du niveau d'eau. Le modèle HAND est un modèle numérique de terrain normalisé où la valeur de chaque pixel correspond à la différence d'élévation entre ce pixel et le pixel du réseau hydrographique vers lequel il s'écoule. Les valeurs HAND en amont d'une rivière peuvent ainsi se comparer avec celles en aval, et les valeurs HAND de différentes rivières peuvent se comparer entre elles.

Représentation cartographique des cours d'eau

Certaines des activités à réaliser dans le cadre du projet nécessitent une représentation cartographique du réseau hydrographique. Nous avons donc choisi d'utiliser la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) qui est le référentiel commun de l'hydrographie au Québec. Ces données sont également disponibles sur le site de données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>). Les polygones représentant les cours d'eau serviront plus particulièrement comme masque pour déterminer la distribution des valeurs de rétrodiffusion de l'imagerie radar dans les zones couvertes par l'eau et comme valeur de départ pour la méthode HAND (soit $HAND = 0$).

Autres données

Le développement et la validation de la méthode IRENE nécessitera aussi d'autres données spécifiques (Tableau 6). Les données d'occupation du sol seront utilisées pour évaluer l'efficacité de la méthode en fonction de l'occupation du sol présente sur les berges. Les photographies aériennes issues des survols aéroportés du gouvernement réalisés en période d'inondation pourront être utilisées pour comparer les étendues inondées générées à partir de la méthode IRENE avec les étendues réelles.

Les niveaux d'eau ponctuels lors d'inondation, seront utilisés pour la validation des niveaux calculés dans le projet. Il s'agit ici de mesures ponctuelles réalisées par des équipes d'arpentage lors d'événements extrêmes.

Ces données seront utilisées plus tard dans le projet et se retrouveront davantage dans le rapport final.

Tableau 2 : Autres données pertinentes au projet

Type	Source	Format
Couverture des terres	Gouvernement ouvert, https://open.canada.ca/data/fr/dataset/4e615eae-b90c-420b-adee-2ca35896caf6	.tif
Étendue des inondations	MSP	.wms
Niveaux d'eau inondation 2019	CEHQ, MSP	.shp

2. Classification de la probabilité d'eau

Plusieurs éléments influencent la valeur de rétrodiffusion du signal radar en présence d'eau (angle d'incidence du signal, rugosité de l'eau, etc.). Il n'est donc pas possible de déterminer un seuil fixe au niveau des valeurs de rétrodiffusion séparant efficacement les pixels d'eau et ceux de terre. C'est pourquoi nous avons décidé d'intégrer la logique floue dans le processus de classification. Ainsi, selon différents scénarios, la probabilité d'eau sur une image radar s'effectue en faisant correspondre à chaque valeur de rétrodiffusion, une probabilité que cette valeur soit de l'eau.

Étape 1: Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'eau libre

Compilation d'un ensemble de valeurs de pixels d'eau et de terre

Tel que mentionné, la valeur de rétrodiffusion du signal radar en présence d'eau peut varier en raison de plusieurs éléments. Afin de couvrir le plus de scénario possible et ainsi d'avoir une gamme de valeurs de rétrodiffusion la plus exhaustive possible, nous avons procédé comme suit.

À l'aide d'ArcGIS et du langage de programmation Python, nous avons sélectionné au hasard dans chacun des bassins versants faisant partie de notre zone d'étude, 10 lacs et 10 cours d'eau dont la superficie était comprise entre 5000 m² et 10 000 000 m² (10 km²). Le seuil inférieur était pour s'assurer qu'un minimum de 50 pixels radar allait être couvert dans les étapes suivantes, un pixel Sentinel-1 couvrant 100 m². Le seuil supérieur était pour éviter d'avoir à gérer de trop grand plan d'eau, Google Earth Engine ayant également une limitation sur le nombre de valeurs de pixels que l'on peut extraire. Cette étape nous a permis de sélectionner 473 plans d'eau (certains bassins versants n'étant couverts qu'en partie dans la zone d'étude, le nombre de 20 plans d'eau n'a pas été atteint partout).

Ces plans d'eau nous serviront de masque afin d'extraire, sur les images radar, la valeur des pixels représentant de l'eau. Dans le but d'avoir un nombre équivalent de pixels représentant la terre (ou autre chose que de l'eau), nous avons créé des zones tampons (buffer) autour des plans d'eau. Pour chacun des plans d'eau, nous avons généré automatiquement à l'aide du langage Python, 22 zones tampons de largeur différente. Nous avons ensuite conservé, pour chaque plan d'eau, la zone tampon ayant la superficie la plus proche de celle du plan d'eau. Par exemple, pour un cours d'eau d'une largeur de 30 m, la largeur de la zone tampon sélectionnée serait de 15 m de part et d'autre. Nous avons également décidé de limiter la taille de la zone tampon à un maximum de 200 m. L'histogramme des largeurs de zone tampon est présenté à la Figure 3.

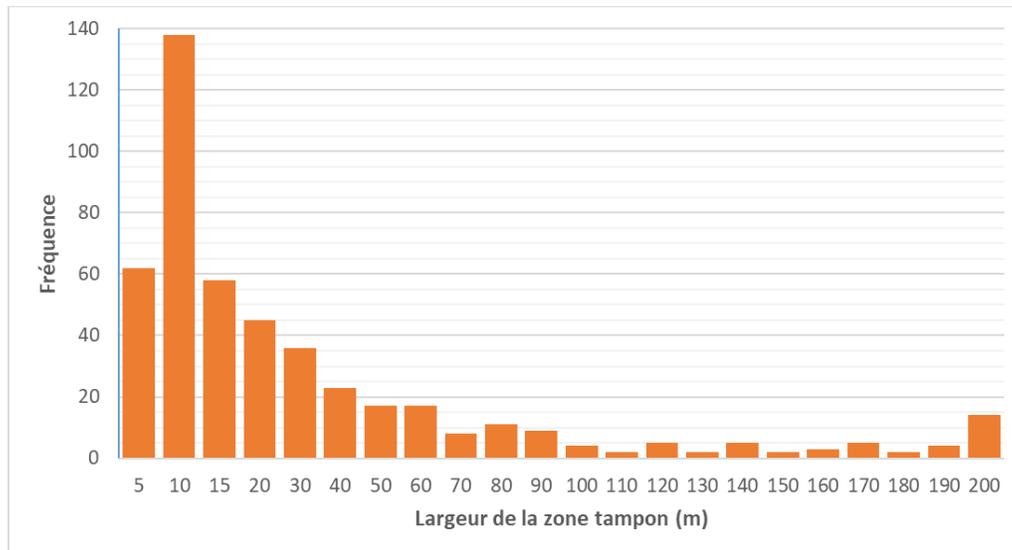


Figure 3 : Histogramme des largeurs de zones tampon. À noter que pour une largeur de zone tampon, la rivière correspondante a une largeur équivalente au double.

Par la suite, nous avons utilisé les nouveaux polygones générés (473 plan d'eau + zone tampon) comme masque afin d'extraire les valeurs de rétrodiffusion pour chacune des images Sentinel-1 acquise depuis l'été 2015. L'opération se faisant en utilisant Google Earth Engine par l'entremise d'un API Python, il n'a pas été nécessaire de télécharger et traiter chacune des images Sentinel-1 pour réaliser cette tâche. Cela représente un gain de temps important car près de 1500 images Sentinel-1 ont été utilisées ce qui a permis d'extraire 81235 ensembles de pixels (combinaison des polygones générés et des images). Il est à noter que chaque image Sentinel-1 couvre un nombre variable de stations.

Extraction des paramètres pour la classification

Chacun de ces ensembles de pixels (ie les pixels d'une image Sentinel-1 situés sous un polygone de plan d'eau avec une zone tampon) représente un nombre approximativement équivalent de pixels correspondant à de l'eau et de pixels correspondant à de la terre. Des pixels mixtes sont également présents. Ces derniers sont les pixels couvrant les rives du cours d'eau et dans lesquels il y a à la fois de l'eau et de la terre. Ils seront traités plus loin. Les valeurs de rétrodiffusion des classes *eau* et *terre* étant significativement différentes, l'histogramme de chacun des ensembles devrait idéalement être bi-modal. Nous avons donc considéré chaque histogramme comme étant le mélange des histogrammes de deux composantes et avons tenté de les séparer en utilisant des fonctions de mélanges de modèle gamma (Matgen, 2011). Pour chaque ensemble, nous avons considéré en premier lieu les valeurs comme une seule composante (ou population) et l'avons modélisée. Ensuite, nous avons répété le traitement en considérant l'ensemble comme la somme de deux composantes et avons tenté de les représenter par deux modèles gamma. Nous avons calculé le critère d'information bayésien (BIC) (Schwarz, 1978) à chaque étape (une composante, deux composantes). Le modèle avec le plus faible BIC étant généralement préférable, cela nous a

permis de déterminer si l'ensemble de pixels pouvait être efficacement séparé en deux composants. Le critère d'information d'Akaike (AIC) (Akaike, 1974) aurait également pu être utilisé. La Figure 4 présente des exemples de situation où les distributions sont bi-modales et uni-modales. Lorsque la distribution est bi-modale (Figure 4-A), le graphique de droite représente la probabilité que la valeur de rétrodiffusion x appartienne à la classe p (eau, terre).

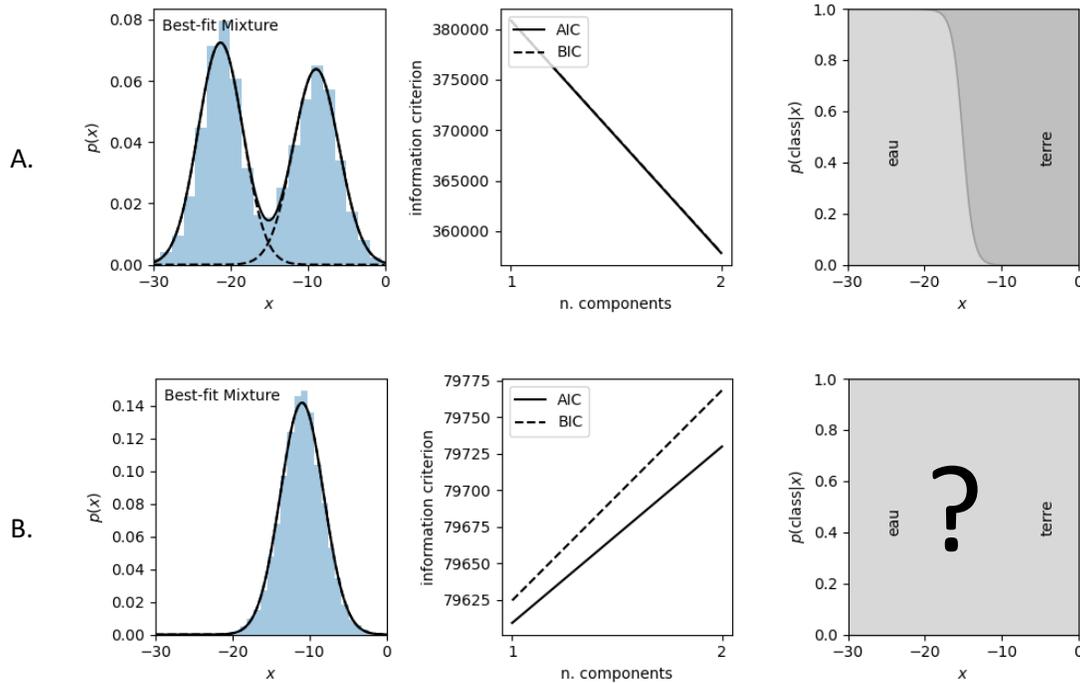


Figure 4 : Exemples d'histogramme de valeurs de rétrodiffusion sous les polygones de plans d'eau et leur zone tampon. A) Distribution pouvant être modélisée par la somme de deux composantes. B) Distribution ne pouvant être séparée en deux composantes

Ensuite, pour les distributions se modélisant efficacement comme la somme de deux composantes (57 177 distributions), nous avons extrait les valeurs du mode et du 99^e percentile de la composante *eau*. Nous avons également extrait les valeurs du 1^{er} percentile et du mode de la composante *terre*. Les valeurs extraites pour la composante *eau* et la composante *terre* forme à leur tour de nouvelles distributions. La Figure 5 montre un histogramme des valeurs du mode de la classe *eau* pour les 57 177 distributions. Cet histogramme est de nouveau bi-modal. La raison est que les distributions sont formées des valeurs de pixels extraites sur des cours d'eau de différentes tailles. Pour les plus petits cours d'eau, soit ceux dont la largeur équivaut à 4-5 pixels de l'image Sentinel-1, soit 40-50 m, la proportion de pixels mixtes est très importante. Si les distributions sont séparées par taille de cours d'eau et que seuls ceux dont la taille est plus grande que 50 m sont conservés, nous remarquons que la distribution devient unimodale (Figure 6) et peut être plus efficacement modélisé par un modèle gaussien.

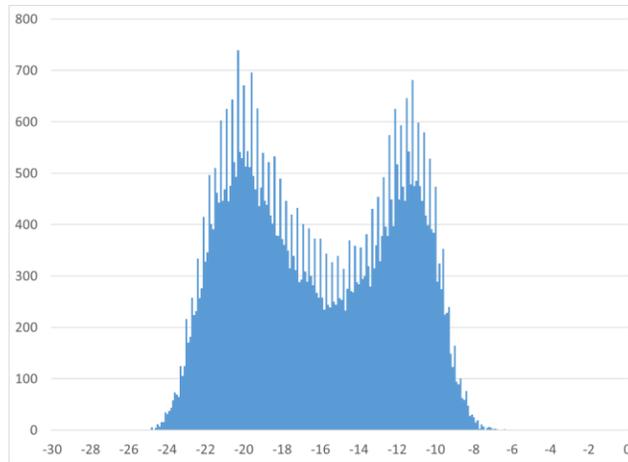


Figure 5 : histogramme des valeurs du mode de la classe eau pour toutes les distributions bi-modales (57 177 distributions)

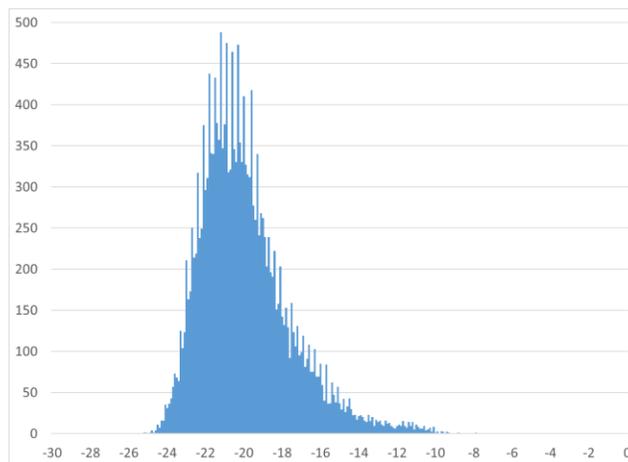


Figure 6 : histogramme des valeurs du mode de la classe eau pour les distributions bi-modales dont la taille de la zone tampon est plus grande ou égale à 50 m (19 448 distributions)

Si nous faisons l'exercice de représenter par un modèle gaussien les distributions de valeurs du mode de l'eau pour des cours d'eau de taille plus grande ou égale à un seuil, nous remarquons que les modèles convergent vers une moyenne autour de -20 dB à partir d'un seuil de 50 m (Figure 7). Pour le mode de la classe *eau*, nous utiliserons les paramètres du modèle gaussien calculé à partir de ce seuil pour la classification. Pour le 99^e percentile de la classe *eau*, nous utiliserons le même seuil. En comparaison de la Figure 7, la Figure 8 montre que les valeurs de mode de la classe *terre* ne sont pas affectées par la taille de la rivière, la moyenne du mode de la *terre* se situant toujours entre -10 et -9 dB.

Le seuil de 50 m utilisé à cette étape ne sert qu'à sélectionner des rivières et lacs qui donneront des distributions de pixels d'eau « les plus purs possible » afin de calculer les paramètres à utiliser lors de la classification des images Sentinel-1. Le seuil n'est pas un indicateur, pour le moment, de la taille des plans d'eau sur lesquels la méthode développée pourra être appliquée.

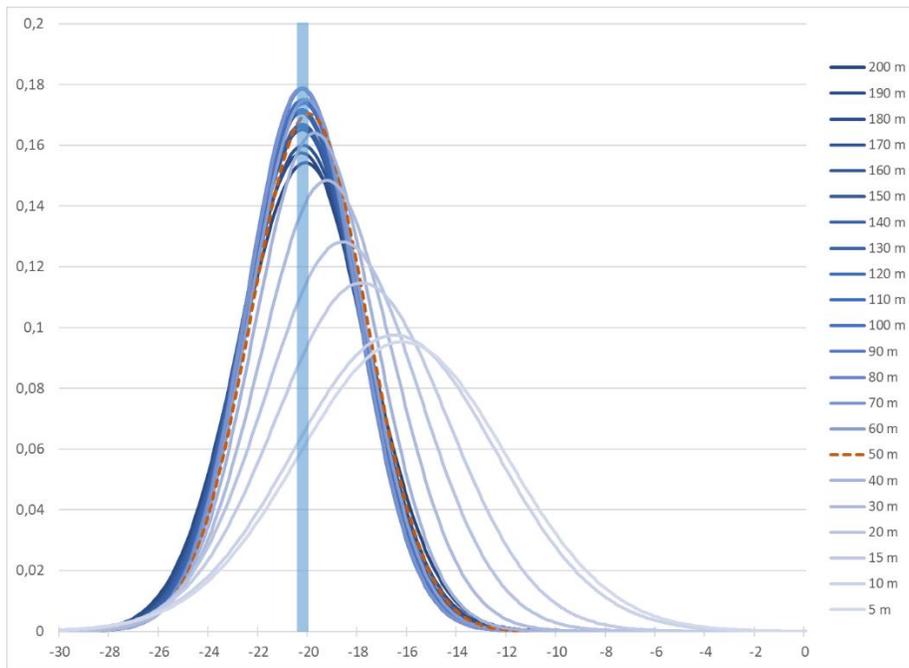


Figure 7 : Modèle gaussien représentant les distributions des valeurs de mode pour la classe eau en fonction d'un seuil de taille de zone tampon. Les tailles plus grandes ou égales aux seuils sont considérées dans le modèle.

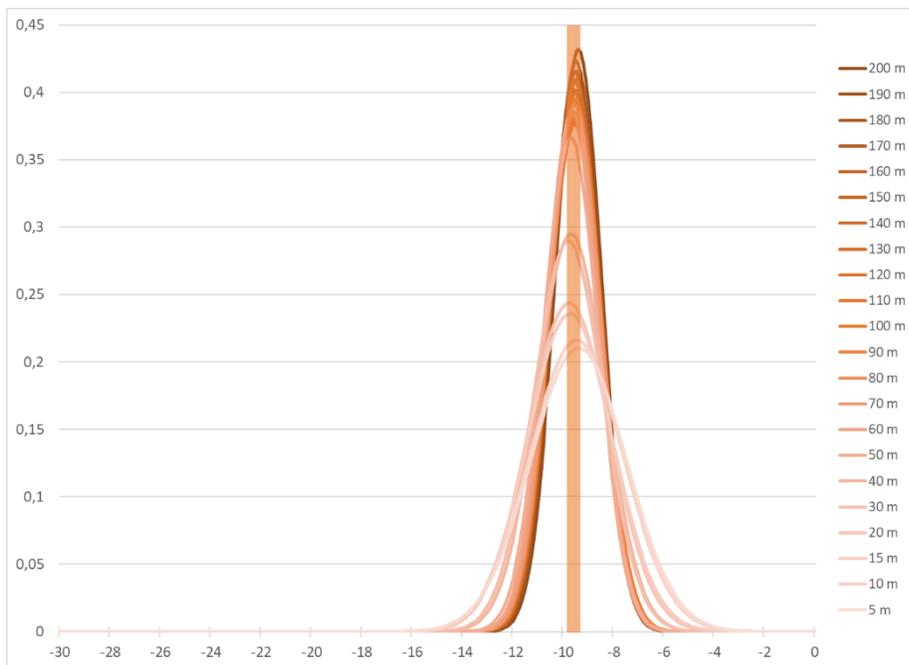


Figure 8 : Modèle gaussien représentant les distributions des valeurs de mode pour la classe terre en fonction d'un seuil de taille de zone tampon. Les tailles plus grandes ou égales aux seuils sont considérées dans le modèle.

Étape 2: Classification par logique floue des objets d'eau libre

Afin de tenir compte de la superposition quasi-systématique d'une partie des valeurs de rétrodiffusion des plans d'eau et des valeurs de rétrodiffusion d'autres types de couvertures du sol, une approche de classification suivant les règles de la logique floue a été utilisée. L'intérêt des théories des ensembles flous est qu'elles permettent d'estimer le degré d'appartenance de chaque élément d'un ensemble à une classe donnée, selon la valeur de rétrodiffusion de cet élément à l'intérieur des limites de l'ensemble. Une fonction d'appartenance standard de forme Z (MathWorks, 2022) a été utilisée pour estimer la probabilité d'appartenance à la classe eau de chaque pixel (Figure 9). D'après cette fonction, plus la valeur moyenne de rétrodiffusion des objets de l'image est faible, plus fort sera son degré d'appartenance à la classe eau. Elle est ainsi adaptée à l'évaluation du degré d'appartenance des objets représentant de l'eau libre, généralement caractérisés par de très faibles valeurs de rétrodiffusion.

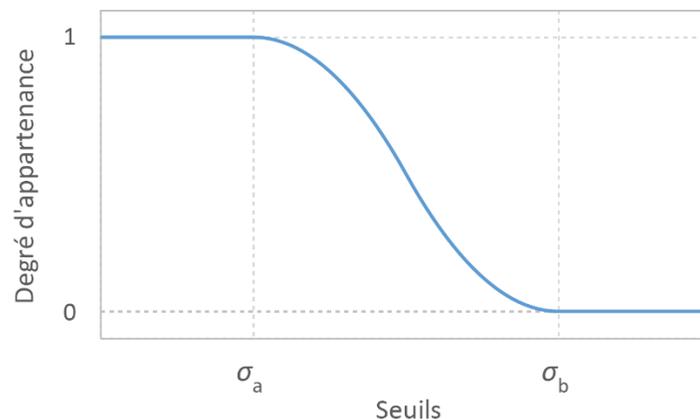


Figure 9 : Fonction d'appartenance de forme Z

Les deux paramètres importants de la fonction d'appartenance en Z sont les seuils σ_a et σ_b entre lesquels la fonction est décroissante. Dans notre cas, ces seuils correspondent au mode et au 99^e percentile de la classe *eau* extraits à l'étape précédente sur les 19 448 distributions de pixels conservés. Afin de tenir compte de la variabilité des valeurs de mode et du 99^e percentile dans l'application de la fonction d'appartenance en Z, nous avons sélectionné trois valeurs stratégiques pour chaque distribution, soit la valeur moyenne (mode), ainsi que la valeur moyenne plus ou moins la racine de 3 multiplié par l'écart-type. En combinant ces six valeurs, il est possible de générer neuf scénarios, ou fonctions d'appartenance différentes. Comme les valeurs de mode et de 99^e percentile utilisées n'ont pas toutes la même probabilité d'occurrence à l'intérieur de leur distribution, un poids différent a été utilisé pour chacune d'elles. Ainsi, dans chaque distribution (mode et 99^e percentile), la valeur du mode étant la plus fréquente, un poids de 2/3 lui a été assigné. Pour obtenir un poids total égal à un, Les deux autres valeurs ont reçu un poids de 1/6. Ces poids ont ensuite servi à pondérer chacune des neuf fonctions d'appartenance, lesquelles ont été combinées pour calculer la probabilité finale en utilisant l'équation 1.

$$\begin{aligned}
P_{eau} = & \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} \cdot F(x: \sigma_{a-}, \sigma_{b-}) + \frac{1}{6} \cdot \frac{2}{3} \cdot F(x: \sigma_{a-}, \sigma_b) + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} \cdot F(x: \sigma_{a-}, \sigma_{b+}) + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{6} \\
& \cdot F(x: \sigma_a, \sigma_{b-}) + \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot F(x: \sigma_a, \sigma_b) + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{6} \cdot F(x: \sigma_a, \sigma_{b+}) + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} \\
& \cdot F(x: \sigma_{a+}, \sigma_{b-}) + \frac{1}{6} \cdot \frac{2}{3} \cdot F(x: \sigma_{a+}, \sigma_b) + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} \cdot F(x: \sigma_{a+}, \sigma_{b+})
\end{aligned} \tag{1}$$

Où

σ_a et σ_b représente les valeurs du mode de chaque distribution,

σ_{a-} , σ_{a+} , σ_{b-} et σ_{b+} représente les valeurs du mode de chaque distribution plus ou moins $\sqrt{3} \times$ l'écart-type

L'application de l'équation 1 sur une image Sentinel-1 permet d'obtenir une probabilité d'appartenance à la classe *eau* pour chaque pixel (Figure 10).

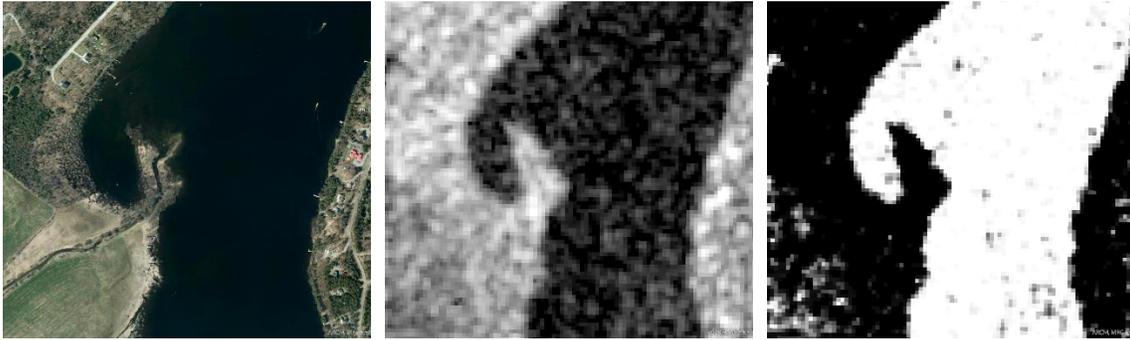


Figure 10 : Classification de la probabilité d'occurrence de l'eau à partir de l'image Sentinel-1. Gauche : Image visible du cours d'eau (date indéterminée). Milieu : Image Sentinel-1 du 1^{er} juin 2019. Droite : Probabilité d'occurrence de l'eau d'après l'image Sentinel-1 (noir = 0%, blanc = 100%)

3. Estimation des hauteurs sur toute la plaine inondable

Étape 3: Désagrégation de la classification de l'eau libre

Pour ramener les résultats de la classification de l'eau (probabilité de présence de l'eau dans le pixel) issue de l'image radar (10 m) à la même résolution que celle du modèle numérique de terrain (1 m), une désagrégation spatiale est faite à l'aide du modèle HAND.

Le modèle HAND, pour Height Above the Nearest Drainage, consiste en un modèle numérique d'élévation normalisé à l'altitude de la rivière. Chaque pixel du modèle représente la différence de hauteur entre l'altitude en ce point et l'altitude du pixel sur la rivière dans lequel il s'écoule (Figure 11). Pour générer le modèle HAND, des prétraitements doivent être effectués sur le modèle numérique de terrain pour assurer un écoulement cohérent, soit une correction des élévations sur la surface de la rivière pour enlever les artefacts liés à l'interpolation, le remplissage des cuvettes et l'intégration des ponceaux dans le modèle numérique de terrain. Le modèle de direction d'écoulement est ensuite calculé et le modèle HAND est généré pour la partie du plan d'eau à l'étude.

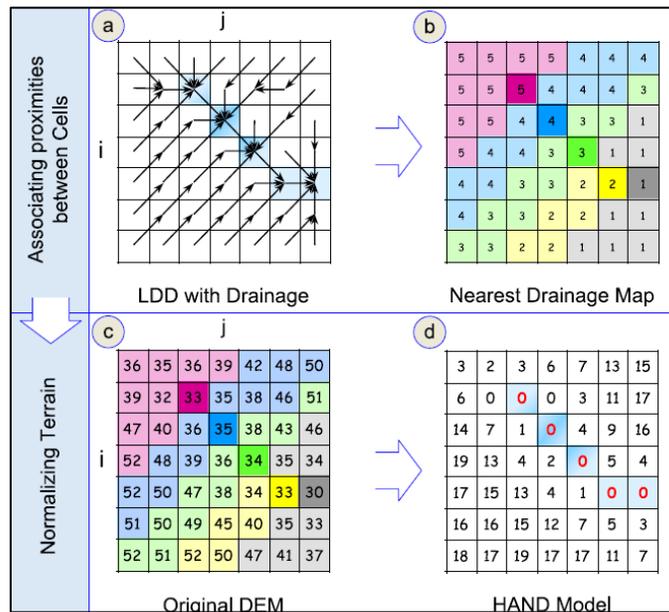


Figure 11 : Approche HAND (tirée de Nobre et al., 2011).

À partir du modèle HAND créé sur la plaine inondable, la carte de probabilité d'eau à 10 m peut être désagrégée à une résolution de 1 m. Un pixel de 10 m (par 10 m) correspond alors à 100 pixels de 1 m². La désagrégation est effectuée sur les pixels dont la probabilité d'appartenance à la classe d'eau est > 0% et < 100%. Pour ces pixels, la probabilité d'appartenance à la classe eau agit comme un seuil et est interprétée comme un centile. Les pixels du HAND dont la valeur est inférieure à ce centile sont considérés comme de l'eau. Par exemple, si un pixel de la carte de probabilité produite à partir de l'image Sentinel-1 a une valeur de 40%, nous supposons qu'il devrait être composé de 40% d'eau. Ainsi, nous considérons que parmi les 100 pixels du modèle HAND couvert par ce pixel Sentinel-1, les 40 pixels ayant les valeurs de HAND les plus faibles sont ceux qui devraient être de l'eau (Figure 12). Nous pouvons ainsi dire que le niveau de l'eau se situe aux environs du 40^e percentile de ce groupe de pixels. En procédant pixel par pixel au niveau de la carte de probabilité, cela peut occasionner des discontinuités à l'échelle du modèle HAND lors du passage d'un pixel de probabilité à un autre. Afin d'uniformiser la valeur de HAND utilisée, la valeur (moyenne) de toutes les valeurs extraites du HAND par les centiles est utilisée comme seuil final à appliquer à l'ensemble de la plaine inondable.

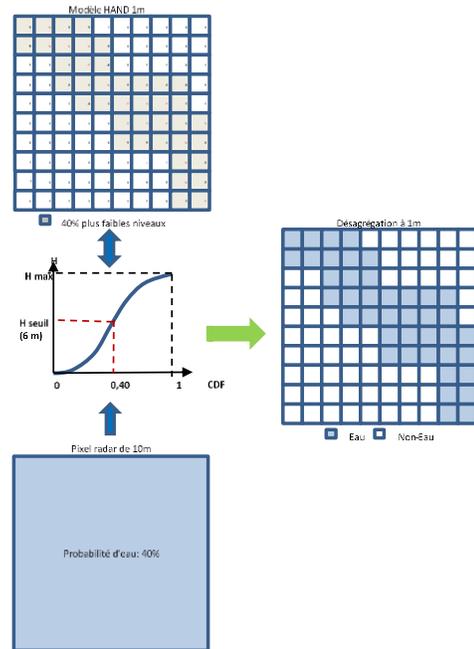


Figure 12 : Schématisation du processus de désagrégation spatiale en utilisant les probabilités déterminées par l'imagerie Sentinel-1 et les élévations du modèle HAND

La matrice de surface mouillée résultante n'est donc plus une carte de probabilité mais une matrice binaire (Eau libre, Non-Eau) à une résolution spatiale de 1 m x 1 m. La Figure 13 montre l'application de cette méthode. Il est possible de remarquer sur le modèle HAND deux petits affluents au nord-est de la rivière principale. Ces affluents, dont les rives sont végétalisées, n'apparaissent pas sur la matrice de probabilité d'occurrence de l'eau. En combinant les deux jeux de données, il est possible de mieux représenter la région submergée.

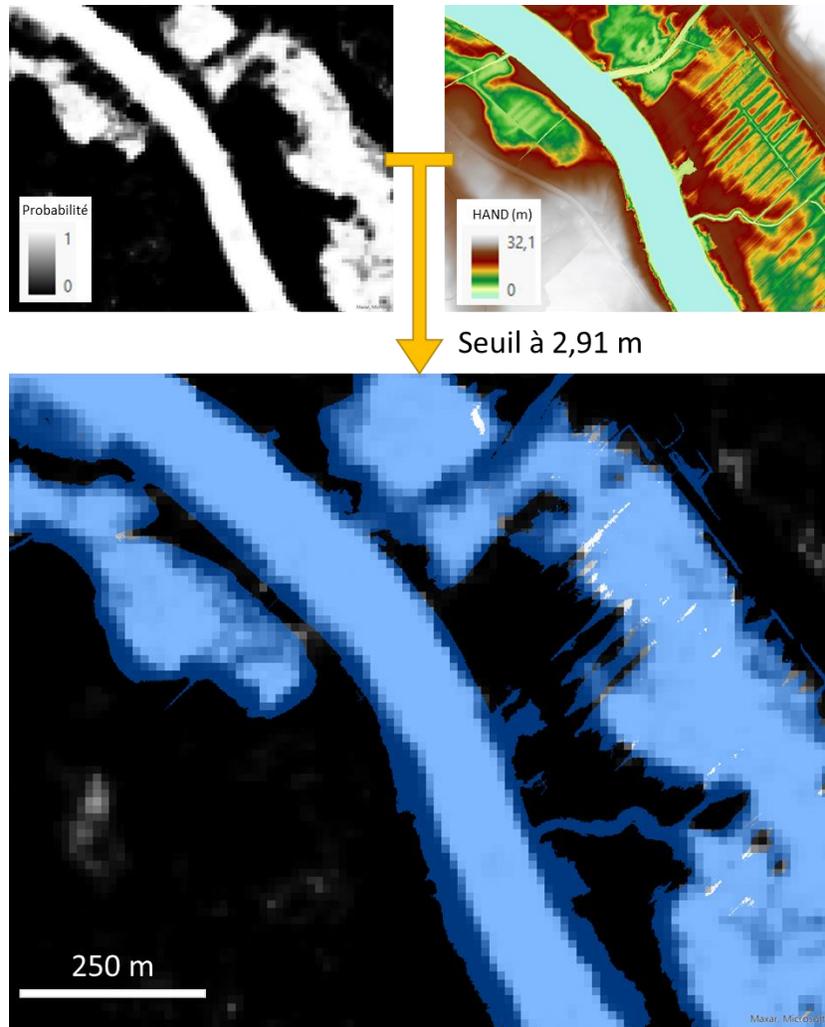


Figure 13 : Désagrégation spatiale en combinant les probabilités d'occurrence de l'eau à une résolution de 10 m et un modèle HAND à une résolution de 1 m. (Note : les couleurs du modèle HAND ont été rehaussée pour montrer le détail des zones de basse valeur. Les couleurs ne correspondent pas avec la disposition linéaire montrée dans la légende)

Étape 4: Estimation des hauteurs d'eau sur les secteurs d'eau libre

La profondeur de submersion est obtenue en prenant la valeur du seuil déterminé par les centiles et en soustrayant les valeurs du HAND en tout point de la zone *eau* (Figure 14 et Figure 15). Le niveau d'eau absolu peut également être calculé en ajoutant les profondeurs de submersions au niveau du modèle numérique de terrain.

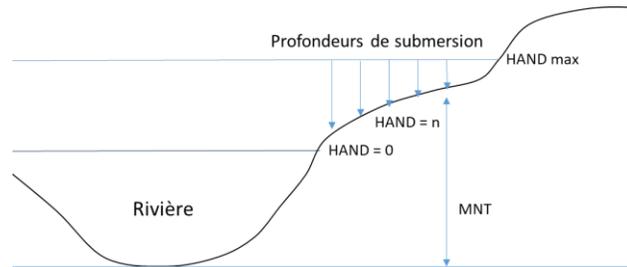


Figure 14 : Calcul de la profondeur de submersion

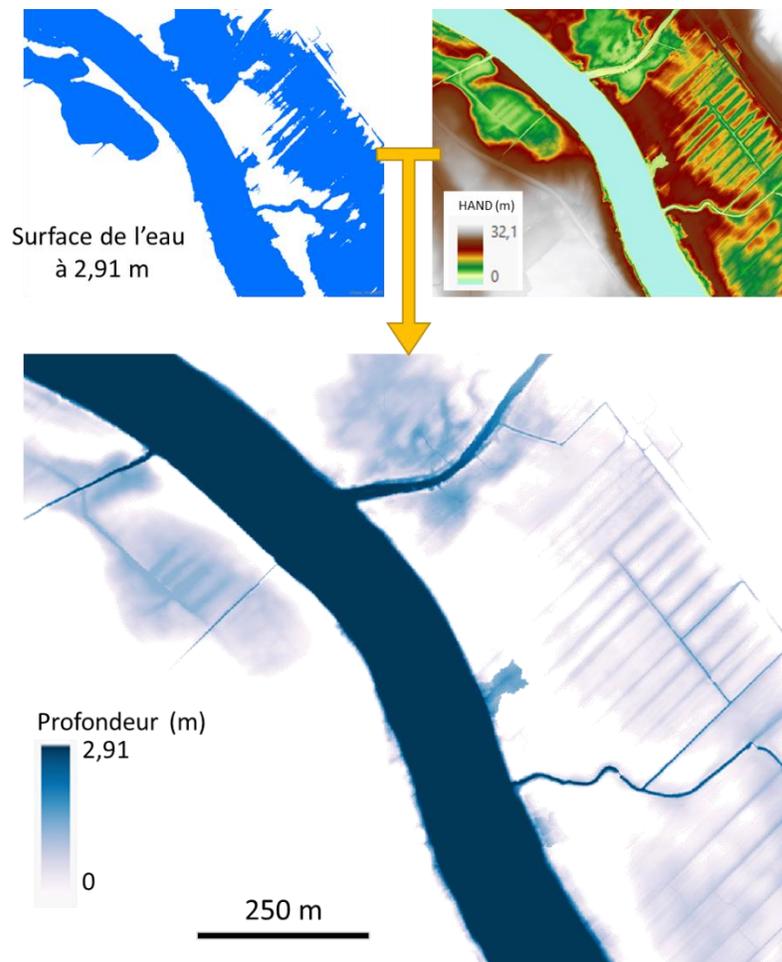


Figure 15 : Profondeur de submersion obtenue en soustrayant les valeurs du HAND d'une surface d'élévation constante (par rapport au HAND)

La Figure 16 montre le résultat des différentes étapes réalisées pour un tronçon de 7 km de la rivière Chaudière lors de l'inondation de 2019.

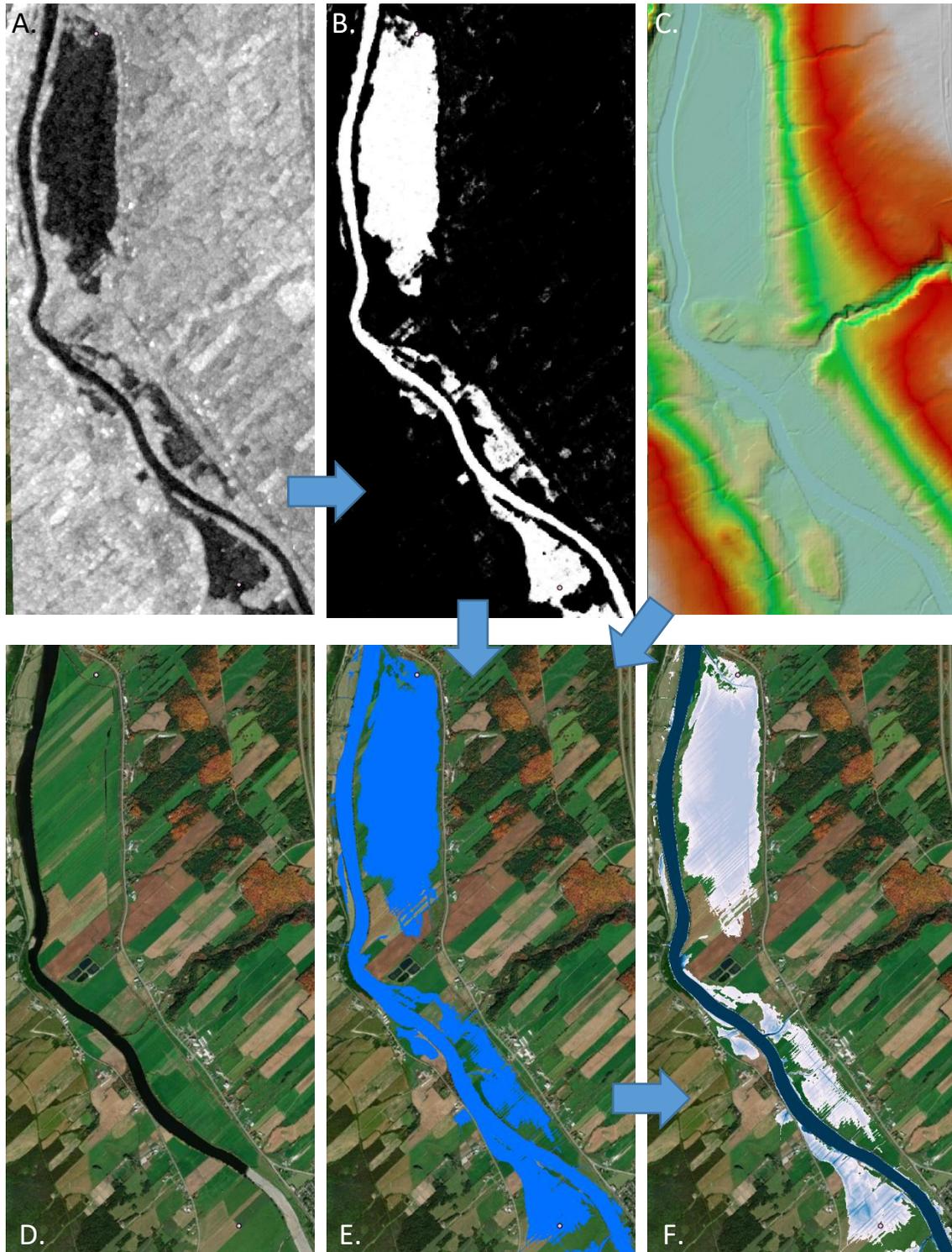


Figure 16 : Processus de classification des zones submergées (Rivière Chaudière, 26 avril 2019, zone de 3 km x 6 km). A) image Sentinel-1, B) probabilité d'appartenance à la classe eau, C) modèle HAND dérivé du MNT, D) image du secteur (date indéterminée), E) étendu de la surface submergée, et F) profondeur de submersion de la zone inondée

Activités à venir

4. Calcul de l'incertitude

Comme tout modèle, le modèle IRENE n'est qu'une simplification plus ou moins représentative du système physique auquel il est rattaché. Par conséquent, le modèle est entaché d'un niveau plus ou moins élevé d'incertitude ou d'erreur qui affecte la qualité de ses prédictions. L'incertitude dans un modèle provient de plusieurs sources soit au niveau de sa structure mathématique, des données qui ont servi à le bâtir et à le calibrer ainsi que des paramètres et des données d'entrée qui sont utilisées. Ici, les données d'entrée sont le MNT et l'image Radar. L'erreur sur les sorties ainsi que les différentes contributions sont souvent décrites par leurs moments statistiques (moyenne, variance, coefficient d'asymétrie, etc.).

Pour les estimer, nous utiliserons dans la présente étude, la méthode proposée par Torvi et Hertzberg (1997). Cette méthode ne traite pas la propagation de l'incertitude des entrées vers les sorties d'un modèle comme étant un problème de variables aléatoires mais plutôt comme un problème d'intégration, dont les techniques de résolution numérique sont précises et approuvées. Cette approche a été testée avec succès par Chokmani et al. (2001) dans un contexte de modélisation bioclimatique et plus récemment par El Alem et al. (2019), dans le suivi des fleurs d'eau d'algues par imagerie satellitaire ou encore par Oubennaceur et al. (2018, 2019) en modélisation hydrodynamique.

5. Validation des résultats

La méthode sera développée et validée en fonction des données de débits, de niveaux et de lignes d'eau disponibles (stations hydrométriques, relevés et sondes du MELCC, survols aériens du MSP) ainsi que des données LIDAR disponibles. Sur chaque secteur choisi, nous définirons un ou plusieurs tronçons où les données complètes sont disponibles.

Ainsi, dans un premier temps, la validation à partir des niveaux d'eau mesurés par les stations de la DEH ou du COBARIC permettra d'identifier les secteurs où la cartographie radar des zones d'eau libre est la plus efficace (occupation du sol, relief, forme du chenal). Nous évaluerons également la qualité de la mesure estimée par l'approche IRENE. Dans un deuxième temps, nous raffinerons l'approche sur les secteurs prometteurs préalablement identifiés et nous y ferons l'acquisitions de mesures ponctuelles de niveaux d'eau, simultanément à l'acquisition de nouvelles images radar. Il est proposé que lors de crues à venir, le MELCC avisera l'INRS qui enclenchera alors un survol de drone équipé d'un capteur optique afin de documenter la limite de l'inondation sur un secteur d'intérêt afin de pouvoir comparer les résultats de l'approche IRENE avec une méthode alternative mesurée sur le terrain. Des mesures ponctuelles de niveaux d'eau pourraient également être prises à ce moment. Un minimum de deux personnes seraient nécessaires pour ces travaux. Cela permettra de préciser la qualité des estimations sur plusieurs secteurs et d'établir les meilleurs sites de stations virtuelles. Au fil du projet, des sites d'application potentielle pourraient s'ajouter selon les crues à venir et les données disponibles.

Il est à noter que l'utilisation d'images radar en polarisation horizontale (HH) est généralement préférée à celle de données acquises en polarisation verticale (VV), car elle permet généralement d'obtenir un meilleur contraste entre l'eau libre et le reste de l'occupation du sol. Les données

Sentinel-1 sont en polarisation VV. Par contre, dans un futur rapproché, des données en polarisation HH de la constellation RADARSAT, de l'agence spatiale canadienne seront également disponibles gratuitement en temps quasi-réel. Il est donc prévu de tester la méthode sur ces données en fin de projet.

6. Codage

Chaque étape de la méthodologie sera d'abord codée et automatisée individuellement durant la phase de développement afin de permettre différentes itérations et tests de la méthode et des paramètres utilisés. Le travail est échelonné tout au long du projet. Nous envisageons ici une série de scripts en Python qui permettent de réaliser automatiquement toutes les étapes de l'approche. De tels scripts pourraient ensuite être intégrés tels quels ou traduits, dans les outils du MELCC. À la fin de la deuxième phase, les modules seront intégrés pour créer un prototype d'outil qui reproduit toute la séquence. Dans cet outil, les images Sentinel-1 seront récupérées automatiquement via Google Earth Engine, une API qui permet d'avoir un accès facile aux données satellitaires gratuites, dans un format déjà corrigé géométriquement et radiométriquement. La procédure avec les images de la constellation Radarsat n'est pas encore connue. Les étapes subséquentes pourront être intégrées à l'intérieur d'un exécutable développé en langage Python, lequel utilisera certaines bibliothèques d'ArcGIS et de l'API pour Google Earth Engine. Le programme pourra ainsi fonctionner en continu et donc mettre à jour les niveaux d'eau lorsque de nouvelles images satellites seront acquises. Les niveaux d'eau seront inscrits dans des fichiers textes (CSV) avec leur incertitude associée. D'autres résultats seront également conservés sous la forme matricielle : profondeurs de submersions, niveau d'eau absolu, surface mouillée raffinée avec le modèle HAND (1 m x 1 m) et la carte de probabilité issue de l'imagerie radar (10 m x 10 m). Un guide d'utilisation sera produit.

Plan de travail et calendrier

Selon le calendrier du projet (Tableau 1), les activités 1, 2 et 3 sont terminées ou en voie de l'être. Les activités 4 et 5 ne sont pas débutées à ce jour mais seront les prochaines étapes à être réalisées. L'activité 6 est quant à elle en cours de réalisation car la tâche d'automatisation est essentielle à chacune des activités du projet. L'intégration dans un prototype ou une application existante se fera plus tard.

Un changement de personnel et des problèmes informatiques (cyber-attaque contre l'INRS) ont fait en sorte qu'un certain retard a été pris dans le projet. Les problèmes informatiques n'étant toujours pas complètement résolus après 2 mois et demi, nous ne sommes pas confiants qu'ils le seront sous peu. Le retard occasionné par ces éléments nous pousse à demander un report de la date de fin du projet prévue pour juillet 2023. Un report de trois mois serait souhaitable.

Tableau 3 : Calendrier de réalisation révisé des activités du projet

Titre de l'activité	Principales tâches	2021			2022					2023																
		A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	
1. Mise en place de la base de données	<ul style="list-style-type: none"> - Choix des zones d'étude - Collecte des données - Structuration des données 																									
2. Classification de la probabilité d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Prétraitement images radar - Calcul FDP - Détermination de la fonction Z et des seuils - Classification par logique floue des objets d'eau libre 																									
3. Estimation des hauteurs sur toute la plaine inondable	<ul style="list-style-type: none"> - Création du modèle HAND - Désagrégation de la carte d'eau à 1m - Calcul des profondeurs de submersion 																									
4. Calcul de l'incertitude	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul propagation d'erreur 																									
5. Validation des résultats	<ul style="list-style-type: none"> - Validation zone inondée - Choix des sites optimaux - Survol de drone avec un capteur optique - Mesures de niveaux - Validation niveaux estimés 																									
6. Codage	<ul style="list-style-type: none"> - Automatisation - Intégration dans prototype 																									

Annexe A

Tableau 4 : Statistiques des données de niveau d'eau pour les 105 stations retenues

Station	Latitude	Longitude	Nom	Description	Nb_jours avec niveau quotidien	Début données extraites	Min Niveau* m	Max Niveau* m	Moy Niveau* m	SD Niveau* m	Étendue Niveau* m
023402	46,58694	-71,21361	Chaudiere	au pont-route 218 a Saint-Lambert-de-Lauzon	2572	2015-01-01	111,98	116,78	112,64	0,56	4,8
023409	45,57310	-70,88040	Barrage Megantic	au lac Megantic a Lac-Megantic	2577	2015-01-01	393,95	395,61	394,38	0,18	1,66
023446	46,09594	-70,65074	Barrage Sartigan	a 0,2 km en amont du barrage Sartigan	2580	2015-01-01	172,46	176,01	173,98	0,41	3,55
023450	46,41147	-71,24427	Beaurivage	au pont-route Saint-Charles a Saint-Patrice-de-Beaurivage	429	2020-11-18	47,82	48,77	48,25	0,11	0,95
023451	45,99822	-70,91796	Bras Saint-Victor	a 3,5 km en aval de La Guadeloupe	531	2020-08-11	47,04	48,1	47,24	0,18	1,06
024004	46,21990	-71,77700	Bourbon	a 02 km en amont du pont de la rue Savoie a Plessisville	430	2020-11-20	48,89	49,59	49,	0,1	0,7
02LA015	45,43140	-75,70620	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A HULL		2515	2014-02-01	40,97	45,17	41,95	0,69	4,2
02LA027	45,43990	-75,69290	RIDEAU RIVER ABOVE RIDEAU FALLS		2460	2014-02-01	3,98	5,49	4,75	0,21	1,51
02LB033	45,52070	-75,35830	BECKETTS CREEK NEAR BECKETTS CREEK		1928	2014-02-01	9,46	11,82	9,69	0,34	2,36
02MC005	45,33440	-73,96210	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A POINTE-DES-CASCADES		2526	2014-02-01	20,78	22,64	21,66	0,41	1,86
02OA003	45,66290	-73,75220	MILLE ILES (RIVIERE DES) A BOIS-DES-FILION		2526	2014-02-01	0,6	2,61	1,42	0,4	2,01
02OA013	45,40470	-73,95660	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A SAINTE-ANNE-DE-BELLEVUE		2526	2014-02-01	21,34	24,66	22,21	0,58	3,32

02OA016	45,41500	-73,62320	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LASALLE		2526	2014-02-01	0,68	2,23	1,4	0,35	1,55
02OA033	45,40250	-73,94880	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A LA MARINA DE SAINTE- ANNE-DE-BELLEVUE		2526	2014-02-01	20,73	22,69	21,6	0,42	1,96
02OA039	45,42770	-73,82070	SAINT-LOUIS (LAC) A POINTE-CLAIRE		2524	2014-02-01	20,7	22,56	21,55	0,42	1,85
02OA041	45,46490	-73,50590	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LA PRAIRIE		2158	2014-08-27	9,65	11,28	10,29	0,36	1,63
02OA107	45,38910	-73,99810	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A TERRASSE-VAUDREUIL		2526	2014-02-01	21,32	24,62	22,2	0,58	3,3
02OB011	45,95940	-73,21460	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LANORAIE		2526	2014-02-01	3,82	7,56	5,21	0,68	3,75
02OE012	45,26750	-72,16150	MEMPHREMAGOG (LAC) A MAGOG		2526	2014-02-01	207,07	208,58	207,7	0,23	1,5
02OH001	45,03980	-73,07970	CHAMPLAIN (LAC) A PHILIPSBURG		2526	2014-02-01	3,98	6,29	4,84	0,49	2,31
02OJ007	45,39850	-73,25840	RICHELIEU (RIVIERE) AUX RAPIDES FRYERS		2526	2014-02-01	0,53	2,22	1,18	0,38	1,69
02OJ016	45,30230	-73,25010	RICHELIEU (RIVIERE) A LA MARINA DE SAINT-JEAN		2525	2014-02-01	-0,02	1,86	0,69	0,39	1,88
030118	46,06914	-71,97661	Barrage Beaudet	au reservoir Beaudet a Victoriaville	2577	2015-01-01	128,68	129,94	128,98	0,14	1,26
030120	45,98269	-72,16338	Nicolet	a 6,5 km en aval de Saint-Albert	780	2019-12-05	99,17	100,79	99,5	0,26	1,62
030201	45,95092	-71,27406	Barrage Jules-Allard	au lac Saint-Francois a Saint-Joseph-de- Coleraine	2577	2015-01-01	283,73	290,22	288,32	1,33	6,49
030202	45,76047	-71,40616	Barrage Aylmer	au lac Aylmer a Weedon	2577	2015-01-01	245,91	248,62	247,64	0,48	2,71
030234	45,46797	-71,65497	Eaton	a 06 km de la riviere Saint-Francois	2577	2015-01-01	25,15	28,45	25,68	0,34	3,3
030241	45,27631	-71,97350	Lac Massawippi	au quai passerelle a North-Hatley	2566	2015-01-01	160,13	161,83	160,66	0,25	1,7
030242	45,34059	-71,56729	Eaton	en aval du pont-route 210 a Sawyerville	793	2019-11-20	253,66	255,12	253,92	0,2	1,46

030247	45,47081	-72,13153	Barrage Bombardier	au lac Brompton a Saint-Denis-de-Brompton	2577	2015-01-01	238,09	238,7	238,43	0,08	0,61
030268	45,39397	-72,22606	Barrage Stukely	au lac Stukely a Orford	2577	2015-01-01	284,23	284,69	284,4	0,07	0,46
030283	45,27919	-71,89147	Barrage de Waterville	sur la riviere Coaticook a Waterville	2577	2015-01-01	188,19	189,71	188,76	0,11	1,52
030289	45,73811	-71,42192	Lac Louise	a Weedon	2577	2015-01-01	242,6	245,04	242,96	0,27	2,44
030296	45,80625	-71,32600	Lac Aylmer	au quai de la municipalite de Stratford	2578	2015-01-01	246,36	248,75	247,7	0,43	2,39
030297	45,03639	-71,91176	Barrage Lyster	a Coaticook	2578	2015-01-01	470,61	471,27	470,98	0,11	0,66
0302A1	45,34239	-71,85632	Aux Saumons	a 13 km de son embouchure dans la riviere Massawipi	424	2020-11-23	46,18	47,47	46,44	0,18	1,29
030302	45,28267	-72,96622	Yamaska	a 06 km en amont du pont-route de la 235 a Farnham	2555	2015-01-01	62,63	63,99	62,86	0,2	1,37
030314	45,20622	-72,74758	Yamaska Sud-Est	au pont-route 202 a Cowansville	2551	2015-01-01	29,93	31,53	30,31	0,22	1,6
030326	45,41736	-72,60960	Barrage Choiniere	sur la riviere Yamaska Nord a Roxton Pond	2577	2015-01-01	139,83	143,68	142,1	0,92	3,85
030332	45,33833	-72,51601	Lac Waterloo	au lac Waterloo a Waterloo	2577	2015-01-01	207,86	208,47	208,08	0,07	0,61
030342	45,35013	-72,51542	Barrage de Waterloo	a Waterloo	2577	2015-01-01	207,74	208,23	208,01	0,07	0,49
030345	45,62886	-72,93908	Yamaska	a 18 km en aval du barrage a Saint-Hyacinthe	2575	2015-01-01	18,77	23,25	19,58	0,69	4,48
030350	45,22639	-72,50494	Lac Brome	a la plage municipale de la ville de Lac-Brome	2579	2015-01-01	196,03	197,2	196,68	0,26	1,17
030354	45,30000	-72,70125	Yamaska	au pont de la rue de Soulanges a Bromont	1186	2018-10-25	104,32	106,05	104,65	0,25	1,73
030430	45,07719	-73,32556	Richelieu	au centre de plein air l'Estacade a Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix	2578	2015-01-01	28,37	30,57	29,14	0,44	2,2
030905	45,33034	-73,76223	Châteauguay	a 2 km en amont du pont-route 132	2577	2015-01-01	28,52	32,31	29,12	0,55	3,79

040101	46,18256	-74,27667	Barrage de la Montagne-Noire	au lac de la Montagne Noire a Lantier	2577	2015-01-01	453,08	453,69	453,38	0,1	0,61
040102	46,12708	-74,30672	Barrage Papineau	au lac Papineau a Sainte-Agathe-des-Monts	2577	2015-01-01	375,17	376,23	375,66	0,13	1,06
040103	46,11898	-74,27535	Barrage Ludger	au lac Ludger a Sainte-Agathe-des-Monts	2577	2015-01-01	374,87	375,71	375,36	0,12	0,84
040104	46,08318	-74,27974	Barrage Brûle	au lac Brûle a Sainte-Agathe-des-Monts	2577	2015-01-01	366,48	367,61	367,05	0,15	1,13
040105	46,09097	-74,42692	Barrage Cornu	au lac Cornu a Saint-Faustin--Lac-Carre	2577	2015-01-01	389,27	389,85	389,62	0,09	0,58
040106	46,07442	-74,33600	Barrage Manitou	au lac Manitou a Sainte-Agathe-des-Monts	2577	2015-01-01	389,33	389,9	389,57	0,07	0,57
040107	46,05303	-74,30800	Barrage des Sables	au lac des Sables a Sainte-Agathe-des-Monts	2577	2015-01-01	376,17	377,18	376,77	0,15	1,01
040108	46,03069	-74,05572	Barrage Masson	au lac Masson a Sainte-Marguerite--Esterel	2577	2015-01-01	334,67	335,33	335,13	0,11	0,66
040109	45,96169	-74,24767	Barrage Theodore	au lac Theodore a Val-Morin	2577	2015-01-01	365,29	366,48	365,89	0,19	1,19
040134	45,76693	-74,13730	Bonniebrook	en amont du pont de la rue du Mont Castel	651	2019-11-19	45,9	47,61	46,46	0,32	1,71
040135	45,58142	-74,36046	Du Nord	a 8 km de l'embouchure a Saint-Andre-d'Argenteuil	782	2019-12-03	46,82	49,05	47,4	0,46	2,23
040238	46,11469	-74,60169	Du Diable	a 100 metres en amont du pont de la route 117	2578	2015-01-01	194,62	198,05	195,19	0,5	3,43
040239	46,21078	-74,94681	Barrage Chapleau	au lac Chapleau a La Minerve	2573	2015-01-01	266,26	266,92	266,47	0,07	0,66
040240	45,91108	-74,77000	Maskinonge	1 km en amont de Boileau	496	2020-08-14	47,1	49,13	47,78	0,38	2,03
040241	46,36480	-74,81680	Rouge	a 8 km en aval de la ville de Riviere-Rouge	414	2020-12-02	44,17	46,2	44,88	0,41	2,03
040407	45,87675	-75,08336	Lac Barriere	au barrage	527	2020-08-13	197,75	198,6	198,12	0,16	0,85
040602	46,10124	-75,64807	Barrage des Rapides-des-Cedres	au lac du Poisson Blanc a Notre-Dame-du-Laus	2577	2015-01-01	192,66	201,7	199,31	2,34	9,04

040605	46,54842	-75,41889	Lac des ecorces	a Mont-Laurier	2577	2015-01-01	229,46	230,56	229,69	0,11	1,1
040608	46,62977	-75,12223	Barrage Kiamika	au reservoir Kiamika a Chute-Saint-Philippe	2578	2015-01-01	264,04	270,08	267,54	1,26	6,04
040609	47,21475	-75,17561	Barrage Mitchinamecus	au reservoir Mitchinamecus a Lac-Oscar	2577	2015-01-01	376,28	382,47	379,36	1,34	6,19
040629	46,50758	-75,38939	Barrage Reno	au lac des ecorces	2571	2015-01-01	228,62	229,79	229,38	0,23	1,17
040829	46,27642	-75,80331	Barrage Hubert-Tremblay	au lac des Trente et Un Milles a Sainte-Therese-de-la-Gatineau	2577	2015-01-01	161,76	162,6	162,08	0,14	0,84
040830	47,08325	-75,75353	Gatineau	a la tete des Rapides Ceizur	2451	2015-01-01	25,73	29,5	26,59	0,61	3,77
040841	46,58992	-76,04136	Desert	sur le chemin Lytton en amont de la Chute Rouge	2578	2015-01-01	185,94	188,8	186,61	0,49	2,86
043108	45,48900	-73,97808	Lac des Deux Montagnes	a Pointe-Calumet	2576	2015-01-01	21,3	24,77	22,2	0,58	3,47
043205	45,53319	-73,88236	Barrage du Grand-Moulin	sur la riviere des Mille-Îles a Deux-Montagnes niveau amont	2575	2015-01-01	21,18	24,66	22,03	0,57	3,48
043206	45,53319	-73,88236	Des Mille-Îles	en aval du barrage du Grand-Moulin a Deux-Montagnes	2574	2015-01-01	21,18	23,59	21,92	0,39	2,41
043208	45,69281	-73,64000	Barrage des Moulins	sur la riviere des Mille-Îles a Terrebonne	2577	2015-01-01	13,58	14,72	13,99	0,17	1,14
043212	45,53994	-73,88572	Des Mille-Îles	a l'usine de pompage de Deux-Montagnes	629	2015-01-01	19,45	22,42	20,73	0,71	2,97
043301	45,52161	-73,84563	Des Prairies	a la tete du rapide du Cheval Blanc chenal sud	2571	2015-01-01	19,1	22,63	20,1	0,63	3,53
046404	45,72147	-73,58247	Mascouche	a 500 m en amont de l'autoroute 640	475	2020-10-06	45,03	47,69	45,4	0,34	2,66
050119	46,68411	-73,91480	Matawin	a 750 m en amont du reservoir Taureau a Saint-Michel-des-Saints	2568	2015-01-01	26,35	29,42	26,9	0,44	3,07

050147	46,65939	-72,77408	Lac des Piles	a 50 metres en amont du barrage	2302	2015-01-01	165,85	166,34	166,08	0,08	0,48
050409	46,97658	-71,84736	Bras du Nord	a 45 km en amont de la Mauvaise	2577	2015-01-01	27,97	30,18	28,37	0,33	2,21
050805	46,86750	-71,63722	Barrage de Duchesnay	au lac Saint-Joseph a Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	2577	2015-01-01	157,97	159,21	158,68	0,23	1,24
050917	46,91762	-71,32182	Jaune	a 1,5 km en amont de l'autoroute Laurentienne 73	436	2020-11-12	46,04	48,04	46,33	0,26	2,
050918	46,81550	-71,29460	Du Berger	au Parc Duberger a 1 km de la confluence avec la riviere Saint-Charles	437	2020-11-11	47,4	48,69	47,53	0,13	1,29
052212	46,03069	-73,70494	Ouareau	a la tete des chutes Dorwin	867	2015-01-01	27,79	30,77	28,45	0,47	2,98
052228	46,34061	-73,65428	Noire	a 26 km en amont du pont-route a Sainte-emelie-de-l'energie	2577	2015-01-01	26,91	28,57	27,23	0,26	1,66
052233	45,84619	-73,49253	De l'Achigan	au pont-route 341a L'epiphanie	2578	2015-01-01	28,91	31,11	29,32	0,32	2,2
052237	46,04493	-73,69727	Lac Rawdon	a Rawdon pres du pont-barrage	440	2020-11-09	44,59	46,18	45,34	0,26	1,59
052401	46,15709	-73,39080	Bayonne	a Saint-Felix-de-Valois	2546	2015-01-01	28,36	29,58	28,62	0,15	1,22
052601	46,30117	-73,09619	Maskinonge	en amont du pont de chemin de fer pres de Sainte-Ursule	2574	2015-01-01	26,94	30,02	27,51	0,54	3,08
052603	46,30414	-73,39686	Lac Maskinonge	a Saint-Gabriel-de-Brandon	2577	2015-01-01	141,6	144,98	142,53	0,41	3,38
052604	46,32703	-73,27819	Barrage Saint-Didace	sur la riviere Maskinonge a Saint-Didace	2577	2015-01-01	141,12	143,87	142,35	0,34	2,75
052606	46,44167	-73,46189	Mastigouche	a 01 km en aval du lac Sainte-Rose	2577	2015-01-01	29,35	30,67	29,68	0,21	1,32
052811	46,46383	-73,14318	Lac Saint-Alexis	a l'eglise de Saint-Alexis-des-Monts	415	2020-12-01	46,17	46,98	46,58	0,27	0,81
COBARIC_1	45,57314	-70,88061	Lac-Mégantic (CEHQ 023427)	Barrage au Lac-Mégantic	2346	2015-01-01	393,25	395,6	394,38	0,19	2,36

COBARIC_10	46,50397	-71,07165	Nord du pont route 171 / Scott	Nord du pont de la route 171 à Scott	588	2015-03-09	138,	144,83	140,15	1,28	6,83
COBARIC_11	46,58578	-71,21584	St-Lambert (CEHQ 023402)	Rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon	2326	2015-01-01	111,98	116,8	112,66	0,58	4,82
COBARIC_12	46,71490	-71,28337	Barrage Innergex	Rivière Chaudière à Charny	685	2016-07-27	54,6	56,87	55,03	0,39	2,27
COBARIC_13	46,66054	-71,28634	Beaurivage (CEHQ 023401)	Rivière Beaurivage à Saint-étienne de Lauzon	2188	2015-01-01	25,61	29,11	26,16	0,44	3,49
COBARIC_3	46,11999	-70,67332	Ront route 271 / St-Georges	Pont de la route 271 à Saint-Georges	1793	2015-01-01	158,96	164,57	161,61	0,83	5,62
COBARIC_4	46,18459	-70,61601	Rivière Famine	Rivière Famine à Saint-Georges	2051	2015-01-01	26,86	30,05	27,34	0,37	3,19
COBARIC_5	46,18146	-70,71785	Pont couvert / Notre-Dame-des-Pins	Pont couvert de Notre-Dame-des-Pins	37	2015-04-15	155,5	175,17	159,14	4,98	19,67
COBARIC_6	46,21026	-70,77699	Pont route 108 / Beauceville	Pont de la route 108 à Beauceville	1934	2015-01-01	145,31	152,7	146,87	1,2	7,39
COBARIC_7	46,30821	-70,88469	Pont route 276 / Saint-Joseph-de-Beauce	Pont de la route 276 à Saint-Joseph-de-Beauce	2059	2015-01-01	141,99	150,88	145,16	1,16	8,89
COBARIC_8	46,37451	-70,92835	Pont route 112 / Vallée-Jonction	Pont de la route 112 à Vallée-Jonction	1521	2015-01-07	142,96	150,06	143,57	1,	7,1
COBARIC_9	46,43671	-71,02178	Pont route 216 / Ste-Marie	Pont de la route 216 à Sainte-Marie	2468	2015-01-01	140,06	147,46	141,31	0,99	7,4

*Note : Ces valeurs réfèrent aux statistiques (minimum, maximum, moyenne et écart-type) sur les niveaux quotidiens enregistrés à la station depuis la date de début. L'étendue est la différence entre le niveau maximum et le niveau minimum.

Tableau 5 : Statistiques des données de niveau d'eau correspondant aux images S1, pour les 105 stations retenues

Station	Nom	Nb images sur la station	Date première image	Min Niveau m	Max Niveau m	Moy Niveau* m	SD Niveau* m	Étendue Niveau* m	% de l'étendue couvert*
023402	Chaudiere	92	2015-08-17	112,01	116,26	112,6	0,8	4,25	89
023409	Barrage Megantic	167	2015-08-17	393,97	395,49	394,41	0,19	1,52	92
023446	Barrage Sartigan	167	2015-08-17	173,03	175,36	173,93	0,41	2,33	66
023450	Beaurivage	13	2021-04-11	48,12	48,43	48,21	0,09	0,31	33
023451	Bras Saint-Victor	40	2020-08-14	47,04	48,05	47,21	0,19	1,01	95
024004	Bourbon	35	2021-04-03	48,9	49,15	48,97	0,07	0,25	36
02LA015	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A HULL	164	2015-07-22	41,05	45,12	41,97	0,99	4,07	97
02LA027	RIDEAU RIVER ABOVE RIDEAU FALLS	164	2015-07-22	4,1	5,2	4,69	0,2	1,1	73
02LB033	BECKETTS CREEK NEAR BECKETTS CREEK	116	2015-07-22	9,47	11,79	9,72	0,51	2,32	98
02MC005	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A POINTE-DES-CASCADES	151	2015-07-22	20,88	22,6	21,83	0,43	1,73	93
02OA003	MILLE ILES (RIVIERE DES) A BOIS-DES-FILION	147	2015-07-22	0,61	2,54	1,4	0,5	1,93	96
02OA013	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A SAINTE-ANNE-DE-BELLEVUE	146	2015-07-22	21,34	24,59	22,26	0,8	3,25	98
02OA016	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LASALLE	158	2015-07-22	0,74	2,21	1,53	0,37	1,47	95
02OA033	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A LA MARINA DE SAINTE-ANNE-DE-BELLEVUE	146	2015-07-22	20,76	22,68	21,75	0,47	1,92	98
02OA039	SAINT-LOUIS (LAC) A POINTE-CLAIRE	147	2015-07-22	20,74	22,53	21,72	0,45	1,79	97
02OA041	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LA PRAIRIE	213	2015-07-22	9,65	11,28	10,41	0,37	1,63	100
02OA107	OUTAOUAIS (RIVIERE DES) A TERRASSE-VAUDREUIL	146	2015-07-22	21,32	24,56	22,25	0,79	3,24	98
02OB011	SAINT-LAURENT (FLEUVE) A LANORAIE	133	2016-04-06	3,95	7,5	5,31	0,82	3,56	95

02OE012	MEMPHREMAGOG (LAC) A MAGOG	203	2015-08-17	207,29	208,53	207,68	0,19	1,23	82
02OH001	CHAMPLAIN (LAC) A PHILIPSBURG	138	2016-04-06	4,05	6,28	4,82	0,61	2,23	97
02OJ007	RICHELIEU (RIVIERE) AUX RAPIDES FRYERS	218	2015-07-22	0,55	2,21	1,14	0,46	1,66	98
02OJ016	RICHELIEU (RIVIERE) A LA MARINA DE SAINT-JEAN	218	2015-07-22	0,	1,85	0,68	0,48	1,85	99
030118	Barrage Beaudet	233	2015-08-17	128,69	129,48	128,96	0,14	0,79	63
030120	Nicolet	78	2020-04-04	99,17	100,35	99,44	0,26	1,18	73
030201	Barrage Jules-Allard	233	2015-08-17	284,09	290,11	288,86	0,84	6,02	93
030202	Barrage Aylmer	239	2015-08-17	246,52	248,59	247,88	0,28	2,07	76
030234	Eaton	239	2015-08-17	25,16	26,8	25,6	0,33	1,64	50
030241	Lac Massawippi	239	2015-08-17	160,3	161,83	160,66	0,25	1,53	90
030242	Eaton	84	2020-04-04	253,66	254,64	253,86	0,19	0,98	67
030247	Barrage Bombardier	239	2015-08-17	238,18	238,63	238,45	0,07	0,46	75
030268	Barrage Stukely	239	2015-08-17	284,3	284,59	284,44	0,05	0,29	63
030283	Barrage de Waterville	239	2015-08-17	188,61	189,22	188,73	0,09	0,61	40
030289	Lac Louise	239	2015-08-17	242,6	244,68	242,91	0,31	2,08	85
030296	Lac Aylmer	239	2015-08-17	246,71	248,66	247,91	0,27	1,95	82
030297	Barrage Lyster	239	2015-08-17	470,64	471,25	470,93	0,12	0,61	92
0302A1	Aux Saumons	36	2021-04-03	46,18	46,68	46,34	0,14	0,5	39
030302	Yamaska	159	2016-04-06	62,63	63,49	62,79	0,17	0,86	63
030314	Yamaska Sud-Est	159	2016-04-06	29,94	31,02	30,25	0,2	1,08	68
030326	Barrage Choiniere	158	2016-04-06	139,92	143,48	142,14	0,95	3,56	92
030332	Lac Waterloo	156	2016-04-06	207,96	208,26	208,1	0,05	0,3	49
030342	Barrage de Waterloo	156	2016-04-06	207,89	208,18	208,03	0,05	0,29	59
030345	Yamaska	155	2016-04-06	18,81	21,66	19,36	0,54	2,85	64
030350	Lac Brome	156	2016-04-06	196,32	197,05	196,85	0,12	0,73	62
030354	Yamaska	83	2018-10-28	104,33	105,43	104,57	0,24	1,1	64

030430	Richelieu	254	2015-07-22	28,38	30,53	29,15	0,54	2,15	98
030905	Châteauguay	176	2015-07-22	28,52	31,66	28,99	0,52	3,14	83
040101	Barrage de la Montagne-Noire	168	2015-07-22	453,09	453,62	453,42	0,1	0,53	87
040102	Barrage Papineau	168	2015-07-22	375,28	376,1	375,71	0,12	0,82	77
040103	Barrage Ludger	168	2015-07-22	374,91	375,58	375,39	0,12	0,67	80
040104	Barrage Brûle	168	2015-07-22	366,6	367,6	367,1	0,15	1,	88
040105	Barrage Cornu	167	2015-07-22	389,3	389,82	389,63	0,09	0,52	90
040106	Barrage Manitou	168	2015-07-22	389,33	389,86	389,6	0,07	0,53	93
040107	Barrage des Sables	168	2015-07-22	376,21	377,12	376,81	0,15	0,91	90
040108	Barrage Masson	166	2015-07-22	334,74	335,31	335,15	0,11	0,57	86
040109	Barrage Theodore	166	2015-07-22	365,45	366,42	365,97	0,14	0,97	82
040134	Bonniebrook	45	2020-04-02	45,94	47,61	46,45	0,4	1,67	98
040135	Du Nord	45	2020-04-02	46,83	48,96	47,34	0,51	2,13	96
040238	Du Diable	104	2015-07-22	194,69	198,02	195,31	0,72	3,33	97
040239	Barrage Chapleau	100	2015-07-22	266,33	266,92	266,5	0,09	0,59	89
040240	Maskinonge	14	2020-08-24	47,23	48,35	47,73	0,41	1,12	55
040241	Rouge	11	2021-04-09	44,36	45,63	44,79	0,39	1,27	63
040407	Lac Barriere	17	2020-08-24	198,1	198,59	198,23	0,14	0,49	58
040602	Barrage des Rapides-des-Cedres	186	2015-07-22	192,86	201,69	199,93	1,97	8,83	98
040605	Lac des ecorces	90	2015-08-15	229,56	230,5	229,72	0,16	0,94	85
040608	Barrage Kiamika	91	2015-08-15	264,58	270,07	268,1	1,21	5,49	91
040609	Barrage Mitchinamecus	89	2015-08-15	376,45	382,46	379,75	1,48	6,01	97
040629	Barrage Reno	95	2015-08-15	228,7	229,73	229,39	0,23	1,03	88
040829	Barrage Hubert-Tremblay	262	2015-08-15	161,76	162,6	162,12	0,17	0,84	100
040830	Gatineau	173	2015-08-15	25,79	29,5	26,78	0,77	3,71	98
040841	Desert	177	2015-08-15	185,97	188,8	186,72	0,65	2,83	99
043108	Lac des Deux Montagnes	167	2015-07-22	21,36	24,71	22,23	0,79	3,35	97
043205	Barrage du Grand-Moulin	167	2015-07-22	21,22	24,6	22,08	0,78	3,38	97

043206	Des Mille-Îles	167	2015-07-22	21,22	23,49	21,92	0,51	2,27	94
043208	Barrage des Moulins	172	2015-07-22	13,69	14,38	13,96	0,17	0,69	61
043212	Des Mille-Îles	16	2015-07-22	19,57	22,11	20,21	0,76	2,54	86
043301	Des Prairies	166	2015-07-22	19,12	22,56	20,07	0,8	3,44	97
046404	Mascouche	26	2020-10-06	45,05	46,23	45,4	0,3	1,18	44
050119	Matawin	157	2015-08-15	26,4	29,34	26,97	0,63	2,94	96
050147	Lac des Piles	72	2015-09-27	165,88	166,29	166,09	0,1	0,41	85
050409	Bras du Nord	157	2015-08-17	27,98	29,99	28,43	0,38	2,01	91
050805	Barrage de Duchesnay	158	2015-08-17	158,	159,08	158,73	0,22	1,08	87
050917	Jaune	13	2021-04-11	46,07	46,82	46,32	0,23	0,75	38
050918	Du Berger	13	2021-04-11	47,42	47,67	47,5	0,08	0,25	19
052212	Ouareau	35	2015-07-22	27,79	30,3	28,55	0,74	2,51	84
052228	Noire	168	2015-07-22	26,93	28,34	27,22	0,33	1,41	85
052233	De l'Achigan	212	2015-07-22	28,91	30,94	29,27	0,36	2,03	92
052237	Lac Rawdon	20	2021-04-04	44,89	45,85	45,28	0,27	0,96	60
052401	Bayonne	246	2015-07-22	28,47	29,58	28,62	0,17	1,11	91
052601	Maskinonge	155	2016-04-06	26,98	29,89	27,54	0,7	2,91	94
052603	Lac Maskinonge	172	2015-07-22	141,84	144,89	142,74	0,51	3,05	90
052604	Barrage Saint-Didace	155	2016-04-06	141,45	143,81	142,52	0,3	2,36	86
052606	Mastigouche	168	2015-07-22	29,4	30,5	29,69	0,27	1,1	83
052811	Lac Saint-Alexis	9	2021-04-04	46,3	46,96	46,76	0,19	0,66	81
COBARIC_1	Lac-Mégantic (CEHQ 023427)	141	2015-08-17	393,96	395,48	394,41	0,2	1,52	64
COBARIC_10	Nord du pont route 171 / Scott	30	2016-10-22	138,81	144,24	140,42	1,51	5,43	79
COBARIC_11	St-Lambert (CEHQ 023402)	79	2015-08-17	112,	116,32	112,64	0,84	4,31	90
COBARIC_12	Barrage Innergex	30	2016-08-08	54,84	56,87	55,19	0,51	2,03	90
COBARIC_13	Beaurivage (CEHQ 023401)	76	2015-08-17	25,65	28,53	26,17	0,64	2,88	82
COBARIC_3	Ront route 271 / St-Georges	104	2015-08-17	158,96	164,57	161,52	1,05	5,62	100
COBARIC_4	Rivière Famine	70	2015-08-17	26,87	29,34	27,39	0,54	2,47	77

COBARIC_5	Pont couvert / Notre-Dame-des-Pins	3	2018-04-27	158,	171,	162,33	7,51	13,	66
COBARIC_6	Pont route 108 / Beauceville	70	2015-08-17	145,5	151,76	146,67	1,44	6,27	85
COBARIC_7	Pont route 276 / Saint-Joseph-de-Beauce	67	2015-08-17	142,11	150,88	145,11	1,59	8,77	99
COBARIC_8	Pont route 112 / Vallée-Jonction	59	2016-07-22	142,96	150,06	143,78	1,44	7,1	100
COBARIC_9	Pont route 216 / Ste-Marie	88	2015-08-17	140,12	146,44	141,21	1,25	6,32	85

*Note : Ces valeurs réfèrent aux statistiques (minimum, maximum, moyenne et écart-type) sur les niveaux quotidiens enregistrés à la station pour les jours où une image radar est disponible. L'étendue est la différence entre le niveau maximum et le niveau minimum. Le % est le rapport entre l'étendue à la station du tableau 4 (tous les jours) et l'étendue à la station du tableau 5 (jours d'images).

Bibliographie / référence

Akaike, Hirotogu (1973), "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle", in Petrov, B. N.; Csáki, F. (eds.), 2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor, Armenia, USSR, September 2-8, 1971, Budapest: Akadémiai Kiadó, pp. 267–281. Republished in Kotz, S.; Johnson, N. L., eds. (1992), Breakthroughs in Statistics, vol. I, Springer-Verlag, pp. 610–624.

Chokmani, Karem (2022) Livrable 1 - Mise en place de la base de données. 17 p.

Chokmani K., Viau A. A., Bourgeois G., (2001) Analyse de l'incertitude de quatre modèles de phytoprotection relative à l'erreur des mesures des variables agrométéorologiques d'entrée. *Agronomie*, 21, 147-167.

El-Alem, A., Chokmani, K., Laurion, I., El-Adlouni, S.E., Raymond, S., Ratte-Fortin, C. (2019) Ensemble-Based Systems to Monitor Algal Bloom with Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57 (10), art. no. 8736492, pp. 7955-7971.

Leboeuf, Antoine (2015) Projet d'acquisition de données par le capteur LiDAR à l'échelle provinciale - Analyse des retombées et recommandations. Ministère des forêts, de la faune et des parcs (MFFP) du Québec, Direction des inventaires forestiers. Québec (Québec)

Matgen P, Hostache R, Schumann G, Pfister L, Hoffmann L & Savenije HHG (2011) Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth* 36(7-8):241-252.

MathWorks (2022). Z-shaped membership function. Consulté le 13 décembre 2022. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/zmf.html>

Oubennaceur, K., Chokmani, K., Nastev, M., Gauthier, Y., Poulin, J., Tanguy, M., Raymond, S., Lhissou, R. (2019) New sensitivity indices of a 2D flood inundation model using gauss quadrature sampling. *Geosciences (Switzerland)*, 9 (5), art. no. 220, DOI: 10.3390/geosciences9050220

Oubennaceur, K., Chokmani, K., Nastev, M., Tanguy, M., Raymond, S. (2018) Uncertainty analysis of a two-dimensional hydraulic model. *Water (Switzerland)*, 10 (3), art. no. 272 DOI: 10.3390/w10030272

Schwarz, Gideon (1978) Estimating the dimension of a model. *Ann. Statist.* 6, no. 2, 461–464.

Torvi H., Hertzberg T., (1997) Estimation of uncertainty in dynamic simulation results. *Comput. Chem. Eng.* 21 (Suppl.) S181–S185.