

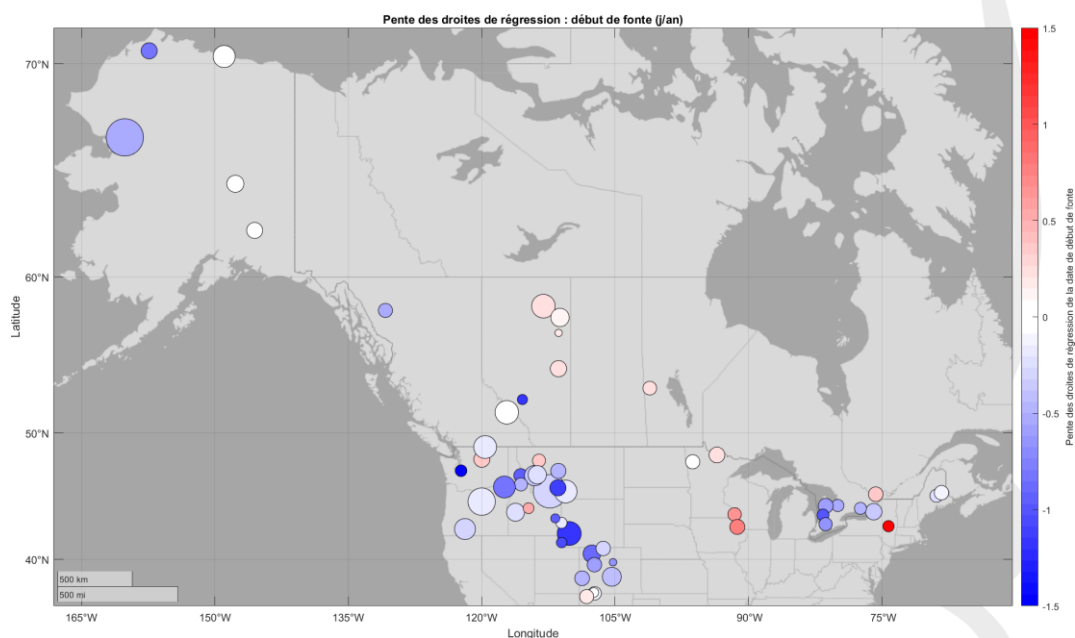
Master of Science in Environmental Science

Changements climatiques et crues dans les bassins versants nivaux

Global warming and peak discharge in snowmelt catchments

Dionys Lugon-Moulin

Sous la direction du Prof. Grégoire Mariéthoz



Août – 2019

Information importante: Le texte de ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication ou dans l'optique d'une édition ou diffusion ; son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce texte n'en est pas moins soumis aux règles et droits usuels sur les droits d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA) est en outre applicable.

Convention de transmission des travaux de master en Sciences de l'Environnement déposés dans les archives de la Bibliothèque des Sciences de la Terre

Les travaux de masters en Sciences de l'Environnement sont juridiquement considérés comme des copies d'examen et sont, à ce titre, confidentiels.

Cependant, la confidentialité peut être exceptionnellement levée avec l'accord de l'auteur du travail de master et du directeur du travail de master pour des **motifs de recherche scientifique, sans but commercial**.

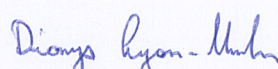
- Par sa signature, l'auteur du travail de master en autorise la transmission sous format papier et électronique pour des motifs de recherche scientifique, par la bibliothèque des Sciences de la Terre.
- Le directeur du travail doit indiquer si le travail contient des données juridiquement confidentielles (par ex. des données de compagnies pétrolières ou minières) ne pouvant pas être diffusées.
- Le directeur du travail peut en outre décider d'une période d'embargo durant laquelle le travail ne sera pas transmis, même pour des motifs de recherche scientifique. La période d'embargo s'éteint automatiquement au plus tard à la retraite du directeur du travail ou lorsque le directeur quitte l'université de Lausanne.

Titre du travail : Global warming and peak discharge in snowmelt catchments
Changements climatiques et crues dans les bassins versants nivaux

Auteur : Dionys Lugon-Moulin

Directeur : Grégoire Mariéthoz

J'autorise la transmission de mon travail de master pour des motifs de recherche scientifique sans but commercial.

Lausanne, le 14 août 2019, signature de l'étudiant 

Le travail contient des données confidentielles et ne peut pas être transmis oui / ☒ non

Le travail est soumis à un embargo jusqu'au (date)

L'embargo peut être levé avant la date indiquée moyennant mon accord oui / non

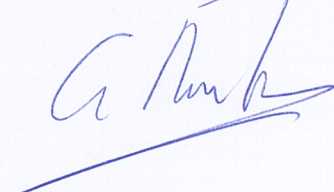
Lausanne, le 14.8.2019, signature du directeur 

Table des Matières

Table des matières	i
Liste des Figures	iii
Liste des Tables	iv
1. Introduction	1
1.1. Situation	1
1.2. Régime nival	1
1.2.1. Risques hydrologiques	1
1.3. Imagerie satellitaire	1
1.4. Problématique	1
1.5. Objectifs	2
2. Revue de la littérature	3
2.1. Régime nival	3
2.2. Débits	4
2.3. Imagerie satellitaire	5
2.3.1. MODIS	5
2.3.2. Obstruction par les nuages	6
2.4. Google Earth Engine	7
2.5. QGIS	7
2.6. Disponibilité des données	8
3. Méthodes	9
3.1. Choix de la station	10
3.1.1. Station de mesure hydrologique	12
3.1.2. Sélection du shapefile	12
3.1.3. MODIS	13
3.2. Récupération des données	13
3.2.1. Débits journaliers	13
3.2.2. Shapefile	14
3.2.3. Surfaces journalières	15
3.3. Traitement des données	18
3.3.1. Importation des données	18
3.3.2. Calculs	19
3.3.2.1. Sélection des jours	20
3.3.2.2. Lissage des séries	20
3.3.2.3. Calcul des points de repère	22
4. Résultats	25
4.1. Statistiques et analyse	26

5. Discussions	41
5.1. Pics de débits	41
5.2. Sensibilité des paramètres	43
5.3. Diverses problématiques	45
5.4. Comparaisons supplémentaires	45
5.5. Interprétation	46
6. Conclusion	49
Bibliographie	51
7. Annexes	57
7.1. Table des bassins versants	57
7.2. Code Google Earth Engine	58
7.3. Code MATLAB	63
7.3.1. Code général	63
7.3.2. Traitement des surfaces	70
7.3.3. Traitement des débits	73
Remerciements	77

Liste des Figures

Figure 1	Carte de Köppen-Geiger des USA	3
Figure 2	Fraction des précipitations tombant sous forme de neige (Addor & al., 2017)	4
Figure 3	Vue de la plateforme Google Earth Engine (GEE)	7
Figure 4	Données mensuelle des débits avec la période de fin de série ("GRDC", 2019)	8
Figure 5	Processus général de sélection et du traitement des données	9
Figure 6	Situation géographique du bassin versant (GEE)	11
Figure 7	Histogramme des altitudes du bassin versant (GEE)	11
Figure 8	SRTM 30m du bassin versant (GEE)	12
Figure 9	Sélection du shapefile au plus proche de la station de mesure pour le bassin versant "Yampa River"	15
Figure 10	Algorithme "cloud-free"	17
Figure 11	Bassin versant de la "Yampa River" à une certaine date (rouge : neige, vert : pas de neige, bleu : donnée non déterminée)	17
Figure 12	Localisation des bassins versants surimprimés en noir transparent (GEE)	18
Figure 13	Couverture neigeuse et débit en pourcent avec moyenne mobile centrée sur 5 valeurs en utilisant les données brutes journalières sans algorithme	21
Figure 14	Couverture neigeuse et débit en pourcent avec moyenne mobile centrée sur 5 valeurs en utilisant l'algorithme "cloud-free" sur 4 jours	22
Figure 15	Situation des bassins versants et altitude moyenne	25
Figure 16	Couverture neigeuse et débits superposés avec les points d'intérêts pour toutes les années au bassin versant "Yampa River"	27
Figure 17	Points d'intérêts et droites de régression pour le bassin versant "Yampa River"	28
Figure 18	Boîtes à moustaches pour les paramètres de début/fin de fonte, date/pourcentage du pic de débit et volume centré des 57 bassins versants	29
Figure 19	Écart à la médiane (gauche) et variance (droite) des dates du début et fin de fonte	31
Figure 20	Écart à la médiane (gauche) et variance (droite) des dates du pic de débit et du volume central	31

Figure 21	Écart aux droites de régression pour toutes les années et tous les bassins versants	33
Figure 22	Droite de régression du début de fonte pour chacun des bassins versants	33
Figure 23	Écart aux droites de régression pour toutes les années et tous les bassins versants sous forme imagée	34
Figure 24	Droite de régression de fin de fonte pour chacun des bassins versants	35
Figure 25	Droite de régression du jour de pic du débit pour chacun des bassins versants	35
Figure 26	Droite de régression du pourcentage du pic de débit pour chacun des bassins versants	36
Figure 27	Régression entre les jours du début de fonte et de fin de fonte (gauche) et entre le jour du début de fonte et le temps de la fonte en jours (droite)	37
Figure 28	Régression entre les jours du début de fonte et le débit maximal du jour du pic (gauche) et entre le jour de fin de fonte et le débit maximal du jour du pic (droite)	37
Figure 29	Régression entre les jours du pic de débit et le débit max. du jour du pic (gauche) et entre le nombre de jours de fonte et le débit max. du jour du pic (droite)	38
Figure 30	Boîtes à moustaches des coefficients de corrélation des différents paramètres	39
Figure 31	Bassin versant "BIRCH RIVER BELOW ALICE CREEK"	41
Figure 32	Boîtes à moustaches pour les paramètres de date/pourcentage du pic de débit et volume centré des 57 bassins versants et des 32 corrigés	42
Figure 33	Situation des 25 bassins versants retirés et altitude moyenne	43
Figure 34	Sensibilité des valeurs médianes des pentes pour le lissage des débits (gauche) et de la couverture neigeuse (droite)	44
Figure 35	Sensibilité des valeurs médianes des pentes pour la sélection des surfaces (gauche) et du pourcentage de début et fin de fonte	44
Figure 36	Comparaison de la différence du jour de la fonte des neiges à la médiane avec l'anomalie de température des mois de mars, avril et mai 2014	46

Liste des Tables

Table 1	Données de la station “Yampa River below Craig”	10
Table 2	Valeurs récupérées de MOD10A1.006	16
Table 3	Liste des variables	19
Table 4	Nombre d’images utilisées	20
Table 5	Points de repère et conditions	22
Table 6	Jour du début et de fin de fonte	23
Table 7	Particularités des données des débits selon les bassins versants	26
Table 8	Analyse visuelle des pics de débit	28
Table 9	Valeur médiane des pentes des bassins versants	30
Table 10	Médiane des coefficients de corrélation	39

1. Introduction

1.1. Situation

Le réchauffement climatique modifie les phénomènes atmosphériques se déroulant sur terre. Cela a notamment pour conséquence des changements en terme de température et de précipitation (*“IPCC”, 2018*). Certaines régions voient ainsi les risques d’inondation augmenter (Milly, Wetherald, Dunne & Delworth, 2002). Alors que des ouvrages fluviaux construits par l’homme sont censés résister à des événements d’un temps de retour de x années, 100 ans par exemple, les modifications rapides du climat pourraient en réalité réduire la durabilité des ouvrages et mettre en danger la population exposée. Il est ainsi important de pouvoir constater et prédire, à l’échelle mondiale et locale, l’évolution des débits de fonte des neiges dans les régions soumises à ce type de climat. Les techniques modernes d’observation de la terre par satellite ont permis de récupérer une quantité de données sur la surface terrestre. Ces données peuvent être traitées afin de constater l’évolution de la surface enneigée et de la coupler aux mesures des débits des rivières récoltées régulièrement par l’homme au cours des dernières décennies.

1.2. Régime nival

Il existe différents types de régimes hydrologiques. Ce qui nous intéresse dans ce travail est de focaliser l’étude sur les régions dominées par le régime nival afin de bien faire ressortir les caractéristiques de la fonte des neiges. Le régime nival se caractérise par une majorité des précipitations sous forme de neige qui s’accumule durant la saison d’hiver pour fondre au printemps créant ainsi par un pic de débit entre avril et juin en fonction du régime nival de montagne ou de plaine (Musy, 2005).

1.2.1. Risques hydrologiques

Les débits des cours d’eau au moment de la fonte des neiges peuvent être variables selon les années et il sera certainement difficile de dégager des tendances dans des délais restreints. En fonction des paramètres, des débits maximaux plus importants pourraient être observés et mettraient à mal des populations et des infrastructures. A l’échelle mondiale, il est estimé que plus de personnes se verraient affectées par les inondations avec l’augmentation des températures (Hirabayashi & al., 2013).

1.3. Imagerie satellitaire

L’imagerie satellitaire fournit un très grand nombre de données d’une grande partie de la surface terrestre. Ces données sont très utiles pour observer l’évolution de la surface couverte par la neige et ainsi calculer son évolution pour presque toutes les parties de la surface de la terre. Le satellite Landsat 7 fournit des données à une localisation précise tous les 16 jours (Goward, Masek, Williams, Irons & Thompson, 2001) tandis que le programme MODIS peut fournir des données journalières (Hall & Riggs, 2016) mais de plus basse résolution.

1.4. Problématique

Afin de limiter les risques pour les populations et les infrastructures, il est important d'anticiper l'évolution des débits maximaux des crues en régime nival. Les crues dépendent du climat, ainsi les modifications climatiques peuvent avoir un effet amplificateur qu'il sera nécessaire d'étudier. Grâce aux données recueillies par les satellites, il est possible de quantifier l'évolution de la couverture neigeuse continentale. Ces données couplées aux mesures de débit des rivières en aval des bassins versants devraient permettre de montrer les conséquences du changement climatique des dernières décennies sur les débits critiques lors de la saison de la fonte des neiges.

1.5. Objectifs

L'implémentation d'une méthode de calcul permettra de prendre connaissance de l'état de l'enneigement journalier de l'entier d'un bassin versant dominé par un régime nival et disposant de données des débits journaliers. Il sera alors possible en fonction des paramètres des différents bassins de réaliser des statistiques et des corrélations de données afin d'obtenir des tendances globales et régionales. Ces tendances concernent la couverture neigeuse et sa relation avec les débits des bassins étudiés. L'étude se concentre sur 57 bassins versants d'une superficie entre 1'000 et 25'000 km² situés aux États-Unis et au Canada sur une période allant d'octobre 2000 à septembre 2018. La sélection des bassins versants a été réalisée après la rédaction de la revue de la littérature au chapitre "2. Revue de la littérature" et de la méthode au chapitre "3. Méthode".

2. Revue de la littérature

2.1. Régime nival

Pardé a catégorisé en 1933 dans son ouvrage "Fleuves et rivières" les régimes hydrologiques. Il les classe en considérant un cycle annuel en régime simple avec une seule alternance naturelle de hautes et basses eaux, en régime mixte avec deux maxima et minima distincts caractérisant des sources d'alimentation différentes et en régime complexe caractérisé par plusieurs extrêmes et modes d'alimentation (Musy, 2005; Pardé, 1933). Afin de pouvoir mettre en évidence les liens entre la couverture neigeuse et les débits, les stations de mesure de débit présentant les caractéristiques d'un régime simple seront privilégiées. Et plus particulièrement celles présentant un régime nival caractérisé par l'accumulation et la fonte totale de la neige.

Afin de repérer facilement les zones de régime nival à l'échelle globale, il est indispensable d'utiliser une classification des climats. La première classification quantitative des climats sur terre a été proposée par Wladimir Köppen en 1900. Les climats sont partagés en cinq grandes catégories : équatoriaux, arides, tempérés, neigeux et polaires. En 2006 une carte à jour est publiée sous le nom de Köppen-Geiger (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf & Rubel, 2006). Cette carte est utile pour ce travail car elle comprend la carte des climats neigeux qui nous intéresse et permettra une sélection dirigée en vérifiant que les bassins versants désirés correspondent aux zones des climats de type neigeux.

Avec la *Figure 1*, aux États-Unis, les zones qui correspondent bien à un climat neigeux sont situées le long de la chaîne de montagne des Rocheuses ainsi qu'au nord-est du territoire, des grandes plaines jusqu'à la côte atlantique.

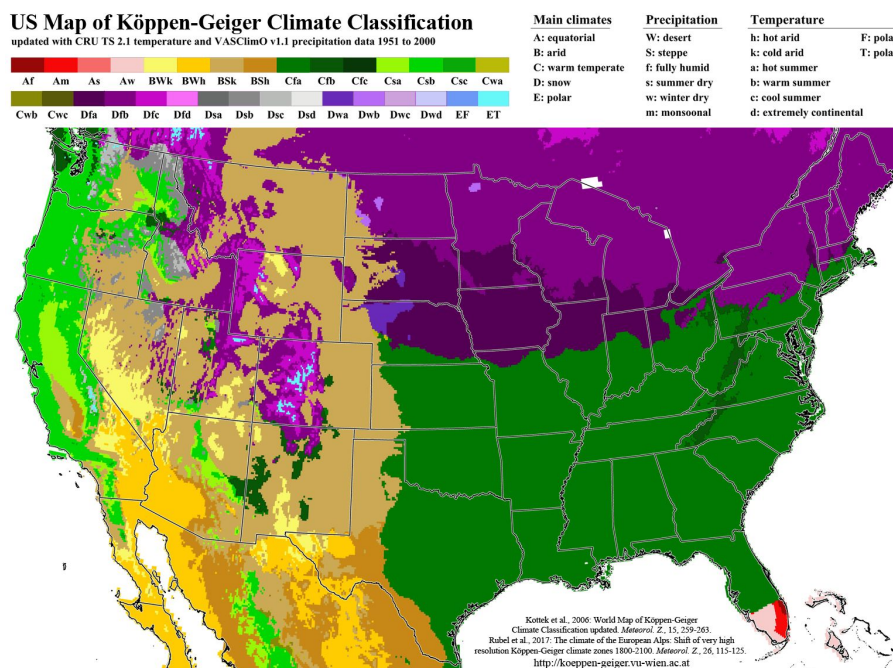


Figure 1 : Carte de Köppen-Geiger des États-Unis

Un set de données nommé CAMELS, contenant des informations météorologiques sur 671 bassins versant aux États-Unis a été développé par Newman et al. (2015) puis complété avec de nouveaux attributs par Addor, Newman, Mizukami et Clark (2017). La *Figure 2* présente les 671 bassins avec la part de précipitations tombant sous forme de neige. La carte est utile pour visualiser les zones ayant une forte proportion des précipitations sous forme de neige qui se situent dans la région des montagnes Rocheuses et à l'ouest de cette dernière.

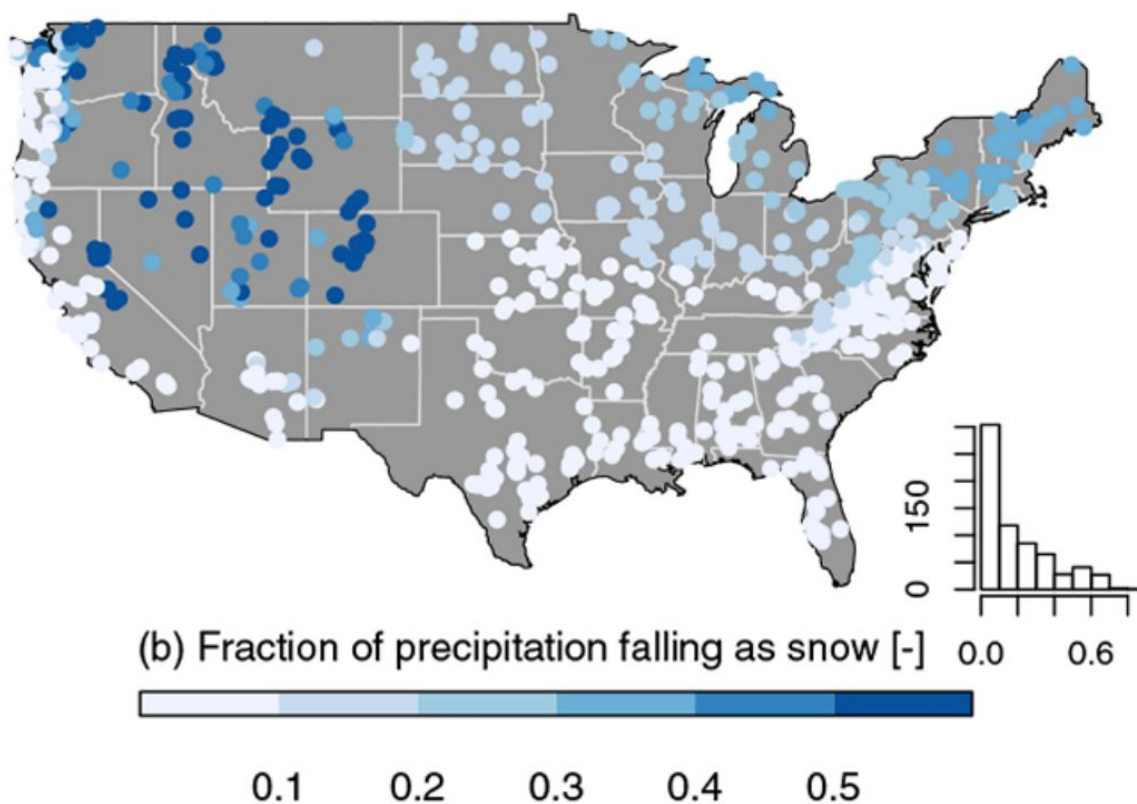


Figure 2 : Fraction des précipitations tombant sous forme de neige aux États-Unis
(source : Addor & al., 2017)

2.2. Débits

Les débits journaliers des cours d'eau bénéficient de données historiques pouvant s'étaler sur plus de 100 ans pour certaines séries. Aujourd'hui aux États-Unis, il y a plusieurs milliers de stations ("*USGS Surface-Water Data for USA*", 2019) qui mesurent les débits journaliers et fournissent ainsi de grandes quantités de séries de données. Ce qui s'avère utile pour analyser l'évolution et les tendances des débits.

Plusieurs études se sont intéressées à l'évolution des débits dans la région arctique (Holmes & al., 2015, 2018; Overeem & Syvitski, 2010; Peterson et al., 2002). Elles notent une augmentation des débits annuels sur le long terme ainsi qu'un décalage du pic d'intensité des débits arrivant plus tôt dans la saison. Des liens sont également établis avec la surface enneigée donnée par imagerie satellite, qui permettant de mettre en évidence une corrélation entre la couverture neigeuse et les débits observés (Yang, Robinson, Zhao, Estilow & Ye, 2003).

Dans l'Europe de l'est en Russie, une augmentation des débits en hiver durant les basses eaux est constatée pouvant être la conséquence de températures plus douces en hiver et de précipitations plus importantes dues au changement climatique (Telegina, 2015).

Au nord du Canada, il a été montré une intensification des débits annuels ainsi qu'une variabilité accrue (Déry, Hernández-Henríquez, Burford & Wood, 2009a). Le développement d'une méthode d'analyse des débits a montré pour des rivières nivales et glaciaires un allongement de la période hydrologique chaude se manifestant par une fonte plus tôt dans la saison, des débits plus faibles en été et un délai dans les flux en automne (Déry & al., 2009b).

Dans les Alpes, un travail sur 177 stations de mesures couvrant au moins 40 ans de mesures a permis de montrer un changement dans les crues nivales qui affichent un débit de fonte plus précoce et une durée allongée, sans pour autant montrer clairement un changement dans l'intensité des crues (Bard, Renard & Lang, 2012).

2.3. Imagerie satellitaire

2.3.1. MODIS

La NASA a lancé les satellites Terra le 18 décembre 1999 et Aqua le 4 mai 2002, tous deux équipés des instruments Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Grâce aux données récoltées, la présence de la couverture neigeuse peut être calculée et publiée par le National Snow and Ice Data Center (NSIDC) ("*MODIS Overview*", 2019). Les données de Terra pour le produit "MOD10A1" qui représente l'enneigement journalier avec une résolution de 500m est disponible depuis le 24 février 2000 dans sa 6^{ème} version (Hall & Riggs, 2016). Le produit est également accessible dans le catalogue de Google Earth Engine et permet d'avoir les données sur une plus longue période que les données fournies par Aqua qui n'a son produit associé "MYD10A1" qu'à partir du 4 juillet 2002.

Le paramètre "NDSI_Snow_Cover" est le résultat de l'algorithme de détection. Il contient la valeur Normalized-Difference Snow Index (NDSI) pour la neige comprise entre 0 et 100 ou une valeur supérieure à 200 signifiant par exemple de l'océan (239) ou des nuages (250). Le guide de l'utilisateur édité par le NSIDC indique que la neige a typiquement une bonne réflectance dans le visible (VIS) mais une faible réflectance dans l'infrarouge court (SWIR) ce qui permet de différencier la neige de la plupart des nuages. La neige est détectée en utilisant le ratio NDSI à l'aide de la différence de réflectance entre VIS et SWIR. La formule (1) du NDSI est donnée (Riggs, Hall & Román, 2015) :

$$NDSI = \frac{VIS - SWIR}{VIS + SWIR} \quad (1)$$

VIS : 0.555 μm (bande 4)

SWIR : 1.640 μm (bande 6)

Un pixel avec un indice NDSI supérieur à 0.0 est considéré comme ayant une part de neige présente. Un pixel avec un indice NDSI inférieur à 0.0 est considéré comme n'ayant pas de

neige. Tous les pixels avec un indice NDSI supérieur à 0.0 ne correspondent pas forcément à de la neige et c'est pourquoi d'autres algorithmes sont appliqués afin d'augmenter au mieux la qualité de la reconnaissance et de proposer une valeur fiable pour le paramètre.

2.3.2. Obstruction par les nuages

Une difficulté avec les données issues de MODIS est que les images sont souvent obstruées par des nuages. Il existe plusieurs méthodes permettant de réduire cette surface rendue invisible par les nuages.

Généralement, une des premières étapes est de combiner les images des satellite Terra et Aqua (Dariane, Khoramian & Santi, 2017; Deng, Huang, Feng, Ma & Liang, 2015; Dong & Menzel, 2016; Gafurov & Bárdossy, 2009; Qiu, Yu, Guo, Shi & Zhang, 2016). Vu que ces derniers mesurent la même zone mais à des heures différentes, il est très probable que les nuages ne soient pas positionnés au même endroit, ce qui permet donc d'améliorer l'information sur la couverture du sol. Un inconvénient est que les premières années ne pourront pas profiter d'améliorations car la série de données d'Aqua débute 2 ans et demi après celle de Terra.

Une étape est la combinaison temporelle (Dariane & al., 2017; Dong & Menzel, 2016; Gafurov & Bárdossy, 2009; Qiu & al., 2016). Il suffit par exemple de prendre l'image du jour précédent et du suivant pour déterminer la valeur du pixel, s'il y a de la neige avant et après, il est très probable que le pixel soit recouvert de neige également durant ce jour. A noter que plus il faut sélectionner des jours éloignés pour avoir l'information, moins la qualité de la prédiction du pixel sera bonne.

Il existe aussi la méthode dite de la "snowline" (Dariane & al., 2017; Deng & al., 2015; Gafurov & Bárdossy, 2009; Qiu & al., 2016) qui classe les pixels selon leur altitude et déduit une altitude à laquelle les pixels ont une grande probabilité d'être enneigés. Puis l'algorithme catégorise les pixels nuageux en fonction de l'altitude. Selon l'algorithme, deux altitudes peuvent être calculées en laissant les pixels situés entre ces altitudes toujours sans informations. Il est également possible de faire les calculs pour des sous-régions, chacune ayant sa propre altitude faisant la limite avec la neige.

Une autre approche est la méthode spatiale (Dariane & al., 2017; Deng & al., 2015; Dong & Menzel, 2016; Gafurov & Bárdossy, 2009; Qiu & al., 2016). Cette méthode considère les pixels les plus proches et attribue une moyenne au pixel du centre. Les 4, 8 ou 24 pixels attenants peuvent être considérés comme filtre spatial.

D'autres méthodes peuvent être appliquées en prenant en compte les précipitations et les températures (Dong & Menzel, 2016). Des validations sur les algorithmes peuvent être appliqués notamment en utilisant le réseau des stations de mesures de la neige actives dans la zones étudiée (Deng & al., 2015; Dong & Menzel, 2016). Le taux de classification réussi tourne autour de 90%.

Dans ce travail, seule la méthode temporelle sera utilisée et considère les quelques jours précédents uniquement, à voir au chapitre "3.2.3. Surfaces journalières". Il est considéré que la méthode apporte suffisamment d'améliorations sans avoir besoin d'appliquer d'autres méthodes.

2.4. Google Earth Engine

Depuis quelques années, Google Earth Engine (GEE) permet d'accéder simplement à un catalogue multi-petabyte de données géospatiales prêtes à être analysées (Gorelick & al., 2017). La plateforme s'utilise via un navigateur internet et permet de saisir du code en Javascript qui s'exécute sur les serveurs de Google. Il est possible d'y intégrer ses propres données et de télécharger les résultats obtenus afin de les traiter hors ligne. La plateforme se présente tel que montré dans la *Figure 3*.

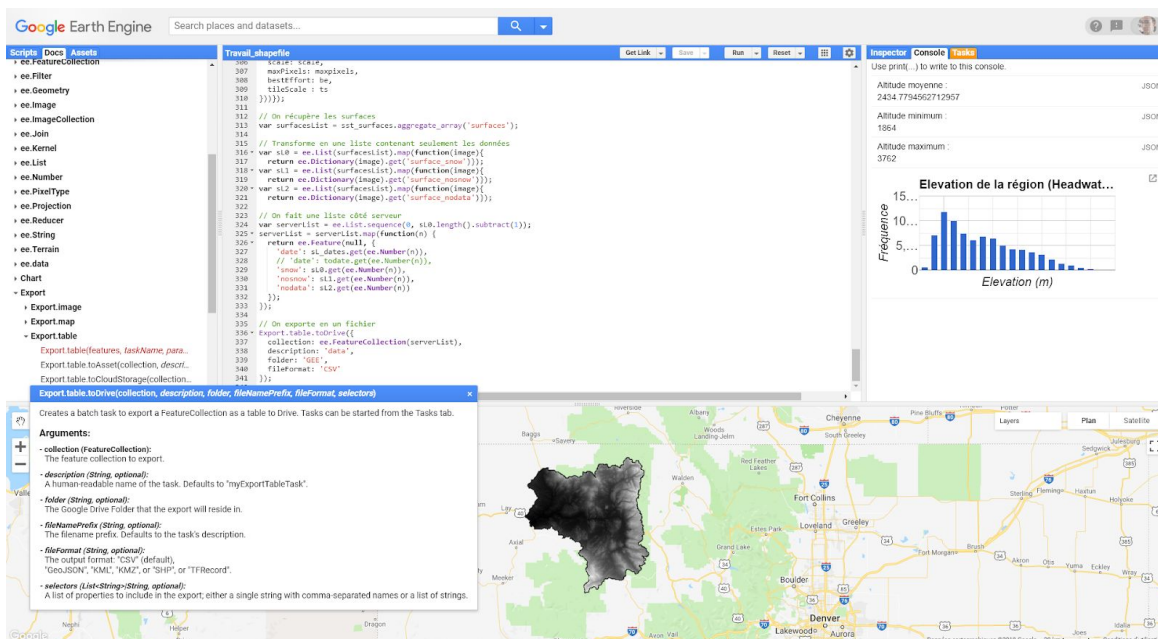


Figure 3 : Vue de la plateforme Google Earth Engine (source : GEE)

Une étude menée par Sidhu, Pebesma et Câmara (2018), apporte une évaluation de GEE. Elle rapporte la facilité d'utilisation, il n'y a pas besoin d'installer d'autres programmes ni de disposer de ressources en puissance de calcul. GEE est puissant et parallélise les calculs, ce qui lui permet d'être très efficace spatialement mais fait face à des problèmes d'allocation de mémoire ou de "timeout" lors de calculs sur des séries temporelles. Ce dernier problème a été rencontré à l'étape "3.2.3. Surfaces journalières" mais s'est en partie résolu avec l'export des données qui permet une plus longue durée des calculs (*"Debugging guide"*, 2019). Cependant, selon les conditions, de grandes surfaces peuvent toujours prendre trop de temps avec l'export et mener à l'arrêt prématuré des calculs, une solution peut être le découpage en plusieurs surfaces plus petites ou une diminution de l'échelle de traitement des tuiles.

2.5. QGIS

QGIS est un logiciel SIG qui permet d'interagir informatiquement avec les informations géographiques. Il est utilisé au chapitre "3.2.2. Shapefile" afin de sélectionner tous les sous-bassins versants en amont de la station de mesure des débits, voir de procéder à des découpages manuels. La version utilisée est la 3.6.3 (*"QGIS Development Team"*, 2019).

2.6. Disponibilité des données

Le nombre de stations de mesure des débits a atteint son maximum autour des années 1980 avant de marquer une diminution (Fekete, Looser, Pietroniro & Robarts, 2012). Le coût de maintenance des stations trop élevé pour certains pays et le développement des mesures satellitaires considérées comme une alternative aux mesures in situ peuvent en être une cause. Également, certains pays peuvent ne plus vouloir partager leurs données. La *Figure 4* montre la disponibilité des données que le centre basé à Koblenz propose. L'Amérique du Nord et l'Europe centrale ont une bonne disponibilité des données récentes tandis qu'un manque flagrant du côté russe est constaté.

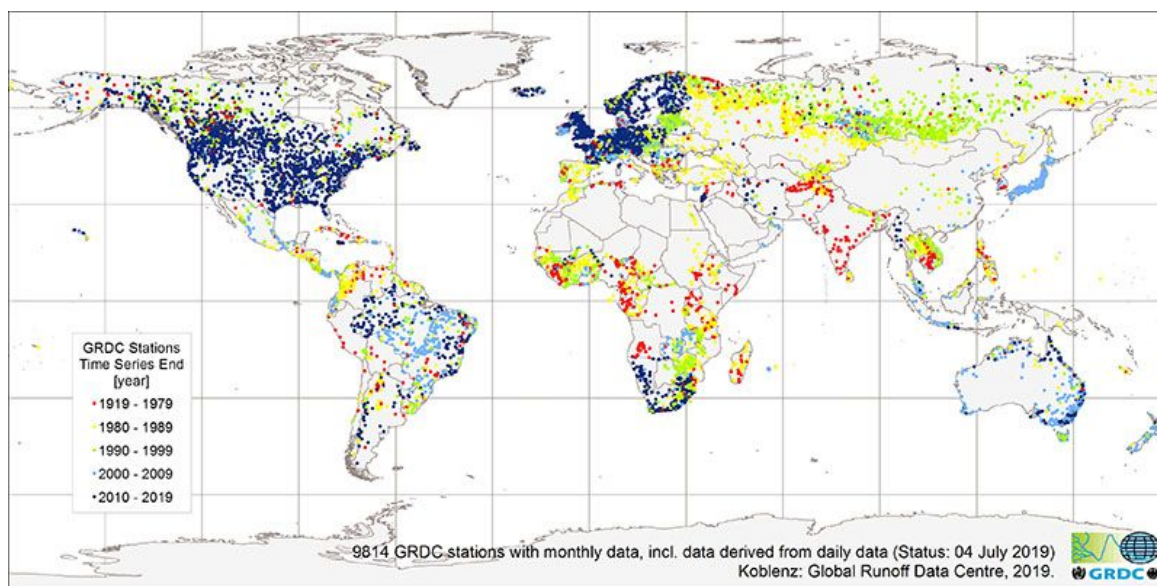


Figure 4 : Données mensuelle des débits avec la période de fin de série (source : "GRDC", 2019)

3. Méthodes

Le travail nécessite plusieurs étapes en commençant par la recherche des données adéquates, à leur extraction puis à leur traitement en vue d'obtenir des résultats interprétables.

La *Figure 5* présente dans les grandes lignes le schéma opérationnel qui se compose de quatre parties nommées "Navigateur web", "QGIS", "Google Earth Engine" et "Matlab". La partie web consiste à repérer et récupérer les données d'une station de mesure des débits. Les données géographiques du bassin versant sont ensuite traitées via QGIS, un logiciel d'information géographique qui permet de sélectionner au plus près de la station tous les bassins contribuant au débit mesuré puis d'exporter en une unique forme la surface désirée. Le fichier géographique est ensuite transféré via Google Earth Engine (GEE) et utilisé pour découper la collection d'images MODIS. Les calculs réalisés à l'aide de GEE permettent d'exporter un fichier texte contenant les mesures des surfaces (neige, pas de neige et information manquante) corrélées aux dates. La phase utilisant Matlab récupère ces données ainsi que les débits des stations de l'étape web afin de les traiter et de procéder à des analyses annuelles de tendances. La suite du chapitre explique en détails toutes les étapes ainsi que les algorithmes impliqués.

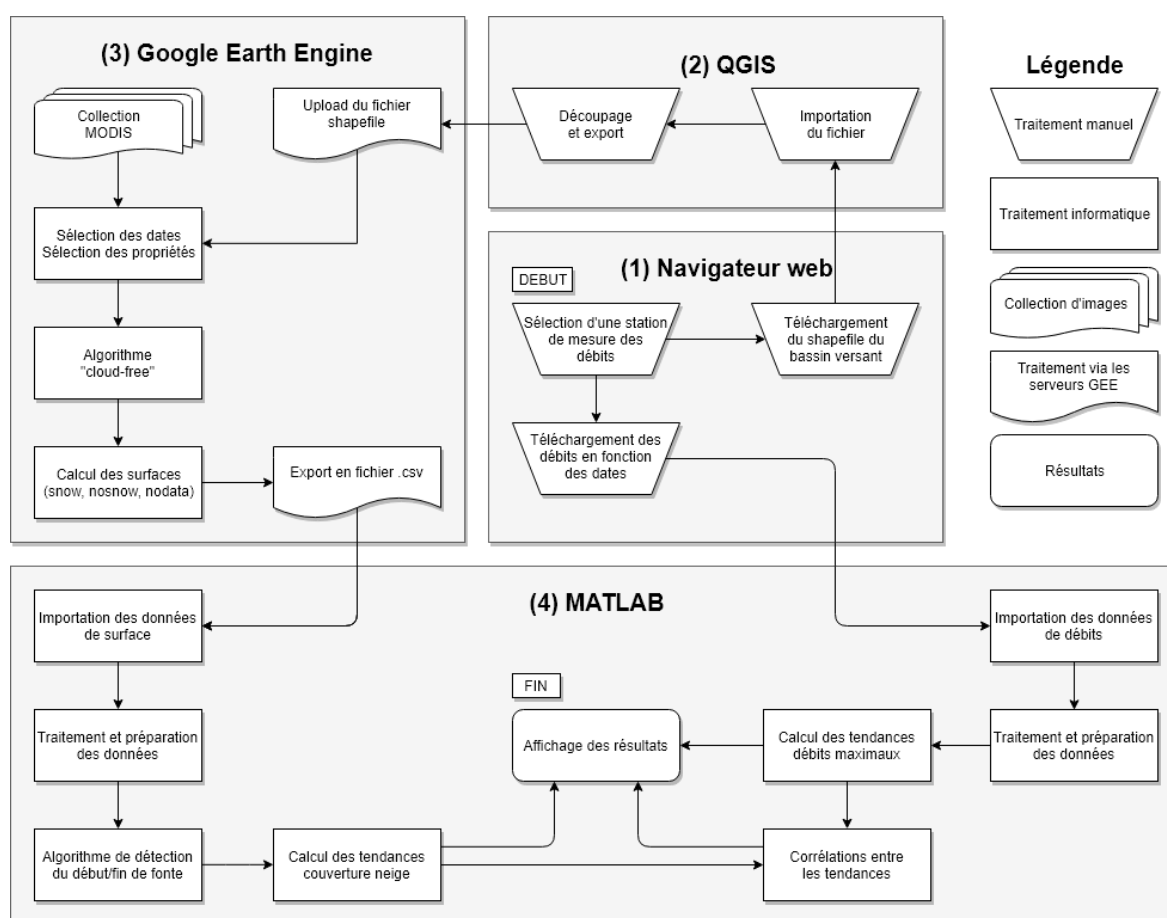


Figure 5 : Processus général de sélection et du traitement des données

3.1. Choix de la station

Les chapitres “3.1. Choix de la station” et “3.2. Récupération des données” sont traités avec une seule station et son bassin versant pour l’année 2017/2018. Ceci afin d’expliquer en détail les étapes de sélection et de traitement des données. Le chapitre “3.3. Traitement des données” concerne la généralisation des données à toutes les stations depuis 2000 jusqu’en 2018, soit 18 saisons. Pour les premières étapes, la station de mesure sur la “Yampa River” en dessous de la ville de Craig est utilisée. Les informations de la station se trouvent à la *Table 1*. Le bassin versant se situe entre Salt Lake City et Fort Collins dans les montagnes Rocheuses comme le montre la *Figure 6*. La *Figure 7* montre l’histogramme des altitudes et la *Figure 8* le SRTM à 30m de résolution (“SRTM 30m”, 2019).

Table 1 : Données de la station “Yampa River below Craig”

Coordonnées	Latitude 40°28'51", Longitude 107°36'49"
Lieu	Moffat County, Colorado, Hydrologic Unit 14050001
Surface du bassin versant	5'511 km ²
Altitude moyenne*	2'435m (min 1'864, max 3'762)
Période des données	01.10.2000 au 30.09.2018 (18 années ou saisons)
Lien de la station	https://waterdata.usgs.gov/nwis/inventory?agency_code=USGS&site_no=09247600 (station n° 09247600)

* Calculée à l’aide du shapefile obtenu au point “3.2.2. Shapefile” en utilisant les données d’élévation du programme de la NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 30m de résolution (Farr & al., 2007).

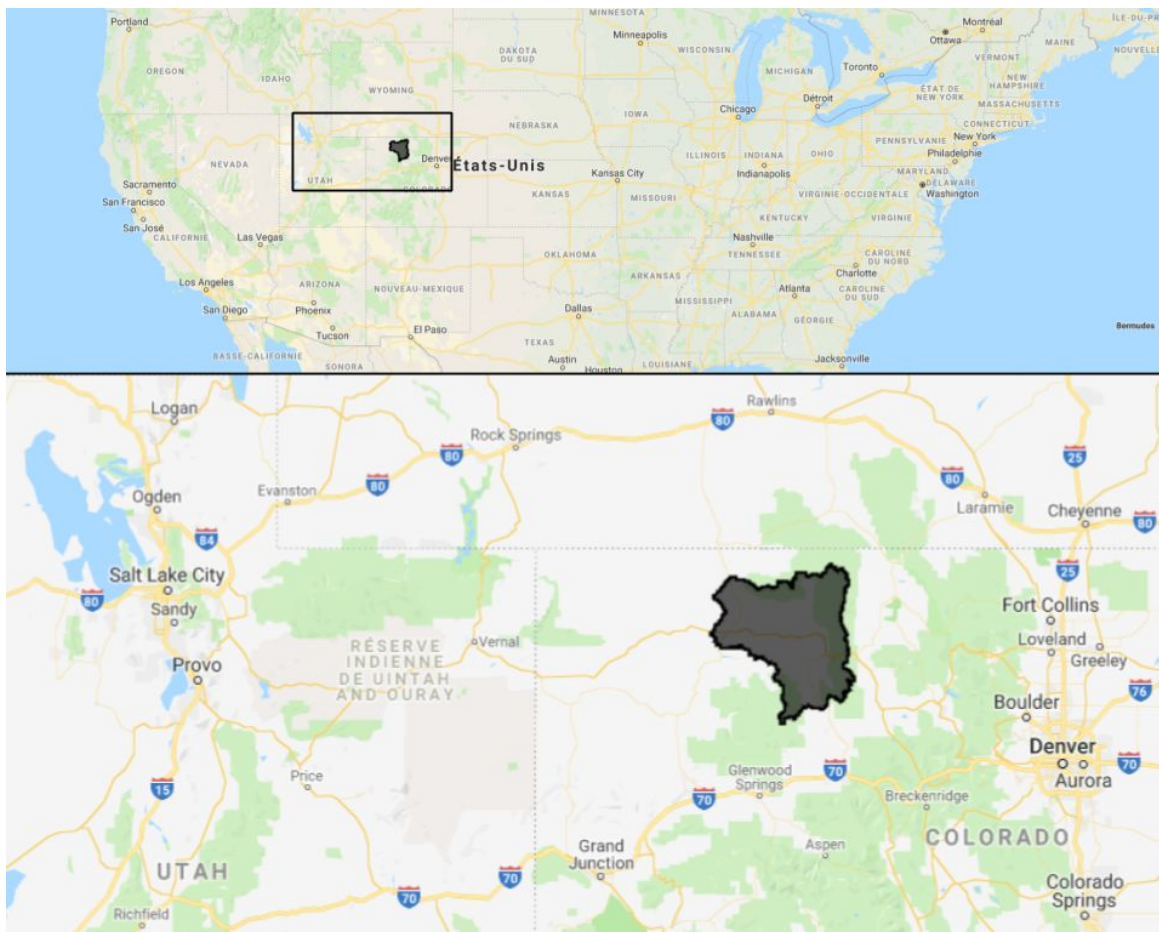


Figure 6 : Situation géographique du bassin versant (GEE)

Histogramme des altitudes du bassin versant

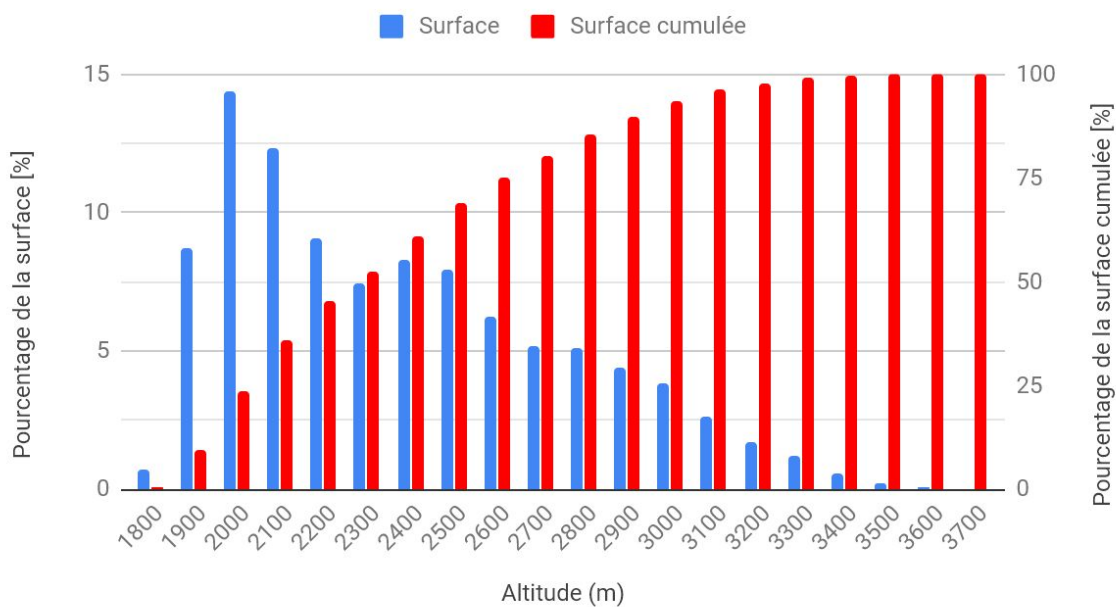


Figure 7 : Histogramme des altitudes du bassin versant (source : GEE)

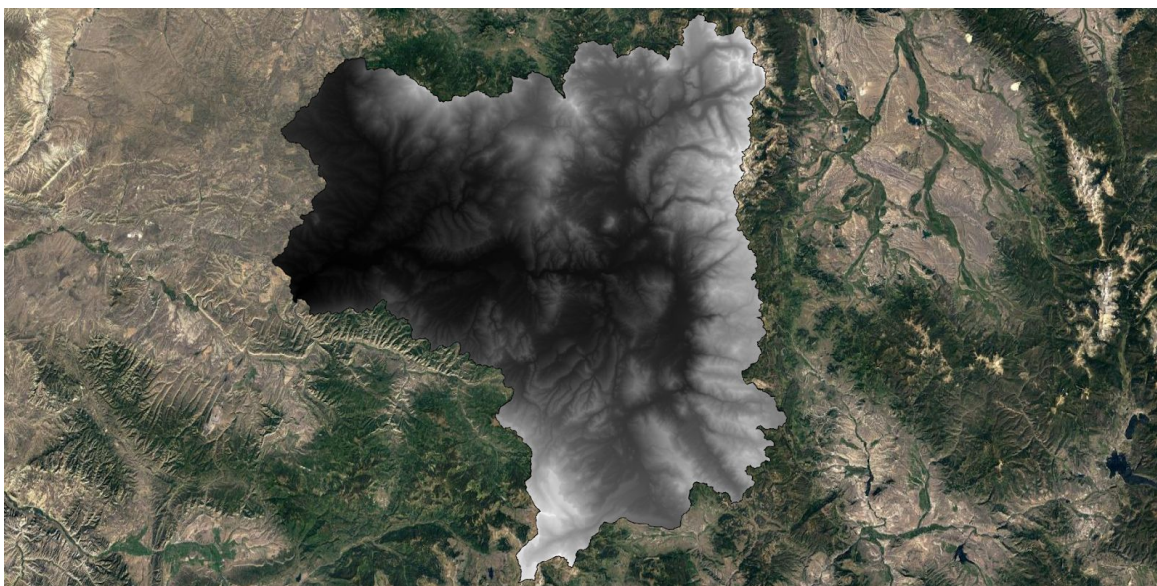


Figure 8 : SRTM 30m du bassin versant (source : GEE)

3.1.1. Station de mesure hydrologique

La carte de l'USGS (<https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/>) permet d'afficher toutes les stations de mesure actives et inactives sur le sol Américain. En zoomant et en sélectionnant une station adéquate, il est possible d'accéder aux données disponibles. Le débit et les disponibilités sont particulièrement intéressantes pour le travail.

L'analyse visuelle du graphe des débits peut se faire directement sur la page de la station et permet de voir rapidement si le débit de cette dernière correspond à un régime nival. La zone de recherche des stations se fait principalement dans les zones décrites au chapitre "2.1. Régime nival" comprenant la carte des climats de Köppen-Geiger. Dans les limites du possible, on s'abstiendra de sélectionner des zones où les barrages pourraient influencer fortement les débits journaliers et où l'agriculture est fortement développée et pourrait prélever une bonne partie du débit de fonte.

Pour le Canada, une carte interactive des stations existe ("*Données hydrométriques en temps réel*", 2019) mais elle n'est pas pratique pour sélectionner et visualiser les débits aux stations. En revanche, il existe un explorateur de données ("*Explorateur de données d'Environnement Canada*", 2016), dont l'interface commence à dater mais fonctionnel, qui permet de visualiser et de traiter rapidement les données à partir de la base de données HYDAT. Ces données sont recueillies par les huit bureaux régionaux des Relevés hydrologiques du Canada ("*Archives nationales des données hydrologiques : HYDAT*", 2018)

3.1.2. Sélection du shapefile

Une autre carte de l'USGS (<https://viewer.nationalmap.gov/basic/>) permet de visualiser les bassins hydrologiques (HU-2, HU-4 et HU-8) et de télécharger les fichiers vecteurs (shapefile) associés. Une ouverture via un éditeur de contenu d'information géographique comme QGIS permet de retirer au bassin (HU-4) ou au sous-bassin (HU-8) sélectionné les sous-bassins versants afin d'obtenir une forme au plus proche de la station de mesure

hydrologique contenant toutes les surfaces contribuant au débit mesuré à la station. Un exemple sera donné au chapitre “3.2.2. Shapefile”.

Il existe une nomenclature spécifique pour nommer les différentes zones hydrologiques aux États-Unis (“*Wbd (MapServer)*”, 2019) à savoir :

- 2-digit HU (Region) (1) Région
- 4-digit HU (Subregion) (2) Sous-région
- 6-digit HU (Basin) (3) Bassin
- 8-digit HU (Subbasin) (4) Sous-bassin
- 10-digit HU (Watershed) (5) Bassin versant
- 12-digit HU (Subwatershed) (6) Sous-bassin versant

Pour le Canada, un site web permet de visualiser les sous-bassins sans qu’il n’y ait la possibilité de choisir des découpages plus généraux et sans afficher des découpages plus petits comme pour les États-Unis (“*Open Maps Data Viewer*”, 2019). L’affichage est lent et pénible mais les numéros des sous-bassins sont indiqués, ce qui permet de télécharger ensuite les shapefile via un gestionnaire de fichiers accessible aussi sur un site web (“*Serveur FTP*”, 2019).

3.1.3. MODIS

“MODIS Terra daily” fournit un produit journalier de la couverture neigeuse ce qui permet d’obtenir une évolution de la couverture neigeuse dans le temps (Hall & Riggs, 2016). Cependant les images sont truffées de nuages et cela diminue la qualité d’image en réduisant la quantité de données disponibles. Il est ainsi nécessaire d’implémenter un ou plusieurs algorithmes vus précédemment au point “2.3.2. Obstruction par les nuages” afin d’obtenir des images avec moins de données manquantes. Le traitement se fait avec GEE au point “3.2.3. Surfaces journalières”.

Les images du produit de MODIS ont une précision d’environ 93% (Hall, 2007). Il se peut que certains nuages soient confondus et interprétés comme de la neige. Pour certains jours il peut n’y avoir aucune image disponible, il faut faire attention lors du traitement des données et par exemple ajouter des données vides aux dates inexistantes comme ce qui a été fait au point “3.2.3. Surfaces journalières”.

3.2. Récupération des données

La récupération des données continue avec l’exemple de la “Yampa River”.

3.2.1. Débits journaliers

La page web américaine de la station donne la possibilité d’obtenir les données journalières du débit moyen. Il est également indiqué si le débit est estimé et si les données ont été approuvés par le service. Certaines données peuvent être absentes comme la période du 10 février au 27 mars 2019 où la glace a perturbé les mesures. L’unité de mesure des débits est le pied cube par seconde. L’organisme américain nommé le “NIST: National Institute of Standards and Technology” donne la conversion pour passer du pied au mètre et qui vaut 0.3048 (Butcher, Crown & Gentry, 2006), il s’agit donc de diviser le débit par environ 35.315 afin d’obtenir le débit en m³/s. En l’occurrence les conversions ici ne sont pas vraiment utiles puisqu’on cherche à montrer les tendances via des pourcentages.

Pour le Canada, l’explorateur de données dont on a parlé au chapitre “3.1.1 Station de mesure hydrologique” permet de récupérer tous les débits journaliers de toutes les stations

sélectionnées en un clic (*“Explorateur de données d’Environnement Canada, Guide pratique”*, 2016). Les débits proviennent de la base de donnée HYDAT. Certaines stations se composent toutefois des mesures manquantes lors des saisons hivernales de basses eaux mais cela n’est pas très dérangeant pour notre étude car ce sont les débits de fonte au printemps qui sont importants.

3.2.2. Shapefile

La page web américaine permet de sélectionner le set de données qui nous intéresse. L’indice NHD comprenant une extension de région HU-4 ou HU-8 désignant une sous-région ou un sous-bassin est sélectionné avec un format de fichier shapefile qui peut être ouvert et modifié avec QGIS. Une fois ouvert dans le logiciel, les bassins versants (HU-10) et sous-bassins versants (HU-12) sont progressivement éliminés pour coller au plus près de la station et de ses surfaces d’alimentation en eau. La surface comprenant la station est sélectionnée puis tous les éléments sont fusionnés afin de créer une unique forme qui sera exportée et transférée sur GEE.

La *Figure 9* montre le processus de sélection du shapefile au plus proche de la station (petit point jaune côté gauche). La région entière est considérée comme un sous-bassin HU-8, les zones oranges correspondent à des bassins versants HU-10 et les plus petites surfaces en rouge sont les sous-bassins versants HU-12. Sur la *Figure 9*, un bassin versant a été retiré car ce dernier se jette dans le cours d’eau en aval de la station de mesure et n’influence pas les débits de cette dernière. Les sous-bassins versants sélectionnés pour le shapefile correspondant à la station “Yampa River” sont ainsi tous ceux qui restent sous les couches oranges des bassins versants. Ils seront fusionnés pour ne former qu’une seule forme.

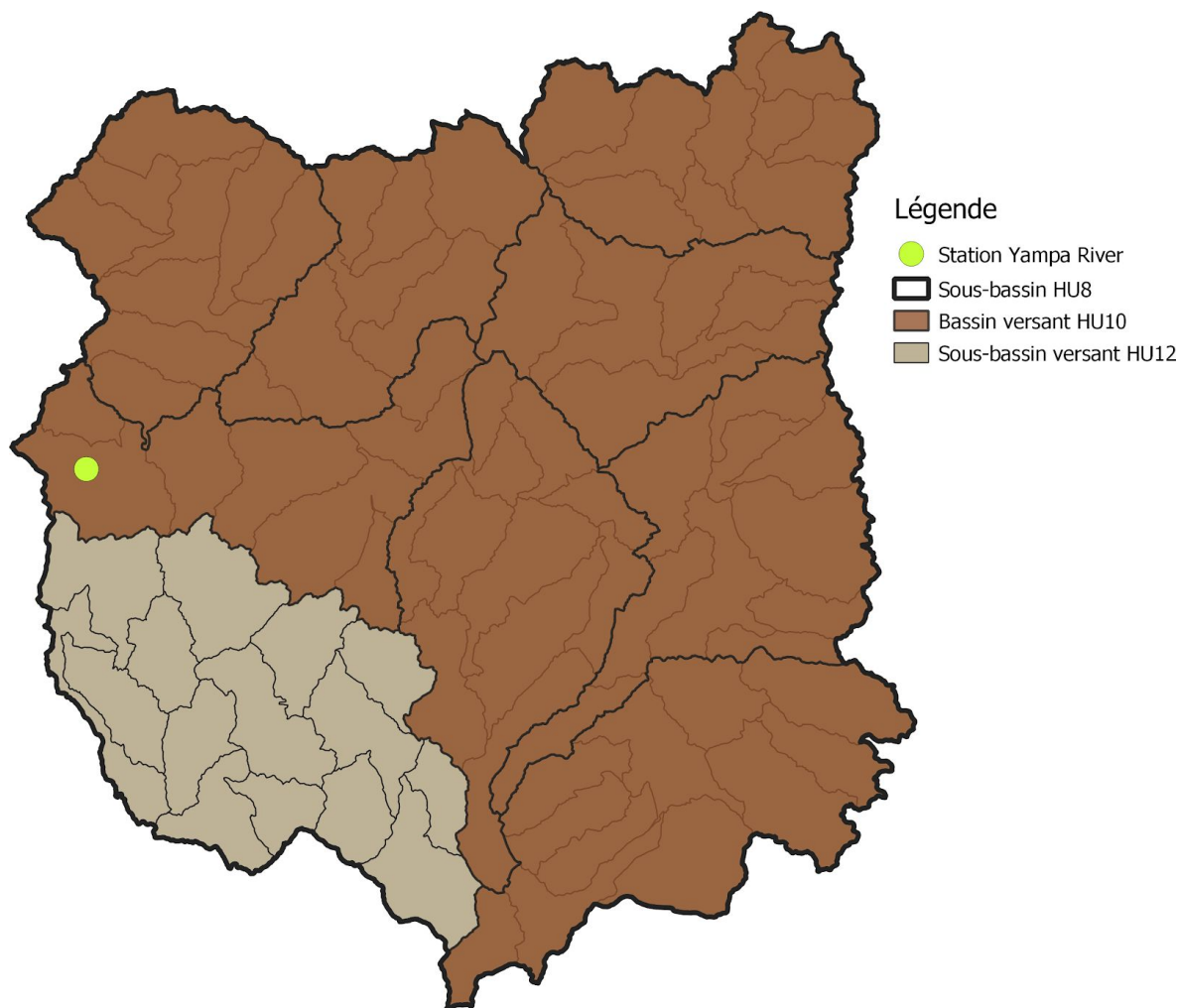


Figure 9 : Sélection du shapefile au plus proche de la station de mesure pour le bassin versant “Yampa River”

Avec les sous-bassins du Canada et leur numéro repéré au chapitre “3.1.2. Sélection du shapefile”, puis le shapefile téléchargé, il est parfois nécessaire de réaliser quelques coupes à la main afin que la surface colle au mieux aux bassins-versants d’alimentation en eau. Le découpage à la main se fait approximativement et pourrait générer quelques erreurs par la suite lors de corrélations avec les débits. Mais au vu de la taille des tuiles du produit “Snow Cover” et des surfaces concernées relativement faibles, il ne devrait pas y avoir de problème. Les surfaces concernées sont celles des bassins numéros 48, 50 et 51.

3.2.3. Surfaces journalières

Google Earth Engine permet de sélectionner rapidement les données satellitaires désirées tout en découpant la zone en fonction du shapefile du bassin précédemment sélectionné. Un fichier en .csv est extrait et affiche par colonne les données suivantes pour chaque jour :

- dates : date du jour en question
- nodata : la surface sans donnée disponible
- nosnow : la surface non recouverte de neige
- snow : la surface recouverte de neige

Le temps d'exécution est compris entre 30min et 60min selon la surface des bassins. Un traitement à l'échelle d'un continent donnerait probablement une erreur de "timeout" ne produisant ainsi aucune donnée exploitable. Une solution pour améliorer le temps de traitement serait de considérer une taille des tuiles plus grande que celle de 500m de MODIS. Cependant les calculs des surfaces seraient moins précis.

Une fois la collection d'images du produit "MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global 500m" ("*Dataset MOD10A1.006*", 2019) intégrée au projet et filtrée sur la période de temps recherchée puis découpée avec le shapefile associé, les bandes d'intérêt décrites à la *Table 2* sont récupérées et converties en masques binaires, c'est à dire avec une valeur de 1 là où on a récupéré des valeurs et 0 partout ailleurs.

Table 2 : Valeurs récupérées de MOD10A1.006

Bande	Valeurs récupérées	Information	Nom
NDSI_Snow_Cover	0	Pas de neige présente	nosnow
NDSI_Snow_Cover	1 à 100	Neige présente	snow
NDSI_Snow_Cover_Class	toutes	Pas d'info sur la neige	nodata

Malheureusement la collection d'images Terra comporte des données journalières manquantes où aucune information n'est retournée pour le jour en question. Un simple algorithme recrée des images sous forme d'un masque complet de "nodata" et des masques vides pour "snow" et "nosnow" à intégrer à la collection. Les étapes de l'algorithme pour l'intégration des images manquantes à la collection sont les suivantes :

1. Liste toutes les dates théoriques.
2. Compare les dates théoriques aux dates obtenues et conserve celles qui manquent.
3. Construit une image artificielle (masque "nodata" à 1, "snow" et "nosnow" à 0).
4. Intègre cette image artificielle à chaque date manquante et crée une collection.
5. Fusionne les collections d'images afin d'avoir toutes les dates.
6. Trie la nouvelle collection dans l'ordre croissant des dates.

Grâce à l'application de cet algorithme, et la création d'une collection d'images complète, il est possible d'appliquer l'algorithme temporel qui améliore l'information des images, en d'autres termes, qui catégorise plus de pixels "nodata" en "snow" ou "nosnow" et donc améliore le calcul du pourcentage des surfaces. L'algorithme temporel fonctionne ainsi :

1. Récupération des masques du jour actuel et des jours précédents.
2. Fusion des masques "snow" et "nosnow" représentant les données déjà acquises.
3. Soustraction du masque obtenu en 2. aux masques du jour précédent.
4. Ajout des résultats du point 3. aux masques "snow" et "nosnow", les masques "nodata" sont simplement multipliés entre eux.
5. Reprise au point 2. autant de fois qu'il y a de jours, dans notre cas, encore 3 fois.

Les étapes précédentes sont décrites sous le nom de l'algorithme "cloud-free" illustré en *Figure 10*. Le résultat final donne la collection prête sur laquelle les calculs de surface vont pouvoir se dérouler.

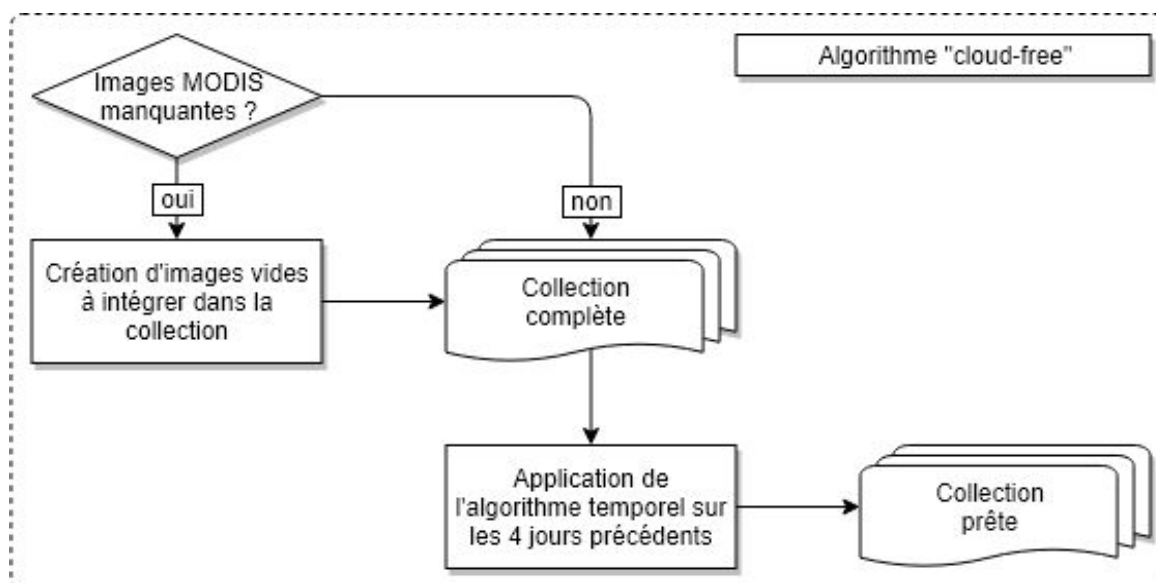


Figure 10 : Algorithme “cloud-free”

L'exportation en vidéo donne le résultat suivant : [en vidéo](#). Une capture de la vidéo est affichée en *Figure 11* où les surfaces de neige sont affichées en rouge, où il n'y a pas de neige en vert et où ce n'est pas déterminé en bleu (nuage, lac, etc.).

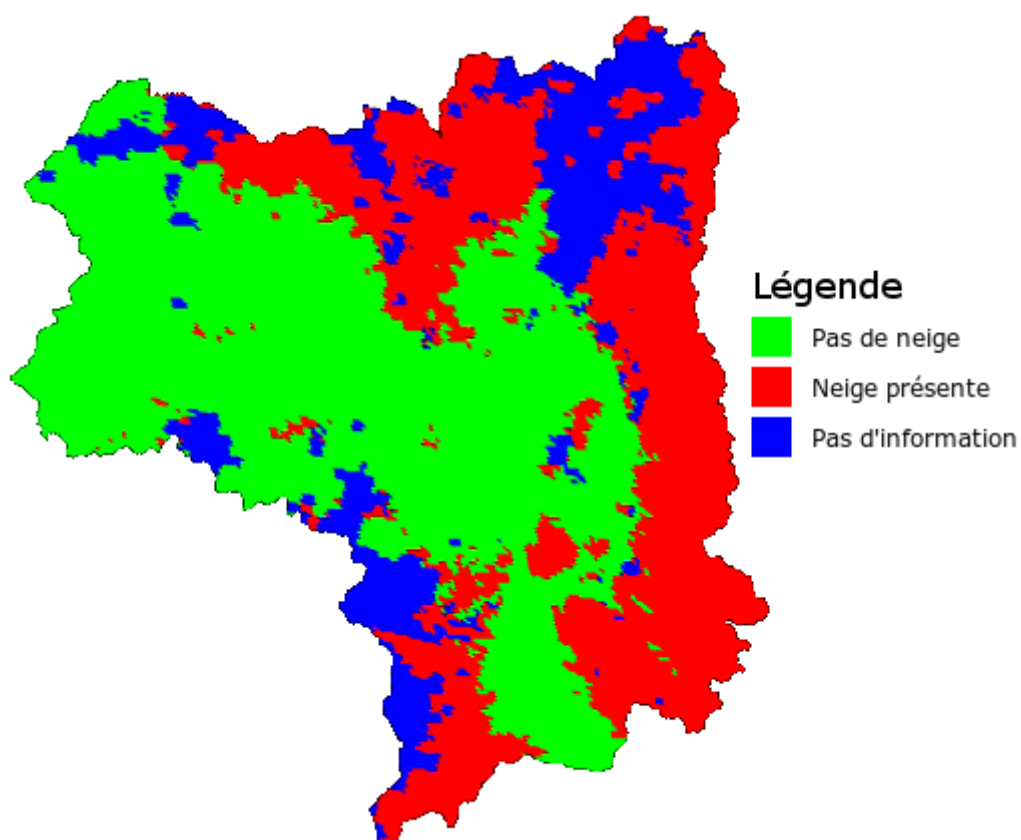


Figure 11 : Bassin versant de la “Yampa River” à une certaine date

Les calculs de surface sur les différents masques sont effectués à l'aide de la collection résultant de l'algorithme "cloud-free". Les masques sont multipliés par la surface d'un pixel divisée par 10^6 afin d'obtenir la surface en km^2 . Puis chaque pixel est sommé pour chaque masque et chaque jour afin d'obtenir la surface recouverte par la neige, celle sans neige et celle sans information sur l'état de la neige afin d'obtenir pour chaque jour ces informations. Il ne reste plus qu'à les exporter en un fichier .csv unique pour chaque bassin versant. Le code utilisé via GEE est en annexe au chapitre "7.2. Code Google Earth Engine".

3.3. Traitement des données

Le but est de généraliser la méthode décrite aux points "3.1. Choix de la station" et "3.2. Récupération des données" à une liste plus grande de stations. Une fois toutes les données récoltées il est temps de les traiter en utilisant Matlab. Certaines parties de ce chapitre montrent en exemple le même bassin versant traité auparavant pour l'année 2017/2018.

La situation géographique de tous les bassins versants utilisés est montrée avec la *Figure 12*. Le détail de chaque bassin figure en annexe au chapitre "7.1 Table des bassins versants".

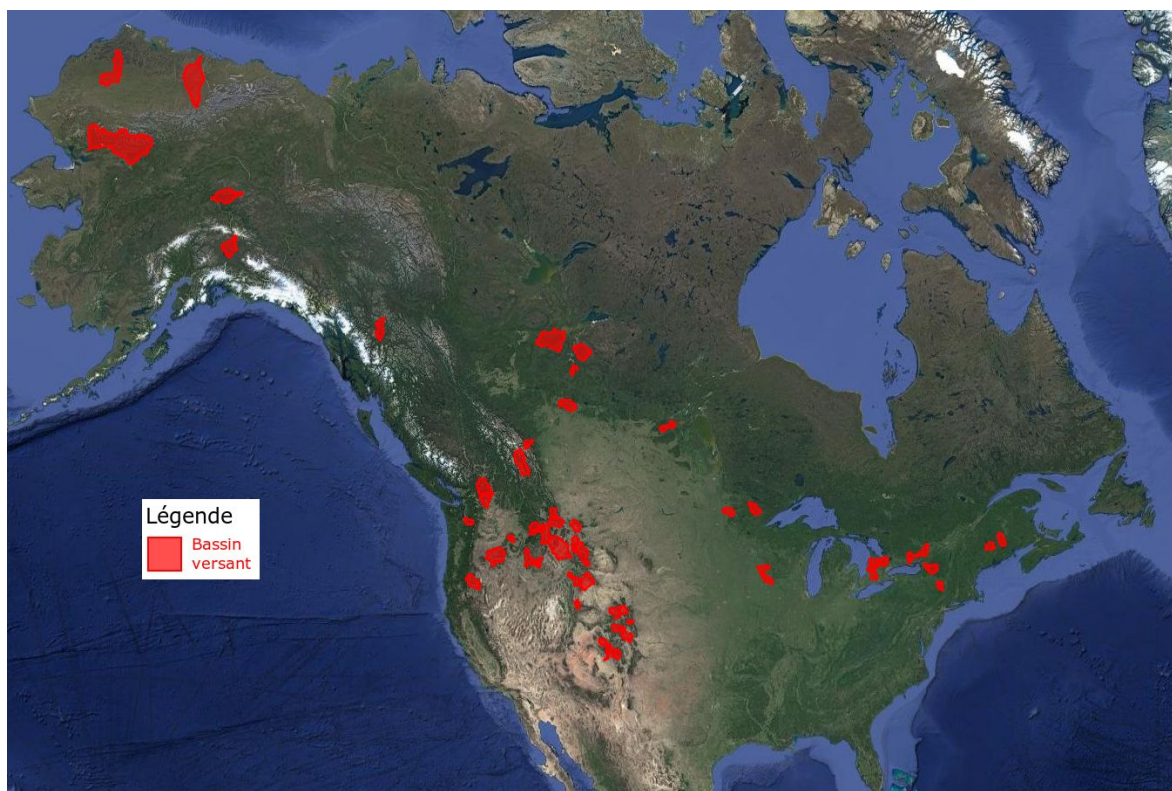


Figure 12 : Localisation des bassins versants (source : GEE)

3.3.1. Importation des données

Les données générées précédemment en fichiers .csv sont maintenant importées et utilisées à l'aide de Matlab. Il y a à disposition pour chaque station :

- informations générales : nom, coordonnées, surface, altitudes,

- série temporelle des débits : date, débit moyen journalier,
- série temporelle des surfaces : date, surface enneigée, surface sans neige, surface indisponible.

3.3.2. Calculs

Dans les paragraphes suivants, plusieurs méthodes de calculs sont expliquées en détails. Selon les valeurs appliquées aux variables listée dans la *Table 3*, les résultats peuvent changer légèrement mais sans modifier les tendances globales comme il sera montré plus tard au chapitre “5.2. Sensibilité des paramètres”.

Table 3 : Liste des variables

Nom	Valeur	Description
<i>pourcent_start_fonte</i>	95	Pourcentage de surface en neige à considérer pour le début de la fonte, cette valeur sera ajustée en fonction des 30 valeurs les plus hautes de la couverture neigeuse.
<i>pourcent_end_fonte</i>	5	Pourcentage de surface enneigée à considérer pour la fin de la fonte, cette valeur sera ajustée en fonction des 30 valeurs les plus basses de la couverture neigeuse.
<i>nb_values_snow</i>	5	Nombre de valeurs à prendre en compte pour la moyenne mobile centrée pour les courbes de couverture neigeuse. Doit être impair.
<i>nb_values_debit</i>	5	Nombre de valeurs à prendre en compte pour la moyenne mobile centrée pour les courbes de débits. Doit être impair.
<i>cloud_free</i>	75	Pourcentage de données disponibles sur une image pour la considérer dans les calculs de lissage des courbes de couverture neigeuse.
<i>val_pre</i>	5	Nombre de valeurs à prendre pour calculer la médiane des valeurs avant le point d'étude. Entre en compte dans le calcul du point de début et fin de fonte.
<i>val_post</i>	10	Nombre de valeurs à prendre pour calculer la médiane des valeurs après le point d'étude. Entre en compte dans le calcul du point de début et fin de fonte.
<i>nb_bv</i>	57	Nombre de bassins versants disponibles pour lesquels les données existent et peuvent être utilisées.

Ces paramètres sont utilisés dans le code Matlab en annexe aux chapitres “7.3.1. Code général” et aux fonctions dépendantes “7.3.2. Traitement des surfaces” et “7.3.3. Traitement des débits”.

Les valeurs pour le jour du début et la fin de la fonte ont été choisies à 95 et 5% respectivement. Dans un cas idéal, la couverture de neige passerait de 100 à 0% et on

pourrait définir facilement les deux points. Mais comme les données varient et ne sont jamais parfaites, il faut essayer de prendre des pourcentages rapprochés. L'étude de Dariane et al. (2017) définit également 5% comme valeur pour le seuil de début et de fin d'enneigement. Ici on adapte cette valeur à la moyenne des 30 jours les plus enneigés et les moins enneigés afin de prendre en compte les spécificités de chaque bassin et de chaque année. Couplées à ce pourcentage, les variables *val_pre* et *val_post* permettent de bien déterminer les points d'intérêt et d'éviter qu'ils soient confondus avec par exemple un retour de la neige tardif après la fonte et qui durerait quelques jours.

Pour le lissage des données, que ce soit pour la couverture neigeuse ou le débit, une moyenne de 5 jours semble bien acceptée puisque Dariane et al. (2017) l'utilise également, ainsi que Déry et al. (2009b) dans un contexte un peu différent. Le lissage sert ainsi à amoindrir quelques valeurs extrêmes qui auraient pu se glisser dans les données. Si le lissage est trop élevé, il y a un risque de décalage par étalement des jours de début et de fin de fonte.

La valeur de *cloud_free* permet de garder les données de qualité bénéficiant de suffisamment de surface connue afin d'effectuer le rapport de la surface enneigée sur la surface connue pour le calcul du pourcentage de neige. Une valeur à 100% ne sélectionnerait quasiment aucune donnée et une valeur à 0% permettrait à des valeurs qui auraient de grandes chances d'être aberrantes de s'introduire dans les calculs.

3.3.2.1. Sélection des jours

La disponibilité des surfaces des bassins versants a été grandement améliorée grâce à l'algorithme temporel mais des informations sont toujours manquantes. C'est pourquoi un taux arbitraire de 75% de données disponibles (surface neige et sans neige) est fixé pour la sélection des dates, les jours n'atteignant pas le taux de 75% sont ignorées dans la construction de la série de valeurs. Ceci afin d'éviter un calcul du pourcentage de neige se faisant sur une trop faible surface et donc plus propice à l'aléatoire.

Concernant les débits des bassins versants, toutes les données sont conservées car elles ont été approuvées par l'organisme qui se charge de les publier.

La *Table 4* affiche le nombre d'images obtenues en fonction de l'algorithme temporel appliqué. Le nombre d'images avec moins de 25% de la surface manquante est considérablement augmenté passant de 138 à 327 sur un total de 365 images. Il est intéressant de constater qu'avec l'application de l'algorithme à 4 jours, 353 images ont moins de 75% de leur surface sans information tandis que 12 images ont toujours plus de 75% de leur surface sans information.

Table 4 : Nombre d'images utilisées

Informations manquantes	Image journalière	Algo 1 jour	Algo 2 jours	Algo 3 jours	Algo 4 jours
< 25 %	138	220	269	304	327
< 50 %	198	275	318	340	348
< 75 %	240	307	335	348	353

3.3.2.2. Lissage des séries

Une interpolation linéaire est appliquée afin de combler les données manquantes suite à la sélection des jours au point “3.3.2.1. Sélection des jours”. Elle permet également de combler les données des jours où il n’y avait pas d’image du satellite Terra. Ensuite une moyenne mobile de 5 jours (*nb_values_snow*) est appliquée pour lisser les données afin d’atténuer des épisodes particuliers courts mais intenses (par exemple un épisode neigeux au printemps recouvrant tout le territoire mais fondant en très peu de temps).

Pour les débits, en cas de donnée manquante, la valeur est ignorée et l’année complète peut être exclue s’il n’y a pas de mesures. Le lissage fonctionne de la même manière que pour les surfaces de neige et une moyenne mobile de 5 jours (*nb_values_debit*) est également appliquée.

La *Figure 13* affiche les moyennes mobiles des surfaces de neige en pourcent représentant au moins 75%, 50% et 25% de la surface non obstruée par les nuages ainsi que le débit de la rivière en pourcent au prorata de son débit maximal non lissé. Pour ce graphe, aucun algorithme temporel n’a été appliqué pour le calcul des surfaces à l’étape “3.2.3. Surfaces journalières” lors du traitement via GEE.

La *Figure 14* suivante présente les mêmes informations mais cette fois avec l’algorithme temporel appliqué sur les 4 jours précédents.

Dans les grands traits, les 2 figures sont semblables et représentent bien la forme générale. Toutefois, en raison du nombre plus faible de données retenues pour la première figure, on observe que les courbes sont très différentes pour certaines parties. L’application de l’algorithme temporel sur 4 jours permet de préciser ces zones floues et donc de permettre par la suite un meilleur calcul des points de début et de fin de fonte.

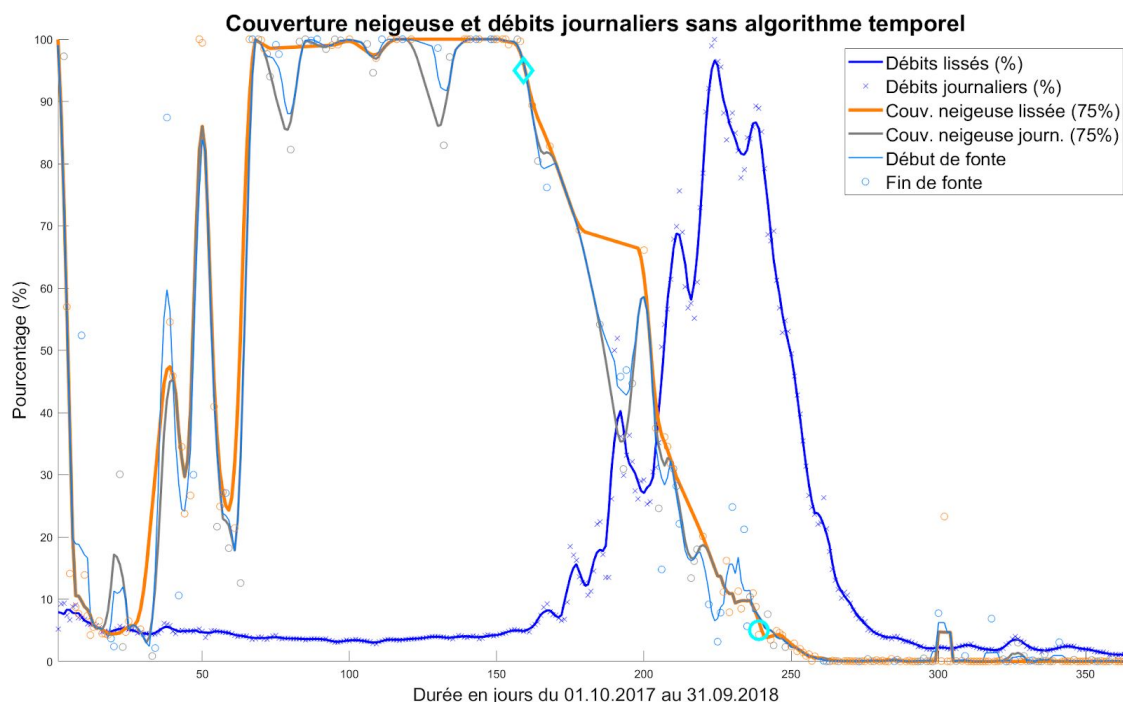


Figure 13: Couverture neigeuse et débits en pourcent avec moyenne mobile centrée sur 5 valeurs en utilisant les données brutes journalières sans algorithme

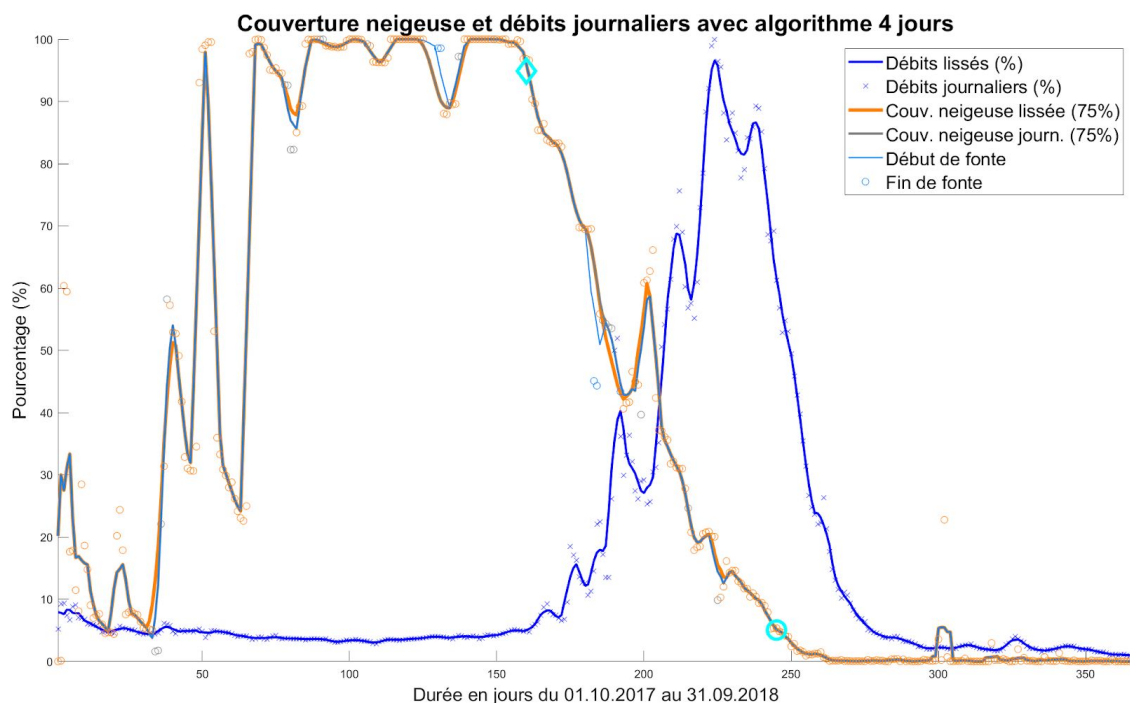


Figure 14 : Couverture neigeuse et débits en pourcent avec moyenne mobile centrée sur 5 valeurs en utilisant l'algorithme "cloud-free" sur 4 jours

3.3.2.3. Calcul des points de repère

Afin de pouvoir dégager des tendances de toutes les données obtenues, il est important de pouvoir définir des points de repère qui suivent les mêmes règles pour l'entier des données. Ces derniers et les conditions à remplir sont détaillés à la *Table 5*.

Table 5 : Points de repère et conditions

Point de repère	Conditions
Début de fonte (start_fonte)	1. La médiane des 5 (<i>val_pre</i>) jours précédents doit être plus grande que le pourcentage de début de fonte ajusté (qui correspond à 95% (<i>pourcent_start_fonte</i>) dont on a soustrait la différence entre 100% et la moyenne des 30 jours les plus enneigés). 2. La médiane des 10 (<i>val_post</i>) jours suivants doit être plus petite que le pourcentage de début de fonte ajusté. 3. Le pourcentage d'enneigement du jour doit être plus grand ou égal au pourcentage du début de fonte ajusté.
Fin de fonte (end_fonte)	1. La médiane des 5 (<i>val_pre</i>) jours précédents doit être plus grande que le pourcentage de fin de fonte ajusté (qui correspond à 5% (<i>pourcent_end_fonte</i>) dont on a ajouté la différence entre 0% et la moyenne des 30 jours les moins enneigés). 2. La médiane des 10 (<i>val_post</i>) jours suivants doit être plus petite que le pourcentage de fin de fonte ajusté.

	- Le pourcentage d'enneigement du jour doit être plus grand ou égal au pourcentage du fin de fonte ajusté. - Le nombre de jours parmi les 25 ($5 \cdot val_pre$) jours précédents ayant une valeur plus petite que le pourcentage de fin de fonte ajusté doit être inférieur à 5 (val_pre). Si cette condition ne se vérifie pas, la variable val_pre est incrémentée de 1 jusqu'à trouver une date remplissant la nouvelle condition parmi les 25 jours précédents.
Débit maximal (peak_day et peak_discharge)	Doit être situé après le début de la fonte.

Ainsi les points de repère sont obtenus et on peut les voir dans les *Figure 13* et *Figure 14* précédentes.

A noter que les valeurs val_pre et val_post ont été choisies subjectivement après plusieurs essais. Elles réussissent mieux que d'autres valeurs à représenter visuellement les points de début et de fin de fonte sur la période de décroissance de la couverture neigeuse.

La *Table 6* montre le calcul des jours du début et de fin de fonte. Le jour du début de la fonte est calculé directement très proche du résultat final et l'application de l'algorithme temporel sur un jour permet déjà de trouver la bonne valeur tandis que le jour de fin de fonte est calculé juste dès l'algorithme temporel sur 2 jours. Toutefois le jour de fin de fonte a été calculé relativement proche du bon résultat. On constate aussi que moins d'images (*Table 4* au ch. "3.3.2.1 Sélection des jours"), mais avec plus d'informations (<25% manquant) est moins efficace pour déterminer les points de repère que plus d'images même de moins bonne qualité. Cela s'explique de part la recherche d'un pourcentage d'enneigement, si les nuages sont distribués aléatoirement sur le territoire, le pourcentage d'enneigement calculé ne changera pas et donnera ainsi de bons résultats. Mais il y a également un risque que les nuages ne recouvrent que la surface de neige et faussent le résultat. Dans le cas présent, il est plus plausible que les nuages aient été répartis aléatoirement, assurant un bon résultat. Au final, il n'est pas très important de vouloir appliquer d'autres algorithmes d'amélioration de la disponibilité de l'information (image avec un masque "no_data" très réduit).

Table 6 : Jour du début et de fin de fonte

Informations manquantes	Image journalière		Algo 1 jour		Algo 2 jours		Algo 3 jours		Algo 4 jours	
< 25 %	159	239	160	241	160	245	160	245	160	245
< 50 %	159	242	160	244	160	245	160	245	160	245
< 75 %	159	242	160	244	160	245	160	245	160	245

4. Résultats

Les étapes précédentes décrites au chapitre “3. Méthodes” sont maintenant généralisées aux 57 bassins sélectionnés faisant partie du set de données sélectionné dans le travail. Les données utilisées se trouvent en annexe au chapitre “7.1 Table des bassins versants”.

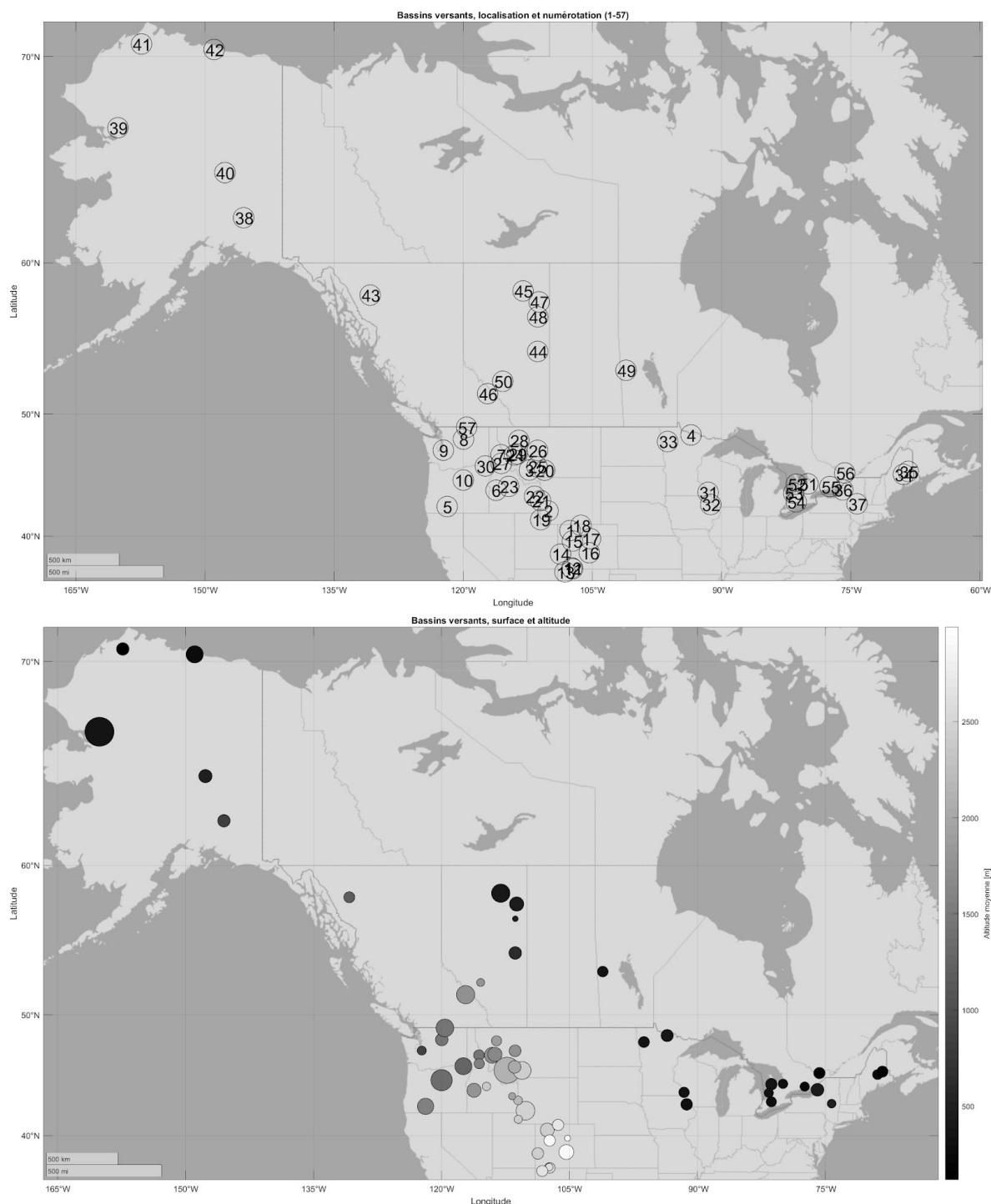


Figure 15 : Situation des bassins versants et altitude moyenne

Pour compléter la *Figure 12*, la *Figure 15* présente les mêmes bassins versants mais avec un cercle positionné à la station de mesure de diamètre proportionnel à la surface et de couleur du noir au blanc représentant l'altitude moyenne. Les altitudes ont été calculées à l'aide des données SRTM à 30m de résolution ("*SRTM 30m*", 2019) sauf pour les bassins versants de 38 à 42 situés le plus au nord et ne bénéficiant pas des données SRTM. Les données GMTED2010 ("*Dataset GMTED2010*", 2019) ont été utilisées sur ces bassins versants pour calculer leur surface moyenne. La résolution est de 7.5 arc-secondes, moins précise que SRTM qui est à une résolution d'approximativement 1 arc-seconde, soit 30m.

A noter que la récolte de données pour les débits des bassins versants a donné lieu à quelques particularités. Certaines stations ne réalisent aucune mesure durant la période des basses eaux et pour d'autres des années entières sont manquantes. En principe, les bassins versants avec des données manquantes ne sont pas sélectionnés mais lors du processus de sélection, il n'était pas clairement indiqué qu'il en manquait et cela n'a été découvert que lors du traitement des données. Pour les bassins versants où il manque les données de basses eaux, ils ne constituent pas tellement un problème vu que ce sont les hautes eaux qui représentent les informations utiles pour nous. Pour ceux où il manque des années, les calculs des droites de régression se feront avec moins d'années. La *Table 7* résume les particularités.

Table 7 : Particularités des données des débits selon les bassins versants

Problème	Bassin versant	Conséquence
Basses eaux manquantes	16, 28, 44, 45, 47, 48 et 49	insignifiante
Années manquantes	31 : 2004, 2009 → 2012 39 : 2004 → 2008, 2013, 2014 41 : 2000 → 2005 46 : 2018	moins de données pour calculer le jour du pic et les débits maximaux, et donc des droites de régressions avec moins de données pour peak_day et peak_discharge
Basses eaux manquantes et années manquantes	26 : 2000 → 2006	

4.1. Statistiques et analyse

Le traitement des 57 bassins versants donne pour chacun d'entre eux une figure telle que la *Figure 16* sur laquelle toutes les années de 2000/01 jusqu'à 2017/18 ont été superposées. Le code couleur varie du bleu pour la première année au rouge pour la dernière année. Les figures sont très utiles visuellement pour identifier les points de début/fin de fonte et les débits de pointe. Par exemple on remarque que pour le premier bassin, la forme générale est sensiblement la même d'année en année mais avec des variations relativement importantes en terme de débit de pointe passant d'environ 20% à plus de 90% de la moyenne journalière la plus grande (pour rappel, la surface de neige et les débits sont lissés sur 5 jours).

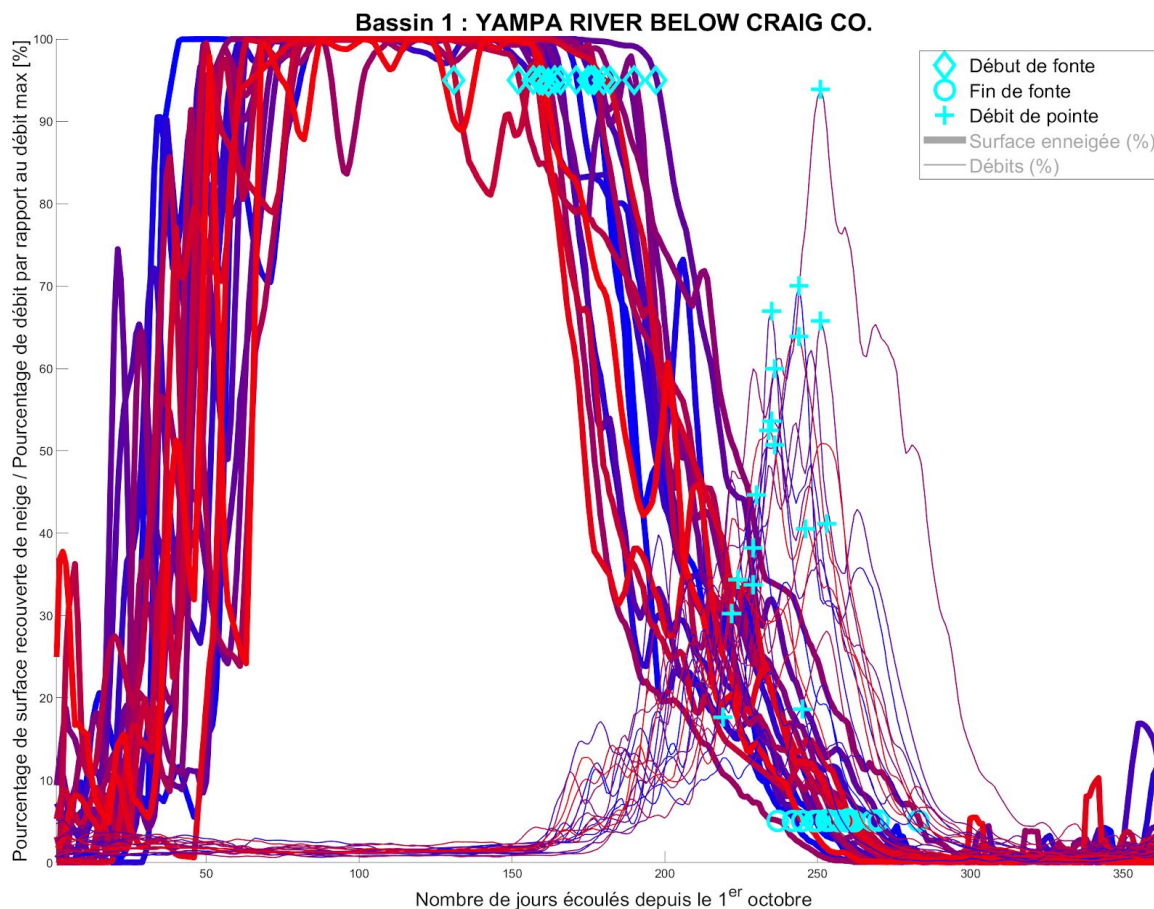


Figure 16 : Couverture neigeuse et débits superposés avec les points d'intérêts pour toutes les années au bassin versant "Yampa River"

Les points qui ont été définis à la *Figure 16* sont ensuite reportés sur la *Figure 17* et des droites de régression sont calculées pour chacun des paramètres, et en plus, également pour le volume centré, qui représente la date à laquelle le volume d'eau des débits cumulés atteint la moitié de son volume annuel, et qui n'a pas été affiché sur la *Figure 16* pour plus de lisibilité. Les valeurs des pentes pour chaque paramètre à la station "Yampa River" sont de -0.8793 pour le début de fonte, 0.2487 pour la fin de fonte, 0.2012 pour la date du débit de pointe et 0.1651 pour le volume centré. Cela signifie que sur la période de 2000 à 2018, le bassin "Yampa River" a perdu 0.8793 jours/an pour le jour du début de fonte, ce qui représente un décalage en amont du début de fonte de presque 16 jours en 18 ans. En revanche les paramètres de fin de fonte, de la date du débit de pointe et du volume centré se situent plus tard entre 3 et 4.5 jours.

Il est à noter que la variabilité des points d'intérêt est relativement grande et qu'une année exceptionnelle peut avoir un impact important sur les résultats d'un bassin versant. Mais grâce à la multiplication des données sur un nombre plus grand de bassins versants, il est possible de montrer des tendances à plus large échelle et de réduire l'incertitude.

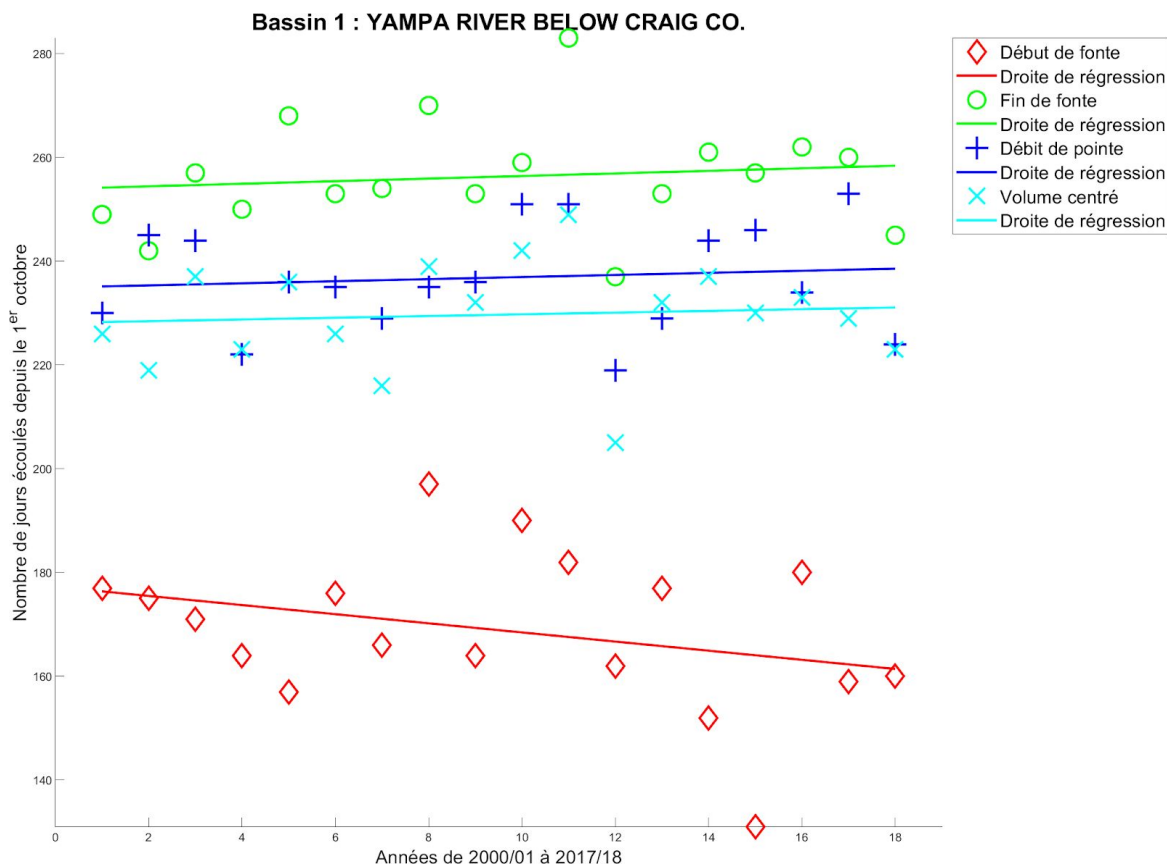


Figure 17 : Points d'intérêts et droites de régression pour le bassin versant "Yampa River"

Après l'analyse visuelle des deux figures précédentes pour tous les bassins versants, certains ne rentrent pas totalement dans le moule prédéfini durant la méthode, principalement concernant les débits comme le résume la *Table 8*.

Table 8 : Analyse visuelle des pics de débit

Phénomène	Bassin versant	Conséquence
Un pic de débit sans lien avec la fonte des neiges	39, 41, 51, 52, 53 et 54	les pentes des droites de régression des débits sont faussées de manière plus ou moins importante
Quelques pics de débit sans lien (entre 2 et 4)	34, 35, 36, 37, 38, 50 et 55	
Plusieurs pics de débit sans lien (5 et plus)	4, 31, 32, 33, 40, 44, 45, 47, 48 et 49	
Présence de glaciers	9 et 46	influence de la fonte sur les débits

Si tous les bassins versants indiqués dans la *Table 8* seraient retirés de l'analyse il ne resterait qu'à quelques rares exceptions plus que les bassins versants situés dans les Rocheuses du côté américain. Tous les bassins sont conservés pour la suite de l'analyse

mais une discussion sera consacrée à l'influence de ce choix dans le chapitre "5.2 Pics de débits". La discussion montrera que les garder n'a pas modifié les tendances générales.

Les boîtes à moustaches sont une manière de représenter les données. Ici elles sont utilisées pour indiquer la médiane et le comportement des autres données autour de cette médiane. La *Figure 18* montre les boîtes pour différents paramètres, la ligne rouge indique la médiane, le rectangle bleu indique à son bord supérieur le 75% des valeurs et à son bord inférieur le 25%. La boîte contient donc le 50% des valeurs. Les moustaches en traitillé sont formées par la distance entre les 2 quartiles multipliée par 1.5 ou s'arrêtant à la dernière valeur. Les valeurs au-delà des moustaches sont considérées comme aberrantes.

La *Figure 18* montre des résultats globalement satisfaisants même si les valeurs pour la date du pic de débit sont très éparpillées, ce qui est une conséquence directe de la discussion concernant la *Table 8*.

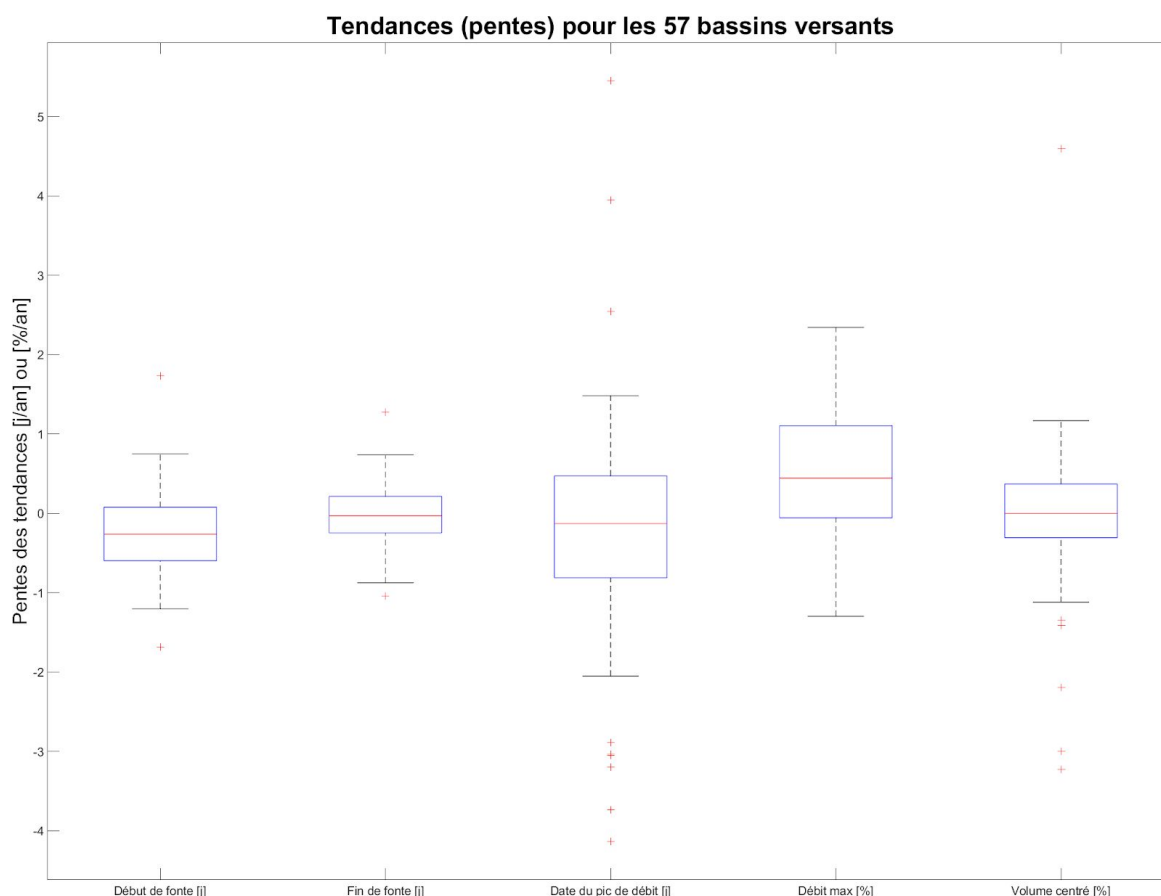


Figure 18 : Boîtes à moustaches pour les paramètres de début/fin de fonte, date/pourcentage du pic de débit et volume centré des 57 bassins versants

Afin de mieux comprendre ce que signifient les valeurs médianes indiquées à l'aide des boîtes à moustaches, la *Table 9* relève les médianes et donne une interprétation. On y apprend que durant la période de 18 ans que couvre l'étude, le début de la fonte intervient 4.7 jours plus tôt tandis que la fin de la fonte 0.5 jours plus tôt. Le pic de débit a gagné un volume de 8% et se déroule 2.3 jours plus tôt tandis que la volume centré ne montre pas de décalage. Il est important de noter qu'il ne s'agit que d'observations et que les

interprétations sont difficiles et peuvent être multiples. Quelques analyses seront menées au chapitre “5.5. Interprétation”.

Table 9 : Valeur médiane des pentes des bassins versants

Paramètre	Valeur médiane des pentes	Interprétation en 18 ans
Début de fonte	-0.2621	la fonte commence 4.7 jours plus tôt
Fin de fonte	-0.0289	la fin de fonte commence 0.5 jours plus tôt
Date du pic	-0.1269	la date du pic de débit a lieu 2.3 jours plus tôt mais varie fortement selon les bassins versants
Pic de débit	0.4450	le pic de débit a cru de 8% par rapport au débit max.
Volume centré	0	pas de changement significatif

Le phénomène de la fonte des neiges ne se déroule pas toutes les années à la même date et certains facteurs climatiques l’influencent. Comme on le voit à la *Figure 17*, les points sont situés à différents niveaux avec des écarts qui peuvent atteindre près de 2 mois d’une année à l’autre. Plus il y a de points disponibles et plus le calcul de la tendance sera robuste mais dans le cas d’un phénomène qui se produit une fois par année, il est important d’être conscient que des biais peuvent facilement être introduits comme par exemple une année exceptionnellement chaude et sèche au début ou à la fin des mesures qui va fortement influencer la droite de régression.

Les *Figure 19* et *Figure 20* montrent les compositions détaillées des paramètres de la *Figure 18* représentant les boîtes à moustaches. On peut y voir en détail les bassins versants et repérer ceux où une forte variance des points utilisés pour le calcul de la droite de régression a été constatée. Sans surprise, on constate que les bassins versants listés à la *Table 8*, dont les jours de débits de pointe ne correspondaient pas à la période de fonte, affichent une grande variance pour le paramètre du jour du pic de débit. Il est intéressant de noter que le jour de début de fonte présente une plus forte variabilité que le jour de fin de fonte. Il est probable que la neige commençant à fondre aux altitudes les moins élevées et la couche de neige plus faible rendent le jour du début de fonte plus sensible aux effets climatiques régionaux tandis que la couche de neige en altitude plus épaisse sera moins fortement impactée et aura un effet tampon ce qui a pour conséquence de donner au jour de fin de fonte une plus petite variabilité. Cela découle également des paramètres de détection pour le début et la fin de fonte fixés à 95% et 5% des 30 jours les plus et moins enneigés.

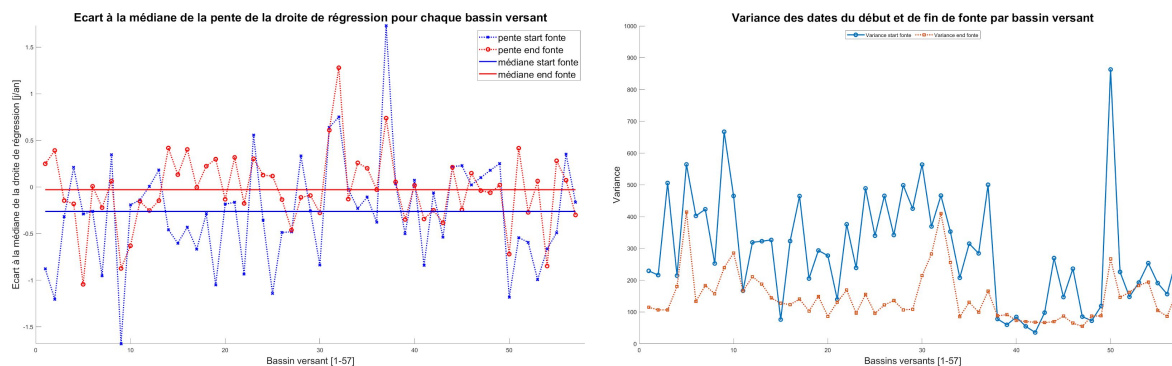


Figure 19 : Écart à la médiane (gauche) et variance (droite) des dates du début et fin de fonte

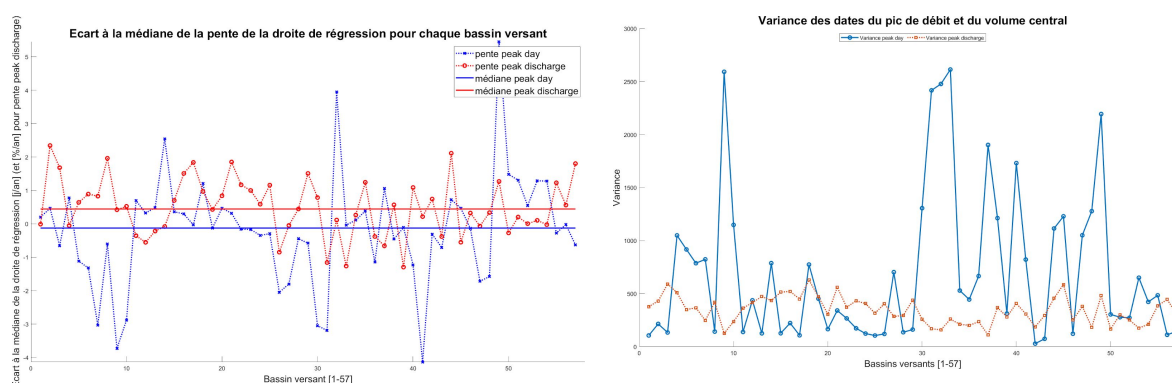
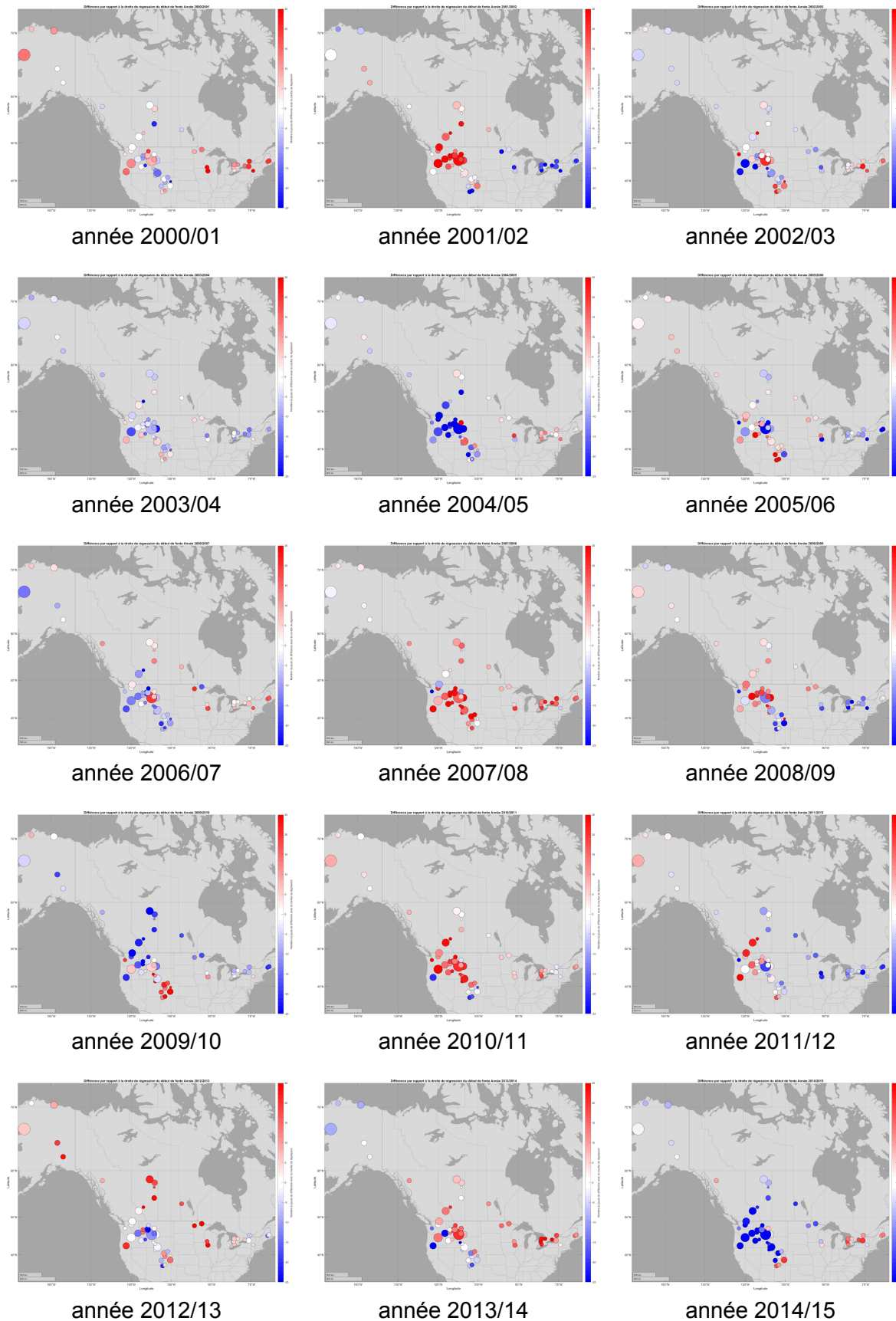


Figure 20 : Écart à la médiane (gauche) et variance (droite) des dates du pic de débit et du volume central

On s'intéresse maintenant au jour du début de fonte afin de voir son évolution à travers les années. La *Figure 21* montre l'écart à la droite de régression de ce jour de fonte pour tous les bassins versants et pour toutes les années. En parcourant les différentes années, on s'aperçoit que le jour de début de fonte varie fortement d'une année à l'autre pour chaque bassin mais aussi que tous les bassins versants d'une certaine région réagissent de façon similaire. Grâce à la densité des points, la zone des Rocheuses est bien identifiée et se comporte en général de la même façon à l'exception du sud qui se comporte différemment mais dont on peut voir les bassins entre les deux régions prendre des valeurs intermédiaires. Dans la région, des fontes particulièrement précoces ont eu lieu en 2004/05 et 2014/5 tandis que des fontes particulièrement tardives ont eu lieu en 2001/02 et 2017/18. La zone des Grands Lacs et de la côte est affichent également des valeurs similaires. D'ailleurs pour cette zone, l'année 2000/01 a vu une fonte tardive et l'année suivante 2001/02 une fonte précoce, et un coup d'oeil suffit à identifier les années particulières.

Ecart en jours du jour du début de fonte de chaque année et pour chaque bassin versant aux droites de régression



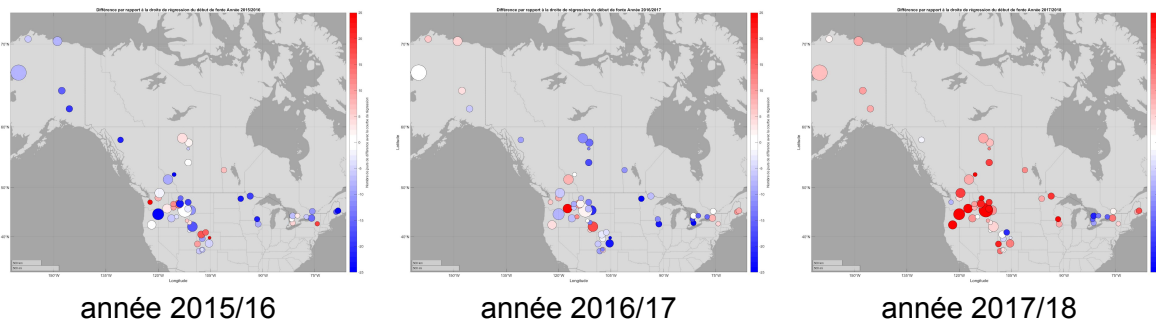


Figure 21 : Écart en jours aux droites de régression pour chaque année

Avec les droites de régression obtenues pour le jour du début de fonte, il est également possible de les représenter sous forme de carte afin d'avoir une bonne vision territoriale et de repérer certaines tendances. En l'occurrence, la *Figure 22* montre que la tendance est à la précocité du jour du début de fonte, particulièrement dans les Rocheuses. La carte sert également à repérer les bassins versants particuliers et d'enquêter. Dans le cas présent la bassin 37 est le point le plus rouge de la carte, son graphe montre des changements très rapides dans la couverture neigeuse. La bassin 9 est celui qui représente le point le plus bleu, et qui affiche lui aussi des changements brutaux en plus de comprendre une surface glacière et un différentiel d'altitude très grand pour une petite surface. Ce sont en quelque sorte des cas particuliers qui sont ignorés lors du calcul de la médiane.

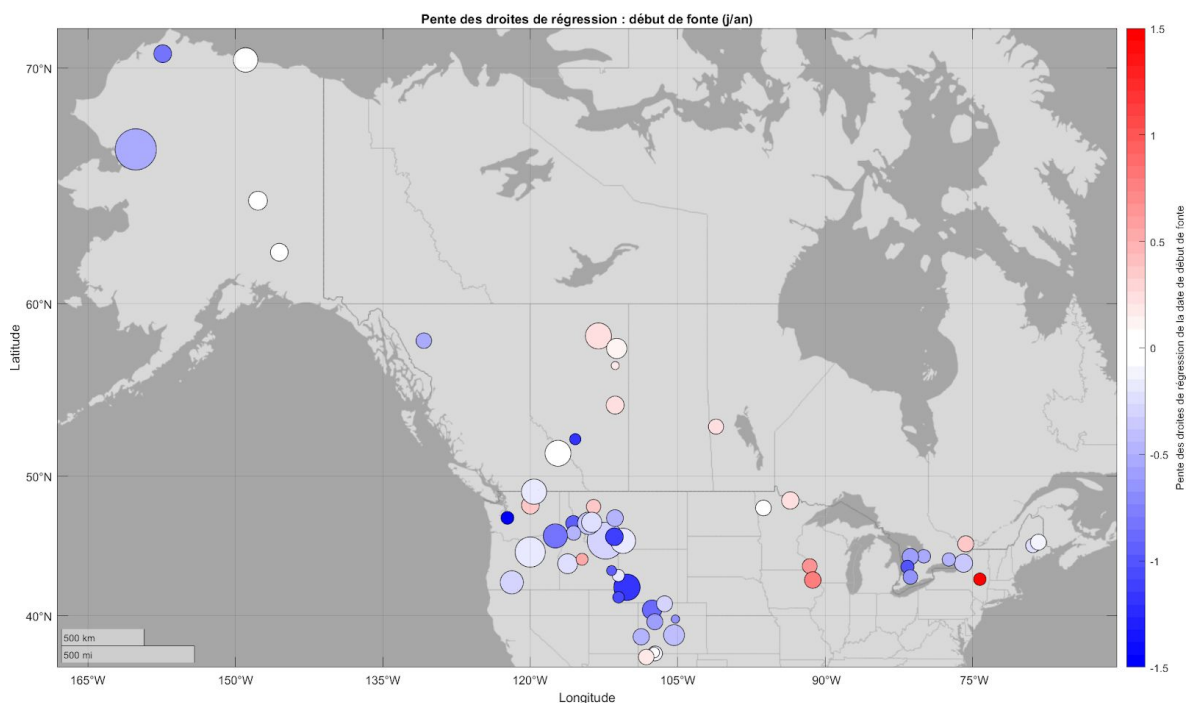


Figure 22 : Pente de la droite de régression du début de fonte pour chacun des bassins versants

Une autre manière de représenter les résultats précédents concernant le jour du début de fonte est avec une seule image regroupant toutes les années et tous les bassins, soit 1026 rectangles de couleur que montre la *Figure 23*. Sur cette *Figure 23*, les bassins versants

sont classés par latitude, leur numéro diffère donc des autres figures. On repère aisément des années ou des régions où le jour du début de fonte est fortement éloigné de la droite de régression. Fait intéressant, les bassins versants les plus au nord situés en Alaska (39, 42 et 41) présentent des écarts moins importants par rapport à leur droite de régression et affichent des variances plus faibles.

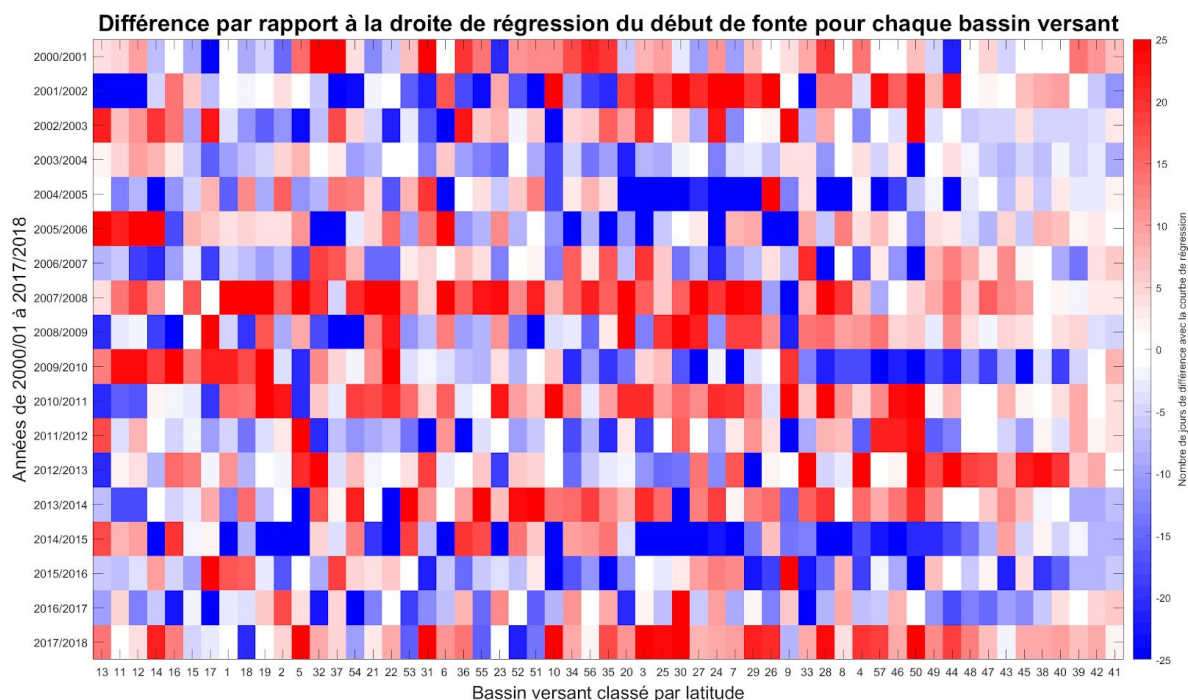


Figure 23 : Écart aux droites de régression pour toutes les années et tous les bassins versants sous forme imagée

Les droites de régression du jour de fin de fonte sont un peu plus contrastées comme le montre la *Figure 24*, même s'il semble que les bassins versants qui voient une fonte plus tardive soient situés plutôt au sud.

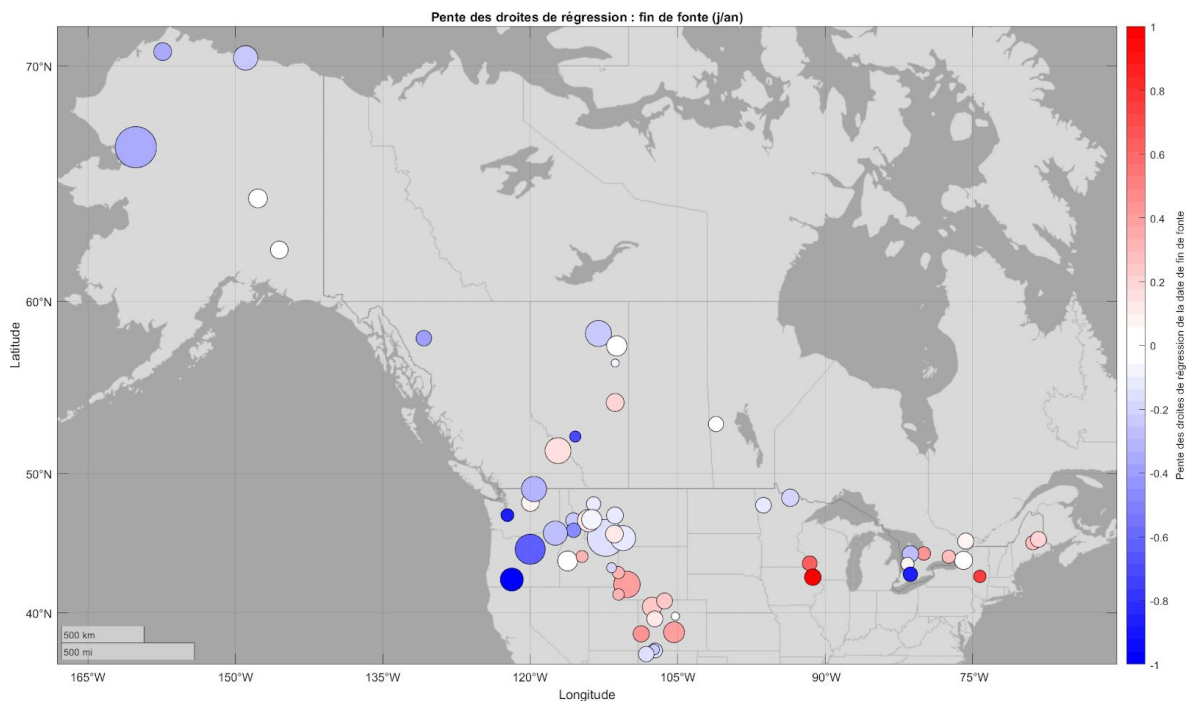


Figure 24 : Pente de la droite de régression de fin de fonte pour chacun des bassins versants

La *Figure 25* affiche les droites de régression du jour de pic du débit. Difficile à tirer des conclusions même si le sud des Rocheuses semble avec des pics de débit plus tardifs et le nord plus précoces.

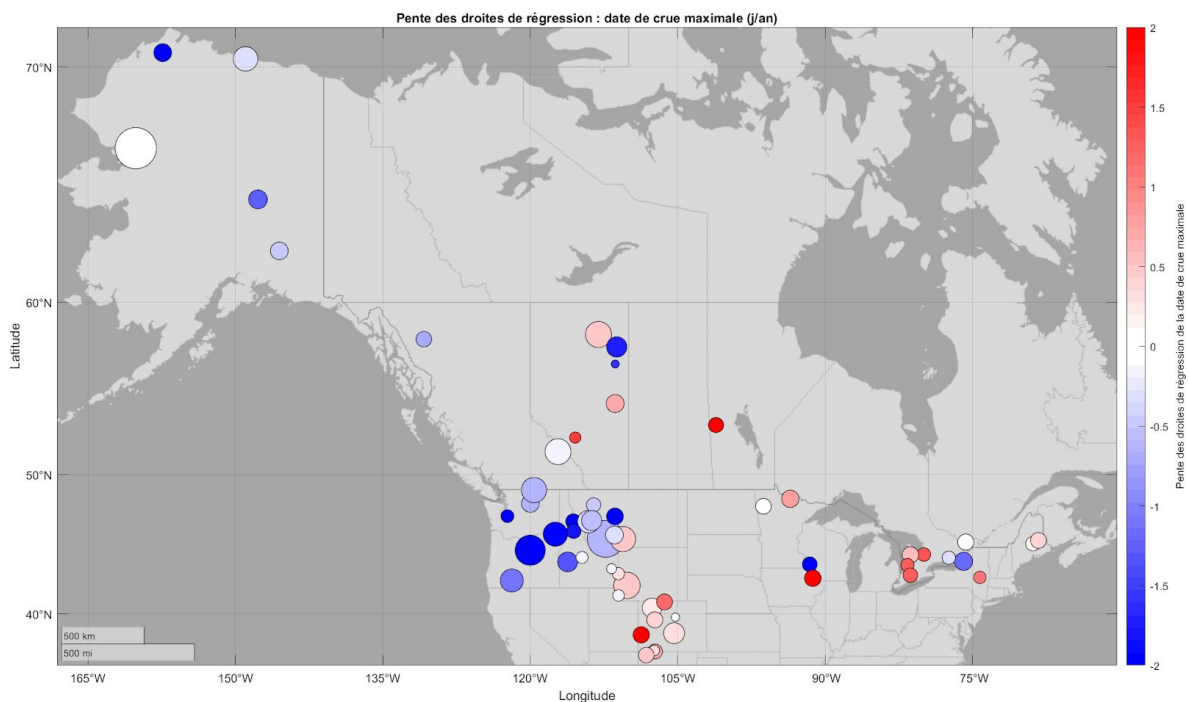


Figure 25 : Pente de la droite de régression du jour de pic du débit pour chacun des bassins versants

Pour les droites de régression des débits en pourcentage du débit journalier maximal, les pentes sont positives dans les Rocheuses et contrastées pour les autres stations. Pour le 25% des bassins avec les plus grandes pentes, l'augmentation du débit pour le jour du pic se situe à plus de 20% pour 18 ans.

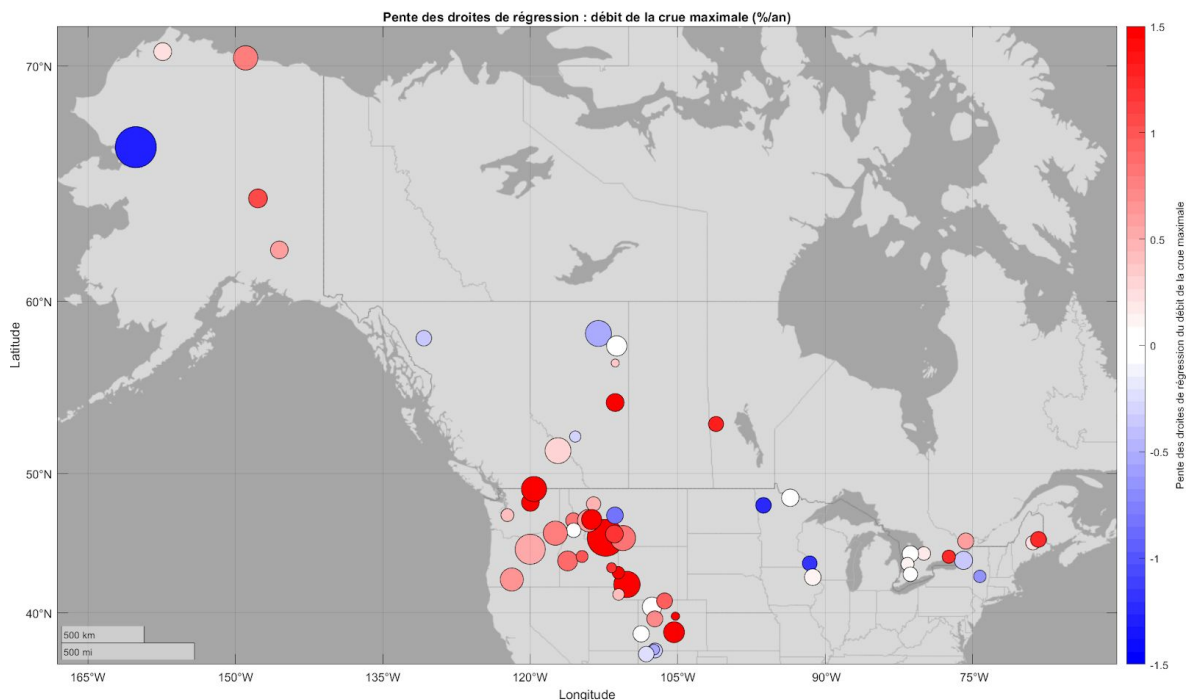


Figure 26 : Pente de la droite de régression du pourcentage du pic de débit pour chacun des bassins versants

Afin d'étudier les relations entre les différents paramètres, plusieurs régressions sont calculées. La *Figure 27* montre toutes les données du jour de début de fonte associées au jour de fin de fonte (à gauche) et du temps de fonte qui est une soustraction entre le jour de début de fonte et le jour de fin de fonte (à droite). Pour chaque bassin versant une droite de régression est réalisée. Pour le graphe de gauche, le jour de fin de fonte ne peut pas se situer avant le jour du début de fonte, il y a alors une limite technique où tous les points doivent se situer au-dessus d'une pente de type $y = ax + b$ avec $a = 1$ et $b = 0$. Pour le graphe de droite, on cherche à savoir combien de jours après le début de la fonte se situera la fin de celle-ci.

On distingue en réalité plusieurs types de bassins versants dans la *Figure 27* :

- groupe 1 : situés dans les Rocheuses et formant le nuage de points supérieur,
- groupe 2 : de faible altitude qui fondent en très peu de temps,
- groupe 3 : situés le plus au nord en Alaska et qui ressemblent au groupe 2 mais se distinguent par un début de fonte tardif.

Les pentes montrent que plus le jour du début de fonte est tard et plus la fin de la fonte interviendra tôt. Ce qui semble logique puisque plus le début de fonte intervient tôt et plus les chances que les températures soient élevées durant les jours de fonte sont fortes, ce qui a pour conséquence de réduire le temps de fonte.

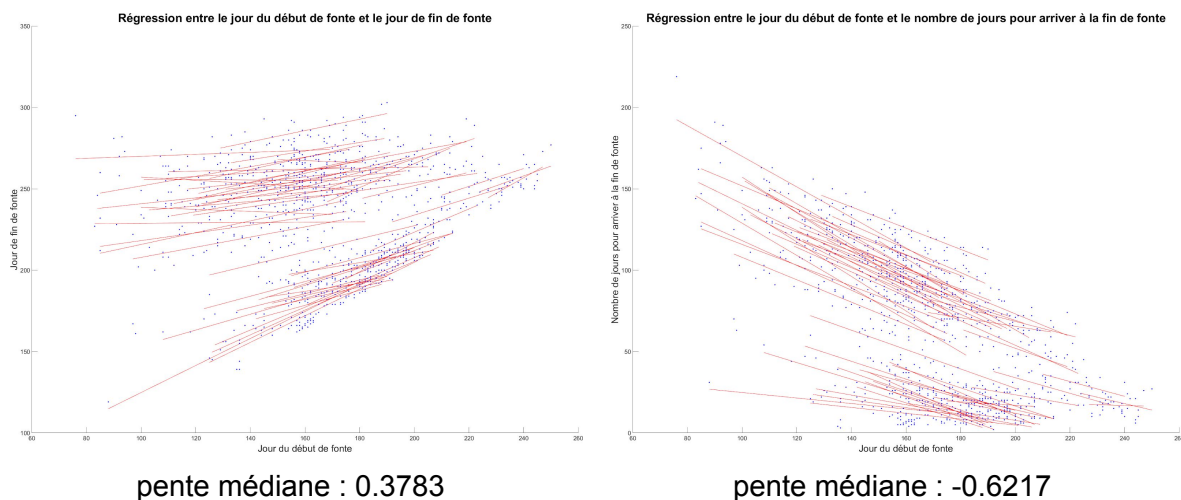


Figure 27 : Régression entre les jours du début de fonte et de fin de fonte (gauche) et entre le jour du début de fonte et le temps de la fonte en jours (droite)

Avec la *Figure 28*, la relation cherchée est le lien des débits maximaux lors du jour de pic de débit avec le début et la fin de la fonte. On observe que dans la majorité des bassins versants, plus le jour du début ou de fin de fonte arrive tardivement et plus les débits maximaux le jour du pic de débit sont importants. On a vu précédemment à la *Figure 19* que la variance est plus élevée pour le jour du début de la fonte que pour celui de la fin, il semble ainsi que l'étalement de la plage des jours du début de fonte rende les pentes moins raides ou alors que les jours de la fin de fonte caractérisent mieux le comportement hydrologique de crue du bassin versant.

Il est pour le moment difficile d'expliquer en détails pourquoi les débits maximaux les plus élevés sont atteints plutôt tardivement, ils pourraient dépendre d'autres paramètres tels que l'épaisseur de la neige et les précipitations liées rendant en moyenne le début et la fin de la fonte plus tardives et engendrant des débits de fonte plus importants.

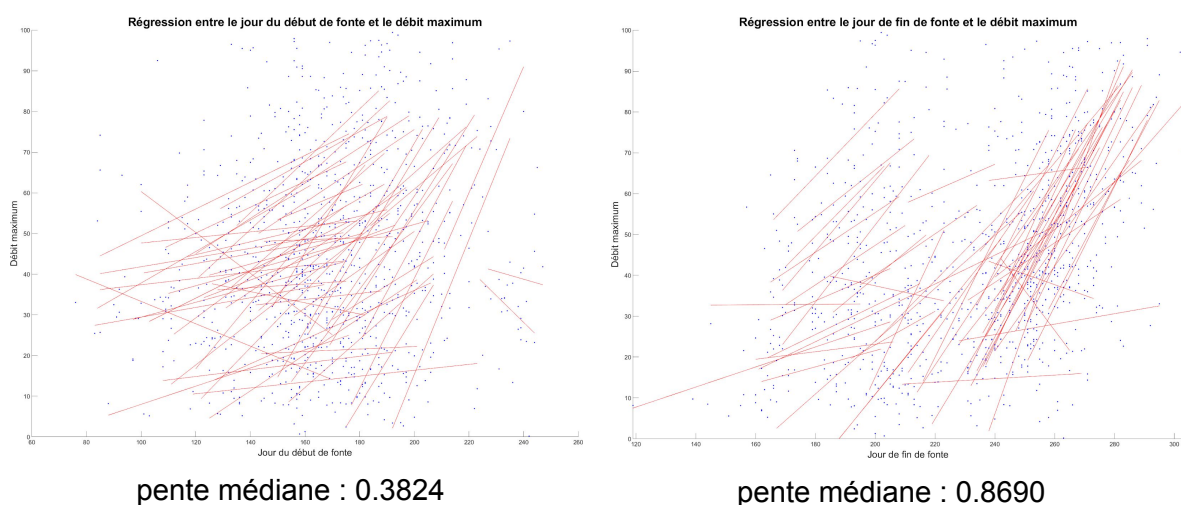


Figure 28 : Régression entre les jours du début de fonte et le débit maximal du jour du pic (gauche) et entre le jour de fin de fonte et le débit maximal du jour du pic (droite)

Le débit maximal pourrait correspondre à d'autres critères. Avec la *Figure 29* mettant en relation les débits maximaux avec le jour auquel ce dernier se produit, il est assez intéressant de voir que pour une majorité de bassins versants il n'y a pas vraiment de lien entre ces deux paramètres, ce qui indique que ce n'est pas vraiment la date du pic de débit qui est importante pour définir le débit maximum mais la date de fin de fonte qui est bien plus révélatrice. La relation des débits maximaux avec le nombre de jours pour arriver à la fin de la fonte montre un lien contrasté dont on ne peut pas vraiment tirer de conclusions. Il semblerait que pour les bassins de fonte rapide (groupe 2), on atteigne un débit maximal avec peu de jours de fonte tandis que pour les bassins avec une fonte sur la durée, les débits maximaux augmenteraient avec la durée de la fonte, mais il n'y a vraiment pas de lien clair et on ne peut pas affirmer de la présence d'un lien comme avec le jour de fin de fonte.

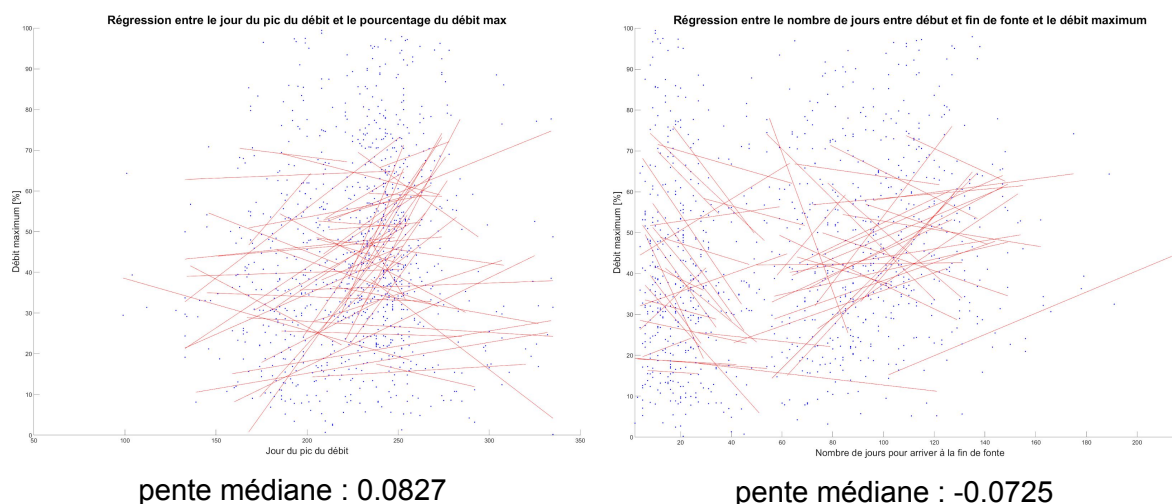


Figure 29 : Régression entre les jours du pic de débit et le débit max. du jour du pic (gauche) et entre le nombre de jours de fonte et le débit max. du jour du pic (droite)

Les coefficients de corrélation permettent de mesurer en quelque sorte la qualité de l'alignement des points des droites de régression. Une analyse est effectuée sur les principaux paramètres et résumée avec la *Figure 30* et à la *Table 10*. Les droites des pentes entre le jour du début et de fin de fonte ainsi qu'entre le jour de fin de fonte et le débit maximal montrent de bon alignements, ce qui conforte les liens entre ces paramètres.

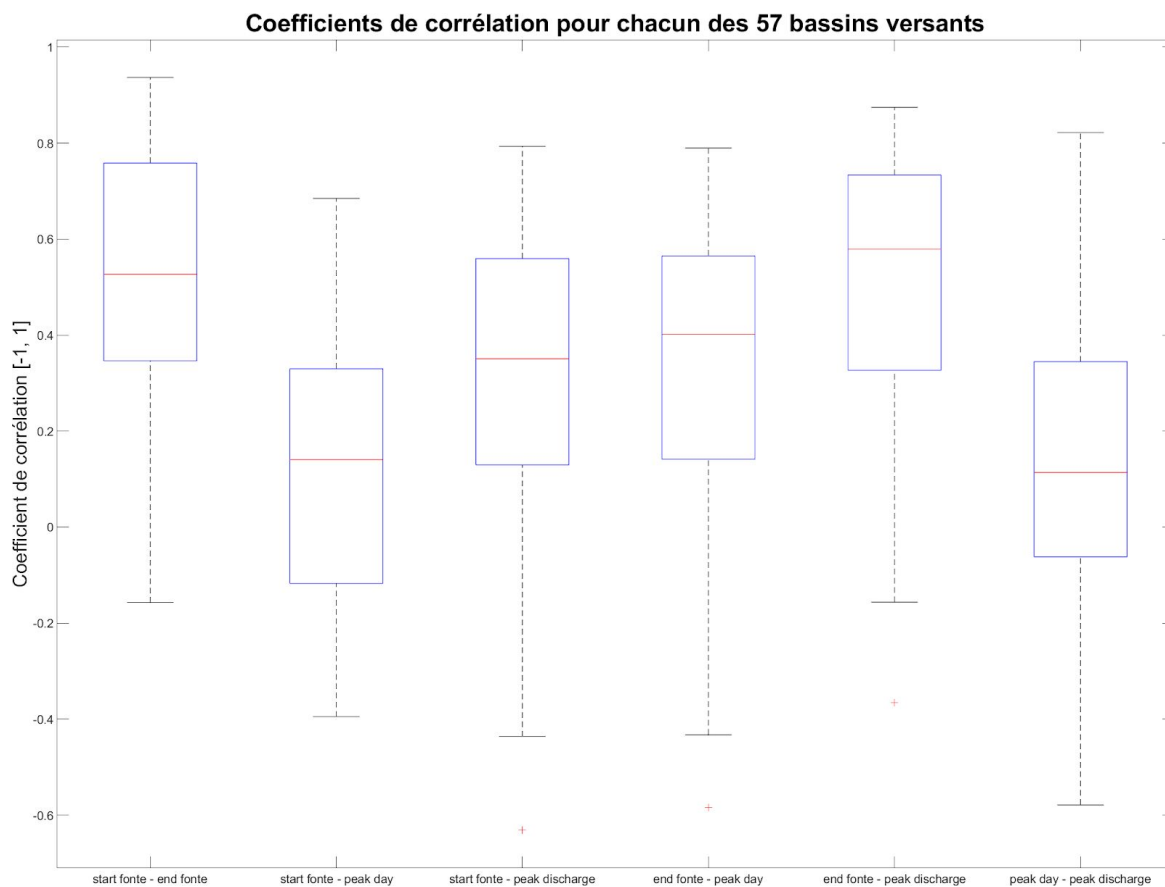


Figure 30 : Boîtes à moustaches des coefficients de corrélation des différents paramètres

Table 10 : Médiane des coefficients de corrélation

Variables	début fonte (j)	fin de fonte (j)	pic de débit (j)	pic de débit (%)
début fonte (j)	1	0.52705	0.14056	0.35067
fin de fonte (j)	-	1	0.40193	0.57919
pic de débit (j)	-	-	1	0.11381
pic de débit (%)	-	-	-	1

5. Discussions

5.1. Pics de débits

Pour certains bassins versants, une partie des pics des jours de débit maximaux n'étaient pas dépendant de la fonte de la neige mais liés à des précipitations plus tardives comme le résume la *Table 7*. Un bon exemple est le bassin 45 sur la *Figure 31* qui présente 5 pics de débits non corrélés à la fonte comme on peut bien le voir.

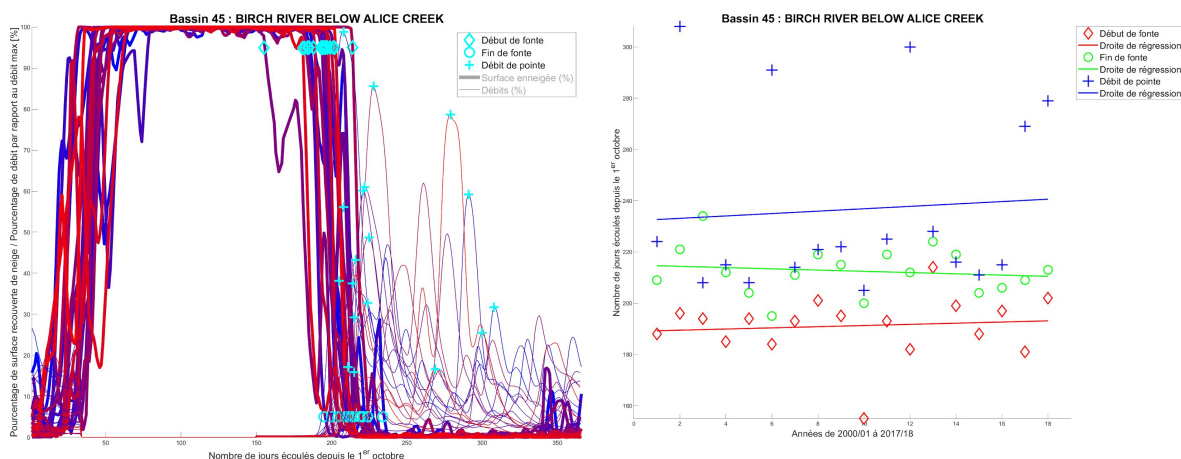


Figure 31 : Bassin versant “BIRCH RIVER BELOW ALICE CREEK”

Afin d'analyser les influences sur les résultats, le graphe des boîtes à moustaches affichant les bassins concernés est modifié afin de retirer les bassins versants listés. Le résultat est affiché en-dessous. A noter que les calculs liés à la couverture de la neige des bassins et des jours du début et de fin de fonte ne sont pas du tout influencés par les débits et restent totalement valides.

Une fois les bassins versants incriminés retirés, la *Figure 32* permet une comparaison rapide des paramètres. Les boîtes à moustaches affichent peu de différence, ce qui est bon signe et indique que les bassins versants avec les données de pic de débits erronés n'ont pas perturbé de manière significative les tendances. La médiane pour la pente de la date du pic de débit passe de -0.1269 à -0.2307 ce qui représente une précocité de 4.2 jours contre 2.3 jours auparavant. La médiane de la pente du débit maximal passe de 0.4450 à 0.7238 ce qui représente une augmentation du débit de 13% contre 8% auparavant. Et la médiane de la pente du volume centré passe de 0 à -0.0206, ce qui ne représente pas un changement significatif.

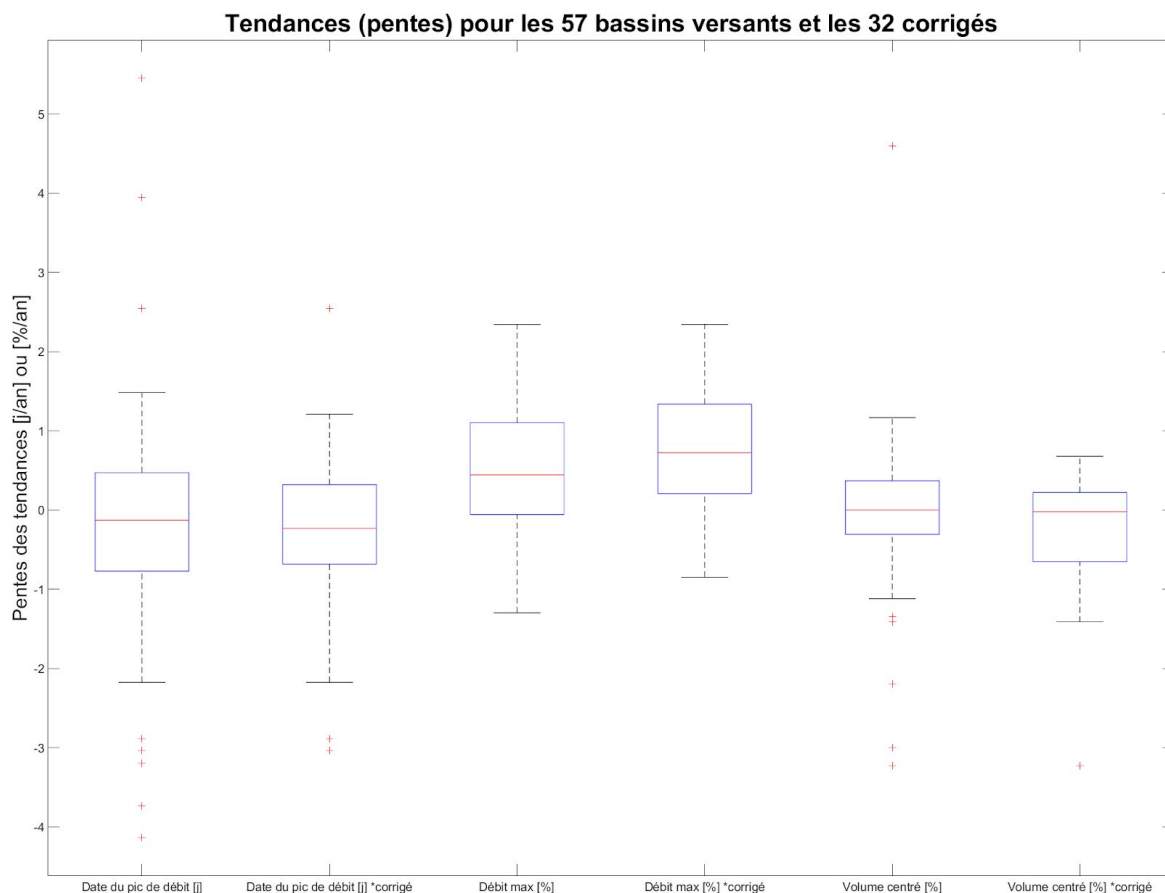


Figure 32 : Boîtes à moustaches pour les paramètres de date/pourcentage du pic de débit et volume centré des 57 bassins versants et des 32 corrigés

Il faut également se rendre compte que les bassins versants retirés représentent des régimes hydrologiques particuliers, principalement de basse altitude et de fonte rapide puisque que l'altitude moyenne médiane des 25 bassins versants retirés est de 382.3m contre 1994.5m pour les 32 bassins versants restants. La médiane du temps de fonte est de 13 jours contre 73 jours. La *Figure 33* représente la position des 25 bassins versants en question. Les 2 cercles blancs représentant une haute altitude moyenne, concernent les 2 bassins versants retirés à cause de la présence de glaciers.

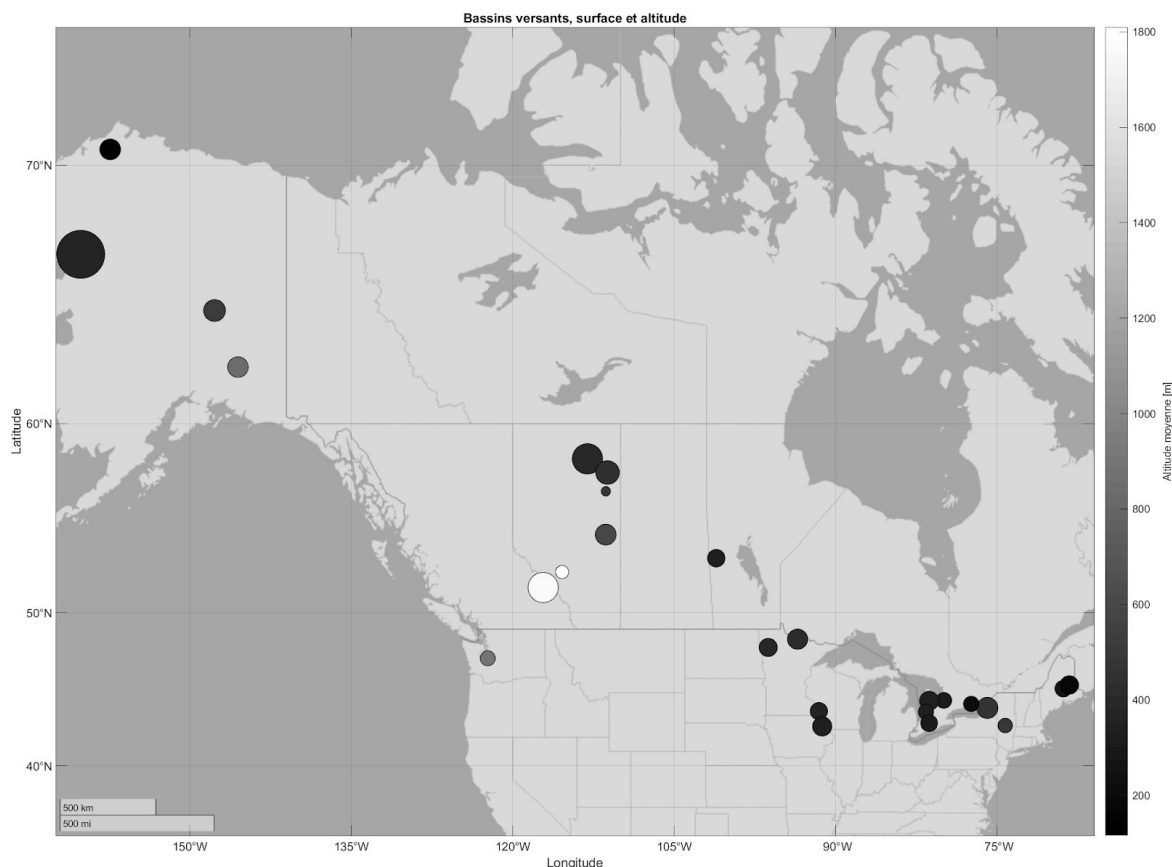


Figure 33 : Situation des 25 bassins versants retirés et altitude moyenne

Ces bassins versants restent importants et il serait dommage de les ignorer, une piste à emprunter serait d'améliorer la détection des pics de débit afin qu'il soient mieux corrélés à la fonte des neiges, car dans la majorité des cas il y a bien des pics de débit lors de la fonte mais il ne sont pas suffisamment importants et se font supplanter par d'autres pics plus tardifs liés à des précipitations sous forme de pluie. Une autre solution serait de procéder à un pointage manuel des pics de débits pour les cas posant problème mais on aimerait éviter de devoir le faire manuellement alors l'amélioration du code semble la piste la plus adaptée.

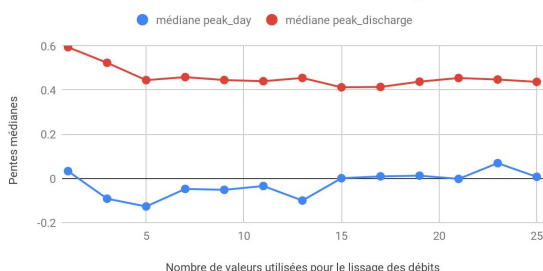
Une piste différente serait de ne pas considérer les pics de débits mais la structure temporelle des changements à la période de la fonte des neiges. Le pic de débit et le volume centré peuvent conduire à de mauvaises interprétations et il est plus judicieux de détecter les changements temporels avec des débits moyens découpés sur 5 jours (Déry & al, 2009).

5.2. Sensibilité des paramètres

La *Table 3* a défini parfois arbitrairement des valeurs pour les variables. On s'intéresse ici à savoir comment ces variables influencent les résultats pour le début et la fin de la fonte, la date du pic de débit et le pourcentage du débit maximal au pic de débit.

La *Figure 34* montre l'évolution des pentes médianes pour du lissage de 1 à 25 valeurs. Les médianes restent dans l'ensemble très stables en ne modifiant en rien les interprétations avancées dans les résultats. A noter que le code Matlab n'a pas été capable de calculer les résultats avec un lissage sur 1 valeur (donc sans lissage) pour la couverture neigeuse.

Evolution des valeurs médianes des pentes des jours du pic de débit et du débit maximal en fonction du lissage des débits



Evolution des valeurs médianes des pentes des jours du début et fin de fonte en fonction du lissage de la couverture neigeuse

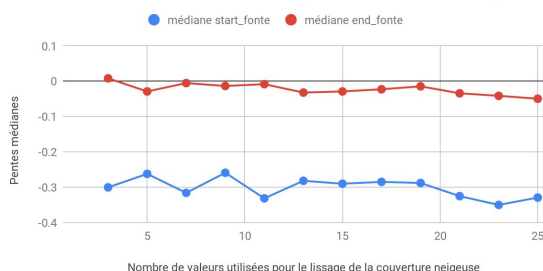
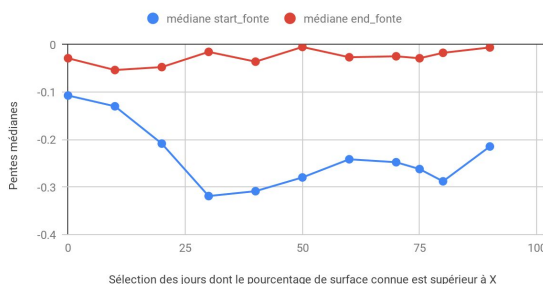


Figure 34 : Sensibilité des valeurs médianes des pentes pour le lissage des débits (gauche) et de la couverture neigeuse (droite)

En ce qui concerne la sélection des jours dont le pourcentage de surface est supérieur à X, présenté à gauche dans la *Figure 35*, les valeurs des médianes pour le début et la fin de fonte sont assez robustes même si l'on peut noter un éloignement des valeurs pour une sélection de jours trop grande incluant probablement des valeurs aberrantes pour les résultats de la médiane de début de fonte. Comme les jours avec peu d'information disponible présentent une plus grande incertitude dans le calcul du pourcentage de surface couverte par la neige ou non, ils ont plus tendance à présenter des valeurs aberrantes, d'où l'intérêt de ne pas sélectionner tous les jours. Le 75% d'information utilisé semble bien fonctionner. A noter que pour une valeur à 100% d'information, le code n'a pas pu donner de résultats, c'est normal car il est possible effectivement d'arriver à aucun jour sélectionné.

Pour le graphe de droite de la *Figure 35*, en choisissant un pourcentage de début de fonte entre 85 et 95% et respectivement un pourcentage de fin de fonte entre 15 et 5% toujours adapté aux 30 valeurs moyennes maximales et minimales de la couverture neigeuse, le résultat affiche également une bonne robustesse pour la pente médiane des jours du début et de fin de fonte. Le code Matlab n'a pas été capable de donner des résultats pour des valeurs supérieures à 95/5% et inférieures à 85/15%, un travail sur le code est nécessaire si l'on souhaite accéder à ces valeurs, par exemple en ignorant les années où il n'a pas été possible de trouver de point de début/fin de fonte ou en modifiant la méthode de sélection de ces derniers.

Evolution des valeurs médianes des pentes des jours du début et fin de fonte en fonction de la sélection des jours dont le pourcentage de surface est supérieur à X



Evolution des valeurs médianes des pentes des jours du pic de débit et du débit maximal en fonction du pourcentage de début et de fin de fonte

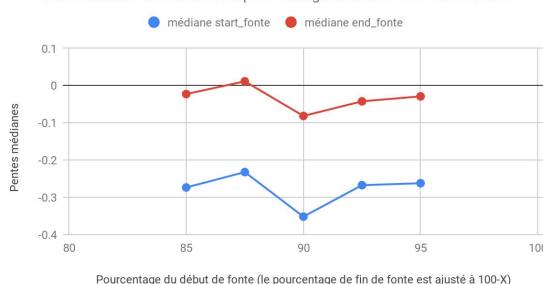


Figure 35 : Sensibilité des valeurs médianes des pentes pour la sélection des surfaces (gauche) et du pourcentage de début et fin de fonte

L'analyse de sensibilité de ces paramètres montre qu'une variation indépendamment sur l'un ou l'autre des paramètres n'affecte que très marginalement les résultats globaux. Il serait envisageable de faire varier simultanément les paramètres mais au vu de la bonne résistance affichée, les résultats ne devraient pas tellement changer. Les valeurs de la *Table 3* choisies au chapitre "3.3.2. Calculs" sont ainsi fiables et il n'y aurait pas tellement de sens de trop s'en éloigner.

5.3. Diverses problématiques

Lors de la réalisation de ce travail, il a été choisi de faire une comparaison de points fixes censés déterminer l'évolution de la fonte de la neige au printemps, on réduit ainsi les données journalières du pourcentage de surface recouvert par la neige à seulement 2 points, ce qui fait qu'une grande quantité de données est perdue. On aurait pu imaginer interpréter ces données autrement afin qu'elles renseignent mieux sur la globalité de l'enneigement et pas seulement 2 points. Il serait peut-être intéressant d'appliquer la méthode de Déry et al. (2009b) initialement proposée pour les débits journaliers qui renseigne par tranche de 5 jours leur évolution par rapport aux autres années. Ainsi avec l'application de cette méthode à la surface enneigée et aux débits, on pourrait envisager plus d'interactions et d'analyses poussées entre les deux.

Le chapitre "2.1. Régime nival" a mentionné un set de données nommé CAMELS et qui renseigne notamment le pourcentage de précipitations sous forme de neige à la *Figure 2* (Addor & al., 2017). Plutôt que d'avoir construit le propre set de données pour ce travail, il aurait été envisageable d'utiliser un set de données déjà tout prêt pour autant qu'il contienne les shapefile de chaque bassin versant et les mesures des débits associés sur la période concernée. Dans tous les cas il serait intéressant de chercher des sets de données qui correspondent aux besoins du travail et de voir les résultats.

5.4. Comparaisons supplémentaires

Des comparaisons des résultats obtenus avec d'autres données pourraient être intéressantes et confirmer ou infirmer certains liens entre le climat et les observations effectuées.

Un outil mis à disposition par le "Climate Change Institute, University of Maine at Orono" permet d'analyser des données climatiques et météorologiques du passé "*Climate Reanalyzer, Monthly Reanalysis Maps*", (2019). L'utilisation du site permet de visualiser la différence des mois de mars, avril et mai par rapport à un set de 1979 à 2017 et d'y afficher les différences de température au niveau mondial. Le jeu de données utilisé est "*ERA-Interim 1979-2016*" avec la variable "*Mean Temperature 2m*". C'est intéressant car il devient possible de comparer la carte générée aux cartes du début de la fonte des neiges que nous avons obtenues. Par exemple pour l'année 2014 présentée par la *Figure 36*, les bassins versants où la fonte s'est déclenchée plus tardivement sont situés au même endroit que l'anomalie de température négative sur le nord des États-Unis et le Canada et les bassins versants avec un début de fonte plus précoce sont situés sur des anomalies positives de température. Il semble qu'il y ait un lien avec ces paramètres, ce qui serait logique puisqu'une température plus élevée devrait entraîner une fonte plus précoce.

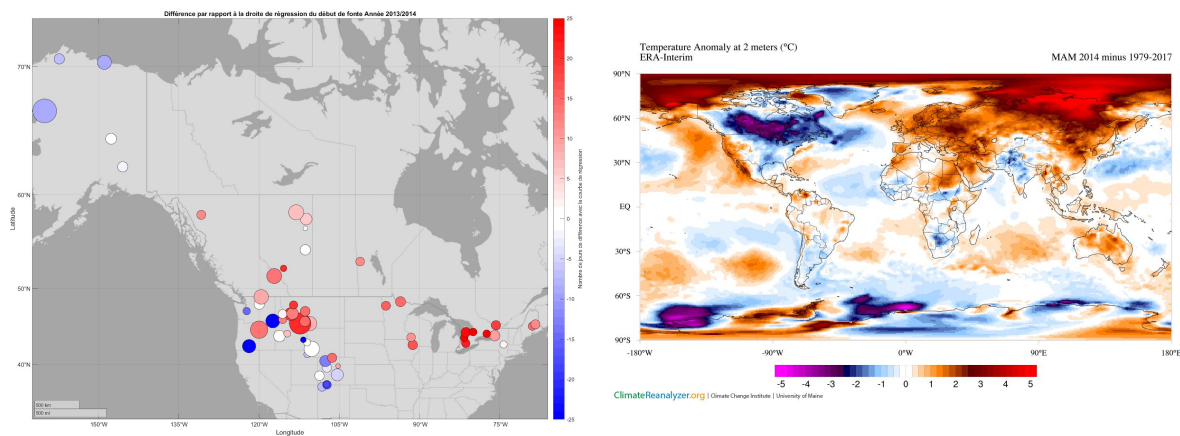


Figure 36 : Comparaison de la différence du jour de la fonte des neiges à la médiane avec l'anomalie de température des mois de mars, avril et mai 2014

Il serait intéressant de voir si une exploitation des données satellitaires plus anciennes permettrait de continuer la série de 18 années mise en avant dans ce travail. Mais cela passerait par une perte de fréquence des données car il n'y a pas de satellite avant Terra pour ce type de données à une telle fréquence journalière.

Une analyse détaillée des données de la couverture neigeuse couplées aux données de précipitations (par exemple TRMM) ou aux données de température pourrait mettre en évidence les liens avec la fonte de la neige. Sur le même principe, une analyse dépendante de l'altitude pour chaque tuile du produit "Snow Cover" pourrait montrer les liens en rapport avec l'altitude.

5.5. Interprétation

Le travail a principalement donné des résultats sans forcément donner des interprétations sur les causes et effets. En faisant une analyse sur les résultats les plus parlants on peut dire que :

- Les débits maximaux ont tendance à augmenter avec une pente médiane de 0.445 %/an si l'on se réfère à la *Table 9*. Cela représente près de 8% d'augmentation en 18 ans, voir même 13% pour les Rocheuses si l'on se réfère au chapitre "5.1. Pics de débits".
- Il y a une tendance plus précoce du jour du début de fonte, jusqu'à près de 5 jours en 18 ans selon la pente médiane trouvée à la *Table 9*. Tandis que le jour de fin de fonte ne montre pas vraiment de modification significative.
- Plus le jour du début de fonte ou de fin de fonte est tardif et plus le débit est important si l'on se réfère aux graphes de la *Figure 28*. La pente est de 0.869 %/jour pour la fin de fonte et la médiane affiche 44 jours séparant le jour le plus précoce de fin de fonte au jour le plus tardif. Ce qui représenterait une augmentation de presque 40% du débit maximal.

En considérant a. et b. on pourrait dire que les précipitations ont augmenté en général et/ou que des pics de chaleur font fondre plus rapidement la couche neigeuse mais sans vraiment influencer la surface de neige de plus haute altitude. Mais avec le point c. on aurait plutôt tendance à vouloir dire qu'il y a une intensification des précipitations qui produisent plus de neige et qui se ressent avec des débits maximaux plus élevés. L'apport de neige

supplémentaire ne changerait pas le jour de fin de la fonte en raison d'un volume plus important de neige à faire fondre.

Il faut tout de même faire très attention avec ces interprétations qui sont risquées et qui devraient être soumises à des vérifications en réalisant des corrélations aux températures et aux précipitations ainsi qu'à d'autres paramètres.

6. Conclusion

Le travail a permis d'élaborer un set de données spécifique aux besoins de l'étude en cherchant des stations de mesure de débit et la forme du bassin versant en fichier géographique. Grâce aux données du satellite Terra équipé des instruments MODIS et du produit "Snow Cover", il a été possible via Google Earth Engine de récupérer les surfaces journalières de la couverture de neige afin de les utiliser via Matlab. C'est finalement les données de 57 bassins versants sur 18 ans qui ont été compilées et traitées.

Les résultats ont donné un début de fonte plus précoce, environ 5 jours d'anticipation du début de la fonte, des débits maximaux lors du jour du pic de la fonte printanière supérieurs d'environ 8% et un lien entre la date de début/fin de fonte de la neige et les débits maximaux où les débits sont plus importants lors d'une date de début/fin de fonte tardive.

Il ne faut pas oublier que les paramètres du jour de début et de fin de fonte, ainsi que les débits, sont soumis à d'importantes variations annuelles ce qui fait qu'un événement extrême intervenant dans le cycle des 18 années peut avoir de grandes conséquences sur les médianes et l'interprétation. Mais grâce à la multiplication du nombre de bassins versants et à la prise en compte des valeurs médianes, les tendances observées sont relativement robustes pour l'étude.

Peu d'explications des résultats observés ont été donnés dans ce travail, il s'agissait plutôt de montrer l'évolution des différents paramètres dans un contexte de changements climatiques rapides. Des investigations sont nécessaires afin de mettre en évidence un lien avec les précipitations et les températures. Une autre méthode prenant plus en considération l'évolution temporelle de la surface neigeuse pourrait être développée afin de saisir les subtilités de ces modifications. D'ailleurs, il n'est jamais fait mention de l'épaisseur de la couche de neige qui pourrait également être un paramètre de choix.

Bibliographie

- Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., & Clark, M. P. (2017). The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(10), 5293–5313. doi : [10.5194/hess-21-5293-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017)
- Archives nationales des données hydrologiques : HYDAT (2018, 5 juillet). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/surveillance/relevés/produits-données-services/archives-nationales-hydat.html>
- Bard, A., Renard, B., & Lang, M. (2012). Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin. *La Houille Blanche*, (1), 38–43. doi : [10.1051/lhb/2012006](https://doi.org/10.1051/lhb/2012006)
- Butcher, K. S., Crown, L. D., & Gentry, E. J. (2006). The international system of units (SI) - conversion factors for general use. doi : [10.6028/nist.sp.1038](https://doi.org/10.6028/nist.sp.1038)
- Climate Reanalyzer, Monthly Reanalysis Maps (2019, 29 juillet). Repéré à Climate Change Institute | University of Maine. Repéré à https://ecm.um.maine.edu/reanalysis/monthly_maps/index.php
- Darlane, A. B., Khoramian, A., & Santi, E. (2017). Investigating spatiotemporal snow cover variability via cloud-free MODIS snow cover product in Central Alborz Region. *Remote Sensing of Environment*, 202, 152–165. doi : [10.1016/j.rse.2017.05.042](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.042)
- Dataset GMTED2010 (2019, 29 juillet). Dans Google Earth Engine Data Catalog. Repéré à https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_GMTED2010
- Dataset MOD10A1.006 (2019, 29 juillet). Dans Google Earth Engine Data Catalog. Repéré à https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD10A1
- Dataset SRTM 30m (2019, 29 juillet). Dans Google Earth Engine Data Catalog. Repéré à https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003
- Debugging guide (2019, 8 mai). Dans Google Earth Engine API. Repéré à <https://developers.google.com/earth-engine/debugging>
- Deng, J., Huang, X., Feng, Q., Ma, X., & Liang, T. (2015). Toward improved daily cloud-free fractional snow cover mapping with multi-source remote sensing data in China. *Remote Sensing*, 7(6), 6986–7006. doi : [10.3390/rs70606986](https://doi.org/10.3390/rs70606986)
- Déry, S. J., Hernández-Henríquez, M. A., Burford, J. E., & Wood, E. F. (2009a). Observational evidence of an intensifying hydrological cycle in northern Canada. *Geophysical Research Letters*, 36(13). doi : <https://doi.org/10.1029/2009GL038852>

- Déry, S. J., Stahl, K., Moore, R. D., Whitfield, P. H., Menounos, B., & Burford, J. E. (2009b). Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada. *Water Resources Research*, 45(4). doi : [10.1029/2008wr006975](https://doi.org/10.1029/2008wr006975)
- Dong, C., & Menzel, L. (2016). Producing cloud-free MODIS snow cover products with conditional probability interpolation and meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 439–451. doi : [10.1016/j.rse.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.019)
- Données hydrométriques en temps réel (2019, 6 mai). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à https://eau.ec.gc.ca/google_map/google_map_f.html?map_type=real_time&search_type=province&province=all
- Explorateur de données d'Environnement Canada (2016, 11 avril). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/surveillance/relevés/produits-données-services/explorer.html>
- Explorateur de données d'Environnement Canada, Guide pratique (2016, mars). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/hydrometrics/www/ECDDataExplorer_FR.pdf
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi : [10.1029/2005rg000183](https://doi.org/10.1029/2005rg000183)
- Fekete, B. M., Looser, U., Pietroniro, A., & Robarts, R. D. (2012). Rationale for Monitoring Discharge on the Ground. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1977–1986. doi : [10.1175/jhm-d-11-0126.1](https://doi.org/10.1175/jhm-d-11-0126.1)
- Gafurov, A., & Bárdossy, A. (2009). Cloud removal methodology from MODIS snow cover product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1361-1373. doi : [10.5194/hess-13-1361-2009](https://doi.org/10.5194/hess-13-1361-2009)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. doi : [10.1016/j.rse.2017.06.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)
- Goward, S. N., Masek, J. G., Williams, D. L., Irons, J. R., & Thompson, R. (2001). The Landsat 7 mission. *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2), 3–12. doi : [10.1016/s0034-4257\(01\)00262-0](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00262-0)
- GRDC (2019, 4 juillet). Global Runoff Data Base. Repéré à https://www.bafg.de/GRDC/EN/02_srvcs/21_tmsrs/stationMaps.html?nn=201566
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21(12), 1534–1547. doi : [10.1002/hyp.6715](https://doi.org/10.1002/hyp.6715)

- Hall, D. K. & Riggs, G. A. (2016). *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 6*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. doi : [10.1038/nclimate1911](https://doi.org/10.1038/nclimate1911)
- Holmes R.M., A. I. Shiklomanov, S. E. Tank, J. W. McClelland, M. Tretiakov (2015, 17 novembre) River Discharge, Arctic Report Card: Update for 2015. *NOAA's Arctic Program*. Repéré à <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/227/River-Discharge> (consulté le 15.07.2019)
- Holmes R.M. , A. I. Shiklomanov, A. Suslova, M. Tretiakov, J. W. McClelland, R. G. M. Spencer, S. E. Tank (2018, 13 novembre) River Discharge, Arctic Report Card: Update for 2018. *NOAA's Arctic Program*. Repéré à <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/786/River-Discharge> (consulté le 15.07.2019)
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. doi : [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130)
- Pardé, M. (1933). Fleuves et rivières. Collection Armand Colin. Section de Géographie (France) fre no. 155.
- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), 514–517. doi : [10.1038/415514a](https://doi.org/10.1038/415514a)
- MODIS Overview (2019, 29 juillet). Dans NASA Distributed Active Archive Center (DAAC) at National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Repéré à <https://nsidc.org/data/modis/>
- Musy, A. (2005, février). Chapitre 9 Les régimes hydrologiques. *Hydrologie Générale*, EPFL. Repéré à <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre9/chapitre9.html> (consulté le

10.07.2019)

- Newman, A. J., Clark, M. P., Sampson, K., Wood, A., Hay, L. E., Bock, A., et al. (2015). Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 209–223. doi : [10.5194/hess-19-209-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-209-2015)
- Overeem, I., & Syvitski, J. P. M. (2010). Shifting discharge peaks in arctic rivers, 1977–2007. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 92(2), 285–296. doi : [10.1111/j.1468-0459.2010.00395.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2010.00395.x)
- Open Maps Data Viewer (2019, 29 juillet). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à https://open.canada.ca/data/en/fgpv_vpgf/a4b190fe-e090-4e6d-881e-b87956c07977
- Peterson, B. J., Holmes, R. M., McClelland, J. W., Vörösmarty, C. J., Lammers, R. B., Shiklomanov, A. I., ... & Rahmstorf, S. (2002). Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *science*, 298(5601), 2171-2173. doi : [10.1126/science.1077445](https://doi.org/10.1126/science.1077445)
- Qiu, Y., Yu, X., Guo, H., Shi, L., & Zhang, H. (2016). Daily cloud free snow cover mapping over Central Asia and Xinjiang Province of China. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). doi : [10.1109/igarss.2016.7730285](https://doi.org/10.1109/igarss.2016.7730285)
- QGIS Development Team (2019, 17 avril). QGIS Geographic Information System. Logiciel version 3.6.3. Open Source Geospatial Foundation Project. Repéré à <http://qgis.org>
- Riggs, George A., Dorothy K. Hall, and Miguel O. Román. (2015). "MODIS snow products collection 6 user guide." *National Snow & Ice Data Center*. Repéré à https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/C6_MODIS_Snow_User_Guide.pdf (consulté le 15.07.2019)
- Serveur FTP (2019, 13 mars). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/geobase_nhn_rhn/shp_fr/
- Sidhu, N., Pebesma, E., & Câmara, G. (2018). Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 486–500. doi : [10.1080/22797254.2018.1451782](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1451782)
- Telegina, E. A. (2015). Spatial and temporal variations of winter discharge under climate change: Case study of rivers in European Russia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 245–250. doi : [10.5194/piahs-368-245-2015](https://doi.org/10.5194/piahs-368-245-2015)
- USGS Surface-Water Data for USA (2019, 29 juillet). Dans U.S. Geological Survey. Repéré à <https://waterdata.usgs.gov/nwis/sw>
- Wbd (MapServer) (2019, 28 juillet). Dans Gouvernement du Canada. Repéré à <https://hydro.>

nationalmap.gov/arcgis/rest/services/wbd/MapServer

Yang, D., Robinson, D., Zhao, Y., Estilow, T., & Ye, B. (2003). Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds. *Journal of Geophysical Research*, 108(D18). doi : [10.1029/2002jd003149](https://doi.org/10.1029/2002jd003149)

7. Annexes

7.1. Table des bassins versants

no	nom du bassin	km2	latitude	longitude	alt_moy	alt_min	alt_max
1	YAMPA RIVER BELOW CRAIG CO.	5'511	40.480833	-107.613611	2'435	1'864	3'762
2	GREEN RIVER NEAR LA BARGE WY	10'127	42.192778	-110.1625	2'486	1'979	4'216
3	Jefferson River near Twin Bridges MT	19'725	45.613283	-112.329397	2'121	1'389	3'384
4	LITTLE FORK RIVER AT LITTLEFORK MN	4'403	48.395833	-93.549167	409	327	573
5	WILLIAMSON RIVER BLW SPRAGUE RIVER NR CHILOQUIN OR	7'770	42.564375	-121.879714	1'581	1'266	2'725
6	PAYETTE RIVER NR HORSESHOE BEND ID	5'750	43.943333	-116.196667	1'791	789	3'245
7	NF CLEARWATER RIVER NR CANYON RANGER STATION ID	3'357	46.840556	-115.621111	1'449	506	2'401
8	METHOW RIVER NEAR PATEROS WA	4'589	48.0775	-119.983889	1'423	232	2'709
9	PUYALLUP RIVER AT PUYALLUP WA	2'442	47.208611	-122.325833	891	-11	4'379
10	JOHN DAY RIVER AT SERVICE CREEK OR	13'183	44.793889	-120.005556	1'355	493	2'737
11	SAN JUAN RIVER NEAR CARRACAS CO.	3'237	37.013611	-107.311667	2'555	1'848	4'040
12	PIEDRA RIVER NEAR ARBOLES CO.	1'691	37.088333	-107.397222	2'629	1'848	3'945
13	ANIMAS RIVER AT FARMINGTON NM	3'522	36.7225	-108.20175	2'662	1'597	4'258
14	SAN MIGUEL RIVER AT URAVAN CO.	3'885	38.357222	-108.712222	2'439	1'478	4'240
15	ROARING FORK RIVER AT GLENWOOD SPRINGS CO.	3'763	39.543611	-107.328889	2'933	1'749	4'332
16	ARKANSAS RIVER AT PARKDALE CO.	6'369	38.487222	-105.373056	2'929	1'746	4'396
17	CLEAR CREEK AT GOLDEN CO	1'020	39.753056	-105.234722	2'992	1'717	4'339
18	NORTH PLATTE RIVER NEAR NORTHGATE CO	3'706	40.936639	-106.339194	2'707	2'386	3'936
19	BEAR RIVER ABOVE RESERVOIR NEAR WOODRUFF UT	1'955	41.434444	-111.016944	2'451	1'978	3'865
20	Yellowstone River near Livingston MT	9'197	45.597211	-110.566497	2'445	1'380	3'679
21	SALT RIVER AB RESERVOIR NR ETNA WY	2'220	43.079722	-111.037222	2'217	1'730	3'298
22	WILLOW CREEK BL TEX CREEK NR RIRIE ID	1'471	43.441944	-111.728333	1'976	1'578	2'978
23	SALMON RIVER BL YANKEE FORK NR CLAYTON ID	2'090	44.268333	-114.732778	2'379	1'776	3'299
24	Bitterroot River near Missoula MT	7'314	46.831739	-114.054861	1'748	945	3'074
25	Gallatin River at Logan MT	4'633	45.885356	-111.438286	2'013	1'244	3'419
26	Smith River near Eden MT	4'113	47.189292	-111.386239	1'741	1'063	2'885
27	LOCHSA RIVER NR LOWELL ID	3'051	46.150833	-115.587222	1'591	427	2'664
28	S F Flathead R ab Twin C nr Hungry Horse MT	3'002	47.979097	-113.560683	1'876	1'090	2'827
29	Blackfoot River near Bonner MT	5'923	46.899411	-113.756319	1'658	1'025	2'855
30	GRANDE RONDE RIVER AT TROY OR	8'482	45.945833	-117.45	1'244	479	1'940
31	ROOT RIVER NEAR HOUSTON MN	3'237	43.768611	-91.569722	365	197	447
32	Turkey River at Garber IA	4'002	42.74	-91.261667	338	196	427

33	CLEARWATER RIVER AT RED LAKE FALLS MN	3'574	47.886206	-96.276581	382	285	504
34	Piscataquis River at Medford Maine	3'010	45.260556	-68.868611	274	74	1'109
35	Mattawamkeag River near Mattawamkeag Maine	3'673	45.501111	-68.305833	175	53	741
36	BLACK RIVER AT WATERTOWN NY	4'828	43.985556	-75.924722	474	73	1'146
37	SCHOHARIE CREEK AT BURTONSVILLE NY	2'295	42.8	-74.262778	505	159	1'230
38	GULKANA R AT SOURDOUGH AK	4'558	62.520833	-145.530833	840	570	1'880
39	KOBUK R NR KIANA AK	24'553	66.973611	-160.130833	378	0	2'476
40	CHENA R AT FAIRBANKS AK	5'154	64.845833	-147.701111	516	124	1'580
41	MEADE R AT ATKASUK AK	4'636	70.495833	-157.3925	116	7	469
42	KUPARUK R NR DEADHORSE AK	8'651	70.281667	-148.959722	263	7	1'459
43	TUYA RIVER NEAR TELEGRAPH CREEK	3'550	58.07225	-130.826444	1'190	233	2'043
44	BEAVER RIVER NEAR GOODRIDGE	4'700	54.436056	-111.367444	616	512	747
45	BIRCH RIVER BELOW ALICE CREEK	9'860	58.324889	-113.065222	399	207	852
46	COLUMBIA RIVER AT DONALD	9'700	51.483306	-117.180389	1'777	761	3'436
47	FIREBAG RIVER NEAR THE MOUTH	5'980	57.651083	-111.202611	452	219	674
48	HANGINGSTONE RIVER AT FORT MCMURRAY	962	56.708972	-111.356389	504	238	776
49	OVERFLOWING RIVER AT OVERFLOWING RIVER	3'350	53.142944	-101.1025	347	252	770
50	RAM RIVER NEAR THE MOUTH	1'850	52.368583	-115.422167	1'810	1'054	3'208
51	NOTTAWASAGA RIVER NEAR EDENVALE	2'690	44.485	-79.966	303	172	549
52	SAUGEEN RIVER NEAR PORT ELGIN	3'950	44.456472	-81.326444	351	169	546
53	MAITLAND RIVER AT BENMILLER	2'540	43.717556	-81.626194	344	174	457
54	THAMES RIVER AT BYRON	3'080	42.9625	-81.331778	322	221	421
55	MOIRA RIVER NEAR FOXBORO	2'590	44.253722	-77.418833	222	73	463
56	RIDEAU RIVER AT OTTAWA	3'810	45.3815	-75.696972	129	38	263
57	SIMILKAMEEN RIVER NEAR NIGHTHAWK	9'190	48.984722	-119.617222	1'442	271	2'639

7.2. Code Google Earth Engine

```

1 // Global warming and peak discharge in snowmelt catchments
2 // Dionys Lugon-Moulin - Juillet 2019
3 //
4 // Ce script permet d'analyser le pourcentage journalier de couverture neigeuse
  d'une région donnée
5 // Imports à effectuer : srtm, gmted, et les 57 bassins de bv1 à bv57
6 // Infos Terra :
  https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD10A1
7
8 // ##### MODIFIER ICI POUR LE CHOIX DU BASSIN VERSANT
9 var region = bv1;
10 var data_name = 'data_bv1';
11 // var srtm = gmted; // Pour l'Alaska qui n'est pas sur le srtm
12 // print(ee.Feature(region.first()).area().divide(1000000)); // check la surface
13 // #####
14
15 // Histogramme des altitudes de la région
16 var srtm_mean = srtm.reduceRegion({
17   reducer : ee.Reducer.mean(),
18   geometry : region,

```

```

19   maxPixels : 1e9
20 });
21 var srtm_minMax = srtm.reduceRegion({
22   reducer : ee.Reducer.minMax(),
23   geometry : region,
24   maxPixels : 1e9
25 });
26
27 // print('Altitude moyenne :', srtm_mean.get('be75')); // Pour l'Alaska qui n'est
pas sur le srtm
28 // print('Altitude minimum :', srtm_minMax.get('be75_min')); // Pour l'Alaska qui
n'est pas sur le srtm
29 // print('Altitude maximum :', srtm_minMax.get('be75_max')); // Pour l'Alaska qui
n'est pas sur le srtm
30 print('Altitude moyenne :', srtm_mean.get('elevation'));
31 print('Altitude minimum :', srtm_minMax.get('elevation_min'));
32 print('Altitude maximum :', srtm_minMax.get('elevation_max'));
33 var region_name = ee.Image(region.first()).get('Name'); // US name
34 // var region_name = ee.Image(region.first()).get('NOMJEUDONN'); // CANADA name
35 var title_region = ee.String('Elevation de la région
(').cat(region_name).cat(ee.String('')).getInfo();
36 // Options pour l'histogramme
37 var options_hist = {
38   title: title_region,
39   fontSize: 20,
40   legend: 'none',
41   hAxis: {title: 'Elevation (m)'},
42   vAxis: {title: 'Fréquence'}
43 };
44 // Génération de l'histogramme
45 var histogram = ui.Chart.image.histogram(srtm, region, 300, 30, 100)
46   .setOptions(options_hist);
47 print(histogram);
48
49 // Ajout à la google map pour visualisation
50 Map.addLayer(region, {}, 'Région sélectionnée');
51 Map.centerObject(region);
52 // Map.addLayer(srtm.clip(region),{min:0, max:4000}, 'SRTM'); // Visualisation du
srtm
53
54 // Contrôle du calcul des tuiles
55 // var scale = 30; // --> scale définie en fonction de la projection (gagne bcp de
temps)
56 var maxpixels = 1e9; // 1e9
57 var be = false; // besteffort false
58 var ts = 1; // tilescale 1
59
60 // On traite une collection d'images entre date_first et date_last
61 var date_first = ee.Date('2000-10-01');
62 var date_last = ee.Date('2018-10-01'); // sélectionne jusqu'au jour précédent
63
64 // On charge la collection avec les paramètres qui nous intéressent
65 var sst = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD10A1').select('NDSI_Snow_Cover')
66   .filterDate(date_first, date_last)
67   .filterBounds(region)
68   .map(function(image){return image.clip(region)});
69 // print(sst);
70
71 var scale = sst.first().projection().nominalScale();
72 // Map.addLayer(sst.first(), {}, 'first collection image');
73
74 var sstclass =
ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD10A1').select('NDSI_Snow_Cover_Class')
75   .filterDate(date_first, date_last)
76   .filterBounds(region)

```

```

77     .map(function(image){return image.clip(region)}) ;
78
79 // On convertit en binaire pour compter les pixels enneigés
80 var sst_snow_mask = sst.map(function(image){return image.expression(
81     "(b('NDSI_Snow_Cover') > 0) ? 1" +
82     ": 0"
83 ));
84 // On convertit en binaire pour compter les pixels où il n'y a pas de neige
85 var sst_nosnow_mask = sst.map(function(image){return image.expression(
86     "(b('NDSI_Snow_Cover') < 1) ? 1" +
87     ": 0"
88 ));
89 // On convertit en binaire pour compter les pixels non renseignés
90 var sst_nodata_mask = sstclass.map(function(image){return image.expression(
91     "(b('NDSI_Snow_Cover_Class') > 0) ? 1" +
92     ": 0"
93 ));
94
95 // Mise en place de l'algorithme qui prend les 4 jours précédents pour compléter le
nodata
96 // On récupère toutes les dates de la collection d'images
97 var i = sst_nodata_mask.size(); // nbre d'éléments
98 // print(ee.Date(sst.get('system:time_start'))); // récupère la date de l'image
99 var datelist = sst.toList(i);
100 var todate = ee.List.sequence(1, i);
101 todate = todate.map(function(n) {
102     var actual = ee.Number(n).subtract(1);
103     return ee.Image(datelist.get(actual)).get('system:time_start');
104 });
105
106 // On complète les dates manquantes
107 var sL_dates = ee.List.sequence(date_first.millis(),
date_last.millis().add(-86400000), 86400000);
108
109 var serverListdates = ee.List.sequence(0, sL_dates.size().add(-1));
110 serverListdates = serverListdates.map(function(n) {
111     var evaldate = todate.contains(sL_dates.get(n));
112     return ee.Algorithms.If(evaldate, 0, sL_dates.get(n));
113 });
114 var missing_dates = serverListdates.removeAll(ee.List([0])); // Liste des dates
manquantes
115
116 // On crée artificiellement des images vides pour snow et nosnow et pleines pour
nodata
117 var serverLista = ee.List.sequence(0, missing_dates.size().add(-1));
118 serverLista = serverLista.map(function(n) {
119     return ee.Image(0).set('system:index',
ee.Date(missing_dates.get(n)).format('YYYY-MM-dd'));
120 });
121 var serverListb = ee.List.sequence(0, missing_dates.size().add(-1));
122 serverListb = serverListb.map(function(n) {
123     return ee.Image(1).set('system:index',
ee.Date(missing_dates.get(n)).format('YYYY-MM-dd'));
124 });
125
126 var missing_coll_empty = ee.ImageCollection(serverLista);
127 var missing_coll_full = ee.ImageCollection(serverListb);
128 // print('Nombre d\'images MODIS manquantes : ', missing_coll_empty.size());
129 var merged_coll_snow = sst_snow_mask.merge(missing_coll_empty);
130 var merged_coll_nosnow = sst_nosnow_mask.merge(missing_coll_empty);
131 var merged_coll_nodata = sst_nodata_mask.merge(missing_coll_full);
132
133 // Réécriture de la date correcte (sans le no de la collection)
134 var new_coll_snow = merged_coll_snow.map(function(image){
135     return image.set('system:name', ee.String(image.get('system:index')).slice(2));

```

```

136 });
137 var new_coll_nosnow = merged_coll_nosnow.map(function(image){
138     return image.set('system:name', ee.String(image.get('system:index')).slice(2));
139 });
140 var new_coll_nodata = merged_coll_nodata.map(function(image){
141     return image.set('system:name', ee.String(image.get('system:index')).slice(2));
142 });
143
144 // Collections complètes
145 sst_snow_mask = new_coll_snow.sort('system:name');
146 sst_nosnow_mask = new_coll_nosnow.sort('system:name');
147 sst_nodata_mask = new_coll_nodata.sort('system:name');
148
149 // On fait les listes côté serveur
150 var i = sst_nodata_mask.size(); // recalcul du nbre d'éléments
151 var slist = sst_snow_mask.toList(i);
152 var snslist = sst_nosnow_mask.toList(i);
153 var sndlist = sst_nodata_mask.toList(i);
154
155 // Mise à jour des masques de surface
156 // L'algo récupère les images en boucle ce qui veut dire que les 4 premières images
sont faussées (pas d'impact pour la suite)
157 var mask_update = ee.List.sequence(1, i);
158 mask_update = mask_update.map(function(n) {
159     var pre_pre_pre_previous = ee.Number(n).subtract(5);
160     var pre_pre_previous = ee.Number(n).subtract(4);
161     var pre_previous = ee.Number(n).subtract(3);
162     var previous = ee.Number(n).subtract(2);
163     var actual = ee.Number(n).subtract(1);
164     // Probablement faisable de faire une boucle pour les 4 jours
165     var mask_known = ee.Image(slist.get(actual)).add(snslist.get(actual));
166     var mask_need = mask_known.not();
167     var mask_1day_ns =
ee.Image(snslist.get(actual)).add(snslist.get(previous)).multiply(mask_need).add(snslist
.get(actual)).eq(1);
168     var mask_1day_s =
ee.Image(slist.get(actual)).add(slist.get(previous)).multiply(mask_need).add(slist.get(a
ctual)).eq(1);
169     var mask_1day_known = mask_1day_ns.add(mask_1day_s);
170     var mask_1day_need = mask_1day_known.not();
171     var mask_2day_s =
mask_1day_s.add(slist.get(pre_previous)).multiply(mask_1day_need).add(mask_1day_s).eq(1)
;
172     var mask_2day_ns =
mask_1day_ns.add(snslist.get(pre_previous)).multiply(mask_1day_need).add(mask_1day_ns).e
q(1);
173     var mask_2day_known = mask_2day_ns.add(mask_2day_s);
174     var mask_2day_need = mask_2day_known.not();
175     var mask_3day_s =
mask_2day_s.add(slist.get(pre_pre_previous)).multiply(mask_2day_need).add(mask_2day_s).e
q(1);
176     var mask_3day_ns =
mask_2day_ns.add(snslist.get(pre_pre_previous)).multiply(mask_2day_need).add(mask_2day_n
s).eq(1);
177     var mask_3day_known = mask_3day_ns.add(mask_3day_s);
178     var mask_3day_need = mask_3day_known.not();
179     var mask_4day_s =
mask_3day_s.add(slist.get(pre_pre_pre_previous)).multiply(mask_3day_need).add(mask_3day_
s).eq(1);
180     var mask_4day_ns =
mask_3day_ns.add(snslist.get(pre_pre_pre_previous)).multiply(mask_3day_need).add(mask_3d
ay_ns).eq(1);
181     var mask_4day_nd =
ee.Image(sndlist.get(actual)).multiply(sndlist.get(previous)).multiply(sndlist.get(pre_p
revious)).multiply(sndlist.get(pre_pre_previous)).multiply(sndlist.get(pre_pre_pre_previ

```

```

ous));
182 var band_video = ee.Image.cat([mask_4day_s.multiply(8), mask_4day_ns.multiply(4),
mask_4day_nd.multiply(2)]).multiply(512).uint8(); // convert en 8 bits
183 var full =
mask_4day_s.addBands(mask_4day_ns).addBands(mask_4day_nd).addBands(band_video); // algo
4 jours
184 // var full =
mask_3day_s.addBands(mask_3day_ns).addBands(ee.Image(sndlist.get(actual)).multiply(sndli
st.get(previous)).multiply(sndlist.get(pre_previous)).multiply(sndlist.get(pre_pre_previ
ous))).addBands(band_video); // algo 3 jours
185 // var full =
mask_2day_s.addBands(mask_2day_ns).addBands(ee.Image(sndlist.get(actual)).multiply(sndli
st.get(previous)).multiply(sndlist.get(pre_previous))).addBands(band_video); // algo 2
jours
186 // var full =
mask_1day_s.addBands(mask_1day_ns).addBands(ee.Image(sndlist.get(actual)).multiply(sndli
st.get(previous))).addBands(band_video); // algo 1 jour
187 // var full =
ee.Image(slist.get(actual)).addBands(ee.Image(snslist.get(actual))).addBands(ee.Image(sn
dlist.get(actual))).addBands(band_video); // sans algo
188 return full;
189 });
190
191 var surfaces_coll = ee.ImageCollection(mask_update);
192 var video = surfaces_coll.map(function(image){return image
193   .select([3, 4, 5],[ 'surface_snow', 'surface_nosnow', 'surface_nodata' ])});
194
195 // Renommer les bandes de la vidéo
196 var renamed = video.select(
197   ['constant', 'constant_1', 'constant_2'], // old names
198   ['band1', 'band2', 'band3'] // new names
199 );
200 // print(video); // 3 bands image for video
201
202 // BONUS : Export video
203 Export.video.toDrive({
204   collection: video,
205   description: 'BV1_Snow_Evolution_1year',
206   folder: 'GEE',
207   dimensions: 2160, // 4K
208   framesPerSecond: 12,
209   region: region
210 });
211
212 // On multiplie le mask binaire par la surface d'un pixel
213 var area = ee.Image.pixelArea().divide(1000 * 1000); // en km2
214 var sst_sum = surfaces_coll.map(function(image){return image.multiply(area)
215   .select([0, 1, 2],[ 'surface_snow', 'surface_nosnow', 'surface_nodata' ])});
216 // print(sst_sum);
217
218 // On calcule les différentes surfaces
219 var sst_surfaces = sst_sum.map(function(image){return image.set('surfaces',
image.reduceRegion({
220   reducer: ee.Reducer.sum(),
221   geometry: region,
222   scale: scale,
223   maxPixels: maxpixels,
224   bestEffort: be,
225   tileScale : ts
226 })))});
227
228 // On récupère les surfaces
229 var surfacesList = sst_surfaces.aggregate_array('surfaces');
230
231 // Transforme en une liste contenant seulement les données

```

```

232 var sL0 = ee.List(surfacesList).map(function(image){
233   return ee.Dictionary(image).get('surface_snow'))});
234 var sL1 = ee.List(surfacesList).map(function(image){
235   return ee.Dictionary(image).get('surface_nosnow'))});
236 var sL2 = ee.List(surfacesList).map(function(image){
237   return ee.Dictionary(image).get('surface_nodata'))});
238
239 // On fait une liste côté serveur
240 var serverList = ee.List.sequence(0, sL0.length().subtract(1));
241 serverList = serverList.map(function(n) {
242   return ee.Feature(null, {
243     'date': sL_dates.get(ee.Number(n)),
244     'snow': sL0.get(ee.Number(n)),
245     'nosnow': sL1.get(ee.Number(n)),
246     'nodata': sL2.get(ee.Number(n))
247   });
248 });
249
250 // On exporte en un fichier sur Google Drive
251 Export.table.toDrive({
252   collection: ee.FeatureCollection(serverList),
253   description: ee.String(data_name).getInfo(),
254   folder: 'GEE',
255   fileFormat: 'CSV'
256 });

```

7.3. Code MATLAB

7.3.1. Code général

```

1  % Global warming and peak discharge in snowmelt catchments
2  % Dionys Lugon-Moulin - juillet 2019
3
4  clear
5  close all
6  clc
7
8  % Paramètres à définir
9  pourcent_start_fonte = 90; % pourcentage de surface en neige à considérer pour le
début de fonte
10 pourcent_end_fonte = 10; % pourcentage de surface en neige à considérer pour la fin
de fonte
11 nb_values_snow = 5; % nbre de valeurs à prendre en compte au total, doit être impair
12 nb_values_debit = 5; % nbre de valeurs à prendre en compte au total, doit être
impair
13 cloud_free = 75; % taux en pourcent de données disponibles sur une image
14 val_pre = 5; % valeurs à prendre pour la valeur médiane pre
15 val_post = 10; % valeurs à prendre pour la valeur médiane post
16 nb_bv = 57; % Nombre de bassins versants disponibles
17 individual_plot = false; % plots individuels avec les points start_fonte end_fonte
et débits
18 individual_plot_map = false; % plots individuels pour les différences à la droite de
régression par année
19 regression_plot = false; % plot les 6 plots de régression
20
21 % Pour les pics de débits hors période de fonte printanière
22 % bassins à utiliser : ([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])
23 % bassins à virer : ([4,9,31:41,44:55])
24
25 % Import des informations de chaque station
26 fichier_stations = fopen('stations.csv','r');
27

```



```

stations_import=textscan(fichier_stations,'%f%s%f%f%f%f%f%f','Delimiter',' ','HeaderLines',1);
28 fclose(fichier_stations);
29 stations_nom = convertCharsToStrings(stations_import(:,2));
30 stations_surface = cell2mat(stations_import(:,5));
31 stations_lat = cell2mat(stations_import(:,6));
32 stations_long = cell2mat(stations_import(:,7));
33 stations_altitude = cell2mat(stations_import(:,9));
34
35 % Initialisation des variables
36 pente_sf = zeros(nb_bv,1); % init
37 pente_ef = zeros(nb_bv,1); % init
38 start_fonte_clean=[];
39 end_fonte_clean=[];
40 all_sf = NaN(18,nb_bv);
41 all_ef = NaN(18,nb_bv);
42 for i = (1:nb_bv)
43     start_fonte_clean=[]; % init
44     end_fonte_clean=[]; % init
45     [start_fonte, end_fonte] = getdata(i, nb_values_snow, pourcent_start_fonte,
pourcent_end_fonte, cloud_free, val_pre, val_post, individual_plot);
46     for j = (1:18) % 18 années
47         if start_fonte(j)>0
48             start_fonte_clean=[start_fonte_clean start_fonte(j)];
49             all_sf(j,i)=start_fonte(j);
50             all_ef(j,i)=end_fonte(j);
51             if (end_fonte(j)==0)
52                 all_ef(j,i)=NaN;
53                 all_sf(j,i)=NaN;
54             end
55         end
56         if end_fonte(j)>0
57             end_fonte_clean=[end_fonte_clean end_fonte(j)];
58         end
59     end
60     lsf = length(start_fonte_clean);
61     lef = length(end_fonte_clean);
62     X_start = [ones(lsf,1) (1:lsf)'];
63     X_end = [ones(lef,1) (1:lef)'];
64     eq_sf = X_start\start_fonte_clean';
65     eq_ef = X_end\end_fonte_clean';
66     pente_sf(i) = eq_sf(2);
67     pente_ef(i) = eq_ef(2);
68     % variances
69     varsf(i) = var(start_fonte_clean);
70     varef(i) = var(end_fonte_clean);
71     % Graphes des tendances
72     if individual_plot == true
73         figure(200+i)
74         hold on
75         plot(1:18, start_fonte_clean, 'dr','MarkerSize',15,'LineWidth',2)
76         plot(1:18, (1:18)*eq_sf(2)+eq_sf(1), 'r','LineWidth',2)
77         plot(1:18, end_fonte_clean, 'og','MarkerSize',15,'LineWidth',2)
78         plot(1:18, (1:18)*eq_ef(2)+eq_ef(1), 'g','LineWidth',2)
79     end
80     % Map pour afficher les différences selon les années avec les droites de
régression
81     Map(:,i) = start_fonte_clean-((1:18)*eq_sf(2)+eq_sf(1));
82 end
83
84 % map colorée avec la variation de la neige en fonction de la régression
85 Map_tri = [Map' stations_lat];
86 Map_tri_fait = sortrows(Map_tri,size(Map_tri,2));
87 Map_result = Map_tri_fait(:,1:end-1)';
88 % tri sur les paramètres

```

```

89 stations_tri = [stations_lat stations_long stations_surface];
90 stations_tri_fait = sortrows(stations_tri,1);
91 s_lat = stations_tri_fait(:,1);
92 s_long = stations_tri_fait(:,2);
93 s_surf = stations_tri_fait(:,3);
94
95 figure(600)
96 nb_val_cm = 25; % 2n+1 classes de couleur en tout
97 color_map = [
98     linspace(0,1,nb_val_cm) 1 ones(1,nb_val_cm)]
99     linspace(0,1,nb_val_cm) 1 linspace(1,0,nb_val_cm)]
100    [ones(1,nb_val_cm) 1 linspace(1,0,nb_val_cm)]
101 ];
102 colormap(color_map)
103 imagesc(Map_result, [-nb_val_cm nb_val_cm])
104 c = colorbar;
105 c.Label.String = 'Nombre de jours de différence avec la courbe de régression';
106 c.Label.FontSize = 20;
107 title('Différence par rapport à la droite de régression du début de fonte pour
chaque bassin versant', 'FontSize', 20)
108 xlabel('Bassin versant classé par latitude [bassin 1-57]', 'FontSize', 16)
109 ylabel('Années de 2000/01 à 2017/2018 [années 1-18]', 'FontSize', 16)
110
111 % Représentation annuelle sur une map avec des cercles de couleur
112 if individual_plot_map == true
113     for i = 1:18
114         figure(600+i)
115
116         geosscatter(s_lat,s_long,s_surf./20,Map_result(i,:), 'filled', 'MarkerEdgeColor', [0 0 0]);
117         s.FontSize = 16;
118         colormap(color_map)
119         caxis([-nb_val_cm nb_val_cm]);
120         c = colorbar;
121         c.Label.String = 'Nombre de jours de différence avec la courbe de
régression';
122         c.Label.FontSize = 20;
123         if i < 10
124             title(['Différence par rapport à la droite de régression du début de
fonte Année 200' num2str(i-1) '/200' num2str(i)], 'FontSize', 20)
125         elseif i == 10
126             title(['Différence par rapport à la droite de régression du début de
fonte Année 200' num2str(i-1) '/20' num2str(i)], 'FontSize', 20)
127         else
128             title(['Différence par rapport à la droite de régression du début de
fonte Année 20' num2str(i-1) '/20' num2str(i)], 'FontSize', 20)
129         end
130     end
131
132 % Maps avec les US en fond
133 figure(619)
134
135 geosscatter(stations_lat,stations_long,stations_surface./20,pente_sf, 'filled', 'MarkerEdge
Color', [0 0 0])
136 s.FontSize = 16;
137 colormap(color_map)
138 caxis([-1.5 1.5]); % arbitraire
139 c = colorbar;
140 c.Label.String = 'Droites de régression de la date de début de fonte';
141 c.Label.FontSize = 20;
142 title('Droites de régression : début de fonte (j/an)', 'FontSize', 20)
143 figure(620)
144
145 geosscatter(stations_lat,stations_long,stations_surface./20,pente_ef, 'filled', 'MarkerEdge
Color', [0 0 0])

```

```

144 s.FontSize = 16;
145 colormap(color_map)
146 caxis([-1 1]); % arbitraire
147 c = colorbar;
148 c.Label.String = 'Droite de régression de la date de fin de fonte';
149 c.Label.FontSize = 20;
150 title('Droites de régression : fin de fonte (j/an)', 'FontSize', 20)
151
152 % On récupère les jours de débits max
153 [peak_days, peak_discharge, center_volume] = getdebits(nb_bv, all_sf,
nb_values_debit, individual_plot);
154
155 % Nombre de jours entre start_fonte et peak_day
156 % attention finalement pas utilisé
157 % j_sf_pd = peak_days(1:end)-all_sf(1:end);
158
159 pente_date_peak = zeros(nb_bv,1);
160 pente_discharge = zeros(nb_bv,1);
161 pente_jsfpd = zeros(nb_bv,1);
162 pente_cv = zeros(nb_bv,1);
163 for i = (1:nb_bv)
164     % On enlève le max et le min pour les jours de pic de débits
165     % attention finalement pas utilisé : ça améliore un peu mais pas beaucoup
166     % peak_days(peak_days(:,i))==max(peak_days(:,i)),i)=NaN;
167     % peak_days(peak_days(:,i))==min(peak_days(:,i)),i)=NaN;
168     % center_volume(center_volume(:,i))==max(center_volume(:,i)),i)=NaN;
169     % center_volume(center_volume(:,i))==min(center_volume(:,i)),i)=NaN;
170     ld = length(peak_days(:,i));
171     ldnan = sum(~isnan(peak_days(:,i))); % nb val
172     Xsp = nonzeros(~isnan(peak_days(:,i))).*(1:ld); % nb val
173     pde_val = peak_days(~isnan(peak_days(:,i)),i); % val
174     pdi_val = peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i); % val
175     % variances
176     varpday(i) = var(pde_val);
177     varpdis(i) = var(pdi_val);
178     X_start = [ones(ldnan,1) Xsp];
179     eq_sp = X_start\pde_val;
180     eq_pd = X_start\pdi_val;
181     % jsfpd_val= j_sf_pd(((i-1)*18)+1:(i*18)); % val sélectionnées
182     % eq_jsfpd = X_start\jsfpd_val(~isnan(peak_days(:,i)));
183     lcv = length(center_volume(:,i));
184     lcvnan = sum(~isnan(center_volume(:,i))); % nb val
185     Xcv = nonzeros(~isnan(center_volume(:,i))).*(1:lcv); % nb val
186     Xcv_start = [ones(lcvnan,1) Xcv];
187     eq_cv = Xcv_start\center_volume(~isnan(center_volume(:,i)),i);
188     pente_date_peak(i) = eq_sp(2);
189     pente_discharge(i) = eq_pd(2);
190     % pente_jsfpd(i) = eq_jsfpd(2);
191     pente_cv(i) = eq_cv(2);
192     % Graphes des tendances des peak_days et center_volume
193     if individual_plot == true
194         figure(200+i)
195         hold on
196         plot(Xsp, pde_val, '+b','MarkerSize', 20, 'LineWidth', 2)
197         plot(Xsp, (Xsp)*eq_sp(2)+eq_sp(1), 'b', 'LineWidth', 2)
198         plot(Xcv, center_volume(~isnan(center_volume(:,i)),i), 'xc','MarkerSize',
20, 'LineWidth', 2)
199         plot(Xcv, (Xcv)*eq_cv(2)+eq_cv(1), 'c', 'LineWidth', 2)
200     end
201 end
202
203 % variance des paramètres
204 figure(20)
205 hold on
206 plot(varsf, '-o')

```

```

207 plot(varef,':s')
208 axis([0 58 0 1000])
209 title('Variance des dates du début et de fin de fonte par bassin versant',
'FontSize', 20)
210 xlabel('Bassins versants [1-57]', 'FontSize', 16)
211 ylabel('Variance [-1,1]', 'FontSize', 16)
212 legend({'Variance start fonte' 'Variance end fonte'}, 'Location', 'North',
'NumColumns', 2)
213 figure(21)
214 hold on
215 plot(varpday,'-o')
216 plot(varpdis,':s')
217 axis([0 58 0 3000])
218 title('Variance des dates du pic de débit et du volume central', 'FontSize', 20)
219 xlabel('Bassins versants [1-57]', 'FontSize', 16)
220 ylabel('Variance [-1,1]', 'FontSize', 16)
221 legend({'Variance peak day' 'Variance peak discharge'}, 'Location', 'North',
'NumColumns', 2)
222
223 % Maps avec les US en fond
224 figure(621)
225
geosscatter(stations_lat,stations_long,stations_surface./20,pente_date_peak,'filled','Mar
kerEdgeColor',[0 0 0])
226 s.FontSize = 16;
227 colormap(color_map)
228 caxis([-2 2]); % arbitraire
229 c = colorbar;
230 c.Label.String = 'Droite de régression de la date de crue maximale';
231 c.Label.FontSize = 20;
232 title('Droites de régression : date de crue maximale (j/an)', 'FontSize', 20)
233 figure(622)
234
geosscatter(stations_lat,stations_long,stations_surface./20,pente_discharge,'filled','Mar
kerEdgeColor',[0 0 0])
235 s.FontSize = 16;
236 colormap(color_map)
237 caxis([-1.5 1.5]); % arbitraire
238 c = colorbar;
239 c.Label.String = 'Droite de régression du débit de la crue maximale';
240 c.Label.FontSize = 20;
241 title('Droites de régression : débit de la crue maximale (%/an)', 'FontSize', 20)
242
243 figure(1)
244 % boxplot([pente_sf pente_ef pente_date_peak pente_discharge pente_cv
pente_jsfpd],{'Début de fonte' 'Fin de fonte' 'Date du pic de débit' 'Débit max' 'Volume
centré' 'Délai début fonte et jour du pic de débit'})
245 boxplot([pente_sf pente_ef pente_date_peak pente_discharge pente_cv],{'Début de
fonte' 'Fin de fonte' 'Date du pic de débit' 'Débit max' 'Volume centré'})
246 % boxplot([pente_date_peak pente_date_peak([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])'
pente_discharge' pente_discharge([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])' pente_cv'
pente_cv([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])'], [ones(length(pente_cv),1)'
2*ones(length(pente_cv([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])),1)' 3*ones(length(pente_cv),1)'
4*ones(length(pente_cv([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])),1)' 5*ones(length(pente_cv),1)'
6*ones(length(pente_cv([1:3,5:8,10:30,42,43,56,57])),1)'])
247 % set(gca,'XTickLabel', {'Date du pic de débit [j]'; 'Date du pic de débit [j]
*corrigé'; 'Débit max [%]'; 'Débit max [%] *corrigé'; 'Volume centré [%]'; 'Volume
centré [%] *corrigé'})
248 title('Tendances (pentes) pour les 57 bassins versants', 'FontSize', 20)
249 ylabel('Pentes des tendances [j/an] ou [%/an]', 'FontSize', 16);
250
251 figure(2)
252
geosscatter(stations_lat,stations_long,stations_surface./20,stations_altitude,'filled','M
arkerEdgeColor',[0 0 0])

```

```

253 s.FontSize = 16;
254 colormap(gray)
255 caxis([-inf inf]);
256 c = colorbar;
257 c.Label.String = 'Altitude moyenne [m]';
258 c.Label.FontSize = 20;
259 title('Bassins versants, surface et altitude', 'FontSize', 20)
260
261 % Divers plot
262 figure(6)
263 hold on
264 plot(1:nb_bv, pente_sf, 'bx:', 1:nb_bv, pente_ef, 'ro:')
265 plot([1 nb_bv],[median(pente_sf) median(pente_sf)], 'b')
266 plot([1 nb_bv],[median(pente_ef) median(pente_ef)], 'r')
267 axis([0 58 -inf inf])
268 title('Ecart à la médiane de la pente de la droite de régression pour chaque bassin
versant', 'FontSize', 20)
269 xlabel('Bassin versant [1-57]', 'FontSize', 16)
270 ylabel('Ecart à la médiane de la droite de régression [j/an]', 'FontSize', 16)
271 legend('pente start fonte', 'pente end fonte', 'médiane start fonte', 'médiane end
fonte', 'FontSize', 16)
272 figure(7)
273 hold on
274 plot(1:nb_bv, pente_date_peak, 'bx:', 1:nb_bv, pente_discharge, 'ro:')
275 plot([1 nb_bv],[median(pente_date_peak) median(pente_date_peak)], 'b')
276 plot([1 nb_bv],[median(pente_discharge) median(pente_discharge)], 'r')
277 axis([0 58 -inf inf])
278 title('Ecart à la médiane de la pente de la droite de régression pour chaque bassin
versant', 'FontSize', 20)
279 xlabel('Bassin versant [1-57]', 'FontSize', 16)
280 ylabel('Ecart à la médiane de la droite de régression [j/an] (et [%/an] pour pente
peak discharge)', 'FontSize', 16)
281 legend('pente peak day', 'pente peak discharge', 'médiane peak day', 'médiane peak
discharge', 'FontSize', 16)
282
283 % corrélation start_fonte, end_fonte, peak_day et peak_discharge
284 for i = 1:nb_bv
285     a1=corrcoef(all_sf(:,i), all_ef(:,i));
286     b1(i)=a1(2);
287     a2=corrcoef(all_sf(~isnan(peak_days(:,i))),i),
peak_days(~isnan(peak_days(:,i))),i));
288     b2(i)=a2(2);
289     a3=corrcoef(all_sf(~isnan(peak_days(:,i))),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i))),i));
290     b3(i)=a3(2);
291     a4=corrcoef(all_ef(~isnan(peak_days(:,i))),i),
peak_days(~isnan(peak_days(:,i))),i));
292     b4(i)=a4(2);
293     a5=corrcoef(all_ef(~isnan(peak_days(:,i))),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i))),i));
294     b5(i)=a5(2);
295     a6=corrcoef(peak_days(~isnan(peak_days(:,i))),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i))),i));
296     b6(i)=a6(2);
297 end
298 figure(8)
299 boxplot([b1' b2' b3' b4' b5' b6'],{'start fonte - end fonte' 'start fonte - peak
day' 'start fonte - peak discharge' 'end fonte - peak day' 'end fonte - peak discharge'
'peak day - peak discharge'})
300 title('Coefficients de corrélation pour chacun des 57 bassins versants', 'FontSize',
20)
301 ylabel('Coefficient de corrélation [-1, 1]', 'FontSize', 16)
302
303 % Graphes de points avec les tendances pour chaque bassin versant
304 if regression_plot == true

```

```

305     for i = 1:nb_bv
306         figure(10)
307         hold on
308         [fitresult, gof] = fit(all_sf(:,i), all_ef(:,i), fitttype('poly1'));
309         save1(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]
310         plot(fitresult, all_sf(:,i), all_ef(:,i));
311         legend('off')
312         title('Régression entre le jour du début de fonte et le jour de fin de
fonte', 'FontSize', 20)
313         xlabel('Jour du début de fonte', 'FontSize', 16)
314         ylabel('Jour de fin de fonte', 'FontSize', 16)
315         figure(11)
316         hold on
317         [fitresult, gof] = fit(all_sf(:,i), all_ef(:,i)-all_sf(:,i),
fitttype('poly1'));
318         save2(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]
319         plot(fitresult, all_sf(:,i), all_ef(:,i)-all_sf(:,i));
320         legend('off')
321         title('Régression entre le jour du début de fonte et le nombre de jours pour
arriver à la fin de fonte', 'FontSize', 20)
322         xlabel('Jour du début de fonte', 'FontSize', 16)
323         ylabel('Nombre de jours pour arriver à la fin de fonte', 'FontSize', 16)
324         figure(12)
325         hold on
326         [fitresult, gof] = fit(all_sf(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i), fitttype('poly1'));
327         save3(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]
328         plot(fitresult, all_sf(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i));
329         legend('off')
330         title('Régression entre le jour du début de fonte et le débit maximum',
'FontSize', 20)
331         xlabel('Jour du début de fonte', 'FontSize', 16)
332         ylabel('Débit maximum', 'FontSize', 16)
333         figure(13)
334         hold on
335         [fitresult, gof] = fit(all_ef(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i), fitttype('poly1'));
336         save4(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]
337         plot(fitresult, all_ef(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i));
338         legend('off')
339         title('Régression entre le jour de fin de fonte et le débit maximum',
'FontSize', 20)
340         xlabel('Jour de fin de fonte', 'FontSize', 16)
341         ylabel('Débit maximum', 'FontSize', 16)
342         axis([-inf inf 0 100])
343         figure(14)
344         hold on
345         [fitresult, gof] = fit(peak_days(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i), fitttype('poly1'));
346         save5(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]
347         plot(fitresult, peak_days(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i));
348         legend('off')
349         title('Régression entre le jour du pic du débit et le pourcentage du débit
max', 'FontSize', 20)
350         xlabel('Jour du pic du débit', 'FontSize', 16)
351         ylabel('Débit maximum [%]', 'FontSize', 16)
352         figure(15)
353         hold on
354         [fitresult, gof] =
fit(all_ef(~isnan(peak_days(:,i)),i)-all_sf(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i), fitttype('poly1'));
355         save6(i,1:2)=[fitresult(0) fitresult(1)-fitresult(0)]; % ax+b -> [b a]

```

```

356     plot(fitresult,
all_ef(~isnan(peak_days(:,i)),i)-all_sf(~isnan(peak_days(:,i)),i),
peak_discharge(~isnan(peak_days(:,i)),i));
357     legend('off')
358     title('Régression entre le nombre de jours entre début et fin de fonte et le
débit maximum', 'FontSize', 20)
359     xlabel('Nombre de jours pour arriver à la fin de fonte', 'FontSize', 16)
360     ylabel('Débit maximum [%]', 'FontSize', 16)
361     axis([-inf inf 0 100])
362 end
363 % Les moyennes des régressions
364 median(save1)
365 median(save2)
366 median(save3)
367 median(save4)
368 median(save5)
369 median(save6)
370 end
371
372 % Mise en forme des plots 100+i et 200+i
373 if individual_plot == true
374     for i = 1:nb_bv
375         fig = figure(100+i);
376         title(['Bassin ', num2str(i), ' : ', char(stations_nom(i))], 'FontSize', 20)
377         xlabel('Nombre de jours écoulés depuis le 1er octobre', 'FontSize', 16)
378         ylabel('Pourcentage de surface recouverte de neige / Pourcentage de débit
par rapport au débit max [%]', 'FontSize', 16)
379         axis([1 366 0 100])
380         plot(0, 0, '-k', 'LineWidth', 5, 'visible', 'off')
381         plot(0, 0, '-k', 'LineWidth', 1, 'visible', 'off')
382         legend('Début de fonte', 'Fin de fonte', 'Débit de pointe', 'Surface
enneigée (%)', 'Débits (%)', 'FontSize', 16);
383         figure(200+i)
384         title(['Bassin ' num2str(i) ' : ', char(stations_nom(i))], 'FontSize', 20)
385         xlabel('Années de 2000/01 à 2017/18', 'FontSize', 16)
386         ylabel('Nombre de jours écoulés depuis le 1er octobre', 'FontSize', 16)
387         axis([0 19 -inf inf])
388         legend('Début de fonte', 'Droite de régression', 'Fin de fonte', 'Droite de
régression', 'Débit de pointe', 'Droite de régression', 'Volume centré', 'Droite de
régression', 'FontSize', 16, 'Location', 'NorthEastOutside');
389     end
390 end

```

7.3.2. Traitement des surfaces

```

1 % Fonction getdata.m - Dionys Lugon-Moulin - Juillet 2019
2 %
3 % La fonction permet de récupérer les données du bassin versant indiqué
4 % (bv1 --> bvX) et de les traiter en déterminant les dates de début de
5 % fonte et de fin de fonte pour les années 00/01 jusqu'à 17/18
6 %
7 % usage : [dss_days, dse_days] = getdata(nom, nb_values, pourcent_start_fonte,
pourcent_end_fonte, cloud_free, val_pre, val_post, individual_plot)
8
9 function [dss_days, dse_days] = getdata(nom, nb_values, pourcent_start_fonte,
pourcent_end_fonte, cloud_free, val_pre, val_post, individual_plot)
10
11 % Importation de tous les fichiers de données
12 bv_import=importdata(['data_bv' num2str(nom) '.csv'],',',1);
13 bv_data=bv_import.data;
14
15 % Ajout des dates manquantes avec NaN comme valeur
16 % Car parfois il manque des données de MODIS pour certaines dates

```



```

17 % EDIT : maintenant inutile car le cas est traité directement via GEE
18 date_first = posixtime(datetime([2000,10,1])); % synchro avec GEE
19 date_last = posixtime(datetime([2018,10,1])); % synchro avec GEE
20 sec_day = 86400; % nbre de secondes dans 1 jour : 86400
21 nb_days = (date_last-date_first)/sec_day;
22 surface_bassin = bv_data(1,3)+bv_data(1,4)+bv_data(1,5);
23 add_data = zeros(nb_days-length(bv_data(:,1)), 5); % initialisation
24 z = 1; % initialisation
25 for y = 1:nb_days
26     date_use = (date_first+sec_day*(y-1))*1000;
27     if (y<nb_days)
28         if sum(date_use == bv_data(:,2)) == 1
29             % on ne fait rien
30         else % il faut la rajouter
31             add_data(z,:) = [NaN, date_use, surface_bassin, 0, 0];
32             z=z+1;
33         end
34     else
35         add_data(z,:) = [NaN, date_use, surface_bassin, 0, 0];
36         z=z+1;
37     end
38 end
39 % disp(add_data);
40 bv_data = [bv_data; add_data];
41 bv_data = sortrows(bv_data,2);
42
43 % Extraction des données
44 % system_index=bv_data(:,1); % unused
45 date=bv_data(:,2);
46 nodata=bv_data(:,3);
47 nosnow=bv_data(:,4);
48 snow=bv_data(:,5);
49 bv1_percent_snow=snow./(snow+nosnow)*100;
50
51 % Sélection des données avec plus de x% de data disponible
52 selection = nodata/surface_bassin<=1-cloud_free/100;
53
54 % Mise à jour de la liste avec seulement les valeurs sélectionnées
55 for i = (1:length(bv1_percent_snow))
56     if selection(i) == 1
57         % on ne fait rien
58     else
59         bv1_percent_snow(i)=NaN;
60     end
61 end
62
63 x = (1:length(bv1_percent_snow))';
64 y = bv1_percent_snow;
65 idx = isfinite(x) & isfinite(y);
66 fit_linear = fit(x(idx),y(idx),'linearinterp');
67 % fit_sp = fit(x(idx),y(idx),'smoothingspline');
68 fitl = fit_linear(x);
69 % fits = fit_sp(x);
70 % fit_go = fitl;
71 bv1_percent_snow = fitl;
72
73 % Création des graphes avec les données sur 18 ans
74 % méthode avec x valeurs filtrées et moyenne mobile weighted
75 fit_go = zeros(length(bv1_percent_snow),1);
76 window = (nb_values-1)/2;
77 for i = (1:length(bv1_percent_snow))
78     sum_window = 0;
79     deno = 0;
80     for j = (0:nb_values-1)
81         if (i-window+j > 0) && (-i-j+window+length(bv1_percent_snow)+1 > 0) &&

```

```

(isnan(bv1_percent_snow(i+j-window)) ~= true)
82         % on récupère la valeur
83         % poid = window-0.5*abs((window-j));
84         poid = 1;
85         sum_window = sum_window + poid * bv1_percent_snow(i+j-window);
86         deno = deno + poid;
87     end
88 end
89 fit_go(i) = sum_window/deno;
90 end
91 % suppression des valeurs impossibles
92 fit_go(fit_go>100) = 100;
93 fit_go(fit_go<0) = 0;
94
95 total_jour=0; % init
96 for i = (0:17)
97     sum1 = sum(date./1000<posixtime(datetime([2000+i+1,10,1])));
98     sum2 = sum(date./1000<posixtime(datetime([2000+i,10,1])));
99     nb_jours = sum1-sum2;
100    total_jour=total_jour+nb_jours;
101    graph_color = [i/18 0 1-i/18];
102    if individual_plot == true
103        figure(100+nom)
104        hold on
105        plot(1:nb_jours,
fit_go(total_jour-nb_jours+1:total_jour), 'Color',graph_color, 'LineWidth',5, 'HandleVisibi
lity','off');
106    end
107    save_for_max(i+1) = mean(maxk(fit_go(total_jour-nb_jours+1:total_jour),30));
108    save_for_min(i+1) = mean(mink(fit_go(total_jour-nb_jours+1:total_jour),30));
109 end
110
111 snowmelt_start = zeros(18,1);
112 snowmelt_end = zeros(18,1);
113 total_jour = 0; %initialisation
114 % adaptation du % start_fonte
115 pourcent_start_fonte_adj = -100+save_for_max+pourcent_start_fonte;
116 pourcent_end_fonte_adj = save_for_min+pourcent_end_fonte;
117 val_comp_used = 0; % init pour savoir sur combien d'années on doit modifier val_pre
pour l'algo
118 for i = (0:17)
119     sum1 = sum(date./1000<=posixtime(datetime([2000+i+1,10,1])));
120     sum2 = sum(date./1000<=posixtime(datetime([2000+i,10,1])));
121     nb_jours = sum1-sum2;
122     total_jour=total_jour+nb_jours;
123     data = fit_go(total_jour-nb_jours+1:total_jour);
124     dates = date(total_jour-nb_jours+1:total_jour);
125     pre_j = 5*val_pre; % init nb de jours en plus à analyser en arrière
126     j_pre = val_pre; % init nb de jours à tester pour remplir la conditon
127     val_comp = val_pre; % init for special case
128     finish = false; % init
129     while finish == false
130         for j = (1+val_pre:length(data)-val_post-50) % -50 pour éviter les erreurs
de la neige en septembre
131             mean_pre = median(data(j-val_pre:j));
132             mean_post = median(data(j:j+val_post));
133             if j > val_pre+pre_j
134                 j_pre = nnz(data(j-val_pre-pre_j:j)<pourcent_end_fonte_adj(i+1));
135             end
136             if mean_pre > pourcent_start_fonte_adj(i+1) && mean_post <
pourcent_start_fonte_adj(i+1) && pourcent_start_fonte_adj(i+1) <= data(j) % on a le
point de début de fonte
137                 snowmelt_start(i+1) = dates(j);
138             elseif mean_pre > pourcent_end_fonte_adj(i+1) && mean_post <
pourcent_end_fonte_adj(i+1) && pourcent_end_fonte_adj(i+1) <= data(j) && j_pre <

```

```

val_comp % on a le point de fin de neige
139         snowmelt_end(i+1) = dates(j);
140     end
141     % Si on a pas réussi à trouver de valeur pour snowmelt_end et/ou si on a
snowmelt_end < snowmelt_start
142     if snowmelt_end(i+1) < snowmelt_start(i+1) && j ==
length(data)-val_post-50
143         val_comp = val_comp+1;
144         val_comp_used = val_comp_used+1;
145         finish = false;
146     else
147         finish = true;
148     end
149 end
150 end
151 end
152
153 dss_days = zeros(18,1); % init
154 dse_days = zeros(18,1); % init
155 ds_years = zeros(18,1); % init
156 for i = (1:18) % 18 années
157     dss_days(i) =
(snowmelt_start(i)/1000-posixtime(datetime([2000+i-1,10,1])))/sec_day+1;
158     dse_days(i) =
(snowmelt_end(i)/1000-posixtime(datetime([2000+i-1,10,1])))/sec_day+1;
159     ds_years(i) = 2000+i;
160     if dss_days(i)<0
161         dss_days(i)=NaN;
162     end
163     if dse_days(i)<0
164         dse_days(i)=NaN;
165     end
166 end
167
168 if individual_plot == true
169     figure(100+nom)
170     hold on
171     plot(dss_days,
pourcent_start_fonte_adj,'d','MarkerSize',16,'MarkerEdgeColor','c','LineWidth',3);
172     plot(dse_days,
pourcent_end_fonte_adj,'o','MarkerSize',16,'MarkerEdgeColor','c','LineWidth',3);
173 end
174
175
176 % Confirmation du bon déroulement
177 if val_comp_used > 0
178     disp(['Bassin BV' num2str(nom) ' : années valides pour le début/fin de fonte : '
num2str(length(dss_days)) '/' num2str(length(dse_days)) '(val_pre modifié : '
num2str(val_comp_used) ' fois)']);
179 else
180     disp(['Bassin BV' num2str(nom) ' : années valides pour le début/fin de fonte : '
num2str(length(dss_days)) '/' num2str(length(dse_days))]);
181 end

```

7.3.3. Traitement des débits

```

1 % Fonction getdebits.m - Dionys Lugon-Moulin - Juillet 2019
2 %
3 % La fonction permet de récupérer le jour du pic de débit, le débit en
4 % pourcentage au pic et le volume centré pour chaque bassin versant
5 %
6 % usage : [peak_days_saved, peak_discharge_saved, center_volume] = getdebits(nb_bv,

```

```

start_fonte, nb_values, individual_plot);
7
8 function [peak_days_saved, peak_discharge_saved, center_volume] = getdebits(nb_bv,
start_fonte, nb_values, individual_plot)
9
10
11 % Importation de tous les fichiers de données
12 debits_import=importdata(['debits.csv'],'',1);
13 debits_data=debits_import.data;
14 date=debits_data(:,1);
15 debits=debits_data(:,2:end);
16
17 peak_days_saved = NaN(18,nb_bv); % init
18 peak_discharge_saved = NaN(18,nb_bv); % init
19
20 % Algorithme
21 for nom = 1:nb_bv
22     % Smoothing
23     debitsa=debits(:,nom);
24     smooth_debits = zeros(length(debits),1);
25     window = (nb_values-1)/2;
26     for i = (1:length(debits))
27         sum_window = 0;
28         deno = 0;
29         for j = (0:nb_values-1)
30             if (i-window+j > 0) && (-i-j+window+length(debits)+1 > 0) &&
(isnan(debitsa(i+j-window)) ~= true)
31                 % on récupère la valeur
32                 % poid = window-0.5*abs((window-j));
33                 poid = 1;
34                 sum_window = sum_window + poid * debitsa(i+j-window);
35                 deno = deno + poid;
36             end
37         end
38         smooth_debits(i) = sum_window/deno;
39         % debits incomplets
40         if isnan(smooth_debits(i)) == true
41             smooth_debits(i) = 0;
42         end
43     end
44
45     % on ne fait pas de fit pour le débits
46     x = (1:length(debits))';
47     y = smooth_debits./max(smooth_debits).*100;
48     fit_linear = fit(x,y,'linearinterp');
49     fit_sp = fit(x,y,'smoothingspline');
50     fitl = fit_linear(x);
51     fits = fit_sp(x);
52     % fit_go = fitl;
53     fit_go = smooth_debits./max(debits(:,nom)).*100;
54
55     total_jour=0; % init
56     for i = (0:17)

```

```

57     sum1 = sum(date<posixtime(datetime([2000+i+1,10,1])));
58     sum2 = sum(date<posixtime(datetime([2000+i,10,1])));
59     nb_jours = sum1-sum2;
60     total_jour=total_jour+nb_jours;
61     graph_color = [i/18 0 1-i/18];
62
63     if individual_plot == true
64         figure(100+nom)
65         hold on
66         plot(1:nb_jours,
fit_go(total_jour-nb_jours+1:total_jour), 'Color',graph_color,'LineWidth',1,'HandleVisibi
lity','off');
67     end
68     % Détermination du discharge_peak post fonte
69     peak_discharge = 0; % init
70     peak_days = 0; % init
71     for j = (total_jour-nb_jours+start_fonte(i+1,nom):total_jour-30) % -30 pour
éviter le dernier mois
72         if peak_discharge <= fit_go(j)
73             peak_days = -total_jour+nb_jours+j;
74             peak_discharge = fit_go(j);
75         end
76     end
77     if peak_discharge == 0
78         peak_days = NaN;
79         peak_discharge = NaN;
80     end
81     peak_days_saved(i+1,nom) = peak_days;
82     peak_discharge_saved(i+1,nom) = peak_discharge;
83     % #####
84     % Center volume
85     total_debit = 0; % init
86     cumulative_debits = 0; % init
87     for k = (1:nb_jours)
88         total_debit = total_debit + debits(total_jour-nb_jours+k,nom);
89         cumulative_debits(k) = total_debit;
90     end
91     center_volume(i+1,nom) =
length(cumulative_debits(cumulative_debits<total_debit/2));
92     if center_volume(i+1,nom) == 0
93         center_volume(i+1,nom) = NaN;
94     end
95     % #####
96 end
97
98 if individual_plot == true
99     figure(100+nom)
100     plot(peak_days_saved(:,nom),
peak_discharge_saved(:,nom), '+', 'MarkerSize',16, 'MarkerEdgeColor', 'c', 'LineWidth',3);
101 end
102
103 % Confirmation du bon déroulement
104 count_nan = sum(~isnan(peak_days_saved(:,nom)));

```

```
105     if count_nan ~= 18
106         disp(['Bassin BV' num2str(nom) ' : débits valides pour le jour de pic de
débit : ' num2str(count_nan) '(manque ' num2str(18-count_nan) ')']);
107     else
108         disp(['Bassin BV' num2str(nom) ' : débits valides pour le jour de pic de
débit : ' num2str(count_nan)]);
109     end
110 end
```

Remerciements

J'aimerais remercier mon directeur de mémoire Grégoire Mariéthoz pour son support scientifique, sa disponibilité et son suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite une bonne lecture au Jury composé de Grégoire Mariéthoz et de l'expert Moctar Dembélé et les remercie pour le temps consacré.