

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Modélisation Hydrologique du
Bassin-versant de la rivière Saint-Charles**

Etienne GABORIT

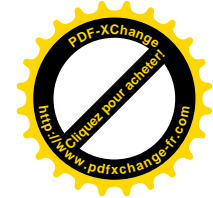
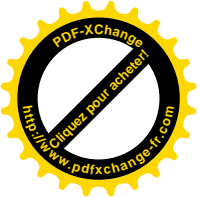
Directeur de recherche : François ANCTIL



**Département de Génie Civil
Université LAVAL
QUEBEC, Qc, CANADA**

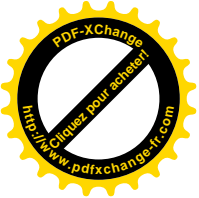
Le 11/05/08





PLAN DU RAPPORT

1-	Introduction	page 3
2-	Résumé / Abstract	page 4
3-	Propriétés de la zone étudiée	page 5
	a) localisation géographique	page 5
	b) occupation du territoire	page 6
	c) caractéristiques climatiques et géomorphologiques	page 8
4-	Moyens opérationnels	page 11
	a) données disponibles	page 11
	b) modèles utilisés	page 13
5-	Modèle SWAT	page 20
	a) Méthodologie	page 20
	b) résultats et sources d'erreur	page 43
6-	Modèle du réseau de Neurones	page 44
	a) Méthodologie	page 44
	b) résultats	page 46
7-	Modèle GR4J	page 47
	a) Méthodologie	page 47
	b) Résultats	page 48
8-	Conclusion	page 49
9-	Références	page 50

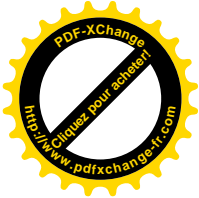
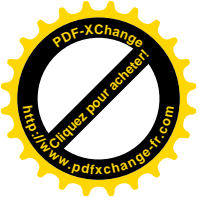


1- Introduction

En raison notamment du développement de zones urbaines, le cycle de l'eau est progressivement modifié, aussi bien d'un point de vue quantitatif que qualitatif. En effet, l'homme bouleverse graduellement l'équilibre écologique en imposant à la nature de s'adapter à son développement. Il faut souvent attendre que les usages soient grandement réduits ou pire, que des problèmes de santé publique surviennent, avant que ce dernier ne prenne conscience de la nécessité de la mise en œuvre d'efforts pour ne pas finir par vivre dans une immense « poubelle ».

C'est par exemple le cas de la ville de Québec, où la substitution de la forêt par des surfaces imperméabilisées, typiques des zones urbaines, a dégradé la qualité de l'eau en aval de la ville, et ce pour deux raisons : dans les plus vieux quartiers de la ville, les eaux de pluie et les eaux usées sont collectées et acheminées ensemble vers l'usine de traitement. Quand il pleut trop, le volume à traiter devient trop grand et tout est directement rejeté dans la rivière Saint-Charles, ce qui arrive une cinquantaine de fois par année étant donné qu'il pleut un jour sur trois à Québec, et souvent de manière relativement intense. Dans les quartiers plus récents, les réseaux collectant les eaux pluviales et usées sont séparés, et les eaux de pluie sont systématiquement rejetées dans la rivière. Or ces eaux entraînent avec elles tous les types de pollution que peuvent générer une ville moderne, comme le rejet d'hydrocarbures issus des automobiles. Pour pallier à ce problème, des bassins de rétention ont été construits, d'une part pour améliorer la qualité de l'eau, ce qui se fait naturellement quand elle stagne, et d'autre part pour limiter l'augmentation brutale du débit de la rivière, lors de forts événements pluvieux. Pour cela, il faut donc optimiser la structure et la gestion des bassins de rétention d'eaux pluviales des quartiers récents, ce qui constitue le projet global dont fait partie ce stage de recherche. Or optimiser implique ici de modéliser la qualité et quantité finale de l'eau en aval des points de rejets, afin de pouvoir étudier différents scénarios possibles et de retenir le meilleur d'entre eux. Par conséquent, il est nécessaire de connaître le débit et la qualité du cours d'eau en amont de ces points de rejet, ne serait-ce que pour avoir une « référence » qualitative et quantitative avant les rejets, mais aussi pour pouvoir modéliser les processus ayant lieu dans la rivière après les rejets, ainsi que le taux de dilution, qui conduiront à cette qualité finale de l'eau que l'on cherche à étudier pour la préserver.

Le but de ce projet de recherche effectué dans le cadre d'un stage de 5 mois de fin de Master, est de simuler le débit du bassin versant de la rivière Saint-Charles en amont de la ville de Québec, pour retenir un ou plusieurs modèles satisfaisants qui pourront servir dans le projet global brièvement décrit ci-dessus. Un aperçu des grandes propriétés de la zone étudiée ainsi qu'un recensement des moyens opérationnels seront d'abord établis, avant de présenter dans un deuxième temps la méthodologie employée et les résultats obtenus avec chacun des modèles utilisés pour mener à bien ce travail. Tout au long de ce rapport, nous nous efforcerons de discuter de la démarche employée, notamment pour justifier les hypothèses faites et interpréter les résultats obtenus, tout en restant prudents sur les conclusions tirées en raison des nombreuses incertitudes découlant tant des observations disponibles que des modèles utilisés.



2- Résumé/Abstract

Ce stage a pour but la modélisation hydrologique du Bassin versant de la rivière Saint-Charles, au Québec. Pour cela, trois modèles différents seront utilisés, chacun présentant leurs propres avantages et inconvénients, pour simuler le débit de la rivière Saint-Charles au point situé le plus en aval possible le long de cette rivière, et pour lequel on dispose de données de débits observés.

Ce travail a pour but d'aider l'optimisation, au niveau de la structure et de la gestion, des bassins de rétention d'eaux pluviales de la ville de Québec, qui se déversent dans cette rivière. La majeure partie du travail s'est avérée être la configuration du modèle SWAT, devant laquelle le temps attribué au modèle du réseau de neurones est faible, et celui attribué au modèle GR4J presque négligeable.

Pourtant, ce sont ces deux derniers modèles, délaissés pendant les trois premiers mois du stage, qui ont fini par fournir les simulations aux meilleures performances. La principale qualité du modèle SWAT, qui est la simulation (ici, du débit) en différents points du bassin modélisé, s'avère être ici très décevante quand on soumet un autre exutoire que celui calé à un type de validation donné.

Les résultats globaux des meilleures simulations issues des trois différents modèles présentent des résultats satisfaisants, mais loin d'être exceptionnels, et ce probablement en raison du grand nombre de sources d'incertitude et d'erreurs du débit simulé, qui, par manque partiel ou total d'information à leur sujet, ne peuvent aucunement être prises en comptes dans les différentes simulations effectuées.

This training aims to establish three different models to simulate the streamflow of the Saint-Charles river, located in Quebec, Canada. Each of the models possesses his own qualities and drawbacks. The streamflow can only be simulated in a location where observed streamflows are available, downstream the Saint-Charles river, in order to estimate the precision of the simulation.

The reason of this work is to provide data that can be used in the construction and management optimisation of the Quebec city rainwater retention tanks, that discharge into the river. The main part of this training was accorded to the SWAT model configuration, in comparison to which time needed by the GR4J and the Neuron Network models was quite insignificant.

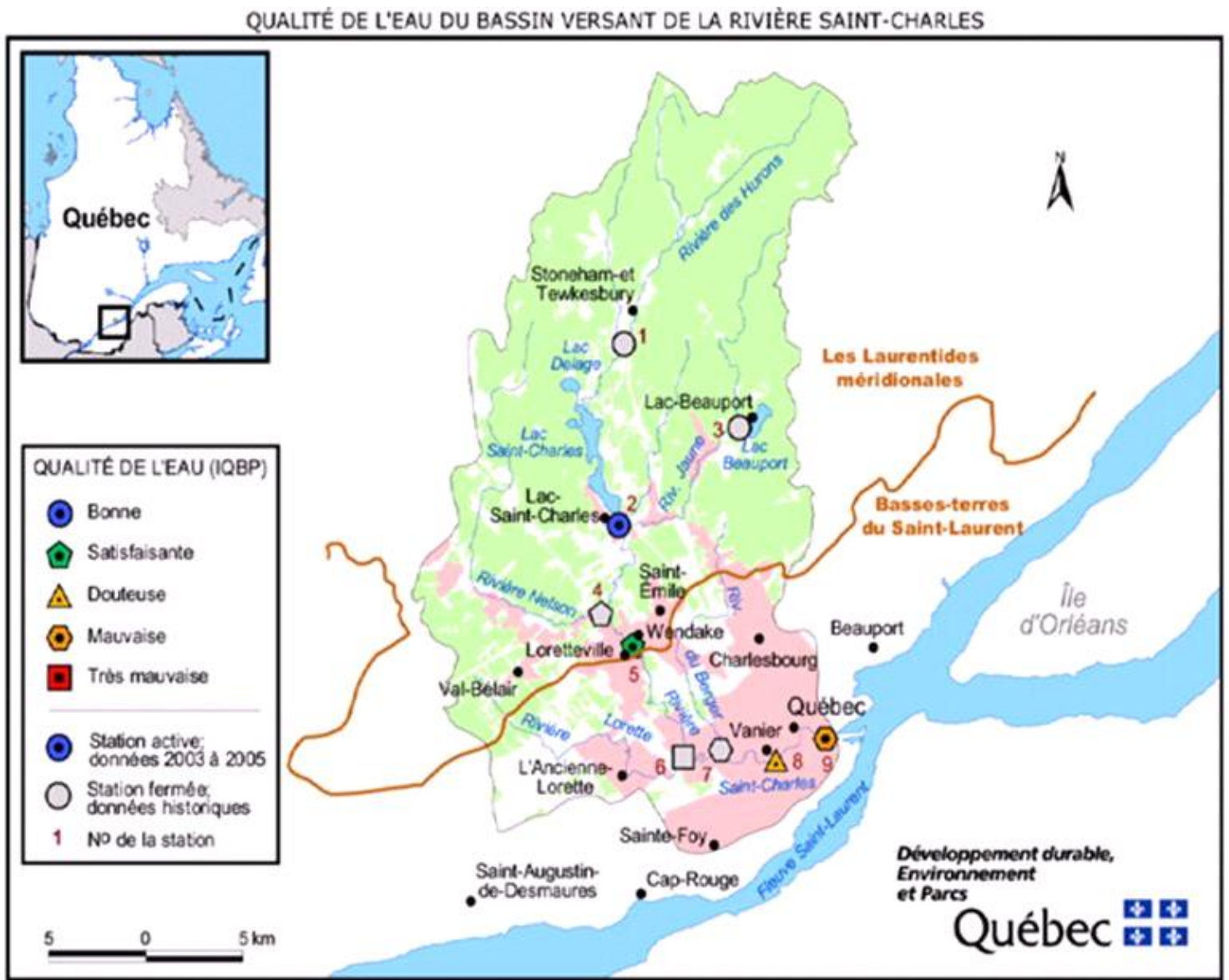
However, these last two models were the ones that gave the most relevant simulations. Swat major quality, which consists in the fact that this model allows to model streamflow in different tributary channels of the Saint-Charles river, and in different points along this one, inside the Saint-Charles river's catchment, showed bad results, based on different validation criteria, that do not let us think we will be able to use this quality in the future, if no more work to enhance SWAT's performances is further done.

Global simulations results show satisfactory but not very good results, what is probably due to the large amount of uncertainty and error sources that are present on the Saint-Charles river's basin, and for which we don't have a lot, or any sufficient information to take them into account in the different streamflow simulations.

3- Propriétés de la zone étudiée

a) Localisation géographique

Le secteur qui fait l'objet de cette étude se situe au Québec, Canada. Il correspond au bassin versant de la rivière Saint-Charles, un affluent mineur du fleuve Saint-Laurent qui s'y jette après avoir traversé la ville de Québec. Ce bassin versant est de petite taille : 550 km². La latitude moyenne du bassin est de 47° Nord, ce qui correspond à peu près à celle de la ville de Nantes, en France. La longitude de ce secteur est d'environ 71,3° Ouest. La figure 1 ci-dessous présente la localisation géographique de cette zone.



© Gouvernement du Québec, tous droits réservés, 2006

Figure 1 : localisation géographique du bassin versant de la rivière Saint-Charles

b) Occupation du territoire

Le *conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007)* spécifie dans un portrait de ce bassin, dont est issue la grande majorité des informations qui suivent, que celui-ci est le plus urbanisé du Québec. Le nombre d'habitants s'y élevait en 2007 à 349 470, avec une densité moyenne de 627 personnes au km² et une maximale de 5255 habitants par km².

Les habitations se concentrant sur le plateau et dans la vallée du bassin, ce dernier est en grande majorité (à 58%, comme le montre la figure 2 ci-dessous) recouvert par la forêt (constituée de feuillus comme les érables, tilleuls et bouleaux, et de résineux). Par comparaison, il est intéressant de noter qu'à l'échelle régionale, celle-ci occupe 87% du territoire, ce qui démontre clairement l'influence de la présence de l'homme sur son environnement, qui engendre une déforestation importante pour installer à la place des zones urbaines et des terres agricoles.

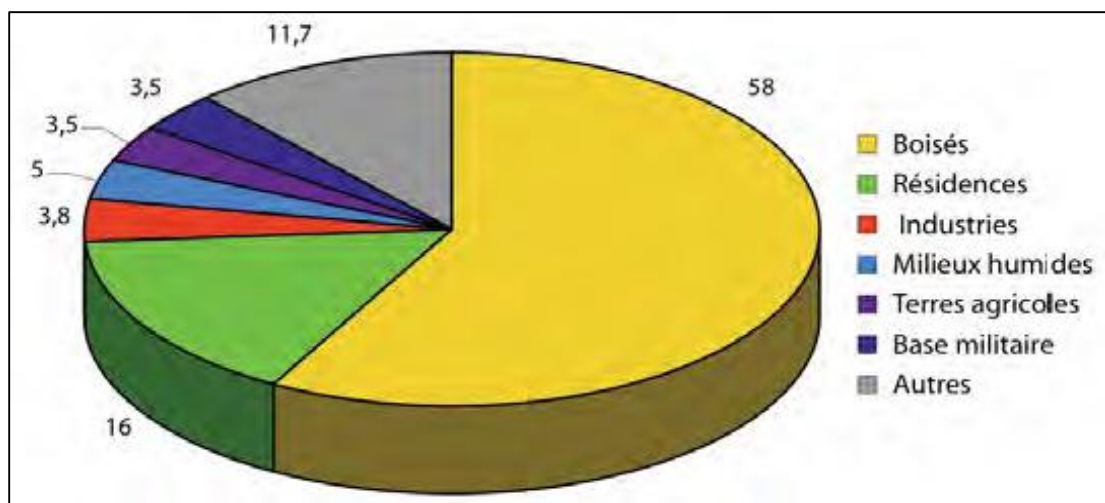


Figure 2 : occupation des sols du bassin versant de la rivière Saint-Charles (en %)

Les 11,7 % du territoire associés à la classe « Autres » sur la figure 2 ci-dessus sont constitués par des prairies (utilisées la plupart du temps comme pâturages), des routes, clubs de golf, stations de ski, parcs, jardins et terrains de camping... et peuvent donc en grande majorité être également raccordés à l'activité humaine. La déforestation au profit des nouveaux types d'occupation du sol compris dans cette classe contribue également à perturber le cycle hydrologique, comme celle au profit de zones urbaines, surtout en augmentant le taux de ruissellement. En 2003, l'étendue des espaces urbains couvrait 172 km² (sur les 550 du bassin versant). Le réseau routier est également très dense sur ce bassin, puisque on y compte 3145 km de voies de circulation, dont seulement 93 de voies ferrées, le reste étant exclusivement composé de routes et d'autoroutes.

Enfin, le réseau hydrographique est également très dense. La longueur totale des cours d'eau est estimée à 800 km, et on dénombre 317 lacs sur ce bassin versant, dont le plus important en raison de son grand volume d'eau (15 millions de mètres cube) est le lac Saint-Charles, situé au centre du bassin, et qui est utilisé pour l'alimentation en eau potable de la ville de Québec. Ce bassin versant se décompose en six sous-bassins principaux, comme le montre la figure 3 ci-dessous :

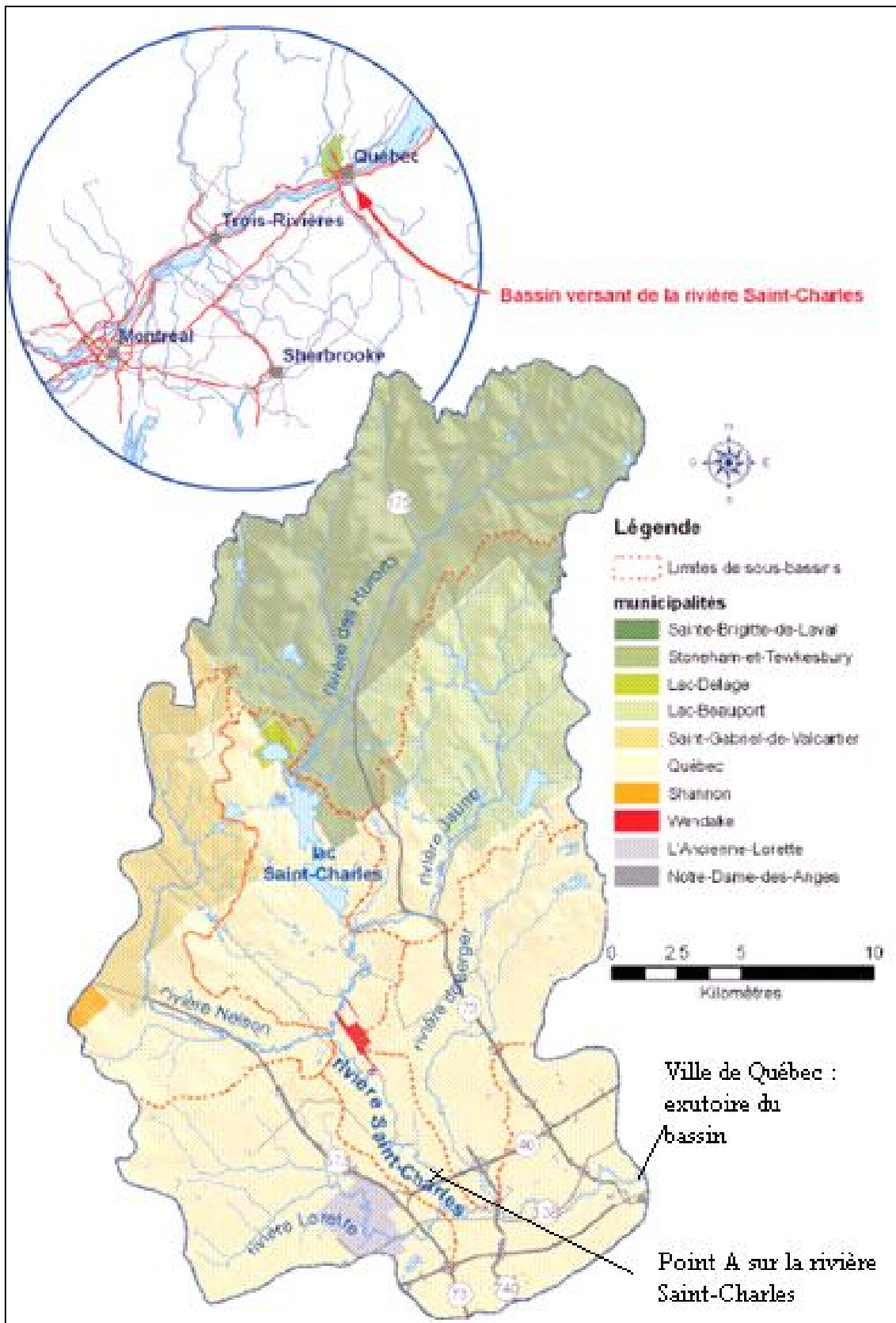
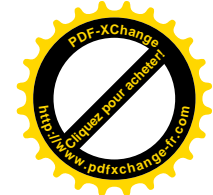
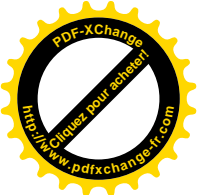


Figure 3 : localisation et réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Saint-Charles



c) Caractéristiques climatiques et géomorphologiques

Le bassin versant de la rivière Saint-Charles se décompose en deux grands ensembles, d'un point de vue climatique. Le climat et le relief étant souvent étroitement reliés, comme c'est le cas ici, ces deux parties du bassin versant possèdent leur propre grand ensemble topographique. Enfin, chaque ensemble topographique correspond à un type géologique particulier.

Comme le montre la figure 1, on peut diviser ce bassin versant en deux grandes parties : celle du nord, qui occupe les trois-quarts du bassin, est nommée « les Laurentides Méridionales », et celle du sud, représentant un quart du secteur à l'étude et correspondant aux « Basses Terres du Saint-Laurent ».

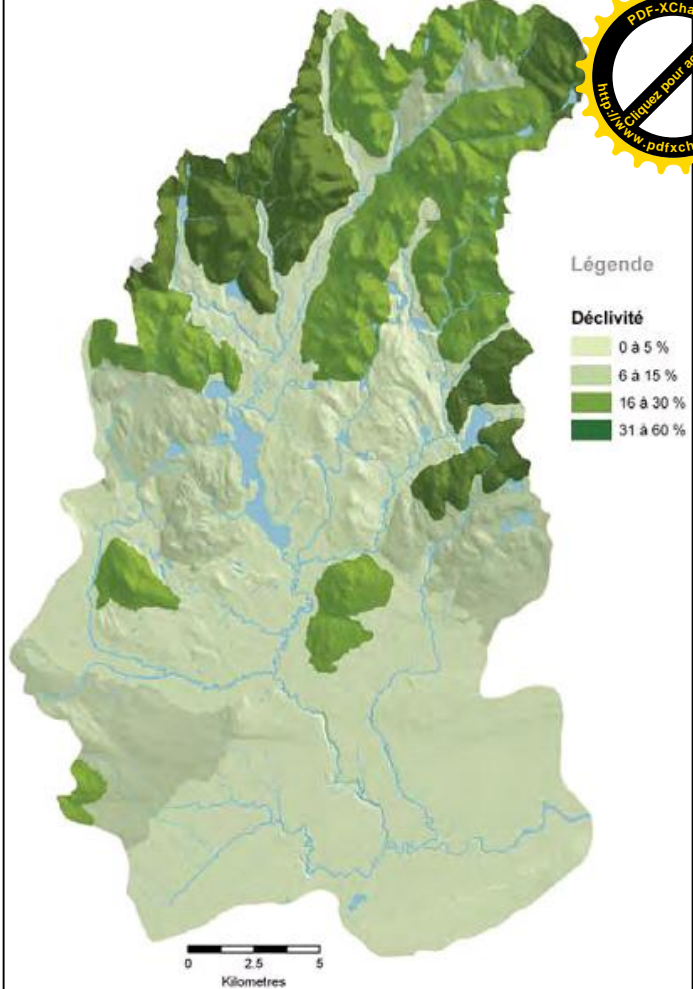
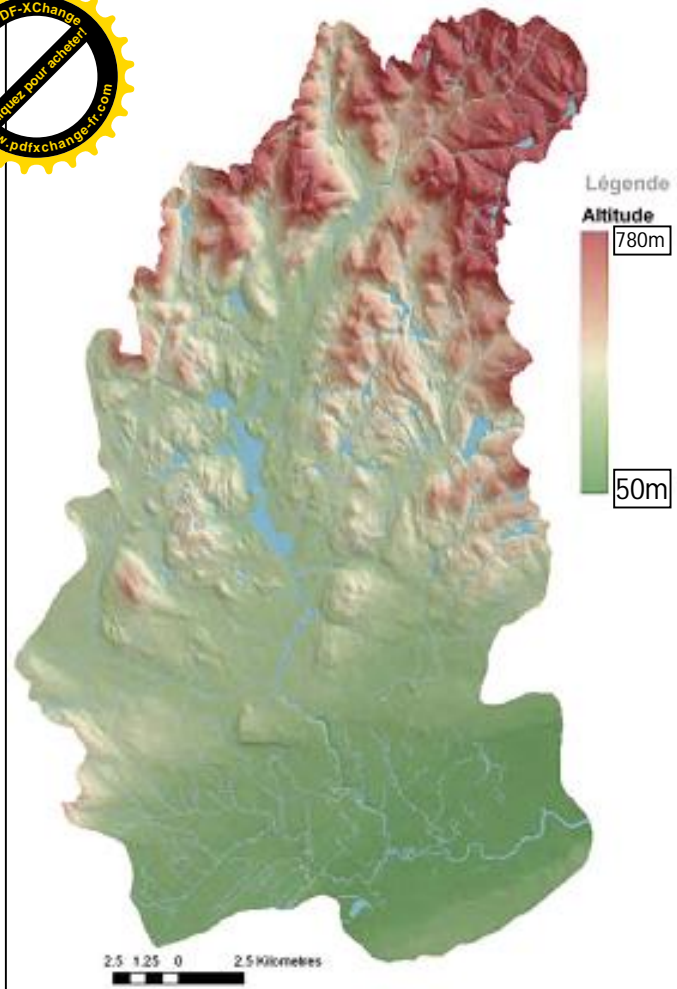
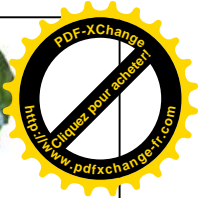
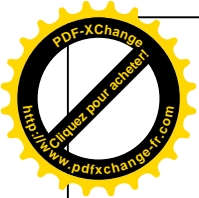
La partie Nord présente globalement un climat de type subpolaire (température annuelle moyenne de 0,6°C), humide (précipitations annuelles moyennes de 1333 mm, variant en fonction de l'altitude entre 1160 et 1720mm), et possède une saison de croissance de 165 jours par an, pour la plupart des végétaux (nombre de jours par an où la température dépasse celle de base du végétal, c'est-à-dire celle au-dessus de laquelle il peut croître). Cette partie nord est faiblement urbanisée, ce qui peut s'expliquer par exemple par les fortes pentes (jusqu'à 60%) qui le caractérisent, et un socle granitique dans lequel il est moins facile de creuser des fondations pour les bâtiments, par rapport aux terrains sédimentaires plus friables et plus plats, au sud. Cette partie nord du bassin présente une altitude comprise entre 200 et 800 m, et un taux de ruissellement allant de 1 à 30%. Sa géologie correspond à celle du bouclier Canadien, c'est-à-dire des roches plutoniques anciennes (granite) et parfois métamorphiques (gneiss) d'âge compris entre 1 et 2,85 milliards d'années.

La partie sud (voir figure 1) possède une topographie beaucoup plus plane, avec des terrains compris entre 50 et 200 m et une pente globalement inférieure à 10%. Ceci s'explique par sa géologie qui correspond à la plate-forme du Saint-Laurent, composée de sédiments marins (grès, shale, mudstone et calcaire, d'âge 100 et 500 millions d'années) recouvrant le socle du bouclier. Cette zone, en raison principalement des deux arguments cités plus haut et du fait qu'elle est très proche du fleuve Saint-Laurent, est fortement urbanisée. Le taux de ruissellement y varie globalement entre 35 et 90%. Le climat de ce deuxième grand secteur est de type tempéré (température annuelle moyenne de 4,55°C.), subhumide (précipitations annuelles de 1064 mm, variant entre 990 et 1130 mm), et présente une saison de croissance plus longue : 200 jours par an.

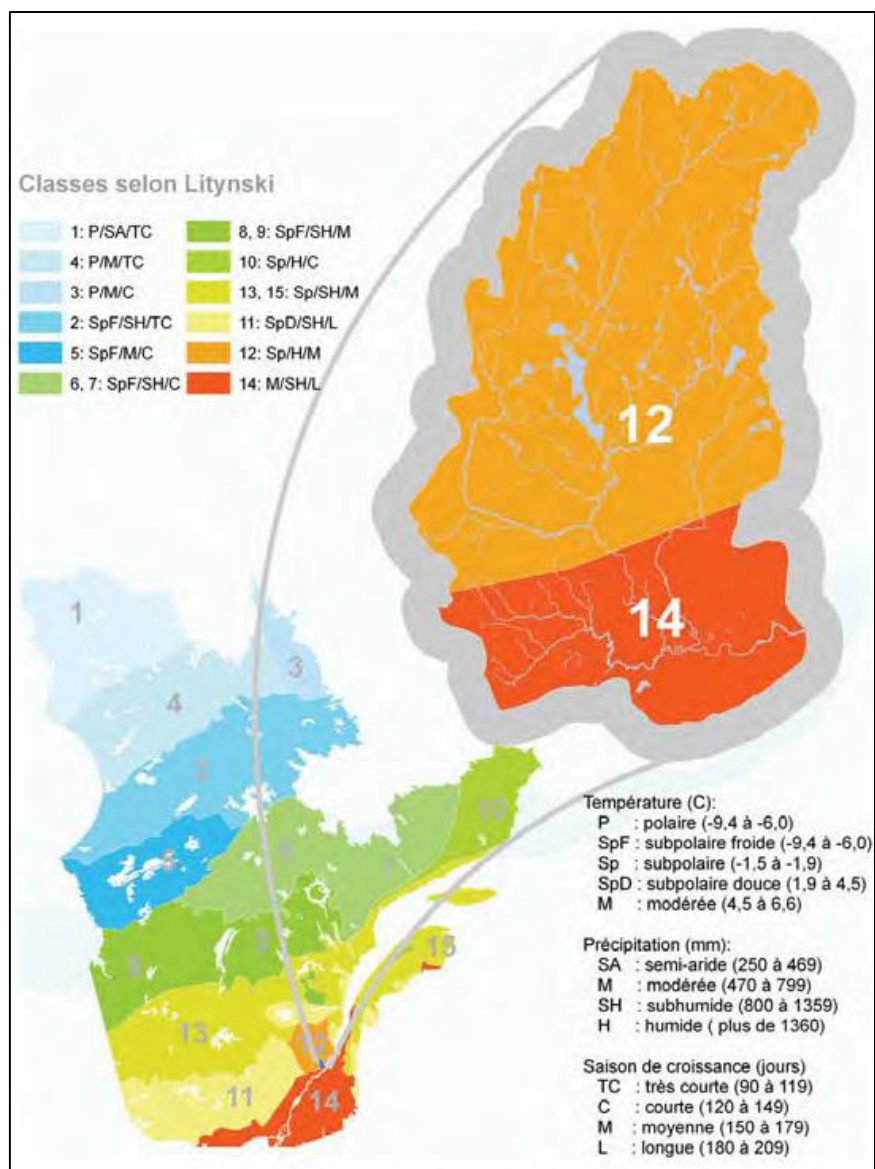
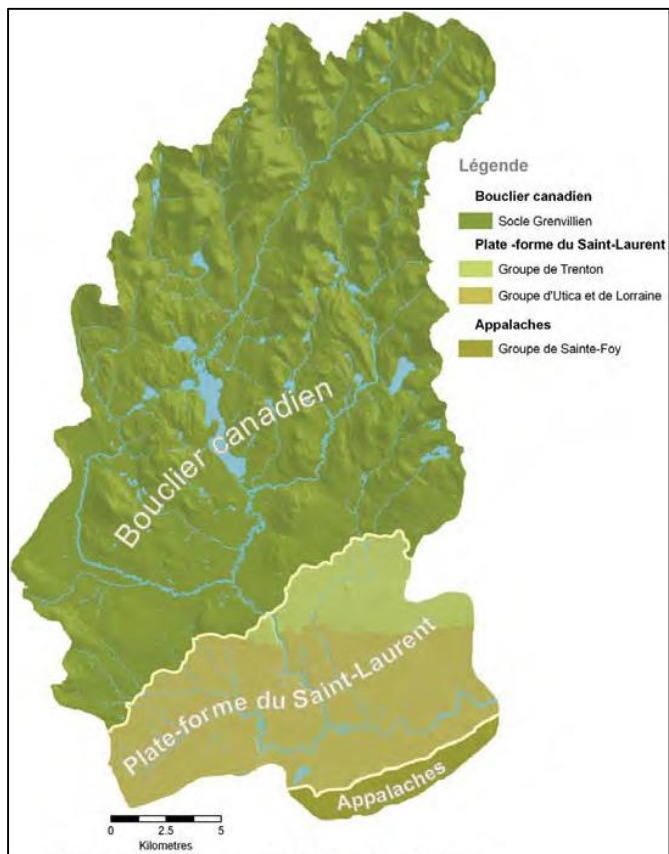
Enfin, à l'extrême sud du bassin versant de la rivière Saint-Charles est présente une troisième zone à la géologie différente des deux premières, mais dont les caractéristiques climatiques et géomorphologiques correspondent à celles de la deuxième partie présentée sur cette page. Il s'agit des Appalaches, constituées de terrains sédimentaires (essentiellement de type shale et mudstone, de même âge que ceux de la plate-forme du Saint-Laurent) métamorphisés durant l'orogénèse qui a formé cette chaîne de montagnes.

Enfin, la température moyenne journalière varie entre -31 et 27°C. au cours d'une année.

Les figures 4 à 7 ci-dessous illustrent certaines des propriétés évoquées plus haut.



Figures 4 à 7 (de haut en bas et de gauche à droite) :
 Figure 4 : topographie du BVRSC
 Figure 5 : Déclivité sur le BVRSC
 Figure 6 : Ensembles géologiques du BVRSC
 Figure 7 : Climat du BVRSC



On peut donc en déduire que la plupart des variables relatives au bassin (altitude et donc température, pente, taux de ruissellement, pluviométrie...) montrent une grande variabilité spatiale. De plus, la pluviométrie et la température varient évidemment dans le temps. Pour ce qui est du régime hydrologique du bassin versant de la rivière Saint-Charles (noté BVRSC par la suite), une station de mesure est présente au niveau du point A dont l'emplacement est précisé sur la figure 3. Le débit moyen annuel est de $8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $0,27 \text{ km}^3$ par an. La lame d'eau annuelle moyenne évacuée par la rivière Saint-Charles au niveau du point A est donc de 794 mm, puisque la surface du bassin versant associé à cet exutoire est de 340 km^2 . La figure 4 ci-dessous présente le débit moyen journalier interannuel de la rivière Sain-Charles au niveau de ce point A :

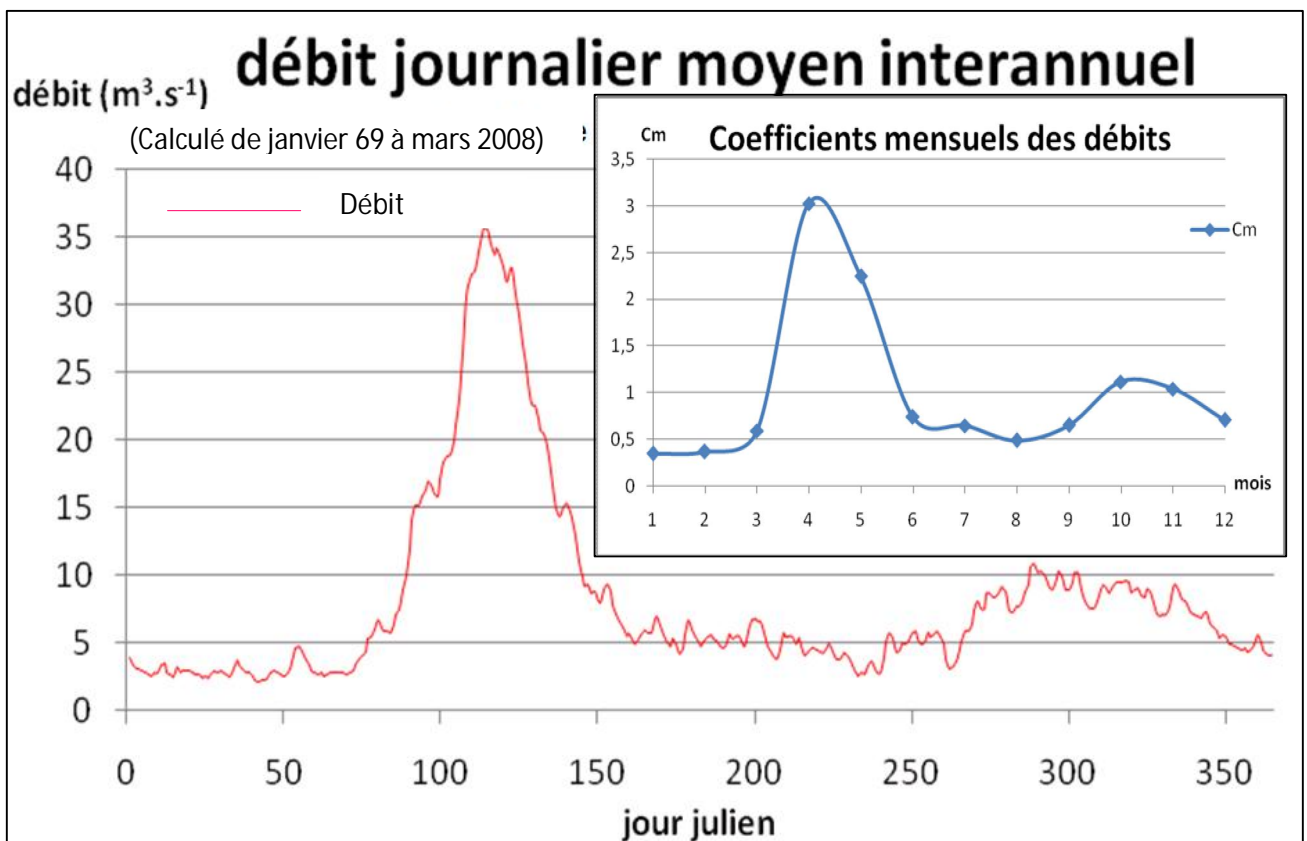
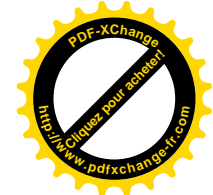
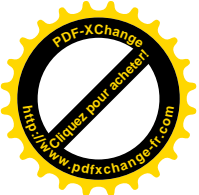


Figure 8 : Régime Hydrologique du Bassin-versant de la rivière Saint-Charles ($C_m = Q_m/Q_a$), avec Q_m et Q_a les débits moyens mensuels et annuels, respectivement (moyennes interannuelles)

Ce régime hydrologique est donc un régime mixte, de type nivo-pluvial, selon les définitions données dans le cours en ligne sur le site de l'Université Pierre et Marie Curie, cours rédigé par le professeur [André MUSY \(2005\)](#). Les principales caractéristiques d'un tel régime sont les suivantes : une crue violente et brève de printemps (avril-mai) due à la fonte massive de la neige (typique du régime nival), une variabilité interannuelle due à la variabilité des précipitations neigeuses d'une année à l'autre, un étiage en fin d'été (ici, Août-Septembre) lorsque les nappes fournissent moins d'eau au débit de base, et un en hiver (Janvier-Février) lorsque la plupart des précipitations sont stockées sous forme de neige, avec entre les deux étiages un maximum local aux alentours des mois d' Octobre/Novembre, lorsque l'évapotranspiration (ETP) redevient propice à l'écoulement (typique du régime pluvial), auquel cas la variabilité journalière du débit est importante car l'eau ruisselle, essentiellement.



4- Moyens opérationnels

a) données disponibles

En dépit de la forte urbanisation du bassin versant, du fait qu'il soit situé dans un pays développé où la recherche occupe une place importante, et que la gestion du barrage du lac Saint-Charles est cruciale puisqu'il contrôle un débit sortant qui devra répondre en même temps aux exigences du débit réservé écologique et de celui nécessaire à l'alimentation en eau potable d'une large part de la ville de Québec (150 000 m³ par jour), le BVRSC présente peu de stations de mesure des variables climatiques comme la pluviométrie, température, vitesse du vent, et de mesure de la variable hydrologique qu'est le débit, variables qui permettent pourtant, si observées sur des périodes de temps assez longues (de l'ordre de 30 ans), de déterminer des fréquences d'apparition des crues, dans le but de protéger les zones habitables d'inondations qui plus est fréquentes sur ce bassin, ou encore d'optimiser la gestion du barrage pour qu'il soit peu rempli à l'approche d'une période de crue (effet tampon du réservoir recherché), et bien rempli avant les étiages pour continuer à alimenter en eau la ville de Québec et satisfaire aux exigences du débit réservé écologique, ce qui n'est malheureusement pas le cas jusqu'à présent. Comme il est dit dans l'ouvrage de *Ph.BOIS et al (2007)*, il faut observer le passé pour avoir une idée du futur, c'est à cela que servent les statistiques en Hydrologie.

Le tableau n°1 ci-dessous résume les données disponibles pour mener à bien notre étude sur ce bassin. Il spécifie le nom de la station dont l'emplacement est précisé sur la figure 9 de la page d'après, les plages de temps sur lesquelles on dispose de données, le type de données associé à la station, et enfin le caractère qualitatif informant du manque de données ou non à l'intérieur de la série temporelle disponible. La plupart de ces données étaient déjà utilisées par d'autres étudiants lors du début du stage, ce qui a facilité leur récupération. Néanmoins, il a fallu étendre les valeurs disponibles jusqu'à la date la plus récente possible (fin Mars 2008), et donc les récupérer à nouveau par nos propres moyens. Les valeurs de la pluviométrie et de la température sont disponibles sur le site *d'Environnement Canada*, qui regroupe les archives climatiques nationales. Ces données sont gratuites pour tous. Les données de débits ne sont pas accessibles à tout le monde, sauf pour les 4 derniers jours (disponibles sur le site du *Centre d'expertise hydrique du Québec*). Elles nous ont été fournies par William LAROUCHE, qui travaille au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec).

Toutes les variables de ce tableau n°1 ci-dessous sont disponibles au pas de temps journalier. Lorsqu'elles étaient fournies aux 5 minutes, une sommation a été effectuée pour les convertir en données quotidiennes, comme ce fut le cas pour les valeurs de pluviométrie des stations S027 et S901. Pour simplifier l'utilisation des données de température par les modèles, et/ou car ceux-ci ne prennent qu'une valeur unique pour un jour donné, une simple moyenne basée sur les valeurs maximales et minimales a été employée pour déterminer la température journalière moyenne. Les autres modifications apportées seront décrites dans les parties

intitulées « méthodologie ». En rouge dans le tableau n°1 sont accentués les facteurs limitants de certains types de données. Leur utilisation pour certaines applications est alors rendue impossible ou devra être accompagnée d'un regard critique, si les données ne sont pas disponibles sur une période de temps assez longue ou si celles-ci ne sont pas assez complètes, respectivement. Les détails concernant ces limitations seront également précisés dans les parties « méthodologie » des différents modèles. Ci-dessous, la figure 9 précise l'emplacement des stations de mesure.

LIEU	TYPE DE VARIABLE	Dates (mois/année)	Complet à
Aéroport Jean-Lesage	Pluviométrie	01/85-03/08	97,50%
Forêt Montmorency	Température (Maxi-mini)	01/85-03/08	98,30%
	Pluviométrie	08/65-03/08	97%
S901	Pluviométrie	05/06-11/06	96,50%
S027	Pluviométrie	05/06-11/06	98,90%
Rivière Saint-Charles	Débit	01/69-03/08	98,90%
Rivière Jaune	Débit	01/85-12/94	100%
Rivière Nelson	Débit	06/06-03/08	45%
Rivière Saint-Charles	Débit net pompé pour l'AEP	11/99-05/07	100%

Tableau n°1 : récapitulatif des données disponibles

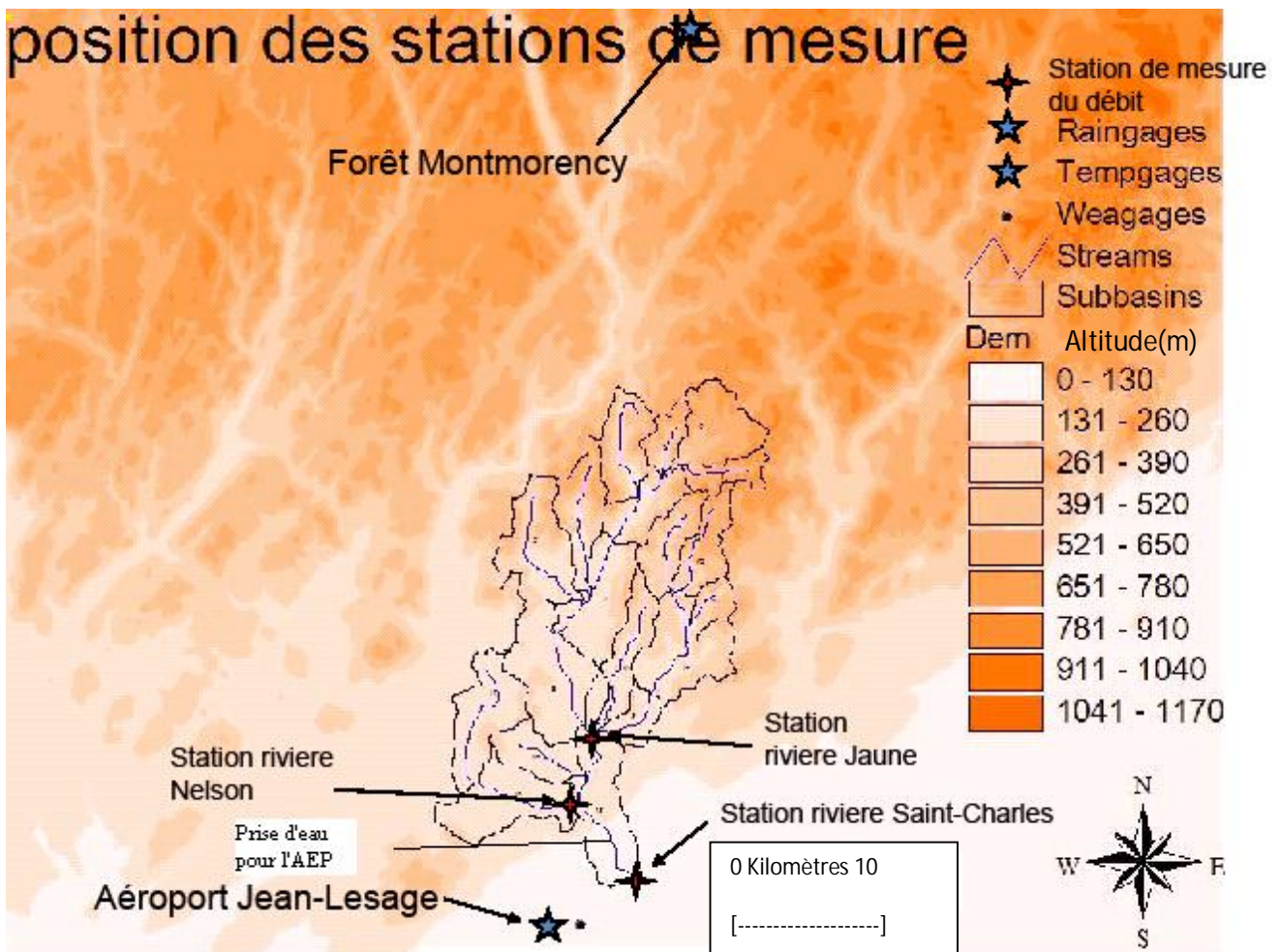
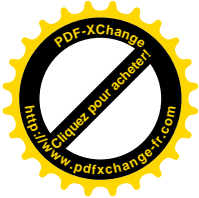
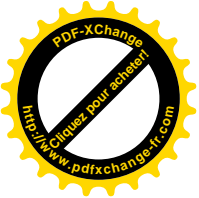


Figure 9 : emplacement des stations de mesure des données relatives au BVRSC



Les stations S027 et S901 sont situées à proximité de la station de mesure du débit de la rivière jaune, à environ 1 km au nord-est et au nord-ouest, respectivement. Par conséquent, l'altitude de la station S027 est plus élevée que celle de la station S901. La station de la forêt Montmorency est située à une altitude de 672,8 mètres, tandis que celle de l'aéroport Jean-Lesage est à 74,4 mètres. Ces propriétés seront utilisées pour effectuer un ajustement des précipitations, et lors du calcul du coefficient « Plaps », nécessaire au modèle SWAT, qui correspond à l'augmentation de précipitations par kilomètre d'altitude lors d'un événement pluvieux journalier, en mm/km. Ici encore, le détail est fourni dans la partie méthodologique du modèle SWAT.

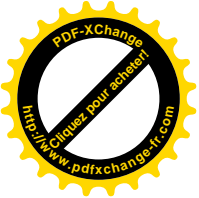
Enfin, nous disposons pour cette étude d'un modèle numérique de terrain qui comprend la topographie de la zone d'étude, fichier indispensable au fonctionnement du modèle SWAT pour que celui-ci délimite le réseau hydrographique associé ; le portrait du BVRSC effectué par le *conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007)* s'est avéré très utile pour déterminer les ordres de grandeur relatifs à certaines des variables nécessitées par SWAT dans le cadre de cette étude, et les propriétés physiques du sol ont été fournies par des étudiants du laboratoire de génie civil de l'Université LAVAL qui travaillaient avec SWAT sur des bassins-versants situés dans la région de la ville de Québec, car la carte des propriétés physiques du sol à partir de laquelle ils ont obtenu ces informations présente une résolution beaucoup trop faible, de sorte qu'un seul même type de sol est considéré dans toute la région de la ville de Québec.

b) Modèles utilisés

Pour mener à bien la modélisation hydrologique du BVRSC, trois modèles différents ont été utilisés pour simuler le débit de cette rivière, afin de comparer les performances de chacun, et pour utiliser un modèle plutôt qu'un autre en fonction des types de scénarios que l'on cherche à étudier ou des données nécessitées, car chaque modèle utilisé ici est très différent des deux autres et possède ses propres avantages et inconvénients. Cette sous-partie a pour but de présenter les grandes caractéristiques de chacun des modèles utilisés, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

- Modèle S.W.A.T. (Soil and Water Assessment Tool, ou outil d'analyse du sol et de l'eau) :

Ce modèle est issu de 30 ans d'efforts en modélisation. Il a été développé par le docteur Jeff ARNOLD au centre de recherche du département d'agriculture américain, le « USDA » (US Department of Agriculture). La version la plus récente, utilisée dans le cadre de ce stage de recherche en laboratoire, date de 2005. Comme l'expliquent *Philip W. Gassman et al. (2007)* dans la documentation théorique du programme, ce modèle a été accepté à l'international pour la robustesse des nombreuses applications multidisciplinaires qu'il offre. SWAT est un modèle qui

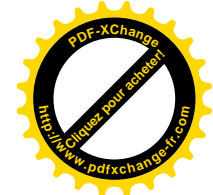
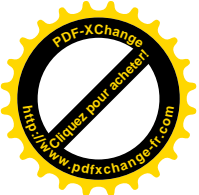


permet de modéliser le débit et la qualité des cours d'eau d'un bassin versant. Il permet donc de traiter les problèmes de ressource en eau et ceux liés aux sources de pollution ponctuelles et diffuses, ou encore d'étudier les effets de l'anthropisation comme par exemple l'accélération de l'érosion. Il est à l'origine conçu pour étudier les impacts des changements d'occupation du sol et des changements dans le type de pratique agricole sur l'eau, d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

SWAT est un modèle basé sur la physique, c'est-à-dire qu'il cherche à reproduire les processus qui ont réellement lieu dans l'environnement, à l'aide de nombreuses et parfois complexes équations, dans lesquelles interviennent les paramètres spécifiques au bassin versant modélisé et que l'utilisateur peut modifier. Pour information, on peut même y définir l'efficacité d'homogénéisation annuelle du sol lié à l'activité biologique ou les labours. Cependant, certaines des équations du modèle sont empiriques et c'est pourquoi on lui attribue généralement dans la littérature le caractère de modèle semi-physique. Il prend par exemple en compte les propriétés du sol, son type d'occupation, et les pratiques agricoles qui y ont lieu. Comme il est dit dans une autre documentation relative aux équations présentes dans SWAT, par [S.L. NEITSCH et al. \(2005\)](#), ce modèle est continu dans le temps, opère au pas de temps journalier et est fait pour simuler sur de longues périodes, et non pas pour simuler des événements ponctuels dans le temps.

Son principal avantage est qu'il permet, une fois les paramètres du bassin versant modélisé calés, d'obtenir les données relatives à l'exutoire de chaque sous-bassin (le débit, la composition de l'eau) pour chaque pas de temps et d'avoir accès aux différentes variables du bilan hydrologique à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (échelle plus fine que celle du sous-bassin), également à chaque pas de temps ou de manière globale sur toute la période de simulation, comme l'équivalent en mm d'eau de la quantité de neige fondue, la biomasse produite en tonnes/hectare, le débit évacué par le ruissellement de surface, celui par l'écoulement dans l'aquifère, etc... ce qui donne une idée des impacts précédemment cités sur un grand nombre de variables du cycle de l'eau, à n'importe quel pas de temps et sur n'importe quel secteur du bassin versant, en plus de sa mission principale : fournir le débit et la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin. Nous ne nous intéresserons dans cette étude qu'à l'aspect quantitatif de l'eau, et non à sa qualité. Le modèle nécessite comme données climatiques d'entrée, les précipitations, températures (maximales et minimales), vitesse du vent, rayonnements solaires et humidité relative de l'air, qui seront pour les trois dernières générées par le modèle lui-même à partir d'un fichier regroupant 13 variables dont les moyennes mensuelles interannuelles sont spécifiées.

Dans SWAT, le bassin versant est subdivisé en plusieurs sous-bassins, lesquels sont subdivisés en unités de réponse hydrologique (URH) à l'échelle desquelles le bilan hydrologique est calculé. Chaque URH se caractérise par une combinaison du type de sol et du type de couverture du sol particulière, pour qu'au sein de chacune il n'existe qu'un seul même type de sol et même type de couverture. Toutes les informations nécessaires au fonctionnement de SWAT sont rentrées au moyen d'une interface graphique qui est une option du logiciel « Arcview-GIS ». L'interface se nomme « AVSWAT 2000 ».



Le principal inconvénient de SWAT est qu'il nécessite la définition d'un grand nombre de paramètres pour pouvoir fonctionner, dont on ne dispose malheureusement, pour beaucoup d'entre eux, d'aucune idée de la valeur sur la zone considérée. Ceci entraîne l'obligation d'un calage automatique qui conduit au problème de l'équifinalité, qui sera discuté plus loin dans le rapport. Par ailleurs, le temps de calcul d'un ordinateur, même relativement puissant, s'élève de plusieurs jours à deux semaines pour effectuer un calage, ce qui rend délicat la comparaison de plusieurs jeux de paramètres obtenus par calage automatique et de leurs performances en découlant, à partir de valeurs différentes attribuées à des variables qui, elles, ne sont pas calables automatiquement. Enfin, la simple mise en place d'un bassin versant particulier dans SWAT est longue et laborieuse pour l'utilisateur non expérimenté (cela prend généralement un ou deux mois à un novice avant de réussir à obtenir un modèle « cohérent », en raison de la longue phase de préparation de données et à l'apprentissage de la manipulation de l'interface, alors que l'utilisateur expérimenté peut pousser une modélisation à son « maximum de performance » en moins d'un mois). La partie du stage consacrée à la modélisation sous SWAT représente plus de 3,5 mois sur les 4,5 totaux de celui-ci.

- Modèle du réseau de neurones :

Le réseau de neurones, à l'exact opposé du modèle SWAT qui cherche à reproduire les vrais phénomènes liés au cycle de l'eau qui ont lieu sur le bassin versant, n'a pour unique objectif que de chercher à reproduire les valeurs d'une variable de sortie, ici le débit de l'exutoire du bassin versant modélisé, à partir des valeurs de plusieurs variables d'entrée. Les entrées sont alors transformées à l'aide d'équations de régressions non linéaires, qui sont calées par le modèle pour rester au maximum fidèle aux vraies valeurs de la variable de sortie. Ce type de modèle est communément qualifié de « boîte noire » en ce sens que l'utilisateur n'a aucune idée de ce qui se passe entre les entrées et la sortie, et de toute façon, les équations présentes dans sa structure n'ont a priori aucune signification physique et ne peuvent donc être reliées à aucun processus réel. Même si cela peut paraître un inconvénient dans la branche de la modélisation qui vise à reproduire la réalité, on peut au contraire le voir comme un avantage lorsqu'on n'a aucune idée des équations qui régissent les processus physiques reliant des entrées et des sorties, comme l'explique [Asaad Y. SHAMSELDIN \(1997\)](#). On peut alors toujours supposer que le réseau « trouve » lui-même les grandes caractéristiques de ces relations entrées-sorties.

Comme il est précisé dans l'article de [François ANCTIL et al. \(2008\)](#), les réseaux de neurones n'ont aucun besoin d'information sur les processus qui relient les entrées aux sorties, car ils sont intégralement dirigés par les séries de données qu'on leur impose, ce qui est utile dans le sens où cela limite la quantité d'informations nécessitées par le modèle pour fonctionner. L'utilisateur fournit au modèle les entrées qu'il estime pertinentes car supposées influencer sur la ou les sorties que l'on cherche à étudier. Une sélection des entrées réellement nécessitées par le modèle sera ensuite effectuée par lui-même lors de l'étude de sa structure optimale pour le site d'intérêt, structure qui peut varier énormément d'un site à l'autre, tant du point de vue du type d'entrées nécessitées que des poids qui leur sont affectés ou encore au niveau du nombre de

nœuds et/ou couches cachés du réseau, et cela même si on étudie le débit d'un cours d'eau sur deux bassins versants très proches géographiquement et morphologiquement. Il est important de savoir qu'un réseau de neurones permet d'obtenir une ou plusieurs sorties, et est donc tout à fait applicable tant aux problèmes d'Hydrologie quantitative qu'à ceux liés à la qualité de l'eau. On peut ainsi modéliser les concentrations de l'eau en différents éléments chimiques comme les nitrates, phosphates, matières en suspension, etc... On se limitera toutefois dans cette étude à une sortie unique, à savoir le débit de la rivière Saint-Charles a point A dont l'emplacement est précisé sur la figure n°3, plus haut.

Le principal avantage de ce type de modèle en plus de ne nécessiter la connaissance d'aucun paramètre que ce soit, seulement de disposer des valeurs d'entrée qui influent sur la ou les sortie(s), est qu'il est facile à mettre en place et donne rapidement de bons résultats. Par exemple, dans le cadre de ce stage, la mise en œuvre du réseau de neurones n'a pris que quelques jours, en comptant la phase de préparation des données, et a donné au bout d'une semaine de mise en œuvre des résultats sensiblement équivalents, meilleurs pour certains critères d'efficacité, que ceux obtenus après 3 mois avec le logiciel SWAT dont on ne se passera pourtant pas en raison des avantages qui lui sont relatifs et cités plus hauts.

La configuration du réseau de neurones dans notre cas est la suivante (configuration la plus largement utilisée comme précisé par [François Anctil et al. \(2008\)](#)) : on dispose d'une couche d'entrée, comprenant les variables choisies par l'utilisateur, une couche « cachée » qui comprend les neurones qui vont chacun transformer toutes les entrées en une seule information, et d'une couche de sortie qui reprend les informations fournies par chacun des neurones de la couche cachée pour les transformer en données finales récupérables par l'utilisateur, comme le montrent les schémas n°1 et 2 ci-dessous, tirés du cours de [François ANCTIL \(2008\)](#) dispensé à l'université LAVAL.

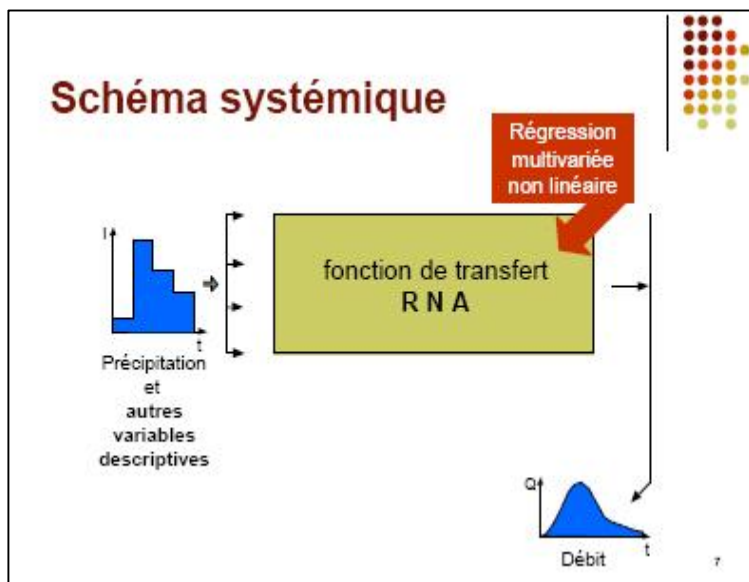


Schéma n°1 : principe global du réseau de neurones

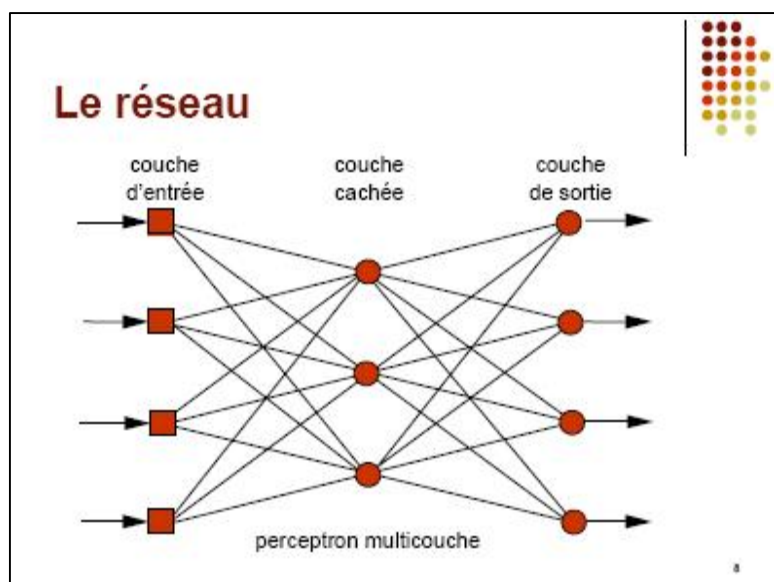


Schéma n°2 : les couches du réseau de neurones

Pour donner un exemple de ce qui se passe vraiment dans la structure de ce modèle, on peut considérer un pas de temps donné. Pour ce pas de temps, on dispose de plusieurs entrées, comme la pluie, la température, et le débit moyen interannuel de ce jour, par exemple. Chaque « nœud » ou « neurone » de la couche cachée attribue un poids différent pour un type d'entrée donné, poids qui restera le même au cours d'une simulation, dans un même neurone et pour une entrée donnée. Chaque nœud prend en compte toutes les entrées. En plus du poids, noté w , attribué à chaque entrée par un nœud, celui-ci associe une constante b à toutes les entrées ; il s'agit du biais, qui diffère selon le nœud considéré uniquement. Il effectue ensuite la somme de toutes les « nouvelles entrées » par la formule $\xi = \sum_i (w_i x_i + b)$, comme montré sur le schéma n°3 ci-dessous, issu également, avec le n°4, du cours de Mr [François ANCTIL \(2008\)](#). A ce moment intervient la transformation non linéaire à l'aide de la formule $y = f_1(\xi)$, avec comme fonction f_1 , dans notre cas d'étude, la fonction tangente hyperbolique dont voici la formule :

$Y = 1 / (1 + \exp(-2 \xi)) - 1$, qui est bornée entre -1 et 1, avec \exp la fonction exponentielle.

Chaque nœud fourni donc une sortie y_i qui sera utilisée par le nœud de sortie de la même manière qu'un nœud de la couche cachée utilise les entrées : $z = f_2(\sum_i (w_i Y_i + b))$, avec cette fois f_2 la fonction linéaire de sorte que $f_2(y) = y$. La variable z est la valeur du débit simulé au jour j . Les différents poids w et les constantes b sont les paramètres qui seront calés par le modèle. Le schéma n°4 ci-dessous présente les courbes des principales fonctions possibles attribuables à f_1 et f_2 .

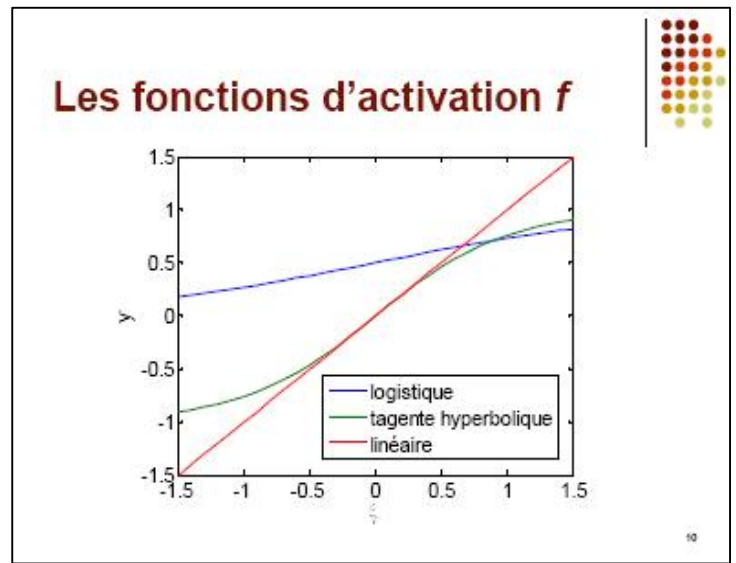
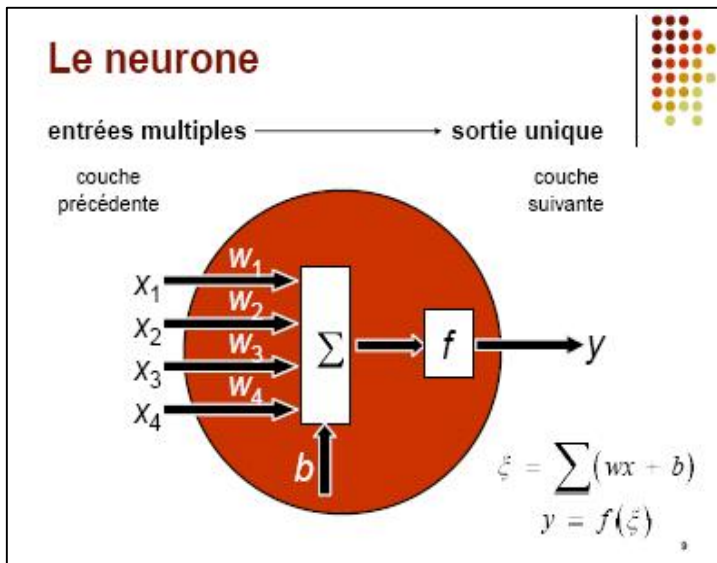


Schéma n°3 : travail d'un nœud ou neurone

Schéma n°4 : courbes des principales fonctions f possibles

Pour chaque simulation effectuée, le modèle effectuera 25 répétitions du processus de calage qui utilise des nombres aléatoirement générés, donc chaque répétition est unique. Les performances finales correspondent à la moyenne des 25 « sous-simulations » du débit effectuées, et ce pour ne pas se limiter à un seul minimum local trouvé. C'est la technique utilisée dans les prévisions d'ensemble déterministes, qui ne donnent en sortie qu'une seule valeur.

On précise enfin qu'on cherche à minimiser les poids attribués aux entrées par les différents nœuds, car plus ceux-ci sont élevés et plus les erreurs de mesure et donc l'incertitude liées aux entrées sont amplifiées, ce qui n'est évidemment pas souhaitable.

D'autre part, compte-tenu de l'allure de la fonction tangente hyperbolique qui possède deux asymptotes lorsque x varie vers $+$ ou $-$ l'infini, l'un des défauts du réseau de neurones ainsi configuré est que s'il est calé sur une période de temps qui n'est pas suffisamment représentative de la variabilité du débit au cours du temps, c'est-à-dire si on a uniquement des faibles débits sur la période de calage par exemple, la modélisation sera mauvaise lorsque le débit observé sera plus élevé, car à partir d'un certain seuil dans les entrées, le débit en sortie ne variera plus beaucoup, ce qui est dû au fait que la fonction tangente hyperbolique est bornée. Pour résumer, les réseaux de neurones ne sont pas bons en extrapolation, où ils sous-estimeront constamment la variable étudiée si celle-ci est positive.

- Modèle GR4J

Ce modèle a été développé au CEMAGREF, en France. La version utilisée au cours de ce stage est celle présentée par [Charles PERRIN \(2002\)](#). On pourrait placer ce modèle à entre le modèle SWAT et le modèle du réseau de neurones, du point de vue de ses caractéristiques. Il s'agit en effet d'un modèle de type « top-down » contrairement à SWAT qui est du type « bottom-up ». SWAT cherche en effet à définir, comme il est dit dans sa partie, des processus à l'échelle la plus fine et le plus précisément possible, et ce sur tout le bassin versant à l'étude. Le modèle GR4J, lui, cherche davantage à représenter le comportement d'ensemble du bassin versant. Il est très simple d'un point de vue conceptuel, comme le montre la figure 10 ci-dessous :

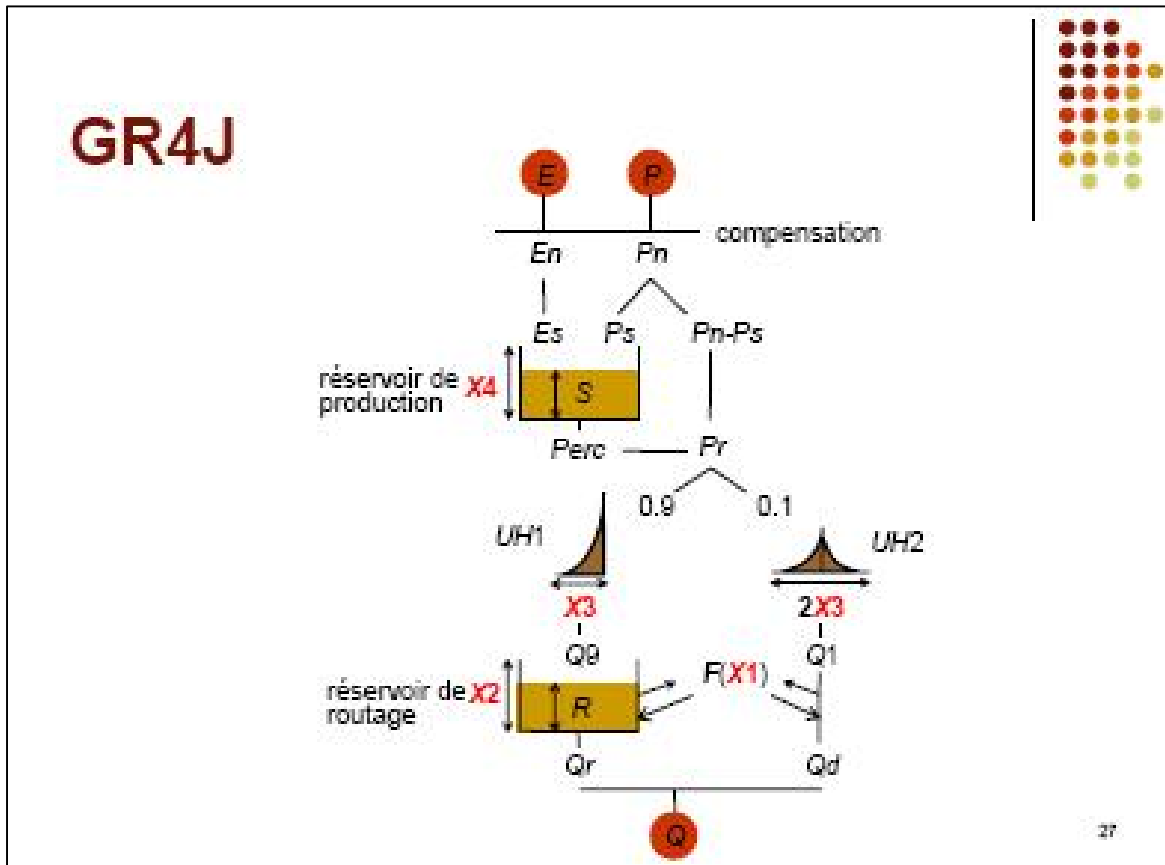
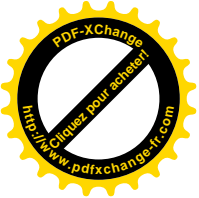


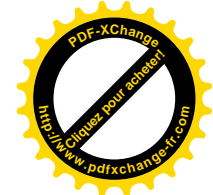
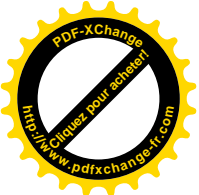
Figure n°10 : concept du modèle GR4J



Ce modèle considère deux réservoirs, l'un de production, en haut, et l'autre de routage, en bas. Les paramètres X1 à X4 sont les quatre qui seront calés pour la simulation. Il s'agit respectivement du paramètre d'échange (en mm), de la capacité du réservoir de routage (en mm), du délai (en jours), et de la capacité du réservoir de production (en mm). Ce modèle comporte donc très peu de paramètres à caler et ne représente pas toutes les subtilités des processus réels rentrant en compte dans le cycle hydrologique. En ce sens, il a des points communs avec le réseau de neurones. Néanmoins, on peut associer des propriétés physiques d'un terrain étudié aux différents éléments de la figure 10 ci-dessus, comme par exemple l'épaisseur du sol (paramètre X4 sur la figure 10) ou encore le temps de concentration (paramètre X3). Le schéma présente par ailleurs des processus physiques clairement identifiables, comme le partage entre ruissellement pur et ruissellement de sub-surface ou souterrain, ou encore la reprise par évapotranspiration (variable E sur la figure 10). Il se rapproche donc de SWAT par la présence dans sa structure de processus réels.

Les avantages de ce modèle sont qu'il nécessite très peu de données (superficie du bassin-versant, précipitations et évapotranspiration), qu'il est donc très simple et très rapide à mettre en œuvre, qu'il est généralement assez performant et assez robuste, surtout sur des bassins versants proches climatiquement de ceux du Nord de la France (zones non karstiques et sans stockage des précipitations sous forme de neige), et que le calage des paramètres se fait sous Excel, à l'aide de l'outil solveur, ce qui prend moins de deux minutes à l'outil pour trouver la meilleure combinaison de paramètres tout en respectant la contrainte de positivité de certains des paramètres du modèle. Son principal défaut, pour le travail présenté ici, est qu'il ne prend pas en compte le stockage des précipitations sous forme de neige car il n'est pas équipé d'un module de fonte. On précisera dans la partie méthodologique du chapitre réservé à ce modèle comment on a pallié à ce problème pour permettre à GR4J de fournir des performances aussi satisfaisantes que celles de SWAT. Enfin, ce modèle n'est pas contraint en extrapolation comme le réseau de neurones, même s'il connaît lui aussi des problèmes dans ce type de contexte. La partie du stage consacrée à l'utilisation de ce modèle est tout à fait négligeable devant celle consacrée aux deux autres. Par son caractère « intermédiaire » entre les deux principaux modèles utilisés, et parce que nous l'avons à disposition (en plus du fait qu'il ne nécessite pas beaucoup de temps), il nous a paru intéressant de l'employer afin d'avoir un élément de comparaison supplémentaire.

En résumé, ces trois modèles employés ici sont fondamentalement différents, que ce soit dans leur structure, les entrées qu'ils nécessitent, les principes sur lesquels ils reposent, ou encore sur les avantages et inconvénients découlant de ces divergences. Ils seront tous trois employés de manière à maximiser leurs performances, ce qui apportera des renseignements supplémentaires liés à chacun deux car les moyens employés pour augmenter leur efficacité dépendent eux aussi des modèles. Ce travail peut en outre fournir une idée du type préférentiel de modèle à employer (et de la méthodologie associée) sur des bassins versants situés dans le même secteur géographique, en fonction des besoins nécessités par l'étude menée, du temps dont on dispose pour la mener à terme, des données disponibles, ou encore des préférences de l'utilisateur. Il



reste tut de même à préciser que, tout comme les modèles eux-mêmes, la configuration optimale trouvée par l'utilisateur n'est jamais parfaite et peut toujours être améliorée.

Cependant, comme nous allons le voir dans les parties suivantes, et surtout dans la description de la méthodologie choisie pour paramétrer les modèles, un réel effort d'exhaustivité, reflétant une volonté de tester le maximum d'hypothèses et de cas de figures possibles a accompagné le travail réalisé dans le cadre de ce stage, et ce pour éviter au maximum de passer à côté d'un élément fondamental et déterminant relatif à chaque modèle qui permettrait d'augmenter considérablement l'efficacité et la robustesse de ceux employés lors de leur application dans la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Saint-Charles. En d'autres termes, nous avons tout fait pour obtenir les meilleurs résultats mais en restant cohérent.

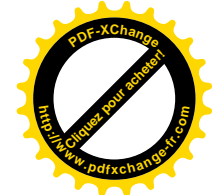
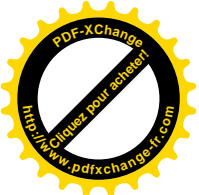
5- Le modèle SWAT

a) Méthodologie

Cette partie a pour but de présenter le travail effectué avec ce modèle. Le plan de celle-ci est montré ci-dessous. Ce dernier ne suit pas complètement l'ordre chronologique réel des modifications apportées, mais a été choisi dans un souci de confort pour le lecteur. On ne peut en effet savoir quelles modifications effectuer à l'avance ou avoir toutes les bonnes idées dès le début. Il faut au contraire essayer, tester et chercher de nouvelles idées en fonction des résultats obtenus au fur et à mesure du stage, auquel cas il ne s'agirait pas d'un travail de recherche, mais d'une simple mise en œuvre. Cependant, l'ordre chronologique global des grandes actions réalisées est bien représenté dans ce plan, mais il faut garder à l'esprit qu'il a parfois fallu recommencer la configuration du modèle à partir du début des sous-parties du plan, et bien souvent apporter des modifications à l'une ou l'autre de ces sous-parties, essentiellement celles de modélisation, ajustement manuel et calage automatique. Voici le plan de la méthodologie employée avec le modèle SWAT :

- Modélisation des propriétés du bassin versant
- Choix des périodes de calage et de validation
- Choix des critères d'efficacité retenus
- Ajustement manuel des paramètres
- Analyse de sensibilité des paramètres
- Calage automatique
- Création du modèle « final »

On se doit enfin de préciser que certaines des sous-parties de ce plan ne sont pas séparables d'une ou plusieurs autres. Par exemple, une modification des propriétés du bassin versant est toujours accompagnée d'un ajustement manuel de certains paramètres, et un calage automatique ne se fait théoriquement pas sans une analyse de sensibilité préalable et un ajustement manuel ultérieur.



- Modélisation des propriétés du bassin versant

La modélisation hydrologique suit souvent ce protocole : d'abord, l'utilisateur ou le programme informatique définit des paramètres en leur attribuant des valeurs, qui eux-mêmes définissent des propriétés du bassin versant. On est en quelque sorte dans la phase « statique » de la modélisation : on est alors entrain de préparer le terrain sur lequel l'eau va couler. Même si la structure du modèle ne reflète pas du tout la réalité (comme avec le réseau de neurones), il s'agit toujours de la définition des outils qui vont servir à modifier les entrées, et par lesquels celles-ci vont « passer et être filtrer », d'un certain point de vue, pour fournir en sortie la variable qui fait l'objet de l'étude. Avec SWAT et GR4J, on pourrait presque imaginer une maquette géante, que l'utilisateur va créer d'une certaine manière et modifier ultérieurement pour se rapprocher des valeurs réelles du débit à l'exutoire. Sauf que ces maquettes sont créées de manière virtuelle, au moyen de l'informatique. Pour SWAT, la création « statique » du modèle peut être vue comme un effort de reconstruire la réalité, avec la taille, la topographie, le réseau hydrologique, le type de couverture à la surface du sol, le type de sol, les lacs, ainsi que toutes leurs propriétés respectives, du bassin versant à l'étude. Pour GR4J, il s'agirait plutôt de deux simples réservoirs, avec des tuyaux, et des contraintes structurales respectant le partage spatial et la répartition temporelle des écoulements comme sur la figure 10.

Une fois cette première réalisation « statique » effectuée, on passe à la partie dynamique : on arrose la maquette, ou le modèle, de la même manière que sont tombées les pluies sur le bassin pendant la période étudiée, puis on observe les résultats, et on modifie la maquette pour se rapprocher de la réalité.

C'est une vision possible basée sur l'analogie avec la modélisation hydrologique sous informatique, pour expliquer son principe et introduire le fait qu'au cours de cette partie, nous avons cherché à définir du mieux possible les grands traits du BVRSC, d'un point de vue physique.

Toutes les informations relatives aux propriétés du BVRSC fournies au modèle SWAT ont été saisies à l'aide de l'interface graphique AVSWAT 2000, qui est un module complémentaire du logiciel Arcview GIS (système d'information géographique). La théorie relative à l'utilisation de cette interface est détaillée dans l'article de [M. Di LUZIO et al. \(2002\)](#). La première chose à faire est de fournir à cette interface un modèle numérique de terrain incluant bien sûr la zone étudiée et décrivant sa topographie. Pour notre étude, il s'agit des données numériques d'élévation du Canada à l'échelle 1 : 50 000ème, qui présente une résolution de 23,17 m une fois projetée à la latitude des bassins versants à l'étude. Il faut alors définir manuellement un « masque » qui limitera la carte à une portion plus restreinte autour de la zone à l'étude. Dès lors, il est possible, grâce à l'interface, de tracer le réseau hydrographique du secteur, et ce uniquement à partir de deux informations : la topographie, décrite par le modèle numérique de terrain (MNT), et une résolution spécifiée par l'utilisateur, en fonction de laquelle le réseau sera plus ou moins précis (plus la résolution spécifiée est faible et plus grand sera le nombre de cours d'eau tracés sur la zone d'étude). En fait, dès cette étape, l'utilisateur devra ajuster la valeur de la résolution à partir de laquelle le logiciel détermine le réseau hydrographique, pour faire coïncider les cartes du réseau réel avec celui déterminé par Arcview. Il est plaisant de constater qu'il est possible

d'obtenir un réseau très fidèle à la réalité, mais il a été remarqué au cours de cette étape qu'il faut pour cela se trouver dans un secteur où la topographie varie suffisamment ou que la résolution du MNT soit suffisamment fine, c'est-à-dire que celle-ci devra être adaptée à l'échelle de la zone d'étude, auquel cas une part importante du secteur modélisé sera comprise dans la même tranche d'altitude, et des erreurs sur le tracé du réseau hydrologique seront alors bien plus susceptibles d'avoir lieu. Pour le secteur étudié, le logiciel n'a pas eu trop de mal à tracer le réseau, comme il est montré sur la figure n°11 ci-dessous, qui est à comparer avec les figures 3,5 et 6, présentées précédemment.

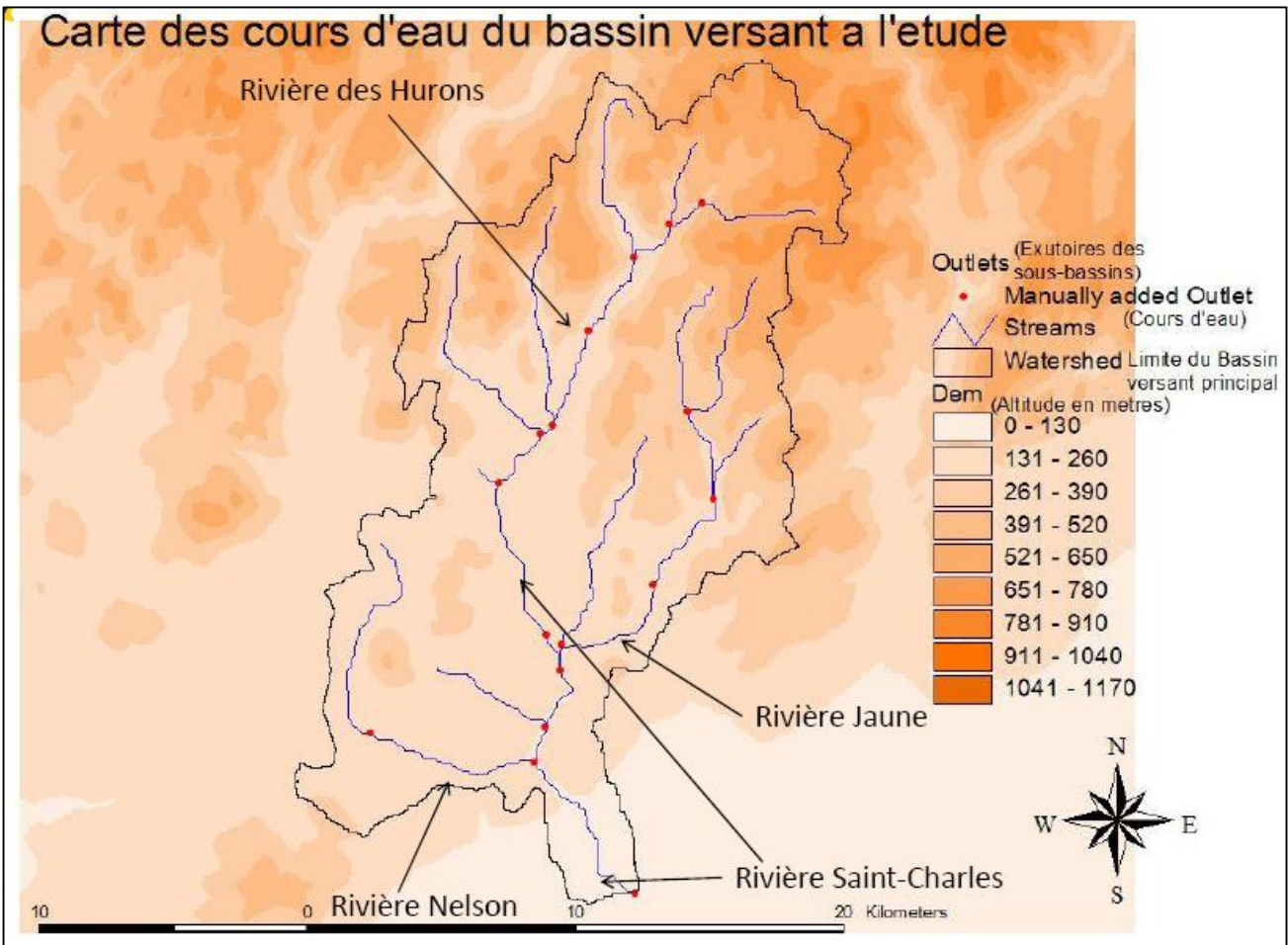
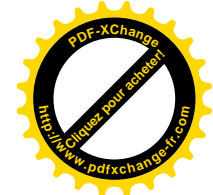
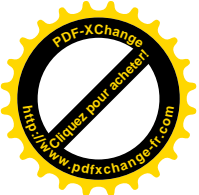


Figure n°11 : réseau hydrographique du BVRSC déterminé par le logiciel Arcview

Une fois le réseau hydrographique tracé dans le « masque » qui englobe la zone d'étude, l'utilisateur doit manuellement placer des exutoires le long de celui-ci, et choisir l'exutoire principal, pour que le logiciel Arcview procède à la délimitation automatique du bassin versant et des sous-bassins, toujours à partir de la topographie, ce qui conduit à ne retenir finalement que le bassin qui nous intéresse pour l'étude, comme montré sur la figure 11 ci-dessus. Un problème peut dès lors être soulevé : le bassin versant de la zone étudiée n'est « que » le bassin versant topographique, et non le bassin versant hydrogéologique. Cela sous-entend que même si le bassin versant relatif à l'écoulement de l'eau par ruissellement est relativement précis, le modèle ne prend pas en compte les apports ou les pertes d'eau dans le bassin par ou vers des aquifères qui



s'étendent sur une zone plus grande que celle délimitée à partir de la topographie. Nous n'avons aucune idée de l'erreur associée. De deux choses l'une : soit on sous-estimera la lame d'eau écoulée sur le bassin, auquel cas on ne prend pas en compte des apports par des zones externes, soit on la surestimera, ce qui signifie que toute l'eau ne sort pas par l'exutoire principal du bassin, mais peut s'écouler en profondeur vers d'autres bassins versants. La deuxième possibilité est néanmoins moins inquiétante que la première, car SWAT permet de définir une partie de l'eau de l'aquifère superficiel qui sera définitivement perdue du système par l'écoulement vertical descendant vers un aquifère profond.

Une fois les différents exutoires ajoutés manuellement, la délimitation du bassin versant principal et des sous-bassins est terminée. Dans notre cas, nous avons placé 18 exutoires et le bassin comporte donc autant de sous-bassins, chacun étant caractérisé par un bief principal. C'est donc à ce stade que l'utilisateur doit placer des exutoires en fonction de l'emplacement des points où il désire obtenir des informations de débits et/ou de qualité de l'eau, car celles-ci ne sont disponibles qu'au niveau des exutoires définis. De même, il faut prendre en compte dans le placement des exutoires les endroits où l'on dispose de données, car un calage automatique se fait évidemment à partir de valeurs de débits observés à un certain endroit qui doit coïncider avec un exutoire placé sur le bassin, auquel cas on devra caler en un point avec des valeurs qui ne lui appartiennent pas, ce qui ne serait aucunement logique. C'est pour cela que dans notre cas, le BVRSC modélisé est moins grand que le réel (340 km² au lieu de 550, et sans les rivières Lorette et du Berger, voir figure 3), car il s'arrête là où nous disposons de données de débit, c'est-à-dire au niveau du point A comme placé sur la figure 3. La figure 12 ci-dessous présente les limites des sous-bassins du bassin global finalement obtenus par la délimitation automatique, et qui seront utilisées dans toute la suite de la modélisation avec le logiciel SWAT. Cette figure peut être comparée avec la figure 3, pour remarquer la bonne adéquation entre sous-bassins réels et tracés par Arcview. En fait, trois critères ont conduit au choix de ce placement des exutoires : l'emplacement où des données étaient disponibles (exutoires de la rivière Jaune et rivière Nelson, voir figure n°11), là où nous en voulions pour effectuer la validation ou approfondir d'autres études (comme le débit simulé sortant du lac Saint-Charles ou celui au niveau de l'exutoire de la rivière de Hurons, par exemple), et le souci de rester fidèle à la réalité en respectant les limites des sous-bassins comme montrées dans un portrait du BVRSC, effectué *par le conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007)*. Une subdivision « assez fine » du bassin versant principal est par ailleurs recommandée par *S.L. NEITSCH et al. (2005)* et *S.L. NEITSCH et al. (2004)* dans la documentation de SWAT de sorte que chaque sous-bassin ne possède pas plus d'une dizaine d'URH (unités de réponse hydrologique), comme il est conseillé dans l'article d'*Etienne LEVESQUE et al. (2007)*, qui propose une méthodologie globale pour la mise en place du modèle SWAT sur des bassins versants affiliés à ce secteur. Cet article propose en fait une liste de cartes et données disponibles sur ce secteur pour définir un sous-bassin du point de vue du MNT, du type d'occupation du sol et du type de sol. Il comporte également des conseils sur la discrétisation d'un Bassin en sous-bassins, mais n'apporte aucune information relative à la définition des variables du modèle ou sur la méthodologie nécessaire pour la modélisation des autres propriétés du bassin-versant.

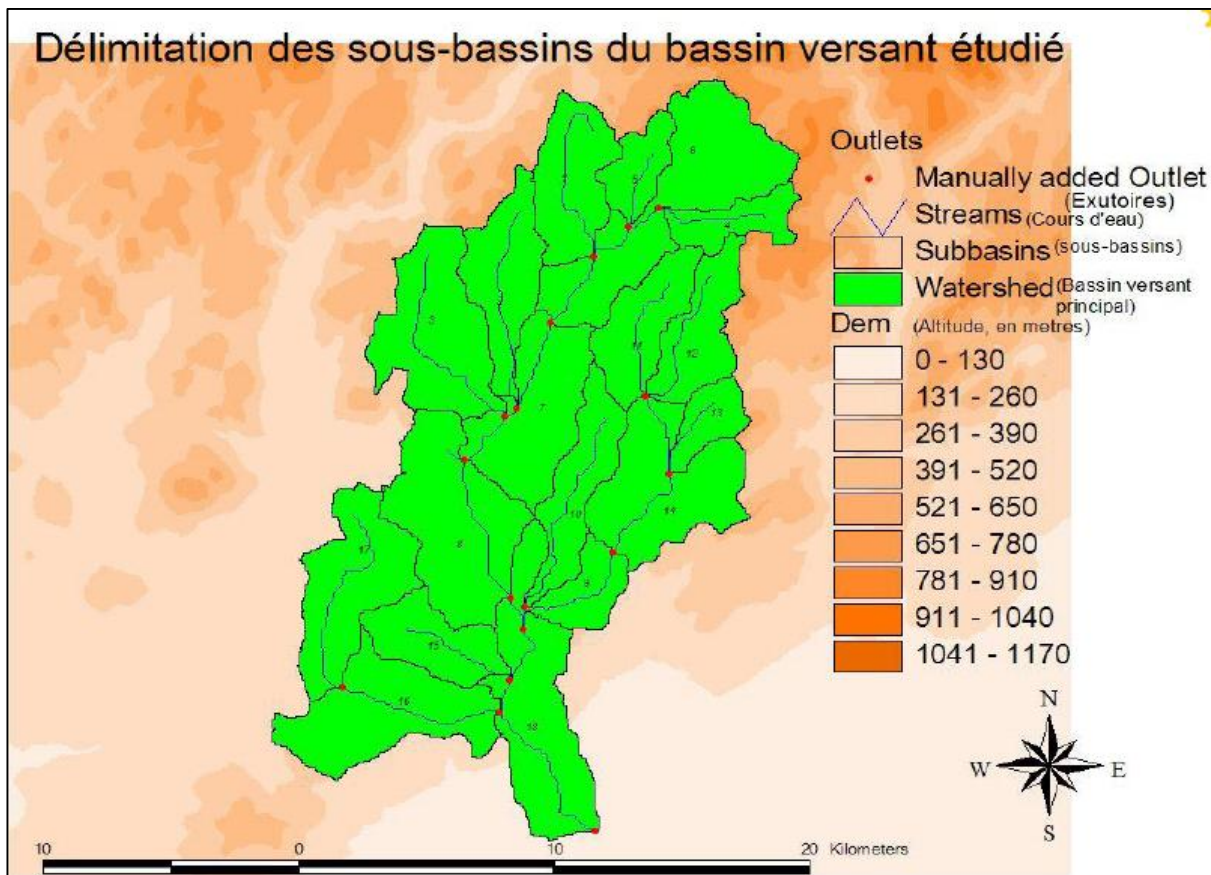


Figure n°12 : limites des sous-bassins et du bassin versant utilisés pour l'étude

Une fois le bassin versant délimité, il reste à lui superposer les cartes d'occupation du sol et des types de sol. La première nous a été fournie par l'association « Canards Illimités Canada », obtenue à partir d'images landsat-7 et ayant une résolution de 25 m. Cette carte est la seule disponible pour l'utilisation du territoire, et a été utilisée par [Etienne LEVESQUE et al. \(2007\)](#), qui la conseillent pour des bassins situés à proximité de la zone d'étude. La figure n°13 sur la page d'après présente les grandes classes d'occupation du sol du secteur étudié. Différentes classes ont été regroupées pour faciliter la lecture de cette carte. Mais comme il est précisé plus loin dans l'ajustement manuel des paramètres relatifs à la végétation, chaque classe présente ses propres caractéristiques et il ne faut donc pas croire que le BVRSC se limite aux 7 classes de cette figure 13, chacune représentée par une couleur spécifique : en noir, les zones urbaines ; en vert, la forêt ; en bleu foncé, les lacs (WATR); bleu clair, les zones humides (WETN); en rouge, les terres agricoles (AGRR); en rose clair, les pâturages (PAST); et en rose foncé, la classe de régénération (RNGE). En tout, il y aura 11 classes d'occupation différentes sur le bassin modélisé, car la classe de forêt et celle des zones urbaines comprennent chacune trois types différents : pour la forêt, il y a les résineux (FRSE), ceux qui perdent leur feuillage (FRSD) et un mélange des deux (FRST). Pour les zones urbaines, il y a celles de faible, moyenne et haute densité (URLD, URML et URMD, respectivement).

Il apparaît alors clairement que la majorité du bassin versant est occupée par de la forêt, que les zones urbaines commencent à être développées vers le sud, et que certains lacs et/ou

zones humides s'étendent sur des surfaces non négligeables, comme le lac Saint-Charles, au centre. Enfin, il faut y remarquer une source d'erreur : les lignes roses correspondent à des routes, pas à des pâturages. Cet artefact de la carte sera complètement négligé par la suite, car il a une influence hydrologique mineure compte-tenu de la faible superficie qu'il occupe.

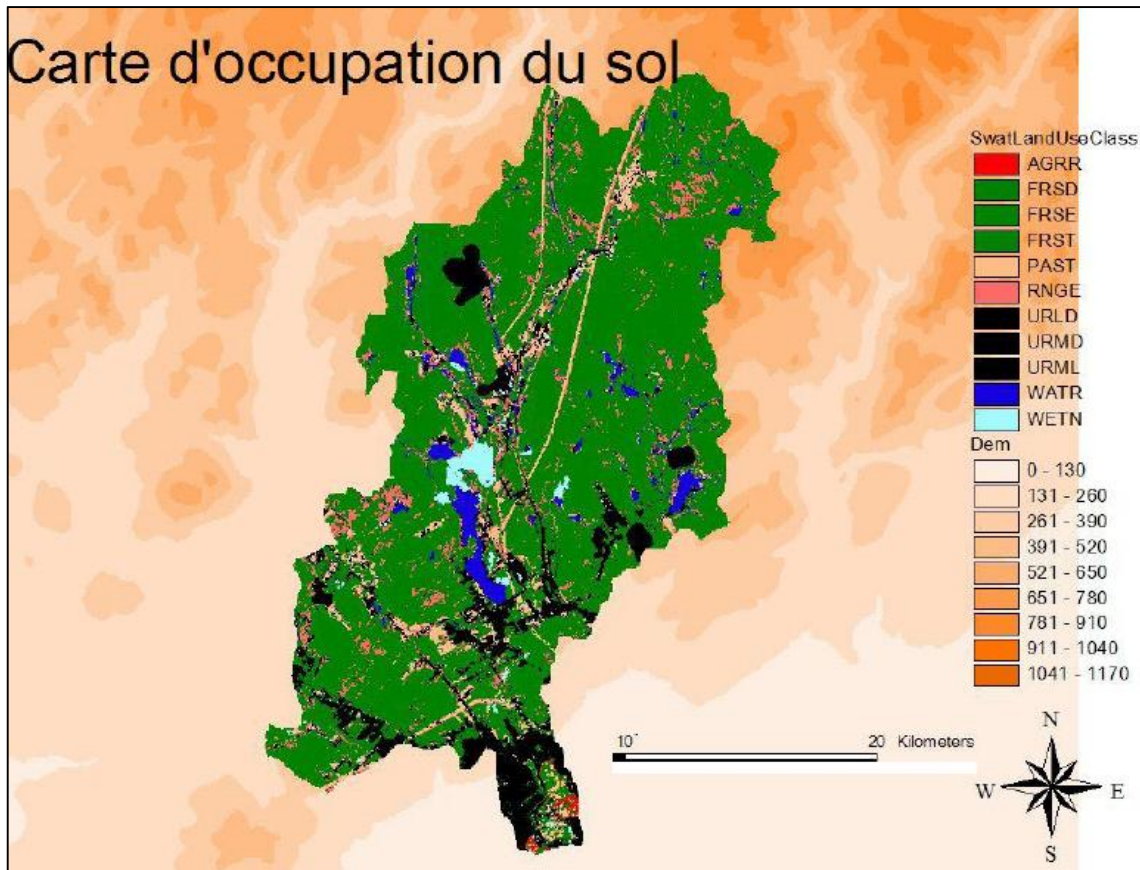
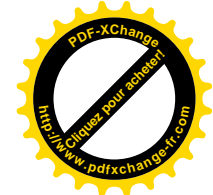
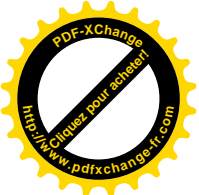


Figure 13 : principales classes d'occupation du territoire sur le BVRSC ; noir : urbain ; bleu : surfaces d'eaux libres ; vert : forêt. (voir plus haut pour la définition plus précise)

Pour ce qui est des données relatives aux propriétés physiques du sol sur le BVRSC, très peu de données sont disponibles, ce qui peut s'expliquer par le faible intérêt agricole de cette zone aux sols souvent acides. Il est pourtant clair que, compte-tenu de la variabilité du relief et de la géologie sur le BVRSC, le sol n'est pas homogène sur toute la zone d'étude. Pourtant, c'est l'hypothèse qui est faite, car la seule source d'informations disponible pour connaître les propriétés physiques du sol du secteur s'est avérée être le fruit du travail d'un étudiant, Boris SALOU, qui a récupéré les données relatives aux propriétés du sol de type « Sainte-Agathe », qui correspond à un type de sol très abondant sur le bassin-versant. Cet étudiant avait exposé le problème au spécialiste Rock OUIOMET, de la direction de la recherche forestière Québécoise, qui lui a conseillé de ne prendre que ce type de sol sur tout le bassin versant à l'étude. Nous suivons cette démarche lors de ce travail, car aucune alternative n'est possible à l'heure actuelle, sinon de prélever des échantillons des principaux types de sols pour effectuer les mesures adéquates, ce qui n'était pas l'objectif du stage. Le seul point positif de cette démarche est que la série de Sainte-Agathe a très bien été étudiée, et ses caractéristiques et propriétés sont donc très bien connues. Il s'agit d'un sol d'un mètre d'épaisseur, qui est un podzol que l'on trouve sous les forêts du Québec, formé à partir du matériel déposé par les glaciers. Son caractère très « pierreux » en surface rend l'agriculture difficile dessus, ce qui par contre a contribué à préserver les forêts de ce

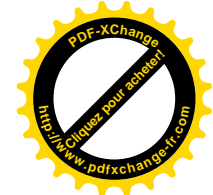
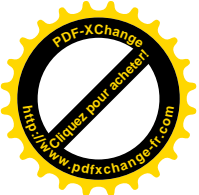


secteur. Il comprend 4 couches d'épaisseur différentes, chacune possédant une perméabilité, porosité, densité, et composition spécifique.

A partir des données jusqu'alors fournies (MNT, carte d'occupation du territoire et types de sol), l'interface graphique de SWAT permet de déterminer automatiquement la discrétisation de chaque sous-bassin versant en différentes Unités de Réponse Hydrologique (URH). Chaque URH est définie comme étant, au sein d'un sous-bassin donné, une combinaison unique d'occupation du territoire et de type de sol. C'est à l'échelle de l'URH que seront calculés les bilans en eau, en sédiments et en nutriments, qui constituent la modélisation des processus terrestres, comme l'expliquent [Etienne LEVESQUE et al. \(2007\)](#). Par la suite, les apports de chacune des URHs d'un sous-bassin versant sont acheminés vers le bief principal de celui-ci, où entrent alors en jeu les processus fluviaux, qui auront lieu jusqu'à l'exutoire principal du bassin versant global modélisé. Pour effectuer la distribution automatique des URHs, l'utilisateur doit spécifier au logiciel un pourcentage seuil pour le type d'occupation du territoire. Au sein d'un sous-bassin versant, les types d'occupation du territoire qui s'étendent sur une surface dont le pourcentage par rapport à la surface totale du sous-bassin est inférieur à la valeur seuil entrée seront négligés. Le modèle ne conservera sur un sous-bassin que les types de couverture dont le pourcentage d'occupation du sol de ce sous-bassin est supérieur à la valeur seuil. La surface laissée « vide » sera alors redistribuée entre les types d'occupation restants, dans les mêmes proportions que celles dans lesquelles sont distribués les types retenus sur le sous-bassin considéré. Ce pourcentage seuil permet de diminuer le nombre de types d'occupation du territoire différent sur un sous-bassin. Il en est exactement de même pour les types de sol. Toutefois, le pourcentage seuil entré pour les types de sol ne changera rien dans cette étude, puisqu'il n'y a qu'un seul et même type de sol sur tout le BVRSC, donc par conséquent qu'un seul sol au sein de chaque sous-bassin du BVRSC.

C'est en fonction des valeurs des pourcentages seuils que le nombre d'URHs définis par le logiciel au sein d'un sous-bassin pourra varier, puisque chacune est caractérisée par un type d'occupation et un type de sol particuliers. Comme le disent [Etienne LEVESQUE et al. \(2007\)](#), il est conseillé de n'avoir qu'une dizaine d'URHs par sous-bassin au maximum, car les URHs ne communiquent pas entre elles au sein d'un sous-bassin, et leurs apports sont directement envoyés dans le bief principal de leur sous-bassin. Ainsi, les processus fluviaux n'ont pas lieu entre la sortie d'une URH et l'entrée dans le bief principal, ce qui est une source d'erreur dans la modélisation qui est inhérente à la structure du modèle SWAT. Jusqu'à 10 URHs par sous-bassin, néanmoins, celle-ci a peu d'impact sur la qualité de la modélisation. Si l'utilisateur désire conserver la complexité de la carte d'occupation du territoire et celle des types de sol, il devra alors définir plus de sous-bassins versants pour pouvoir respecter la règle d'une dizaine d'URHs au maximum par sous-bassin. Dans notre étude, nous avons pu conserver toute la complexité de la carte d'occupation du sol, puisqu'il n'y a pas de complexité au niveau des types de sol. Ainsi, même en fixant la valeur du pourcentage seuil sur le minimum, il n'y a pas plus de 10 URHs par sous-bassin dans le modèle réalisé.

La configuration globale du bassin versant est alors terminée. Il ne reste plus qu'à spécifier au modèle l'emplacement des fichiers comprenant les données de pluviométrie et température de chaque station, l'emplacement géographique de ces stations et leur altitude, et les fichiers comprenant les données nécessaires au générateur de climat pour combler les lacunes dans les fichiers de données observées ou générer celles pour lesquelles on ne dispose pas d'information, comme, dans notre cas, la vitesse du vent, les radiations solaires et l'humidité relative de l'air. Dès lors, des simulations peuvent être lancées, puisque SWAT permet dans un premier temps d'écrire tous les fichiers comprenant les valeurs des différents paramètres physiques du bassin versant, qui sont alors définis « par défaut ». Ce sont ces paramètres qui seront changés pour améliorer la



qualité de la modélisation. La partie suivante, qui appartient toujours à la sous-partie de la « modélisation des propriétés du bassin versant », elle-même incluse dans la partie « méthodologie » de SWAT, présente les modifications apportées à différents paramètres, modifications basées sur la littérature disponible qui comporte des informations supplémentaires ayant permis d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de certains paramètres, et de les imposer au modèle pour augmenter le degré de réalisme de la modélisation tout en diminuant le nombre de paramètres à caler manuellement, ou du moins en limitant leur gamme de variation possible pour rester dans le cadre de valeurs réalistes.

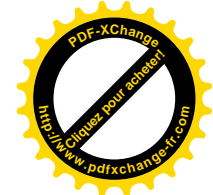
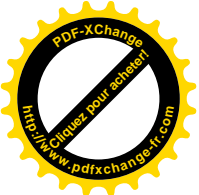
- Modélisation des propriétés du bassin-versant : végétation

Le logiciel SWAT est à l'origine essentiellement conçu pour modéliser les bassins-versants sur lesquels une forte occupation du territoire est dédiée à l'agriculture. En effet, il permet de prendre en compte le type de plantation avec les propriétés prédéfinies associées au végétal considéré (comme la quantité de biomasse produite par unité de radiation solaire interceptée, le potentiel foliaire maximal en m^2 de feuilles par m^2 , les températures de croissance optimale et minimale, l'indice foliaire initial (en m^2 par m^2), etc...), les pratiques agricoles effectuées comme les dates de plantation/récolte, l'application de fertilisants, l'irrigation, l'efficacité de la récolte (en %), la quantité de biomasse initiale (en kg/ha), et d'autres variables comme, entre autres, la profondeur maximale des racines (ZMX dans le tableau 2) et le nombre d'unités de chaleur nécessaires pour amener le végétal à maturité (si on considère, pour un jour donné et à partir du moment où le végétal est planté, la différence entre température moyenne journalière et température de croissance minimale du végétal, différence égale à 0 si négative, et que l'on additionne cette valeur pour un jour donné à celles des jours suivants, le végétal arrive à maturité lorsque cette somme atteint le nombre d'unités de chaleur nécessaires, nombre noté PHU par la suite).

Cette dernière variable est importante puisqu'elle caractérise l'évolution de certaines propriétés du végétal au cours du temps, qui varient selon la variable PHU au fil des jours avant d'atteindre leur valeur maximale prédéfinie dans les tables de SWAT, lorsque la quantité d'unités de chaleur observées atteint le nombre PHU.

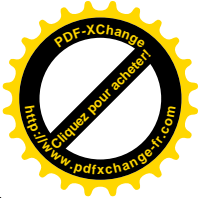
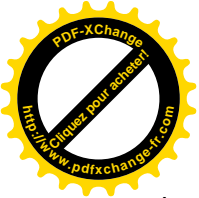
Dans notre cas, nous nous sommes simplement servis des fonctionnalités de SWAT et avons adapté certaines variables pour représenter au mieux le type de végétation présent sur le BVRSC, avec ses propriétés et leur évolution associées, tout en essayant de faire coïncider les quantités de biomasse produites dans SWAT (en tonnes/ha/an) et celles observées (valeurs tirées de la littérature). La partie suivante présente la méthodologie employée pour satisfaire ces exigences, et porte un regard critique sur la divergence engendrée entre réalité et modèle.

Sur le BVRSC, comme le montre plus haut la figure 13, l'agriculture occupe une place négligeable. Le couvert végétal y est presque exclusivement de type forestier, avec quelques pâturages. C'est pourquoi de nombreuses fonctionnalités de SWAT concernant l'agriculture n'ont pas été utilisées, car la plupart de celles-ci servent à l'agriculture, c'est-à-dire qu'elles servent à représenter les modifications d'origine anthropique apportées à la végétation. Ici, l'ensemble des végétaux du bassin versant sont supposés évoluer naturellement et sans intervention de l'homme. Cette hypothèse est déjà fautive dans le sens où en de nombreux points du BVRSC, il existe des puits individuels qui peuvent servir à l'irrigation de petits potagers non référencés sur la carte d'occupation du territoire. Mais, de toute façon, nous ne disposons d'aucune information sur la quantité d'eau prélevée en ces différents points, ni des pratiques agricoles mises en œuvre. On suppose tout simplement l'influence de telles activités comme étant négligeables à l'échelle du



cycle hydrologique d'un sous-bassin du BVRSC. Les types d'occupation du sol qui présentent un couvert végétal sont les suivants (voir figure 13) : la forêt (3 grands types de forêts : les résineux, les arbres qui perdent leurs feuilles, et un mélange des deux), les pâturages, et les zones humides (avec les mêmes trois grands types de couvert végétal que les forêts, mais on considère dans cette étude que les zones humides ne correspondent qu'à un type de couvert végétal : un mélange de résineux et d'arbres perdant leurs feuilles).

La problématique est la suivante : comment représenter les propriétés d'une flore qui évolue naturellement avec les fonctionnalités de SWAT, prévues pour modéliser les végétaux de l'agriculture ? Cela sous-entend en effet que le logiciel nécessite des opérations : chaque année, un végétal n'existe que s'il est planté. Et s'il est planté, il doit impérativement être récolté avant la fin de cette même année. On ne peut abandonner une flore à elle-même, dans SWAT, et la laisser évoluer en fonction des conditions climatiques. Le logiciel n'est pas prévu pour ça. Cela impose donc de faire repousser la forêt chaque année. Pour cela, deux méthodes sont possibles : soit la forêt naît et meurt lorsque le nombre d'unités de chaleur a atteint un pourcentage de la valeur nécessaire pour l'amener à maturité (par exemple 0,15 et 1,15, respectivement), soit on impose des dates où elle est plantée/récoltée. Le fait que dans la réalité, la forêt soit présente tout au long de l'année, nous a poussé à adopter la stratégie suivante (y compris pour l'agriculture, avec du maïs): on la « plante » le 1^{er} janvier et la tue le 31 décembre, en exportant à l'extérieur du bassin versant toute la récolte, auquel cas celle-ci est laissée sur le sol et risque de perturber le cycle hydrologique. Chaque année, la forêt doit néanmoins atteindre sa maturité, car les propriétés d'un arbre adulte ne sont pas les mêmes qu'un jeune. Pour cela, on joue sur la valeur du nombre d'unités de chaleur nécessaires, c'est-à-dire qu'on l'adapte à ce qu'on veut : il doit permettre, la plupart du temps, d'amener les arbres à maturité en 4 mois, alors qu'il leur faut au moins 30 ans dans la réalité. Cette stratégie est en fait conseillée dans le guide méthodologique (ou fichier « readme ») qui accompagne un sous-programme qui permet de calculer le nombre d'unités de chaleur pour amener la plante à maturité, sous-programme spécialement conçu pour SWAT et disponible à l'adresse internet suivante : <http://www.brc.tamus.edu/swat/>, dans la rubrique SOFTWARE / POTENTIAL HEAT UNIT PROGRAM. Pour fonctionner, le programme nécessite la latitude du bassin-versant, les températures minimale et maximale mensuelles (moyennes interannuelles), celles optimale (T_o dans le tableau 2) et minimale (T_b dans le tableau 2) de la plante considérée, ainsi que le nombre de jours requis pour amener la plante à maturité (nb j croiss dans le tableau 2), nombre de jours calculé de sorte qu'à partir des températures journalières moyennes interannuelles, et de la température de base (ou minimale) d'un végétal, celui-ci puisse atteindre sa maturité, au cours d'une année « moyenne » du point de vue des températures. Les divergences avec la réalité qui en découlent paraissent intuitives : les végétaux poussent trop vite, et l'évolution de leurs propriétés n'est donc pas représentative de la réalité. Dans cette dernière, seules les propriétés liées au développement foliaire varient, de manière générale, et la biomasse reste relativement constante tout au long de l'année. Cependant, on notera que dans la modélisation, cela n'est pas trop grave car les variables les plus importantes dans le bilan hydrologique et liées aux plantes sont fixables, comme le nombre CN2 (utilisé dans le calcul du taux de ruissellement avec la méthode SCS) par exemple. Toutefois, les variables dépendantes du développement de la plante, comme la portion de pluie maximale interceptée par la plante, le développement foliaire, la profondeur des racines, la transpiration, etc... seront différentes de la réalité en raison du fait que les arbres doivent d'abord atteindre leur maturité, dans la simulation, avant de voir leurs propriétés simulées se rapprocher des réelles. On ne peut par ailleurs pas spécifier de croissance « instantanée » (toujours à l'aide du nombre d'unités de chaleur requises pour atteindre la maturité, ou PHU), le but étant d'essayer de simuler le



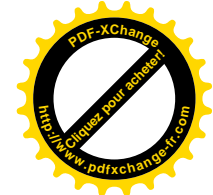
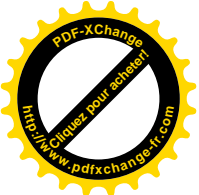
développement foliaire. La stratégie de modélisation retenue sera donc de prendre la valeur fournie par le sous-programme de SWAT décrit plus haut, car celle-ci permet à tous les végétaux d'atteindre leur maturité avant la fin de leur période de croissance annuelle (quand la température dépasse leur température minimale). Ceci est montré dans le tableau n°2 ci-dessous qui présente une comparaison entre les unités de chaleur moyennement disponibles par an et pour chaque végétal du BVRSC (calculées à partir des températures journalières moyennes interannuelles et des températures de base des différents végétaux et noté PHU dispo dans le tableau 2), et celles entrées dans le logiciel (fournies par le sous-programme, et notées PHU prog dans le tableau 2). Une fois ces paramètres entrés dans SWAT (PHU, dates de plantation/récolte...), il reste à définir la quantité de biomasse initiale plantée tous les ans le 1^{er} janvier (en kg/ha). Le scénario sera exactement le même d'une année à l'autre, pour un type de couvert végétal donné.

La quantité de biomasse initiale (Bioin dans le tableau 2) a été ajustée de manière à respecter l'ordre de grandeur de 30 tonnes par hectare (t/ha) de biomasse sèche pour les zones boisées, et d'environ 1 t/ha pour les pâturages, comme précisé dans le guide méthodologique de SWAT de [S.L. NEITSCH et al. \(2004\)](#). C'est-à-dire qu'en fonction de la quantité de biomasse moyenne annuelle produite lors de la simulation, on a augmenté ou diminué cette valeur initiale pour faire coïncider la densité (en t/ha) de végétation produite annuellement dans la simulation (biopr dans le tableau 2) avec celle moyenne observée dans la réalité. La profondeur maximale des racines (ZMX) a été établie de manière intuitive, sachant que le sol ne fait qu'un mètre d'épaisseur au maximum, même si les racines peuvent descendre jusqu'à 2 mètres, elles n'iront pas plus loin qu'1 mètre, dans cette étude. Il s'agissait simplement de permettre ou non au végétal d'exploiter l'eau du sol sur toute son épaisseur ou pas, et de garder une relativité logique entre les valeurs des différents végétaux. Par exemple, les pâturages ont été limités à une profondeur racinaire de 20 cm (en imaginant de l'herbe, cela semble déjà élevé).

Enfin, la valeur du nombre Cn2 a été établie en fonction du type de végétation du BVRSC, et à partir des tables du guide méthodologique de SWAT écrit par [S.L. NEITSCH et al. \(2004\)](#), disponibles également à l'adresse suivante (qui définit l'équation utilisée dans SWAT et à partir de laquelle est calculée la portion de pluie qui ruisselle, en définissant le nombre Cn2 ou Cn) : <http://www.ecn.purdue.edu/runoff/documentation/scs.htm>. Ces valeurs ont légèrement été rehaussées car elles sont ici définies pour une pente de 5%, qui est en moyenne plus importante sur le BVRSC, de l'ordre de 10% environ. On n'a pas fait varier ce paramètre en fonction de la pente locale du sous-bassin, car nous ne disposons pas de tables présentant la variation du nombre Cn en fonction de la pente pour établir cette variation de manière suffisamment précise. Le groupe hydrologique du sol du BVRSC est de type constant B, donc Cn2 ne dépend pas de cette variable sur la zone modélisée.

végétation	To (°C.)	Tb (°C.)	Bioin (t/ha)	nb j croiss	PHU dispo	PHU prog	Biopr (t/ha)	Cn2	ZMX (mm)
AGRR	25	8	10	140	900	700	0,2	78	1000
FRST	30	10	25	120	635	442	30	60	2500
FRSD	30	10	25	120	635	442	30	60	2500
FRSE	30	0	20	216	2332	2122	25	65	2500
WET-Mixed	25	12	15	97	414	169	0,5	85	1000
PAST	25	12	8	97	414	169	0,2	72	200
RNGE	25	12	10	97	414	169	0,5	70	200

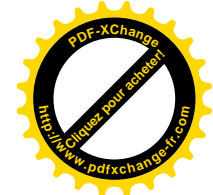
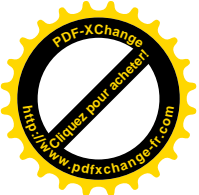
Tableau n°2 : caractéristiques de la végétation fournies au logiciel (sauf To et Tb, initialement incluses, et biopr : calculée par le logiciel). La définition du type de végétation est effectuée page 24, et celle des caractéristiques est précisée plus haut.



- Modélisation des propriétés du bassin-versant : lacs et zones humides

Les lacs et zones humides du BVRSC sont nombreux et peuvent jouer un rôle fondamental sur le régime hydrologique de la rivière Saint-Charles puisqu'ils constituent des « réservoirs naturels » qui peuvent donc créer un effet tampon sur le débit : s'ils sont vides avant une crue, ils permettront d'étaler légèrement la crue dans le temps tout en diminuant la valeur du pic de débit en aval ; lorsqu'ils sont pleins, ils peuvent soutenir, pendant un temps relativement court, les débuts d'étiage, qui sont néanmoins essentiellement soutenus par la vidange de l'aquifère.

Pour prendre en compte ces réservoirs, il faut donner au logiciel les informations suivantes : surfaces et volumes en fonctionnement normal / période de crue, temps pour passer d'une extrême à l'autre (en jours), volume initial, perméabilité du fond, mois de début/fin de saison « sèche » (ou de non-crue), et pourcentage du sous-bassin drainé par le lac ou la zone humide. Le choix de la période de crue influence peu le régime du lac. Nous avons testé les deux configurations suivantes : mois de début/fin de saison sèche : Juillet/Août, et Juin/Mars, sans effet notable sur l'efficacité de la modélisation. Les deux configurations visent à prendre en compte l'étiage d'été ou les deux, respectivement. La première configuration a été retenue car il n'était pas sûr que le logiciel comprenne la deuxième configuration (le mois de fin d'étiage est avant celui de début). Le temps pour passer d'une extrême à l'autre a été approché de manière purement empirique, en testant différents ordres de grandeur et en gardant ceux qui donnaient les meilleures simulations (par exemple 15 jours pour le lac Saint-Charles), une fois tous les autres paramètres fixés. Le volume initial a été établi comme étant égal au volume du réservoir en fonctionnement normal, et est réellement défini après l'année de chauffe. La perméabilité du fond a été choisie de manière commune à tous les lacs et zones humides. Comme pour le temps de vidange des réservoirs, elle a été retenue en fonction de l'efficacité des simulations (et fixée à $0,1 \text{ mm.heure}^{-1}$). Le pourcentage du sous-bassin qui alimente le réservoir par ruissellement (ou le pourcentage drainé par le lac) a été estimé à partir de la carte 1.69 du portrait du BVRSC réalisé par [le conseil du bassin de la rivière Saint-Charles \(2007\)](#), carte qui présente les principaux milieux humides du BVRSC. Pour cela, il a fallu approximer le pourcentage du sous-bassin qui était situé en amont du milieu humide de ce sous-bassin, à partir de la position du milieu humide sur le cours d'eau principal du sous-bassin. Dans le cas où deux milieux humides sont présents sur un même bassin, nous faisons comme s'il n'y en avait qu'un en fusionnant leurs propriétés et en gardant le pourcentage du sous-bassin drainé le plus élevé des deux zones humides. Le portrait comporte également des informations qui ont permis de déterminer les surfaces et volume des milieux en fonctionnement normal. La surface était directement renseignée. Le volume a été déterminé à partir de la profondeur moyenne du lac, quand elle était renseignée. Parfois, on ne disposait que de la profondeur maximale du milieu. Une relation entre profondeur maximale et moyenne du lac a alors été estimée en prenant les deux sous-parties du lac Saint-Charles, qui sont radicalement différentes car ont des profondeurs maximales et moyennes de 16,5 et 5,6m pour l'une, et de 5 et 2,5m pour l'autre. On a donc pris le rapport moyen entre ces deux profondeurs, qui est de 2,7, pour extrapoler les profondeurs moyennes des autres lacs à partir des maximales. On ne peut qu'espérer que les deux « sous-lacs » choisis représentent bien la variabilité de ce rapport sur la zone d'étude. Pour les zones humides, on a retenu la valeur de 1 mètre de profondeur moyenne, valeur purement arbitraire, ce qui n'est pas forcément important au niveau de l'impact sur l'efficacité de la simulation. En effet, il a été constaté que c'est surtout la différence entre le volume en fonctionnement normal et celui en période de crue qui régit l'impact sur l'efficacité de la simulation, car c'est cette différence qui est à l'origine de l'effet tampon plus ou moins fort. Le volume en fonctionnement normal, lui, sera atteint quoi qu'il arrive après l'année de chauffe,

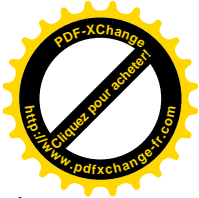
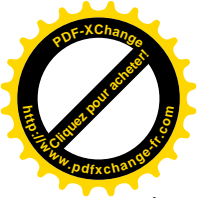


compte-tenu des fortes précipitations et de la faible perméabilité du fond des lacs dans la simulation. Pour les lacs, on disposait des ordres de grandeur des surfaces et profondeurs en fonctionnement normal, donc des volumes dans ce type de cas, mais pas pour les zones humides, pour lesquelles on dispose seulement de la superficie. Enfin, lors des périodes de crues, on néglige l'augmentation de surface des lacs (vrai en réalité car le lac gagne seulement 1 ou 2 mètres sur la berge en période de crue), on considère une augmentation de surface de 20% pour les zones humides à partir des informations du portrait du BVRSC, et un marnage de 1 mètre pour les lacs et 0,5 mètre pour les zones humides, respectivement, ce qui a été choisi de manière à maximiser l'efficacité de la simulation tout en respectant le fait que les zones humides s'étendent sur des surfaces bien plus grandes que celles des lacs, et que leur marnage est donc par conséquent plus faible, puisque cette différence de niveau entre les périodes « sèches » et d'étiage est tamponnée par la superficie du réservoir : prenons un exemple : un verre de 5 cm de diamètre verra sa hauteur augmenter beaucoup plus rapidement qu'un autre de 10 cm, si on leur rajoute la même quantité d'eau. De plus, le choix d'un marnage d'un mètre pour les lacs est en assez bon accord avec les données des niveaux dans le lac Saint-Charles, qui présente un marnage maximal de deux mètres entre l'étiage d'hiver et la crue de printemps. Mais ce lac voit son niveau varier de manière plus importante qu'un lac naturel puisqu'il est géré par l'homme : en étiage, ce dernier relâche plus d'eau pour satisfaire les besoins en eau potable de la ville. Le niveau baisse donc probablement plus que s'il était à l'état naturel, puisqu'on force la vidange. Donc le marnage maximal observé pourrait être interprété comme suit : le niveau en fonctionnement normal correspond à la moyenne des niveaux du lac ; en étiage, le lac est plus vidé que d'habitude, d'un mètre au maximum ; au printemps, le niveau monte d'un mètre de plus que le niveau moyen, ce qui est alors en accord avec les données rentrées dans la simulation. Enfin, le volume du lac Saint-Charles, de 15 Millions de mètres cube en fonctionnement normal, est en accord avec la courbe du Volume en fonction du niveau d'eau du lac, puisqu'avec les deux bassins de superficie identique, le lac a une profondeur moyenne d'environ 10 mètres, ce qui donne exactement comme volume sur la courbe la valeur de 15 Millions de m³.

Enfin, dans SWAT, le lac est modélisé comme étant naturel, alors qu'il est géré par l'homme dans la réalité. Cependant, cela n'a pas empêché d'obtenir des résultats assez satisfaisants sur la simulation, comme on le verra dans la sous-partie des résultats de cette partie relative à SWAT. Une comparaison entre les débits « effectivement » relâchés et ceux simulés sortant du lac y sera également effectuée. Les débits « effectivement » relâchés sont en fait issus du travail de stage d'une étudiante qui a tenté de simuler ces débits car on ne dispose que des mesures des niveaux d'eau amont et aval du lac, et de la position des vannes, et ce sur la moitié de l'année de 2000 à 2005, ce qui a donc empêché de définir le lac Saint-Charles comme un réservoir artificiel dans SWAT, auquel cas il faut disposer des valeurs de débits lâchés pour chaque jour de la simulation (incompatible avec le choix des périodes de calage/validation, voir plus loin).

- Modélisation des propriétés du bassin-versant : détermination de la constante de récession de l'écoulement de base

A partir des chroniques de débits d'un exutoire donné, un sous-programme disponible sur le site internet où sont disponibles beaucoup de logiciels, de mises à jour et de guides méthodologiques relatifs à SWAT et dont l'adresse est la suivante : <http://www.brc.tamus.edu/swat/>, peut déterminer automatiquement la valeur de la constante de récession de l'écoulement de base d'un bassin versant donné. Le programme est disponible à l'adresse mentionnée ci-dessus, dans la rubrique SOFTWARE/BASEFLOW FILTER PROGRAM.



L'article de *J.G. Arnold et al. (1995)*, détaille la méthodologie relative à l'utilisation du logiciel, qui a en fait pour fonction de séparer automatiquement les écoulements de base et surfaciques du débit, pour trouver la variable « alpha_bf » dans SWAT, qui est un indice direct de la rapidité de réponse d'un aquifère à la recharge, comme mentionné dans l'article de *S.L. NEITSCH et al. (2004)* qui apporte plus de précision sur cette variable, qui est en résumé à l'origine de l'allure de la courbe de décroissance du débit en période d'étiage, à cause de la manière dont se vide la nappe. L'analogie avec le coefficient d'emménagement S d'un aquifère paraît alors évidente. Toutefois, la variable « alpha_bf » a pour dimension un temps, dans SWAT. Ce n'est donc pas du tout la même chose que le coefficient d'emménagement S, qui est sans dimension et relié à la porosité efficace en nappe libre. Après avoir mis le fichier de débits au bon format, et spécifié les nombres de jours minimum et maximum pour qu'une récession soit considérée comme telle, le logiciel trouve finalement les informations suivantes : pour l'exutoire global du BVRSC modélisé, l'aquifère contribue entre 46 et 64% au débit observé. La valeur de la constante de récession de l'écoulement de base (alpha_bf), est de 0,0316 jour, ce qui signifie que la zone d'étude présente un aquifère qui répond très lentement à la recharge, et nécessite beaucoup de temps pour se vider complètement, selon les dires de *J.G. Arnold et al. (1995)*, ce qui paraît plutôt étrange compte-tenu du fait que la géologie de la plupart du bassin versant sont de type roche granitique, donc normalement peu favorable à l'emménagement d'une grande quantité d'eau. Ces valeurs ont été obtenues à partir de l'analyse de 57 récessions, une récession ayant ici été analysée si elle durait au moins dix jours. Pour l'exutoire de la rivière jaune, la trop grande quantité manquante de débits n'a pas permis de faire confiance aux valeurs trouvées par le logiciel, qui se basait alors sur l'analyse de 4 récessions d'une durée minimale de 3 jours.

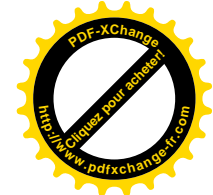
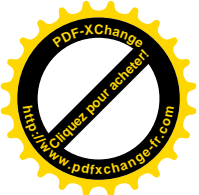
- Modélisation des propriétés du bassin-versant : ajustement des pluies

Les faibles performances du modèle lors des premières simulations, qui montraient par ailleurs un manque d'eau au niveau de l'exutoire (pour ce qui est du bilan global sur toute la période de simulation), nous ont poussé à explorer la piste d'un ajustement des pluies. En effet, comme on peut le voir sur la figure 9 qui détaille l'emplacement des stations de mesure, ces dernières sont relativement éloignées de la zone d'intérêt et ne sont qu'au nombre de deux, l'une à faible et l'autre à haute altitude, par rapport à la moyenne du BVRSC. Or, comme on le sait, la pluviométrie varie avec altitude. En ajoutant à ce phénomène le fait qu'une sous-estimation des précipitations neigeuses est fortement probable en raison de la présence d'un vent relativement fort une grande part du temps (la moyenne des vitesses journalières maximales est d'environ 25 km/h), nous avons tenté d'ajuster les précipitations pour augmenter le critère d'efficacité relatif au bilan global en eau (qui compare la quantité d'eau évacuée par l'exutoire dans la simulation, avec celle observée).

Pour ce faire, une comparaison entre les moyennes mensuelles interannuelles de la pluviométrie aux stations Jean-Lesage et Montmorency a d'abord effectuée. Elle a donné le tableau n°3 ci-dessous :

Valeurs\mois	jan	fev	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	dec
JL (mm)	84,78	67,48	72,83	88,43	94,87	112,92	121,86	99,20	118,37	105,94	101,93	82,06
mont (mm)	16,90	13,14	28,91	50,41	97,48	132,14	146,81	141,35	137,99	100,81	60,23	23,52
écart JL/mont (%)	501,63	513,57	251,90	175,43	97,32	85,45	83,01	70,18	85,78	105,09	169,24	348,83
ajustement Mont	4,00	4,00	2,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20	2,00
ajustement JL	1,10	1,10	1,10	1,10	1,00	1,06	1,10	1,20	1,06	1,00	1,00	1,10

Tableau n°3 : comparaison entre moyennes mensuelles et ajustement de la pluviométrie



Le Bassin-versant de la rivière Saint-Charles (BVRSC) étant globalement situé à une altitude moyenne comprise entre celle de la station Jean-Lesage (74,4m) et celle de la station Montmorency (672,8m), on a en fait souhaité dans un premier temps augmenter la quantité de pluie tombée sur le BVRSC pour que la valeur mensuelle tombe entre les valeurs observées aux deux stations, car le logiciel SWAT n'effectue pas cette opération tout seul, mais affecte la pluviométrie d'une station donnée à tous les sous-bassins les plus proches de cette station. Sur le bassin modélisé, 4 sous-bassins étaient affectés à la pluviométrie de la station Montmorency, et tous les autres (14) à celle de la station Jean-Lesage. Le tableau n°3 précise l'écart observé entre les moyennes mensuelles interannuelles de la pluviométrie aux deux stations (soit par combien il faut multiplier la pluviométrie de la station Montmorency pour obtenir celle de la station Jean-Lesage, par exemple : 500% signifie qu'il faut multiplier par 5). Les deux dernières lignes du tableau montrent par combien on a multiplié la pluviométrie journalière des bassins affectés à la station Montmorency et ceux affectés à la station Jean Lesage (pour les lignes intitulées « ajustement mont » et « ajustement JL », respectivement). Cette comparaison au pas de temps mensuel est imposée par SWAT qui permet d'ajuster la pluviométrie uniquement de la même manière pour un mois donné. Multiplier la pluviométrie journalière par une même valeur tout le mois revient en effet à multiplier la pluviométrie mensuelle par cette valeur. Il ne faut pas oublier que notre problème était que l'on manquait d'eau. Ainsi, quand il y a précipitations neigeuses (c'est-à-dire de Novembre à Avril), on a tenté de se rapprocher des valeurs de la station Jean-Lesage car celles de Montmorency étaient étrangement faibles. Pour les sous-bassins affectés à la station Jean-Lesage, on a encore augmenté la pluviométrie (neigeuse) en supposant une sous-estimation de 10% des précipitations, ce qui est fort possible car le vent et les mini-vortex au niveau du pluviomètre contribuent généralement à sous-estimer ce type de précipitations. Cette valeur de 10% a été obtenue en optimisant (manuellement) la performance de la simulation du point de vue du critère de bilan. Elle est en accord (d'un point de vue ordre de grandeur) avec les courbes montrant la sous-estimation des précipitations (neigeuses, avec bouclier de protection) en fonction de la vitesse du vent, comme celle présente sur un polycopié du cours d'Hydrologie de Mr Pierre RIBSTEIN, cours dispensé dans le cadre du Master 2 Hydrologie-Hydrogéologie de L'UPMC (Paris 6), en 2007/2008. Nous n'avons en effet pas pu trouver cet ajustement de manière plus précise car les données relatives à la vitesse du vent ne présentent que les valeurs journalières maximales, souvent peu représentatives des valeurs journalières moyennes. Reste que cette valeur de 10% n'est pas aberrante (pas trop élevée) et a permis, avec les autres ajustements, d'accroître considérablement le critère de Bilan (voir résultats de la partie SWAT). Pour l'été (Mai à Octobre, précipitations liquides uniquement), on remarque que la pluviométrie de la station Montmorency est plus élevée que celle de la station Jean-Lesage, ce qui est alors en accord avec le fait que la première soit plus élevée que la seconde. Pour les sous-bassins affectés à la station Montmorency, aucun ajustement n'a été appliqué, toujours pour satisfaire le critère de Bilan et ainsi conserver les valeurs élevées de la pluviométrie. Pour les autres sous-bassins (affectés à la station Jean-Lesage), la logique « pluviométrie moyenne » décrite plus haut a été appliquée.

Il est certain qu'avec de tels ajustements, on est toujours très loin de la pluviométrie réelle, mais compte-tenu du faible nombre de stations à disposition et de leur éloignement géographique, notre objectif n'était pas aussi audacieux. De plus, comme le montre la figure 14 plus bas, la variabilité spatiale des pluies sur le BVRSC est grande, et il ne pleut pas toujours même moment au même endroit, ce dont il est impossible de tenir compte dans les ajustements des pluies, qui visent simplement à ajuster des valeurs de pluviométrie lorsqu'un épisode pluvieux a lieu. Ces ajustements ne sont pas ceux qui ont été appliqués dans le modèle « final », car il a été ultérieurement constaté que les valeurs de la pluviométrie de la station Montmorency

correspondaient en fait aux valeurs des précipitations liquides uniquement, c'est-à-dire sans celles correspondant à des précipitations neigeuses, ce qui explique le « manque d'eau » constaté dans les simulations. La récupération des valeurs de précipitations totales de la station Montmorency a alors été effectuée. Les moyennes mensuelles des mois d'été étaient inchangées, et celles des mois d'hiver ne montraient plus cette incohérence de valeurs beaucoup plus faibles pour la station Montmorency, qui présentait alors des valeurs mensuelles totales plus élevées que celles de l'aéroport Jean-Lesage (voir tableau 4 plus bas), car elle est à une altitude plus importante, ce qui s'explique par le phénomène des précipitations orographiques : dans un même secteur, plus un point est élevé en altitude, et plus il y pleuvra, globalement. C'est ce que montre la figure 14 ci-dessous, qui présente la pluviométrie journalière de 4 stations (à proximité pour Jean-Lesage et Montmorency, et sur le BVRSC pour S027 et S901, qui sont respectivement situées à environ 1 km à l'est et au sud de l'exutoire du lac Saint-Charles, voir figure 3 et 9). La station S027 est à une altitude légèrement plus élevée que celle de la station S901, et les deux sont à une altitude comprise entre celle des stations de Jean-Lesage et Montmorency. Ces autres stations disponibles ne présentaient de valeurs que sur une partie de l'année 2006, et n'ont donc pas du tout été utilisées comme entrées dans le modèle.

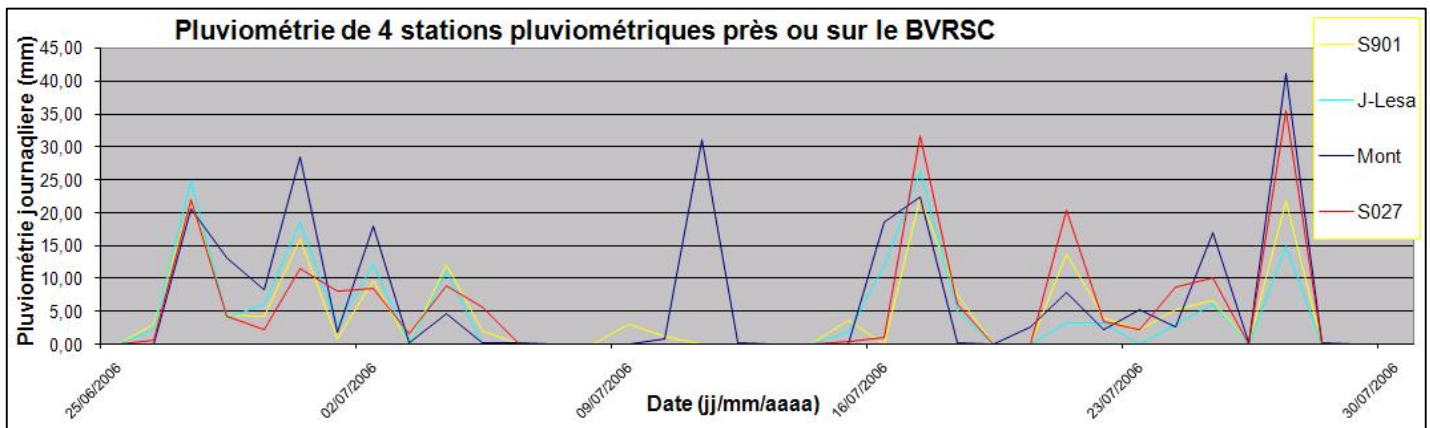
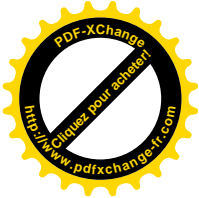
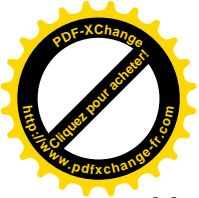


Figure n°14 : exemple de variabilité spatiale des pluies sur le BVRSC (période du 25/06/2006 au 30/07/2006)

A partir des bonnes valeurs de précipitations des deux stations Jean-Lesage et Montmorency, on a calé le coefficient « Plaps » de SWAT, coefficient qui définit l'augmentation de pluviométrie par kilomètre d'élévation, pour un jour pluvieux donné. Ce coefficient permet donc de rajouter une certaine valeur à la pluviométrie d'un sous-bassin, à partir de celle observée à une station, et des altitudes respectives de la station et du sous-bassin. Cette technique d'ajustement n'avait pas été employée précédemment car l'augmentation des précipitations par augmentation d'altitude était déjà comprise dans les valeurs d'ajustement des mois d'été, pour les bassins affectés à la station Jean-Lesage. Sauf que dans cette première partie, tous les sous-bassins étaient alors supposés être à la même altitude. Ici, chaque sous-bassin est affecté de sa propre altitude moyenne, obtenue à partir du MNT, et aura donc un ajustement de la pluviométrie qui lui sera propre. Le coefficient Plaps a été calé de la manière suivante : on essaye de « faire passer » la pluviométrie de la station Jean-Lesage à celle de la station Montmorency. Pour cela, et à partir des altitudes des deux stations (voir plus haut) et du coefficient Plaps, chaque jour où de la pluie tombe sur l'aéroport Jean-Lesage, on additionne à la pluviométrie qui y est observée la valeur de : $\text{Plaps}/1000 * (\text{altitude Montmorency} - \text{altitude Jean-Lesage})$, ce qui donne une valeur simulée de la pluviométrie à la station Montmorency à partir de celle de Jean-Lesage. On compare ensuite la somme des erreurs absolues (écart journalier entre les valeurs simulées et observées à la station



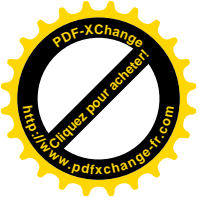
Montmorency, en valeur absolue) sur toute la gamme disponible des précipitations, puis on minimise cette somme à l'aide du solveur, en faisant varier le coefficient Plaps, qu'on doit définir dans SWAT. Evidemment, la somme des erreurs absolues n'est jamais nulle puisqu'il ne pleut pas toujours en même temps aux deux stations et que la correction n'est appliquée que quand il pleut sur l'aéroport Jean-Lesage. Le coefficient Plaps optimal obtenu est de 3,5 mm/km/jour pluvieux. Le tableau n°5 suivant présente les moyennes mensuelles observées de la pluviométrie totale des stations Jean-Lesage et Montmorency, et la pluviométrie de Jean-Lesage ajustée selon la technique précédemment décrite (qui correspond aussi à la pluviométrie simulée de la station Montmorency). Du point de vue du bilan annuel moyen, on voit que cet ajustement est correct. C'est donc celui qui sera finalement retenu, en conservant l'ajustement lié à l'hypothèse d'une sous-estimation des précipitations neigeuses (valeur journalière multipliée par 1,1, soit augmentation de 10% de la pluviométrie observée, et ce pour les mois de Novembre à Mars inclus, car il tombe généralement peu de neige au mois d'avril sur le secteur à l'étude).

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Somme
moy Mont	133,87	108,13	110,2	110,25	110,14	136,12	158,47	132,73	140,07	136,42	157,81	127,15	1561,35
moy JI no aj	89,17	67,16	77,01	91,02	96,35	118,89	129,49	110,06	124,32	115,94	102,77	84,77	1206,97
moy JL aj	123,5	95,66	104,97	117,48	124,72	146,31	159,67	135,67	151,36	145,36	135,33	117,52	1557,56

Tableau n°5 : moyennes mensuelles interannuelles et bilan annuel moyen interannuel observés et simulés

Les valeurs de ce tableau sont en mm. La ligne « moy Mont » correspond aux valeurs de la station Montmorency. « moy JI no aj » correspond aux valeurs non ajustées de la station Jean-Lesage, et la ligne « moy JL aj » aux valeurs ajustées de Jean-Lesage, ou simulées de Montmorency. L'hypothèse principale d'un tel ajustement est qu'il pleut plus si on se place à une altitude plus élevée, ce qui est en accord avec les observations du portrait du BVRSC. Etant donné qu'il pleut environ un jour sur trois à Québec, cela signifie, avec un coefficient « plaps » de 3,5, qu'il pleut environ 425mm de plus par km d'élévation supplémentaire et par an, ce qui est en accord avec les données de ce portrait qui indique qu'il pleut environ 330 mm de plus pour 750 m d'élévation supplémentaire, soit 452mm de plus par km d'élévation par an.

Enfin, les données relatives aux deux stations ont été « comblées » au maximum, c'est-à-dire qu'on a préféré remplacer les données manquantes à notre manière, plutôt que de laisser SWAT simuler lui-même la pluviométrie des jours où les données étaient manquantes. Puisqu'on disposait des valeurs des précipitations liquides et totales pour les deux stations, pour les jours où la température était supérieure à 1°C. environ (température sous-laquelle tombe de la neige), les données manquantes dans les précipitations totales ont été comblées par les valeurs de précipitations liquides. Pour les deux stations, lorsque la technique précédente n'était pas applicable (c'est-à-dire pendant les mois d'hiver, pour la station Jean-Lesage pour laquelle on ne disposait pas de toutes les précipitations liquides, ou tout simplement quand les données étaient manquantes pour les deux types de précipitations), on recoupait les informations des deux stations, c'est-à-dire qu'on appliquait à l'une les valeurs de l'autre, mais ajustées de la même manière que décrite précédemment. Ce procédé a permis par exemple de combler 136 lacunes de la série de précipitations journalières de la station Montmorency (sur 187 au départ, pour un total de 8521 jours de données). Finalement, les données fournies à SWAT présentaient donc peu de lacunes (uniquement présentes quand les données étaient manquantes pour les deux stations simultanément), avec des séries complètes à 99,45% pour les deux stations, sur la période de 1985 à 2008 (voir tableau n°1 pour les pourcentages initiaux, soit avant comblement des lacunes). La pluviométrie totale de 1985 à 2008 pour Jean-Lesage, les pluies moyennes de SWAT issues de cet ajustement « ultime », et Montmorency sont respectivement de 26786, 29497, et 34701 mm.



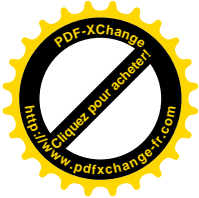
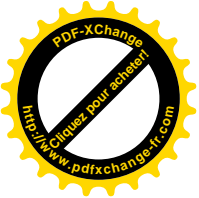
- Modélisation des propriétés du bassin-versant : valeurs de la pente

Dans SWAT, chaque sous-bassin est affecté d'une valeur de pente moyenne, qui sera la même pour chacune des URHs qui le composent, calculée à partir du Modèle Numérique de Terrain. Malgré que le MNT ait permis un tracé correct du réseau hydrographique, celui-ci a en revanche conduit à des valeurs de pente qui paraissent « faibles » par rapport à celles indiquées dans le portrait du BVRSC effectué par le [conseil du bassin de la rivière Saint-Charles \(2007\)](#), comme montré sur la figure 5 qui présente 4 classes de déclivité différentes. C'est à partir de cette figure qu'ont été manuellement ajustées les valeurs de la pente fournies au logiciel SWAT. À l'aide de cette figure 5 et d'une autre présentant la délimitation des sous-bassins versants du modèle comme la figure 12, et en recoupant les informations fournies par ces deux cartes, nous avons estimé la valeur de la pente de chaque sous-bassin du modèle, en prenant la valeur moyenne de chaque classe de déclivité, et en pondérant ces valeurs par le pourcentage approximatif d'occupation d'un sous-bassin que représentait chaque classe de déclivité. Malgré que cette technique soit très approximative, elle permet d'avoir des valeurs de pente plus élevées que celles du MNT (dont la résolution est faible pour faire confiance aux valeurs qui en découlent), et conserve la variabilité spatiale des valeurs de pente des sous-bassins du BVRSC. Plus tard, ces valeurs seront calées automatiquement à l'aide d'une variation par pourcentage commun à toutes, ce qui ajustera les valeurs pour augmenter les performances, tout en conservant des différences entre les sous-bassins.

- Modélisation des propriétés du bassin-versant : débit pompé pour l'AEP

Peu avant l'exutoire du bassin versant modélisé (voir figure 9), de l'eau est pompée dans la rivière Saint-Charles pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) de la ville de Québec. SWAT permet de prendre en compte ce type de pompage en retirant de l'eau de la rivière, mais, comme pour le premier type d'ajustement des pluies, il n'accepte que des valeurs moyennes pour chaque mois de débit prélevé, en $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$. Ce qui signifie que le débit pompé dans la rivière sera le même pour chaque jour d'un même mois de la simulation. Pour calculer ces moyennes mensuelles, nous disposons d'un fichier qui regroupait les quantités d'eau produite pour l'AEP (appelé aussi débit « net » pompé) pour chaque jour de la période du 1^{er} novembre 1999 au 8 mai 2007. Ce fichier présente également les quantités totales d'eau pompée (ou débit « brut » pompé) pour produire cette quantité « nette », mais uniquement à partir du 1^{er} janvier 2005. Pour reconstituer les valeurs du débit brut pompé sur la plus longue période possible (définie ci-dessus), on a mis en évidence la relation moyenne entre débits net et brut pompés sur la plage de données où étaient présents les deux types d'information. Celle-ci est la suivante :

$\text{Débit brut} = (1,13566483 \pm 0,06244316) * \text{débit net}$. Dès lors, on a pu reconstituer les valeurs de débit brut pompé sur la plage manquante (soit de 99 à 2005), avec les valeurs minimales, médianes et maximales pour ce débit brut pompé reconstitué. Un algorithme a ensuite été écrit pour calculer les débits mensuels moyens interannuels pompés (il y en a plusieurs car il y a le « net » et les 3 valeurs de « brut »). Puis, en fonction du nombre de jours dans chaque mois, on détermine finalement la valeur à fournir à SWAT, valeur différente pour chaque mois. À partir de l'analyse des critères de performance, nous avons gardé le type de valeur qui donnait la meilleure simulation, à savoir le débit brut médian pompé. Celui-ci varie entre 15 et $19,4 * 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$, selon le mois considéré (minimum en hiver, maximum en été). Le débit maximal pompé dans la rivière Saint-Charles (dans la simulation) est donc de l'ordre de $2,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est un débit important, donc absolument non négligeable.



- Choix des périodes de calage et de validation

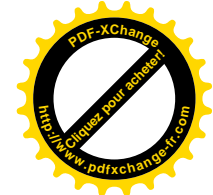
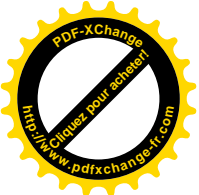
Ce chapitre a pour but de présenter les périodes sur lesquelles seront calés et validés les modèles, ainsi que les différents moyens à notre disposition pour effectuer une validation la plus complète possible du modèle SWAT « final » qui sera retenu.

En raison des données initialement disponibles (débits de 1985 à 2005 du point A sur la figure 3, c'est-à-dire l'exutoire global du bassin versant modélisé), il a au départ été choisi de caler les modèles sur la première moitié de la période disponible (donc de 1986 à 1995 car on garde la première année comme année de chauffe), puis d'effectuer la validation sur l'autre moitié, soit de 1996 à 2005 (on utilise alors 1995 pour la chauffe), en sachant qu'une inversion des périodes de calage/validation serait nécessaire si les performances de la simulation chutaient de manière importante sur la période de validation. On peut mentionner le fait qu'étant donné la longueur des périodes de calage et de validation, les critères d'efficacité retenus seront à priori bien représentatifs de la performance de la simulation, et ne seront pas dus uniquement à une « bonne » ou « mauvaise » année hydrologique, c'est-à-dire une année particulièrement facile ou difficile à simuler, respectivement. Le tableau n°6 ci-dessous présente les statistiques hydrométriques et pluviométriques des deux périodes :

variable	période	quantile 25%	quantile 50%	moyenne	quantile 75%	njourpluie
débit (m3/s)	calage (85-95)	1,64	4,26	8,51	10,50	/
	validation (96-05)	2,51	6,78	11,81	13,07	/
pluviométrie (mm/jour)	calage (85-95)	0,00	0,50	3,56	4,12	233
	validation (96-05)	0,00	0,55	3,38	3,42	240

Tableau n°6 : statistiques hydrométriques et pluviométriques des périodes de calage et de validation

Les quantiles représentent le pourcentage de valeurs sur la période spécifiée inférieure à la valeur mentionnée dans le tableau. Njourpluie représente le nombre moyen annuel de jours (par an) où il pleut sur la période considérée. On notera que ce nombre ne reflète pas la réalité en un point donné du BVRSC, car il est issu, ainsi que les statistiques pluviométriques du tableau, des précipitations moyennes dans la simulation avec le logiciel SWAT, qui fait intervenir les données de deux stations pluviométriques. Se recoupant entre elles, les données des stations font qu'il y a plus de jours où il pleut sur le BVRSC dans la simulation qu'en réalité. Néanmoins, ces valeurs « simulées » des pluies reflètent au mieux possible la réalité (voir partie sur l'ajustement des pluies), et sont donc interprétables d'un point de vue statistique. On remarque que les débits de la période de validation sont globalement plus élevés que ceux de la période de calage, alors que la pluviométrie ne semble pas suivre cette tendance. On pourrait attribuer cela au fait que durant les 30 dernières années, le BVRSC n'a cessé de voir ses surfaces urbanisées augmenter, ce qui augmente le ruissellement et donc les débits, de manière générale, puisque moins d'eau est alors retenue et est disponible pour l'évapotranspiration ou tout simplement pour la consommation par les organismes vivants. Le modèle aura donc à priori des difficultés à « passer » d'une période à l'autre.



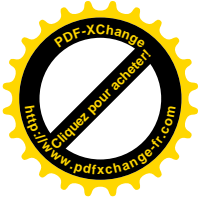
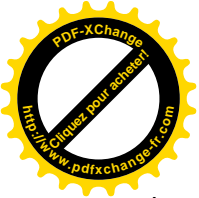
Malgré qu'une extension jusqu'à Mars 2008 des données de débits disponibles ait ultérieurement été effectuée, ce choix d'utilisation des périodes sera conservé pour les 3 modèles utilisés afin de pouvoir comparer les performances de toutes les simulations effectuées, même si celles-ci ont été menées jusqu'à Mars 2008 une fois les données supplémentaires récupérées. L'extension des données jusqu'à l'année 2008 servira en fait à simuler les débits de la rivière Nelson (voir figure 3) qui sont disponibles de début 2006 à Mars 2008, afin d'avoir un critère de validation supplémentaire pour le modèle SWAT. Il reste à préciser que pour la rivière Jaune, des calages automatiques ont été réalisés avec le modèle SWAT, sur la période de 1985 à 1994 au début, puis de 1985 à 1993 ensuite, en raison de la difficulté du modèle à simuler les débits de fonte de la neige au printemps 1994, ce qui limitait l'efficacité de la simulation sur les années précédentes. Pour la rivière Jaune, on n'a pas retenu de période de validation, mais l'exutoire global incluant ses débits et ce dernier étant soumis à la validation, ce choix n'est pas dénué de sens, car c'est essentiellement la simulation des débits de l'exutoire global qui nous intéresse.

Pour disposer d'un autre critère de validation, nous avons estimé les débits de la rivière des Hurons à partir de ceux observés sur la rivière Jaune, avec et sans pondération faisant intervenir les précipitations des deux bassins, comme le montre la formule suivante : $Q_e = Q_{obs} * P_e / P_{obs}$. Q_e et Q_{obs} sont les lames d'eau (en mm) estimées et observées évacuées par les exutoires des bassins de la rivière des Hurons et de la rivière Jaune, respectivement, et pour un jour donné. P_e et P_{obs} sont les précipitations totales de 85 à 2008 (en mm) du bassin des Hurons et Jaune, respectivement, de sorte que la pondération, elle, ne dépende pas du jour considéré. Ici, on obtient un rapport égal à 1,15, ce qui signifie que dans la simulation avec SWAT, il pleut un peu plus sur le bassin de la rivière des Hurons que sur celui de la Jaune, ce qui est normal puisque le premier est davantage affecté à la pluviométrie de la station Montmorency, supérieure à celle de l'aéroport Jean-Lesage qui est affectée au bassin de la rivière jaune. Dans le cas où on n'utilise pas de pondération, le rapport P_e / P_{obs} n'est pas utilisé dans la formule précédente. Pour transformer les débits ainsi estimés en $mm.jour^{-1}$ en $m^3.s^{-1}$, il faut les multiplier par $S * 1000 / 86400$, avec S la surface du bassin versant considéré en km^2 .

De plus, le filtre des écoulements surfaciques et souterrains décrit en page 32 de ce rapport sera appliqué à l'ensemble de la chronique des débits simulés à l'exutoire global, pour voir si on obtient les mêmes résultats qu'avec les débits observés. Ce critère de validation pourra être appliqué aux simulations issues des 3 différents modèles, contrairement aux autres critères supplémentaires, valables pour SWAT uniquement. Enfin, les débits sortant du lac Saint-Charles ont été estimés par Amélie TURCOTTE, sur la base des travaux de [Marie PARE-BOURQUE \(2007\)](#), en fonction des niveaux d'eau du lac et de la position des vannes relâchant le débit. On pourra alors confronter cette simulation avec la nôtre.

- Choix des critères d'efficacité retenus

Pour juger de l'efficacité des simulations produites, plusieurs critères ont été retenus. Ceux communs aux 3 modèles sont les suivants : les nombres de Nash calculés sur les débits et les racines des débits, et un critère de Bilan. Le modèle SWAT fera l'objet d'une évaluation de plus



basée sur le nombre de Nash calculé avec le logarithme népérien des débits et sur un critère d'erreur absolue. Le réseau de Neurones sera évalué sur le critère d'erreur absolue, en plus des critères communs aux trois modèles. Ces différents critères sont présentés ci-dessous.

$$CR1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Nombre de Nash sur les débits

$$CR2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2}$$

Nombre de Nash sur la racine des débits

$$CR3 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \epsilon) - \ln(Q_{calc,i} + \epsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \epsilon) - \ln(\overline{Q_{obs}} + \epsilon))^2}$$

Nombre de Nash sur le logarithme népérien des débits

$$CR4 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|}{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}|}$$

critère d'erreur absolue sur les débits

$$CR5 = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}} \right|$$

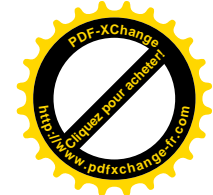
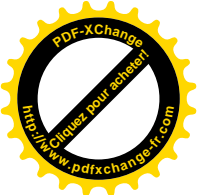
Critère de bilan

Q _{obs,i}	débit observé au jour i	
Q _{calc,i}	débit simulé au jour i	
n	nombre de jours total de la simulation	
ε	moyenne des débits observés /40	
$\overline{Q_{obs}}$	moyenne des débits observés	
$\sqrt{\overline{Q_{obs}}}$	moyenne des racines des débits observés	

Tous les critères ici présentés obéissent à la même loi : plus le critère est proche de 1, meilleure est la simulation. S'il est négatif, alors on simule mieux en prenant la moyenne des débits observés pour simuler le débit à chaque pas de temps qu'avec la simulation issue du modèle.

- Ajustement manuel des paramètres

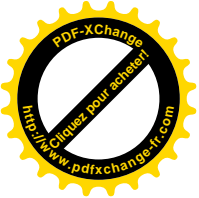
Le calage des paramètres d'un modèle peut être réalisé de manière manuelle ou automatique, ou par une combinaison des deux. Lorsque le modèle SWAT était à peu près correctement configuré (les idées ayant conduit à la configuration finale du modèle telle que présentée dans cette partie sur la méthodologie de SWAT n'ayant pas été eues dès le début), on a commencé à réaliser des simulations. La performance de la simulation était alors initialement mauvaise (la plupart des critères d'efficacité étaient négatifs). Le fait de réaliser un ajustement manuel des paramètres a plusieurs raisons. Tout d'abord, c'est pour « faire connaissance » avec le modèle. On cherche à comprendre quels sont les paramètres qui jouent le plus sur le débit, et on tente de les modifier, un par un, pour modifier les grandes caractéristiques du débit simulé de manière voulue et réfléchie. Par exemple, si le débit simulé suit globalement bien le débit observé mais lui est presque toujours supérieur (décalage vertical sur l'hydrogramme), il faudra augmenter les pertes par infiltration vers l'aquifère profond. Si le débit simulé est décalé horizontalement sur



l'hydrogramme par rapport à celui observé, il faudra augmenter ou diminuer les coefficients de frottement de Manning-Strickler, qui permettent de freiner ou d'accélérer les écoulements de surface. Un autre exemple est le « degré de nervosité » du débit simulé : si celui-ci présente uniquement des pics très fins et très élevés lors d'épisodes pluvieux, il faudra diminuer le coefficient « surlag » dans SWAT, qui permet de limiter la proportion de l'écoulement de surface qui arrive dans les cours d'eau, en un temps donné. Ce coefficient est fondamental et permet de « lisser » les courbes des débits simulés, ou au contraire d'accentuer leur variabilité. Ce premier calage manuel a ainsi permis de faire passer le nombre de Nash de -0,4 à 0,4 environ, en jouant essentiellement sur une dizaine de paramètres affectant l'ensemble du bassin, et en une cinquantaine de simulations, ce qui représente un rendement en termes de gain de performance par simulation effectuée bien supérieur à celui des calages automatiques, qui nécessite parfois 15000 simulations pour augmenter le nombre de Nash de 0,2 seulement (par exemple). Le seul problème était qu'une simulation, manuellement effectuée, nécessite parfois une heure, le temps de changer les paramètres, de faire tourner la simulation, que le logiciel écrive les résultats et qu'on les interprète, alors que celle-ci peut durer moins de 5 minutes en calage automatique. Outre la simple volonté de vouloir comprendre manuellement l'influence des différents paramètres sur le débit simulé, un ajustement manuel permet de faire un calage réfléchi, c'est-à-dire qu'on modifie les paramètres en fonction d'un effet souhaité sur le comportement du débit en sortie, et non pas simplement pour augmenter les performances de la simulation, qui peut très facilement conduire à un jeu de paramètre efficace du point de vue des performances mais complètement aberrant au niveau du sens physique des paramètres. Un calage manuel se veut donc réfléchi et réaliste. Il permet de limiter par la suite la gamme de variation des paramètres lors du calage automatique, pour diminuer le temps de calcul et limiter les variations des paramètres dans des gammes de valeurs réalistes.

De plus, un ajustement ou calage manuel sera parfois nécessaire à l'issue d'un calage automatique, pour faire revenir à des valeurs plus cohérentes des valeurs jugées sorties de leur gamme de variation « réaliste ». En effet, on ne peut pas trop restreindre les plages de variation de certains paramètres, auquel cas la performance à l'issue du calage automatique ne sera pas la meilleure possible. Il faut de plus avoir conscience qu'il est des paramètres pour lesquels on n'a aucune idée de l'ordre de grandeur réaliste sur la zone à l'étude, et qu'un calage automatique sera par conséquent toujours employé, car il permet de plus de trouver une combinaison optimale.

Enfin, l'ajustement manuel des paramètres est lui aussi impératif, puisque tous les paramètres du modèle ne sont pas calables automatiquement et qu'on ne dispose pas de moyen pour les estimer « précisément » (sauf pour ceux décrits dans la modélisation des différents types de propriétés du BVRSC). Parmi ceux qu'il a fallu ajuster manuellement, on dénote par exemple le coefficient de rugosité dans les cours d'eau secondaires d'un sous-bassin, ou à la surface même du sous-bassin, la perméabilité du fond des cours d'eau secondaires, l'épaisseur de neige requise pour une couverture homogène, la quantité initiale de biomasse, la perméabilité du fond des lacs, le marnage des lacs et des zones humides entre saison sèche et période de crue, et la profondeur maximale des racines. C'est en fait une succession de calages automatiques et manuels qui permettent de converger vers des valeurs optimales pour ces paramètres, qu'on fixe par la suite.



- Analyse de sensibilité et calage automatique des paramètres

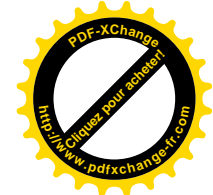
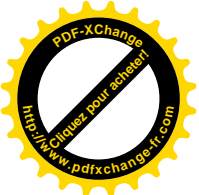
Dans SWAT, on peut effectuer une analyse de sensibilité des paramètres qui influent le plus sur le débit. Cette analyse est faite automatiquement. Elle regroupe des paramètres prédéfinis, qui pourront ensuite être calés automatiquement. Le tableau 7 ci-dessous présente les paramètres dont l'influence sur le débit est analysée, ainsi que leur ordre d'importance (de 1 à 27, du plus important au moins important).

1- Cn2	utilisé pour le calcul du taux de ruissellement	15- Ssubbsn	longueur maximale des ruisseaux pendant la pluie
2- Surlag	coefficient de rétention	16- Gwqmn	haut. min d'eau dans l'aquifère pour écoulement vers la rivière
3- Smfmn	densité minimale de la neige	17- rchrg_dp	% d'eau de l'aquifère superficiel qui percole vers le profond
4- Timp	poids température jour actuel pour fonte neige	18- Ch_k2	perméabilité du fond du cours d'eau principal
5- Smfmx	densité maximale de la neige	19- sol_alb	albedo de la surface du sol
6- Smtmp	température de fonte de la neige	20- Gw-delay	variable relative à l'écoulement dans l'aquifère superficiel
7- Canmx	haut. max de pluie interceptée par végétaux	21- GW-revap	variable limitant la migration d'eau de l'aquifère vers la ZNS
8- Sol_z	profondeur du sol	22- Ch-n	coefficient de rugosité du cours d'eau principal du sous-bassin
9- Sftmp	température sous laquelle tombe de la neige	23- revap-mn	haut. min d'eau dans l'aquifère pour reprise par évaporation
10- alpha_bf	constante de récession de l'écoulement de base	24- epco	facteur limitant la reprise d'eau du sol par les plantes
11- slope	pente	25- tlaps	perte de température par km d'élévation
12- sol_k	perméabilité du sol	26- Blai	développement foliaire maximal
13- sol_awc	eau dispo : porosité totale - de drainage	27- biomix	efficacité de l'homogénéisation annuelle du sol
14- esco	facteur limitant la reprise par évaporation dans le sol		

Tableau n°7 : ordre d'importance des paramètres influençant le débit et calables automatiquement.

Pour avoir une description complète de ces paramètres (signification physique et unité), voir le tableau n°10 plus bas et se référer à l'article de *S.L. NEITSCH ET AL. (2004)*, disponible à l'adresse suivante : <http://www.brc.tamus.edu/swat/> , rubrique documentation (fichier : Swat 2005 input/output file documentation). Le calage automatique a été effectué en prenant tous ces paramètres en compte. Bien sûr, certains, comme alpha_bf, auront une gamme de variation très réduite car on est supposé connaître leur « véritable » valeur. D'autres auront une gamme de variation réduite en raison de la pertinence physique de leur valeur : par exemple, Tlaps sera compris entre -4 et -12 °C./km, Smtmp sera compris entre 0 et 5°C., Sftmp entre 0 et 5°C. également, en veillant à ce que Sftmp soit inférieure à Smtmp, etc...

On a fait varier certains paramètres par pourcentage par rapport à la valeur initialement fournie au logiciel, ce afin de conserver le caractère hétérogène d'un même paramètre, en fonction de la position spatiale par exemple (pour la pente et la longueur maximale des petits cours d'eau créés en temps de pluie), du type de végétation (pour blai, biomix, et Cn2) ou en fonction de la couche de sol considérée (pour tous les paramètres liés au sol). Les autres ont varié par valeur lors du calage, et seront donc les mêmes quel que soit le sous-bassin considéré pris en compte lors du calage. Malgré que le classement ici présenté puisse varier légèrement d'une simulation à l'autre, les 15 premiers paramètres restent globalement toujours les 15 premiers. On remarque l'importance des paramètres liés à la neige, ce qui est compréhensible étant donné les débits extrêmement forts de printemps, par rapport au reste de l'année, débits dus à la fonte de la neige. Or ces débits de printemps influencent considérablement l'efficacité d'une simulation. De plus, l'analyse de sensibilité, comme le calage automatique, étant effectués par rapport à l'erreur

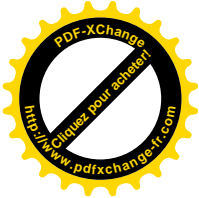
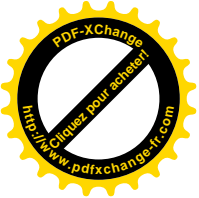


totale entre débit simulé et observé (ce qui revient au même que de l'effectuer par rapport au nombre de Nash calculé sur les débits), les débits forts influencent davantage l'efficacité de la simulation que les faibles, ce qui explique l'importance des paramètres liés à la neige. Nous n'avons pas tenté de caler le modèle SWAT par rapport au nombre de Nash calculé sur la racine des débits, pour tenter de bien modéliser les forts débits comme les faibles, en un seul calage. Enfin, un calage différent en fonction de la saison (hiver et printemps ensemble, puis été et automne ensemble) n'a pas été effectué, notamment en raison d'un manque de temps. Il est montré par [Etienne LEVESQUE et al. \(2007\)](#), lors d'une étude sur des bassins proches du BVRSC et donc soumis au même type de climat, que ce protocole n'augmente pas les performances sur la période hivernale mais les augmente considérablement sur la période estivale. Or, comme il est montré ici dans les résultats du tableau 8 (nombre de Nash sur le Logarithme népérien des débits), le modèle donne des résultats satisfaisants en été lors des étiages, notamment grâce à la détermination de la constante de récession de l'écoulement de base qui a eu lieu. Ce deuxième type de calage ne conduira donc pas forcément à de meilleurs résultats. Enfin, on précise qu'un calage automatique nécessite environ une semaine pour être effectué. En tout, 7 calages automatiques ont été réalisés, la configuration du modèle ayant progressivement varié au cours du stage, notamment après la découverte qu'on disposait uniquement des précipitations liquides de la station Montmorency, ou car la variation par pourcentage des paramètres n'était pas encore connue, ou encore car on avait trouvé de meilleures estimations de certaines variables non calables automatiquement. On ne présentera que les résultats complets (calage et validation) du modèle « final » créé, mais on fournira les performances obtenues en calage pour les autres modèles (voir résultats et sources d'erreur, plus bas).

- Création du modèle « final »

Etant donné la similarité entre les sous-bassins de la rivière des Hurons et de la rivière Jaune (voir figure 3), tant du point de vue topographique (voir figures 4 et 11) avec des altitudes moyennes de 337 et 321m respectivement, géologique et climatique, en considérant de plus le fait que ces bassins sont côte à côte géographiquement, une première stratégie pour la conception du modèle « final » visait à transférer les paramètres obtenus par calage automatique sur le bassin de la rivière Jaune à celui de la rivière des Hurons, puis à fixer ces paramètres lors du calage automatique effectué sur l'exutoire global du BVRSC modélisé, pour obtenir les meilleures performances possibles en différents points du BVRSC. Malheureusement, cette technique n'a pas fourni de bons résultats lors de la comparaison entre débits simulé et approximé de la rivière des Hurons, mais nous ne pouvons savoir si c'est l'approximation par la méthode de la proximité géographique du débit de la rivière des Hurons, ou la méthode de transfert des paramètres du bassin de la rivière Jaune à celui de la rivière des Hurons qui est « mauvaise ».

Par conséquent, ce transfert n'a pas été effectué pour le modèle « final ». Ce dernier a été obtenu en fixant les paramètres du sous-bassin de la rivière Jaune obtenus après un calage automatique, puis en effectuant un autre calage automatique basé à la fois sur l'exutoire de la rivière Jaune et sur l'exutoire global du BVRSC modélisé, car certains paramètres affectant l'ensemble du bassin, on leur a laissé la possibilité de varier pour obtenir de bons résultats sur l'exutoire global, mais en demandant au modèle de chercher à maximiser les performances de la simulation au niveau des deux exutoires.



b) Résultats et sources d'erreur

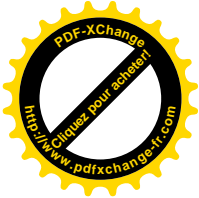
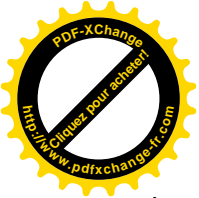
calibration							%aq riv alpha_bf fr1 fr2			Validation : Nombre de Nash sur les débits					
sim:	N Q	N VQ	N LnQ	Err abs	Bilan	ref:	0.0314	0.65	0.48	hurnopon	hurpon	rivjaune			
2000	0.57	0.37	-0.32	0.39	0.69	0.02	0.1231	0.64	0.45	0.44	0.42	0.59			
2100	0.49	0.32	-0.33	0.34	0.56	0.28	0.121	0.57	0.37	0.35	0.36	0.48			
2200	0.62	0.62	0.63	0.45	0.98	0.34	/	/	/	0.36	0.36	/			
3100	0.65	0.53	0.09	0.46	0.88	0.42	0.095	0.66	0.48	0.55	0.56	0.56			
3200	0.66	0.68	0.6	0.5	0.93	0.25	/	/	/	0.52	0.46	/			
4200	0.67	0.71	0.68	0.52	0.99	0.20	/	/	/	0.06	0.26	/			
ULT j	0.6	0.67	0.66	0.45	0.96	?	/	/	/	0.04	0.26	/			
ULT g	0.65	0.67	0.57	0.49	0.95	0.27	0.0722	0.7	0.54	idem	idem	/			
validation ULT g (exutoire global)							%aq riv alpha_bf fr1 fr2			Nelson			Debit lac		
critère	N Q	N VQ	N LnQ	Err abs	Bilan	ref:	0.0434	0.57	0.38	N Q	N VQ	corel	N Q	N VQ	corel
valeur	0.62	0.53	0.057	0.45	0.85	0.28	0.078	0.66	0.48	0.26	0.23	0.3	-1.86	-1.25	0.05

Tableau n° 8 : résultats des différents calages automatiques effectués avec SWAT, en calibration et validation

	calage sur	fichier pluies	type ajust	bio pr	taille lacs	s/subsn	slope	sol	par homo ?
sim2000	exut glob	mauvais	aucun	aucune	mauvaise	non calé	non calé	non calé	oui
sim2100	exut glob	mauvais	1er	insuffisante	mauvaise	non calé	non calé	non calé	oui
sim2200	exut Jaune	mauvais	1er	insuffisante	mauvaise	non calé	non calé	non calé	oui
sim3100	exut glob	mauvais	1er	bonne	bonne	calé	calé	non calé	oui
sim3200	exut Jaune	mauvais	1er	bonne	bonne	calé	calé	non calé	oui
sim4200	exut Jaune	bon	2ème	bonne	finale	calé	calé	calé	oui
Sim ULT	les deux	bon	2ème	bonne	finale	calé	calé	calé	non

Tableau n° 9 : différences principales entre les calages automatiques, précisant (dans les colonnes de gauche à droite et respectivement) l'exutoire sur lequel on a calé les débits, le type de fichier de pluies utilisé pour la station Montmorency, le type d'ajustement des précipitations employé (voir plus haut), le caractère qualitatif de biomasse produite, la fidélité par rapport à la réalité des tailles des lacs, les trois paramètres calés ou non, en plus de tous les autres calés du tableau 7, et le caractère homogène ou non sur tout le bassin versant des paramètres de la simulation (pour le calage ultime, ils sont différents entre le bassin de la rivière Jaune et le reste du BVRSC).

Le tableau 8 présente les résultats en calibration des différents calages automatiques. En plus des critères de performance en calibration, trois aspects de validation sur la période de calibration sont présentés (partie supérieure droite du tableau) : les nombres de Nash calculés sur les débits, pour ceux approximés de la rivière des Hurons, sans et avec pondération (hurnopon et hurpon, respectivement), et pour ceux de la rivière Jaune. La partie gauche du tableau présente les performances des calages en calibration, et du modèle ultime du point de vue de l'exutoire global (ULT g) en validation, au travers des différentes colonnes (de gauche à droite et respectivement) : les nombres de Nash calculés sur les débits, racines des débits, Logarithme népérien des débits, les critères d'erreur absolue et de bilan, le pourcentage du débit de l'exutoire apporté par l'aquifère lors de la simulation, et des valeurs calculés par le filtre de séparation des écoulements appliqué aux débits simulés : la valeur de la constante de récession de l'écoulement de base et les deux pourcentages théoriques de la contribution au débit total par l'aquifère. Pour ces trois dernières valeurs, celles calculées à partir des débits observés sont précisés sur la ligne mentionnée « ref ». Enfin, la partie inférieure droite présente les deux autres critères de validation, uniquement analysables sur la période de validation étant donné les périodes disponibles pour les valeurs de référence (voir tableau 1). Tous les calages n'ont pas fait l'objet d'une simulation sur la période de validation, car il fallait pour cela reconfigurer le logiciel pour étendre les valeurs de précipitations calculées par ce dernier sur la période de validation, puisque



les précipitations utilisées n'étaient pas toujours les mêmes (voir tableau 9 ci-dessus), or le temps a manqué pour effectuer cette démarche, mais cela n'aurait pas influencé le fait de retenir le dernier calage comme simulation « ultime », car il correspond à la meilleure définition possible des propriétés du BVRSC et présente par ailleurs des performances satisfaisantes.

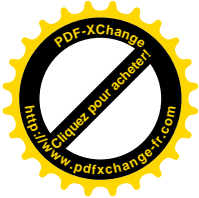
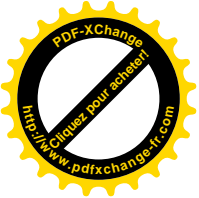
On peut voir dans ce tableau que, globalement et au fil des calages automatiques, les performances de la simulation augmentent, sauf au niveau des débits simulés sur la rivière des Hurons, ce qui s'explique par le fait que les derniers calages ont été l'objet de l'obtention de paramètres « précis » sur un bassin donné, qui n'étaient alors pas adaptés aux autres (les performances sur le débit de la rivière des Hurons, pour le calage 4200, ont été obtenues en transférant les paramètres obtenus sur la rivière Jaune à ceux de la rivière des Hurons). L'efficacité de la simulation diminue peu entre calage et validation, du point de vue du nombre de Nash calculé sur les débits, ce qui justifie la non-inversion des périodes de calage/validation). On peut enfin constater que le calage « ultime » représente la meilleure combinaison possible entre performances sur les débits de la rivière Jaune et de l'exutoire global, et que sur la période de validation, les débits simulés par SWAT du lac Saint-Charles ne sont pas du tout satisfaisants par rapport aux débits approximatés par Amélie TURCOTTE, et que ceux simulés de la rivière Nelson sur le même période ne sont pas satisfaisants non plus. Donc, pour le calage ultime, la plus grande qualité de SWAT, qui est de pouvoir simuler les propriétés du bassin versant en différents points de celui-ci, est presque totalement perdue, ce qui confère a priori à SWAT un intérêt dès lors bien moindre, pour ce travail de modélisation hydrologique ici effectué.

sim/param	Cn2	Surlag	smfmm	Timp	smfmx	smtmp (°C.)	canmx (mm)	sol_z (mm)	sftmp (°C.)	alpha_bf	slope	sol_k (mm/h)	sol_awc	esco
2000	96	0.063	2.01	0.286	3.01	1.6	0	1000	1.4	1	/	41.1	0.27	0.97
2100	94	0.094	3.371	0.6	2.062	2.58	5.94	1000	1.26	0.85	0.21	170.32	0.198	0.563
2200	87	0.069	1.017	0.7	3.43	1.87	5.48	1000	0.85	0.884	0.36	92.44	0.229	0.584
3100	78.69	0.172	2.11	0.38	3.02	1.03	0.0094	1000	1.49	0.04	0.0175	29.49	0.344	0.83
3200	51.15	0.057	1.18	0.844	3.06	1.42	0.0198	1000	0.51	0.976	0.47	10.44	0.175	0.015
ULT jaune	63-96,6	0.497	1.92	0.7	2.69	2.16	3.887	50-200,4	0.59	0.3	0,069-0,24	31-65	0,05-0,25	0.441
ULT global	52-80	0.41	2.096	0.79	2.996	1.8	4.3369	47-189	0.5	0.0594	0,04-0,25	12-25	0,07-0,35	0.139

Tableau n° 10 : valeurs des 14 paramètres les plus importants issus des différents calages automatiques (en rouge : paramètres dont la valeur semble irréaliste) : on dénote la grande variabilité de ces paramètres entre les différents calages.

Malgré les mauvaises performances de SWAT du point de vue des critères de validation, celles au niveau des exutoires global et de la rivière Saint-Charles restent satisfaisantes, mais pas « bonnes ». On peut énumérer les principales sources d'erreur ci-dessous, qui permettent d'expliquer une partie de la limitation de l'efficacité de la simulation du débit du BVRSC modélisé :

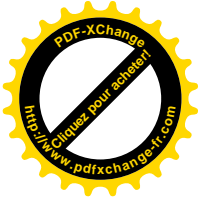
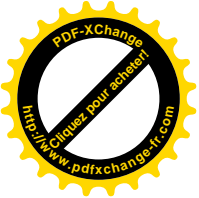
Outre le manque de données disponibles (débits et précipitations, essentiellement), manque surtout spatial mais aussi temporel, quantitatif et qualitatif (manque de données concernant les propriétés du sol, de l'aquifère, ou les débits relâchés au lac Saint-Charles), les valeurs probablement erronées des débits d'hiver (l'eau circule alors sous une couche de glace et est sous pression, la section de la rivière varie beaucoup dans le temps, ce qui rend très délicate l'estimation hivernale du débit), et les difficultés liées au propre contexte local, comme des précipitations et une couverture neigeuse (épaisseur, densité) très localement variables, on dénote des difficultés de modélisation liées à l'anthropisation (qui modifie artificiellement le cycle de l'eau par les nombreux puits privés pour l'irrigation et l'AEP, les nombreux barrages, le stockage de grandes quantités de neige déblayée en des points précis, la déforestation continue au profit de l'urbanisation... ce qu'on ne prend pas en compte dans le modèle) et à la structure même du modèle SWAT (équations régissant les processus physiques incomplètes et/ou imparfaites, notamment celles faisant intervenir la neige, nombre de paramètres trop grand : leurs valeurs sont très difficilement mesurables localement et donc calées automatiquement, or un jeu peut-être optimal du point de vue des performances mais ne pas refléter du tout la réalité).



6- Modèle du réseau de Neurones

a) Méthodologie

Le protocole suivi pour simuler le débit de la rivière Saint-Charles est le même que celui décrit par [Mohamed H.NOUR \(2007\)](#), à savoir qu'on cherche d'abord le jeu d'entrées optimal, puis qu'on optimise ensuite la structure du réseau de neurones. Pour la première étape, une matrice regroupant toutes les valeurs de 85 à 2005 des différentes variables proposées au réseau de Neurone a été créée. Initialement, cette matrice comptait 35 variables différentes. Parmi elles, on trouvait les précipitations de la station Jean-Lesage, ajustées selon le tableau n°3 (1^{ère} version de l'ajustement) et non ajustées. Chaque type de précipitations a donné naissance à quatre variables, puisque pour chacune des deux variables représentant la pluviométrie, nous avons décalé de 1, 2, ou 3 jours les données dans la matrice, afin d'avoir, pour un jour de la simulation donné, la pluviométrie du jour même, et des 1, 2 et 3 jours précédents. Ce décalage temporel de certaines des variables de la matrice a pour but de prendre en compte le délai entre le moment où tombe l'eau sur le bassin et celui où elle sort à l'exutoire, comme expliqué par [François ANCTIL et al. \(2008\)](#). Ici, malgré que le temps de concentration du BVRSC soit probablement bien inférieur à 3 jours étant donné sa superficie (340 km² pour le bassin modélisé), nous avons tout de même multiplié les entrées pour en proposer le maximum au réseau de neurones (RN), afin que ses performances ne soient pas limitées par le choix d'un décalage temporel trop faible des données. Outre les précipitations, le débit moyen interannuel de l'exutoire du BVRSC modélisé a été fourni au RN. On ne voulait pas fournir au modèle le débit observé du jour précédent pour pouvoir comparer ses performances avec celles de SWAT, qui lui ne dispose pas d'une information aussi précieuse. Parmi les autres entrées du RN sont présentes des données relatives à la température pour améliorer la simulation du débit en période de fonte des neiges comme l'ont étudié [Annie-Claude PARENT et al. \(2007\)](#), qui conseillent notamment l'utilisation de la variation de température entre jour précédent et actuel comme variable donnée pour le jour actuel, variation éventuellement limitée aux valeurs positives. Sont présentes également des données d'ETP, obtenues par la méthode de Mc GUINNESS ou de Mc GUINNESS modifiée par Ludovic OUDIN. On dispose ainsi des valeurs journalières « précises » et journalières moyennes interannuelles d'ETP simulée, malgré que fournir cette variable à un modèle qui simule un débit n'augmente pas beaucoup ses performances, comme l'ont montré [Ludovic OUDIN et al. \(2005\)](#), qui recommandent de plus l'utilisation de la valeur moyenne interannuelle, qui donne d'aussi bons résultats qu'une valeur variant continuellement dans le temps. Pour multiplier les entrées, une variable donnée a souvent été transformée en plusieurs autres variables comme par exemple la moyenne interannuelle ou la variation par rapport au jour précédent issue des valeurs observées ou de la moyenne interannuelle (auquel cas il s'agit d'une variation moyenne interannuelle), comme c'est le cas pour les données de Température, de pluviométrie et de débit moyen interannuel, qui ont de plus fait l'objet, pour les deux derniers, d'un décalage temporel. Pour les valeurs interannuelles calculées, il a fallu faire attention aux années bissextiles et non bissextiles, lorsqu'on remplissait la matrice. Enfin, on trouve dans les entrées fournies ici au RN deux autres types de données : un couple de valeurs, se répétant d'une année à l'autre mais différent pour chaque jour considéré,



sensé représenter le type de saison dans lequel on se situe pour un jour donné. Il s'agit des valeurs de $\cos(2 \cdot \pi \cdot t / T)$ et $\sin(2 \cdot \pi \cdot t / T)$, avec t le jour julien (de 1 à 365) considéré et $T=365$. Leur combinaison donne un caractère unique à chaque jour de l'année considéré, caractère qui varie de manière progressive tout au long de l'année. Le dernier type de données fournies est un indice d'humidité du sol calculé à partir des précipitations, ETP, épaisseur considérée du sol et taux de remplissage initial. Cet indice est conseillé par [François ANCTIL et al. \(2004\)](#). Il a été calculé pour 5 sols d'épaisseurs différentes, allant de 100 à 1200mm d'épaisseur. Par la suite, on a rajouté les données de débit pompé dans la rivière pour l'AEP, les précipitations issues de la simulation « finale » sous SWAT, et les précipitations « totales liquides » (PTL) dont l'obtention est décrite dans la méthodologie de GR4J.

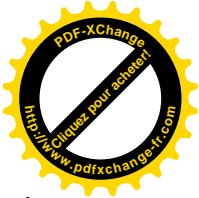
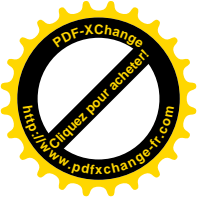
La meilleure combinaison d'entrées est alors recherchée pour un modèle ayant 5 nœuds dans la couche cachée, et avec 25 répétitions (ce qui donne généralement de bons résultats, voir cours de [François ANCTIL \(2008\)](#) sur l'analyse et la modélisation de séries environnementales à l'aide du RN, dispensé à l'Université LAVAL), selon le protocole suivant : on demande au modèle de tester toutes les entrées une par une, on garde celle donnant les meilleurs résultats (en se basant sur un compromis arbitraire entre résultats en calibration et validation) puis on relance le modèle qui cherche alors la deuxième « meilleure » entrée, qui, combinée à la première, donne les meilleurs résultats, on sauvegarde la deuxième, et ainsi de suite jusqu'à ce que les performances ne soient plus améliorées. Chaque recherche d'entrée nécessite environ une nuit pour être effectuée. Il en est de même pour la recherche du meilleur nombre de nœuds cachés, qui vient une fois que le jeu optimal pour 5 nœuds est déterminé : on fixe les entrées au jeu optimal, puis lance le RN qui cherche la meilleure simulation pour un nombre de nœuds allant de 1 à 20. Cette deuxième partie basée sur l'optimisation de la structure du RN est très importante, comme le précise [Asaad Y. SHAMSELDIN \(1997\)](#).

b) Résultats

période	critère	avec matrice initiale (35 entrées)		avec PSWAT	avec QUTE, et PTL
		20 nœuds	3 noeuds	3 noeuds	3 nœuds
CALIBRATION	Nash Q	0.826	0.73	0.739	0.7557
	Nash \sqrt{Q}	0.835	0.765	0.768	0.7643
	Bilan	0.998	0.999	0.999	0.9983
	Mae	2.768	3.404	3.357	3.2984
VALIDATION	Nash Q	0.576	0.62	0.627	0.6838
	Nash \sqrt{Q}	0.517	0.636	0.654	0.6797
	Bilan	0.872	0.972	0.988	0.9633
	Mae	4.223	3.922	3.887	3.6692

Tableau n°11 : résultats du Réseau de Neurones : performances des trois principales simulations

La simulation avec matrice initiale a suivi la méthodologie présentée plus haut. Elle a conduit à retenir 11 entrées, dont le débit et l'ETP (formule de Ludovic OUDIN) moyens interannuels, l'indice de saison, la variation de Température, le taux d'humidité du sol pour des épaisseurs de 100, 200 et 1200 mm, et les pluies de Jean-Lesage non ajustées aux trois précédents pas de temps. On a ensuite remplacé ces précipitations par celles « bonnes » (finales) et moyennes de SWAT (colonne « PSWAT » du tableau 11). La dernière colonne a été obtenue en fournissant « instinctivement » au RN, en plus des trois premiers types d'entrées de la simulation



précédente, les PTL1 (meilleures ici que les PTL2, voir ci-dessous), le débit pompé pour l'AEP, et le meilleur taux d'humidité du sol pour cette configuration, soit celui pour une épaisseur de 100 mm. On remarque que le RN n'a en effet plus besoin des données de température pour fournir une simulation correcte, puisque la neige est alors « déjà fondue » et que l'ETP est fournie. La dernière configuration, pourtant instinctive en grande partie, donne les meilleurs résultats en validation, ce qui nous intéresse le plus puisqu'on veut à priori simuler des débits qui nous sont contemporains. De ce point de vue, les meilleures simulations étaient toujours obtenues pour 3 nœuds cachés.

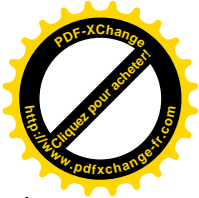
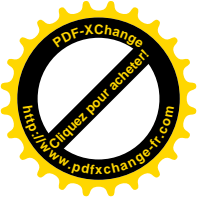
7- Modèle GR4J

a) Méthodologie

A partir des données de précipitations totales de l'aéroport Jean-Lesage (que le modèle préfère au format non ajusté par rapport à la première version de l'ajustement comme décrit dans le tableau n°3), et des données d'évapotranspiration (ETP) moyennes interannuelles (obtenues à partir des températures moyennes interannuelles, avec la méthode de Mc GUINNESS ou de Ludovic OUDIN, le choix n'influant pas sur les performances), le modèle GR4J présentait de médiocres performances, qui s'expliquent par le fait que celui-ci ne prend pas en compte la rétention des précipitations sous forme de neige effectuée par le BVRSC en période hivernale. Nous avons alors tenté de modifier ces précipitations, pour ne donner à GR4J que des valeurs de précipitations liquides (on enlève les précipitations neigeuses des précipitations totales, voir ci-dessous), auxquelles on rajoute la hauteur de neige fondue, calculée par le logiciel SWAT dans le modèle « final » au pas de temps journalier, ce qui donne une variable qu'on nommera « précipitations totales liquides » (PTL) par la suite. Le modèle montrait alors de bien meilleures performances. Voici comment on a procédé pour créer cette variable PTL : pour certaines périodes (de 85 à 95 pour Jean-Lesage et de 85 à 2003 pour Montmorency), nous disposons des valeurs de précipitations liquides observées pour les deux stations. Nous avons alors cherché une relation entre les précipitations liquides et les précipitations totales pour chacune des stations, afin d'étendre les données de précipitations liquides sur toute la période étudiée (de 85 à 2005), à partir des précipitations totales dont nous disposons de manière quasi-complète sur toute la période d'étude. Cette relation a été établie de la manière suivante : sous EXCEL, on définit une cellule variable qui correspond à la variable « sftmp » de SWAT, soit la température sous laquelle tombe de la neige. Ainsi, les précipitations liquides étaient égales aux précipitations totales lorsque la température moyenne sur le BVRSC était supérieure à cette valeur, et égales à 0 sinon. On a ensuite calé cette variable à l'aide du solveur, en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts entre les précipitations liquides observées et simulées. Cette technique a fourni les résultats suivants, présentés dans le tableau n°11 ci-dessous :

Station/variable	sftmp (°C.)	écart annuel (%)	Crit err absolue	Nb Nash	coef corel
Jean-Lesage	-0,7	-1,5	0,91	0,94	0,94
rappel : SWAT:	0,5 / 0,8				
Montmorency	-0,13	5,5	0,86	0,85	0,86

Tableau n°11 : efficacité de la simulation des pluies liquides, et valeurs obtenues pour « sftmp »



On peut voir dans ce tableau, d'une part, que malgré les différences obtenues au niveau de la valeur de sftmp (température sous laquelle tombe de la neige), ces valeurs restent d'un même ordre de grandeur acceptable, même si dans la réalité il tombe souvent de la neige avec des températures légèrement positives. L'écart annuel moyen (écart annuel en % dans le tableau 11) entre les sommes des précipitations liquides simulées et observées montre un bilan relativement correct de la simulation, avec une légère sous-estimation des précipitations pour la station Jean-Lesage et une surestimation pour celle de Montmorency. Les critères d'erreur absolue, du nombre de Nash et du coefficient de corrélation (qui sont respectivement les colonnes suivantes du tableau 11) montrent ici que la simulation est bonne dans les deux cas. Celle de la station Montmorency est probablement moins bonne car elle s'étend sur une période beaucoup plus longue (19 ans au lieu de 10,7) que celle de la station Jean-Lesage, ce qui contribue à amplifier l'erreur cumulée de la simulation. Pourtant, cette technique étant simplement utilisée pour combler les vides des données de précipitations liquides, il est certain que celles de la station Montmorency seront globalement beaucoup plus proches de la réalité puisqu'on dispose des bonnes valeurs sur quasiment toute la période d'étude.

Une fois ces données de précipitations liquides comblées au maximum pour les deux stations, on récupère le débit de fonte des neiges de SWAT, obtenu dans la dernière simulation, qui prend en compte le meilleur ajustement des pluies présenté plus haut dans ce rapport. Ces données sont en mm par jour pour chaque sous-bassin. A partir de la surface de chaque sous-bassin, on calcule le débit de fonte moyen à l'aide d'une pondération par l'importance relative des surfaces par rapport à la surface totale du BVRSC, et à l'aide d'un algorithme spécialement conçu pour remplir cette tâche. Une pondération des précipitations est également effectuée pour trouver les valeurs des précipitations liquides moyennes sur le BVRSC, car on sait à quelle station pluviométrique est affilié chaque sous-bassin. En additionnant ensuite les deux types de données (précipitations liquides comblées ou entièrement simulées, et débit de fonte moyens), on obtient les « précipitations totales liquides » (PTL1 et PTL2, respectivement) qui seront fournies à GR4J et aux derniers essais effectués avec le RN.

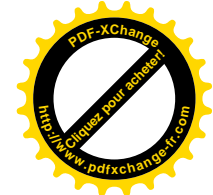
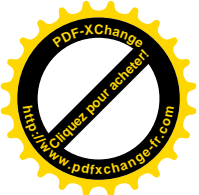
b) Résultats

		PTL1	PTL2			PTL1	PTL2
calage de 86 a 95	nash Q	78.80	79.80	calage de 96 a 05	nash Q	67.30	68.20
	nash√Q	77.00	77.90		nash√Q	67.60	68.10
	nash ln(Q)	63.90	64.90		nash ln(Q)	59.90	59.90
	bilan	101.30	101.40		bilan	97.50	97.60
validation de 96 a 05	nash Q	66.90	67.70	validation de 86 a 95	nash Q	78.40	79.40
	nash√Q	66.50	66.90		nash√Q	77.80	78.80
	nash ln(Q)	57.60	57.50		nash ln(Q)	66.40	67.60
	bilan	102.20	103.40		bilan	96.60	95.70

On remarque que ce sont ici les PTL2 qui donnent les meilleurs résultats (contrairement au RN). D'autre part, inverser les périodes de calage et validation ne modifie pas beaucoup les performances des deux périodes, qui restaient toujours

Tableau n°12 : performances avec GR4J (calage sur les débits) ; les valeurs sont ici en %.

inchangées quelle que soit le type d'ETP considérée. On notera enfin que la meilleure simulation retenue avec GR4J est celle effectuée avec un calage sur les racines des débits, car elle offre un meilleur compromis entre simulation des débits d'étiage et de ceux de crue.



8- Conclusion

On a montré les meilleurs résultats que nous avons réussi à obtenir avec chacun des trois modèles utilisés. Les performances du RN et celles de GR4J sont très proches en validation avec un léger mieux pour GR4J en calibration, bien qu'une amélioration possible des performances avec le RN soit encore fortement probable, étant donné que la méthodologie globale n'a pas été respectée pour les dernières simulations (ce qui pourra être fait ultérieurement). Les performances du modèle SWAT sont en-dessous de celles des autres modèles, du point de vue de l'exutoire global. Néanmoins, ce modèle conserve un intérêt certain puisqu'il permet de simuler des débits en différents points du BVRSC. Même si cela ne fonctionne pas bien ici pour les sous-bassins qui n'ont pas fait l'objet d'un calage, c'est le seul modèle de l'étude offrant cette possibilité. Avec plus de données (on va doucement dans ce sens), il est certain que les performances de la simulation de SWAT (et des autres modèles) pourraient encore être améliorées.

D'autre part, il reste certains points à explorer dans cette étude, comme par exemple pour SWAT : de relancer un calage automatique avec un transfert des paramètres du bassin de la rivière Jaune à celui des Hurons (et en fixant ces paramètres lors du calage). Puisque les performances d'un tel transfert sont calculées à partir d'approximations des débits de la rivière des Hurons, elles ne permettent pas de juger de la pertinence d'une telle méthodologie, qui pourrait toutefois s'avérer bénéfique du point de vue de l'efficacité de la simulation du débit de l'exutoire global ou du débit relâché au lac Saint-Charles. De plus, toujours pour SWAT, on pourrait tenter de caler sur les racines des débits, ou d'effectuer un calage différent pour chaque grande saison (hiver/été) pour améliorer la simulation des débits d'étiage (valable pour le RN et GR4J également), puisque ceux-ci constituent le phénomène le plus important de la problématique globale du projet en définissant les périodes qui présenteront le moins de dilution de la pollution, donc celles pendant lesquelles les débordements des bassins de rétention devront être évités.

Enfin, on devine à l'aide des tableaux 8 et 10 que la variabilité des paramètres du modèle SWAT ne reflète pas du tout l'incertitude existant sur les débits simulés. C'est le problème de l'équifinalité, qui consiste en le fait qu'on peut avoir les mêmes débits simulés avec des jeux de paramètres complètement différents, auquel cas on ne sait lequel représente au mieux la réalité (idéalement, il faudrait essayer tous ces jeux et évaluer leurs performances au niveau des différents critères de validation du modèle SWAT, existant en différents points du BVRSC et définis plus haut). Avoir un jeu de paramètres le plus réaliste possible sera en effet essentiel dans la modélisation ultérieure sous SWAT de la qualité de l'eau, qui nécessite alors des processus aussi fidèles que possible à la réalité, c'est-à-dire les « bons » paramètres, pour espérer lui être elle-aussi fidèle. Il faudra d'abord prouver ce problème de l'équifinalité pour cette étude (ce qui a déjà été fait dans d'autres cas), puis envisager alors de décrire l'incertitude existant au niveau des débits simulés au moyen de plusieurs modèles hydrologiques plutôt qu'avec différents jeux de paramètres sous SWAT, et de tout mettre en œuvre pour, de manière générale, « obtenir de bons résultats pour de bonnes raisons », comme l'explique [James W. KIRCHNER \(2006\)](#). Il reste beaucoup de travail à effectuer pour atteindre ce but ultime lié à la modélisation sous SWAT.



9- Références (par ordre d'apparition dans le rapport) :

- Conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007). *L'eau, ça vous concerne aussi. Portrait du bassin de la rivière Saint-Charles*.
- André MUSY (2005). *Cours « Hydrologie générale »*, laboratoire d'Hydrologie et aménagements (ISTE/HYDRAM), disponible à l'adresse : <http://echo.epfl.ch/e-drologie/>
- Ph. BOIS, Ch. OBLED, I. ZIN (2007). *Introduction au traitement de données en Hydrologie*, Institut polytechnique de Grenoble, INPG/ENSHMG. Pages 1 à 4.
- Le site d'Environnement CANADA : http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html
- Le site du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/>
- P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
- S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS (2005). *Soil and Water assessment tool theoretical documentation, version 2005*, Agricultural Research Service / Blackland research center. Temple, TEXAS, USA.
- Asaad Y. SHAMSELDIN (1997), *Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling*, Journal of Hydrology 199 : 272 – 294.
- F. ANCTIL, M. FILION, J. TOURNEBIZE (2008), *A neural network experiment on the simulation of daily nitrate-nitrogen and suspended sediment fluxes from a small agricultural catchment*. Groupe de recherche en génie des eaux, dpt de génie civil, Université LAVAL, Québec, QC, CANADA.
- F. ANCTIL (2008). *Analyse et modélisation de séries environnementales*, cours dispensé à l'Université LAVAL, dpt de génie civil
- C. PERRIN (2002). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. La Houille Blanche, n°6/7, 84-91.
- M. DI LUZIO, R. SRINIVASAN, J.G. ARNOLD, S.L. NEITSCH (2002). *Arcview interface for Swat 2000 User's Guide*, Blackland research and extension center, Temple, TEXAS.
- S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, R. SRINIVASAN, J.R. WILLIAMS (2004). *Soil and Water Assessment tool Input/Output File Documentation, version 2005*, ARS/BRC, Temple, TEXAS.
- É. LÉVESQUE, L. LAMONTAGNE, A. VAN GRIENSVEN, P. A. VANROLLEGHEM et F. ANCTIL (2007). *Méthodologie pour l'adaptation de données physiographiques canadiennes au modèle de qualité de l'eau SWAT*, grp de recherche en génie des eaux, dpt génie civil, Université LAVAL, Québec, QC.
- E. LÉVESQUE, F. ANCTIL, A. VAN GRIENSVEN & N. BEAUCHAMP (2007), *Evaluation of SWAT model's streamflow simulation for two small watersheds under snowmelt and rainfall*, grpe de recherche en génie des eaux, dpt génie civil, Université LAVAL, Québec, QC.
- J.G. ARNOLD, P.M. ALLEN, R. MUTTIAH, and G. BERNHARDT (1995). *Automated base flow separation and recession analysis techniques*. Ground Water 33(6): 1010-1018.
- M. PARE-BOURQUE (2007). *Création et analyse de séries temporelles de débit en cinq endroits sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles*, Université LAVAL, Québec.
- M. H. NOUR (2007). *Artificial Neural Networks Modelling of streamflow and Water Quality in Ungauged Watersheds : Investigating the Potential of Remote Sensing information*. University of Alberta, Edmonton, ALBERTA. Pages 129-179.
- A.-C. PARENT, F. ANCTIL, V. CANTIN, and M.-A. BOUCHER (2007). *Neural Network Input Selection for Hydrological Forecasting affected by Snowmelt*, dpt de génie civil, Université LAVAL, Québec.
- L. OUDIN, C. MICHELA, F. ANCTIL (2005). *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?* JOURNAL of HYDROLOGY 303 : 275-289 ;
- F. ANCTIL, C. MICHEL, C. PERRIN, V. ANDREASSIAN (2004). *A soil moisture index as an auxiliary ANN input for streamflow forecasting*, Journal of Hydrology 286 (2004) : 155–167.
- J.W. KIRCHNER (2006). *Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology*, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 42