Étude de méthodes de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques et application à un bassin versant non-jaugé au Mexique

PAR

Mélissa BRETON-DUFOUR

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLEÀ L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 21 AVRIL 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mélissa Breton-Dufour, 2017

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Annie Poulin, directeur de mémoire
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Richard Arsenault, codirecteur de mémoire
Rio Tinto Aluminium, Division Énergie Électrique

François Brissette, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Rabindranarth Romero Lopez, examinateur externe
Département de génie Civil de l'Université Veracruzana

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 JANVIER 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu ma directrice Annie Poulin, qui a su respecter mon désir de faire de la recherche, mais avec un caractère plus concret. Le projet du Mexique était pour cette raison parfait puisqu'il a su me motiver à continuer en ayant eu l'opportunité de bien saisir pourquoi des recherches en hydrologie étaient essentielles. Merci d'avoir été là, à distance lorsque j'étais au Mexique, mais sans jamais me donner l'impression d'être à l'autre bout du monde lorsqu'on se parlait, d'avoir été à ton bureau, au téléphone ou encore derrière ton ordinateur lorsque je commençais à paniquer seule devant mes difficultés associées au travail dans un environnement inconnu. Tu as su me donner jusque ce qu'il fallait d'aide pour me prouver que j'étais capable de réussir dans n'importe quelle situation.

Je remercie Richard Arsenault, mon codirecteur, qui a très bien su s'intégrer au projet dès la minute où il est arrivé. Ton expertise dans ce domaine m'a été d'une aide très précieuse et essentielle, même lorsque tu t'es exilé dans le Nord. J'apprécie énormément le temps que tu m'as consacré, même si ce n'était que par texto ou courriel très brefs, ils m'ont toujours été d'une grande aide. Tu as été et resteras un modèle de réussite pour moi.

Toute la gang du DRAME, de loin ou de près, qui m'ont permis de lâcher mon fou, de répondre à mes questions rapides, d'aller prendre une bière ou d'aller dîner. Toutes les discussions que nous avons eues m'ont fait énormément cheminer et vont me manquer quand je quitterai. Anna, Émilie, Martine, Mariana, Magali, la plus grosse et belle gang de filles de l'ÉTS, merci pour tout. Merci particulier à Jean-Luc, qui malgré le fait que je chiale sans cesse qu'il n'arrête pas de faire du bruit, a toujours eu du temps pour moi et surtout m'a convaincu de faire ma maîtrise avec cette gang-là. Merci aussi de faire en sorte que la gang du DRAME reste toujours unie et bruyante. Merci à Michel Baraer qui m'a guidé et ma fournir les plans de ma station de mesure qui a été installé au Mexique. Sans ton aide, cette station n'aurait en aucun cas pu être construite et installée.

Merci aussi à l'équipe de l'université Veracruzana au Mexique qui m'a accueilli durant trois mois, qui ont été ma famille pendant ce temps, loin de Montréal. Mariana, Sara, Rabi, los

mandos un grande abrazo y espero a regresar pronto a Xalapa para verlos. Sabes hay un lugar por ustedes en mi casa para siempre.

Merci à mon amoureux, Rafaël, qui a toujours été là, qui m'a toujours poussé à ne jamais abandonner, mais aussi à toujours donner le maximum de moi-même. Merci de m'avoir laissé vivre cette expérience qui incluait un stage au Mexique, beaucoup de travail à la maison et surtout un stress que je n'aurais pas pensé avoir. Merci d'avoir mis de côté, du moins jusqu'à maintenant, certains rêves pour que je puisse réaliser mon objectif. Après ces années passées ensemble, je ne suis pas du tout inquiète sur la quantité d'obstacle que nous saurons contourner ensemble.

Finalement, merci à mon père et ma mère, qui n'ont jamais hésité à m'appuyer peu importe le projet de fou que j'avais. Vous n'avez même pas hésité à me visiter lorsque j'étais au Mexique, m'encourageant d'autant plus lorsque j'étais à distance. Dès que j'avais besoin d'aide pour quoi que ce soit, vous étiez toujours présents et m'avez toujours aidé du mieux que vous pouviez. Merci me m'avoir donné tous les outils nécessaires pour y arriver et d'avoir cru en moi, même quand moi je n'y croyais plus. J'essaierais à l'avenir de vous rendre ce que vous m'avez donné jusqu'à date, même si je doute que cela soit possible et de vous appeler plus que 5 minutes par semaine, comme il m'arrivait de le faire par manque de temps. Merci ma sœur, de toujours m'encourager et d'avoir acceptée de me voir moins souvent puisque j'étais souvent prise à la dernière minute par mon projet.

ÉTUDE DE MÉTHODES DE RÉGIONALISATION DES PARAMÈTRES DES MODÈLES HYDROLOGIQUES ET APPLICATION À UN BASSIN VERSANT NON-JAUGÉ, AU MEXIQUE

Mélissa BRETON-DUFOUR

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce projet de recherche, l'objectif était de déterminer les apports en eau à un bassin versant mexicain qui n'est pas muni de jauges hydrométriques, c'est-à-dire où aucune donnée de débit n'est disponible. Sans de telles données, la modélisation hydrologique traditionnelle sur des bassins versants dits non-jaugés n'est pas réalisable. Pour y parvenir, quatre méthodes d'estimation des débits aux sites non-jaugés sont généralement utilisées. Ces quatre méthodes sont connues sous l'appellation de « méthodes de régionalisation » et permettent le transfert des données à partir de bassins jaugés vers des bassins non-jaugés. Malgré plusieurs études réalisées sur le sujet, aucune méthode n'a été identifiée comme étant la plus performante à grande échelle. Trois méthodes ont été retenues dans le cadre des présents travaux, lesquelles reposent sur le transfert de paramètres des modèles hydrologiques. La quatrième méthode, soit la régression linéaire multiple, s'est souvent montrée inapte dans les conditions telles que celles qui sont rencontrées au Mexique et n'a pas été considérée.

À la connaissance de l'auteure de ce mémoire, le Mexique n'a pas encore été l'objet de telles études; ainsi, une première partie de ces travaux a été consacrée à tester l'applicabilité des trois méthodes choisies sur un grand secteur se trouvant dans la partie centrale du Mexique. Cet objectif a permis d'identifier l'approche à privilégier pour la régionalisation sur le bassin versant non-jaugé visé par cette étude, soit celui de Naolinco. Ce bassin est d'importance pour l'économie locale et régionale et est aux prises avec des problèmes de qualité et de quantité d'eau.

Ce projet a permis de découvrir que les méthodes de régionalisation ne performent pas très bien au Mexique, majoritairement dû à la qualité variable des données sur lesquelles les simulations hydrologiques sont basées. Certaines parties du secteur à l'étude ont cependant démontré des résultats très satisfaisants en régionalisation des paramètres par proximité spatiale avec un nombre de bassins donneurs supérieur à un, et ce peu importe lequel des trois modèles hydrologiques considérés (MOHYSE, GR4J et HSAMI) est utilisé. Il faut mentionner que pour les bassins sur lesquels les modèles hydrologiques étaient en mesure de bien reproduire les débits observés (étape de calibration), les performances en régionalisation étaient généralement très bonnes, démontrant ainsi l'importance qui doit être accordée au choix du modèle hydrologique utilisé et au nettoyage initial des données de base.

Mots clés : modélisation hydrologique, bassin versant non-jaugé, régionalisation, similitude physique, proximité spatiale

STUDY OF HYDROLOGICAL MODEL PARAMETER REGIONALIZATION METHODS AND APPLICATION TO AN UNGAGED CATCHMENT IN MEXICO

Mélissa BRETON-DUFOUR

ABSTRACT

The current project aims to determine and recreate historic flows on a Mexican basin that is not equipped with a hydrometric gauge. Such catchments, referred to as ungauged catchments, are impossible to model adequately because of a lack of reference to calibrate hydrologic models. To overcome this problem, methods to estimate streamflow on ungauged sites were developed. These methods, aptly named "regionalization" methods, attempt to transfer information from gauged sites in the same region to the ungauged site in order to estimate streamflow values. Four methods are typically used and provide different results. Unfortunately, no single method is consistently better than the others on all sites. Therefore this study compares three of the four methods which are based on hydrological model parameter transfer. The fourth method, based on multiple linear regressions, was not considered due to being historically inaccurate in conditions facing the catchment in this study.

Since, to the author's knowledge, no regionalization study has ever been performed in Mexico, the first part of the project was to apply and compare the regionalization methods in the study region, namely in central Mexico. This allowed finding the method which was most likely to succeed on the target site. The site is the Naolinco basin in Mexico which is a local and regional economic powerhouse and is currently subject to water quality and quantity problems.

The findings of this research project show that regionalization methods in general are not applicable to catchments in Mexico, mostly due to the poor hydrometeorological network and data quality. Some regions were found to be more robust to regionalization, with the spatial proximity regionalization method slightly edging out the others and when multiple donor catchments were used. This holds true for all three models used (MOHYSE, GR4J and HSAMI). It is important to note that in cases where model calibration was successful, regionalization approaches were generally good. This shows that it is essential to carefully select the hydrological model and ensure that the model input data is as error-free as possible.

Keywords: hydrological modeling, ungauged watershed, regionalisation, spatial proximity, physical similarity

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 3
1.1 Modélisation hydrologique 3
1.1.1 Classification selon le degré de spatialisation 4
1.1.2 Classification selon la structure du modèle 5
1.1.3 Modélisation hydrologique au Mexique 7
1.2 Études de régionalisation 8
1.2.1 Considérations générales liées à la régionalisation 8
1.2.2 Méthodes dépendantes du modèle hydrologique 10
1.2.2.1 Régionalisation par régression linéaire multiple 11
1.2.2.2 Proximité spatiale 12
1.2.2.3 Similitude physique 14
1.2.2.4 Approche intégrée 17
1.2.2.5 Régionalisation à donneurs multiples 17
1.2.3 Régionalisation indépendante du modèle hydrologique 18
1.2.3.1 Mise à l'échelle simple par un indice topographique 19
1.2.3.2 Détermination du débit par un rapport des aires 19

CHAPITRE 2 SECTEUR À L'ÉTUDE 21
2.1 Localisation 21
2.2 Données hydrométéorologiques 26
2.3 Données physiographiques 29
2.4 Description détaillée du bassin versant de Naolinco de Victoria 33

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 37
3.1 Survol de la méthodologie 37
3.2 Acquisition et nettoyage des données 39
3.2.1 Manipulation des données brutes 39
3.3 Description des modèles hydrologiques 42
3.3.1 MOHYSE 43
3.3.2 GR4J 43
3.3.3 HSAMI 44
3.4 Calibration 44
3.5 Régionalisation 46
3.5.1 Régionalisation par proximité spatiale 47
3.5.2 Régionalisation par similitude physique 47
3.5.3 Régionalisation intégrée 48
3.5.4 Combinaison des bassins versants donneurs et nombre de donneurs optimal 48
3.5.5 Transposition de site non-jaugé par rapport des superficies 49
3.6 Application des résultats sur le site non-jaugé de Naolinco 50

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES 53
4.1 Analyse des données de base 53
4.2 Calibration.....58
4.3 Régionalisation par proximité spatiale.....63
4.4 Régionalisation par similitude physique.....64
4.5 Régionalisation intégrée.....70
4.6 Nombre de bassins versants optimal.....73
4.7 Application des résultats sur le bassin Naolinco.....76

CHAPITRE 5 DISCUSSION 81
5.1 La confiance dans les données hydrométéorologiques de base 81
5.1.1 Changements dans le répertoire des données hydrométriques 83
5.2 La pertinence d'une étape de validation avant la régionalisation 83
5.3 Différences dans les dates de disponibilité des données entre les bassins versants jaugés et non jaugés 85
5.4 L'accès aux données physiques et morphologiques 86
5.5 La sélection intelligente des bassins donneurs de paramètres sur la base des performances en calibration.....87
5.6 La taille de la base de données de bassins versants pour l'essai de régionalisation par bassins pseudo non-jaugés 88
5.7 La régionalisation au Mexique est-elle possible? 89
5.7.1 L'utilisation de méthodes de régionalisation complexes remplace-t-elle les méthodes simples pour la détermination des débits sur des bassins versants non-jaugés? 90
5.7.2 Le choix du modèle hydrologique influence-t-il les conclusions en régionalisation? 91
5.8 Le pas de temps de la simulation a-t-il un impact sur les résultats obtenus?.....92
5.9 L'application des conclusions sur un bassin versant non jaugé du Mexique 93

CONCLUSION.....95

ANNEXE I REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES 3 MODÈLES HYDROLOGIQUES UTILISÉS.....97

ANNEXE II STATISTIQUES COMPLÈTES DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DE CHACUN DES BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE.....101

ANNEXE III STATISTISQUES DES PERFORMANCES DE LA RÉGIONALISATION PAR PROMIXITÉ SPATIALE.....113

ANNEXE IV STATISTISQUES DES PERFORMANCES DES BASSINS VERSANT À L'ÉTAPE DE CALIBRATION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES 117

ANNEXE V STATISTISQUES DES PERFORMANCES DE LA RÉGIONALISATION PAR SIMILITUDE PHYSIQUE.....121

ANNEXE VI STATISTIQUES DES SIMULATIONS DE RÉGIONALISATION PAR PROXIMITÉ SPATIALE POUR DES DONNEURS MULTIPLES.....143

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....165

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Distribution spatiale des bassins versants étudiés en fonction de l'état où leur exutoire se retrouve 23

Tableau 2.2 Statistiques générales sur les caractéristiques physiques, climatologiques et morphologiques des bassins versants du secteur à l'étude 25

Tableau 2.3 Description et regroupement des unités édaphologiques incluant l'annotation utilisée dans les différentes sections à venir 30

Tableau 2.4 Description des utilisations du sol 32

Tableau 2.5 Caractéristiques hydrométéorologiques et physiques du bassin versant de Naolinco.....35

Tableau 3.1 Qualificatifs associés aux valeurs du coefficient de Nash-Sutcliffe 45

Tableau 4.1 Équivalence entre les valeurs du critère de performance NSE et celles de la FO.....58

Tableau 4.2 Statistiques sur le critère de performance NSE pour les différentes calibrations des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE sur les 91 bassins versants étudiés.....60

Tableau 4.3 Statistiques sur les performances des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE en régionalisation par proximité spatiale, lorsque les 91 bassins versants à l'étude sont considérés à tour de rôle comme pseudo non-jaugés.....64

Tableau 5.1 Comparaison des performances en périodes de calibration et de validation en considérant les nombres de bassins pour diverses plages de valeurs du critère NSE 85

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Schéma de la méthode de proximité spatiale pour le transfert de paramètres d'un bassin versant jaugé vers un bassin versant non-jaugé ..13

Figure 1.2 Schématisation de la régionalisation par similitude physique, dans le cadre du transfert de paramètres de bassins versants jaugés vers des bassins versants non-jaugés 15

Figure 2.1 Carte du Mexique représentant le secteur à l'étude ainsi que les bassins versants étudiés.....22

Figure 2.2 Carte du relief du Mexique 24

Figure 2.3 Zones climatiques du Mexique selon la classification de Koppen 26

Figure 2.4 Carte des précipitations moyennes annuelles pour chaque bassin versant à l'étude.....27

Figure 2.5 Carte des lames de ruissellement moyennes annuelles selon les stations hydrométriques des débits non-reconstruits 28

Figure 2.6 Répartition spatiale des unités édaphologiques sur le territoire mexicain.....31

Figure 2.7 Répartition spatiale de l'utilisation du sol sur le territoire mexicain.....33

Figure 2.8 Localisation du bassin versant de Naolinco, dans le secteur d'Actopan.....34

Figure 3.1 Schéma de l'ensemble des étapes de la méthodologie du projet.....38

Figure 3.2 Étapes de modélisation réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS pour arriver à la modélisation de bassins versants spécifiques puis aux découpages des caractéristiques descriptives de chacune des aires de drainage.....40

Figure 3.3 Exemple d'application de la méthode des polygones de Thiessen pour le calcul de moyenne des données météorologiques pour le secteur de la région hydrographique de Papaloapan, dans l'état de Veracruz.....42

Figure 3.4 Région hydrologique d'Actopan qui servira pour la transposition des débits par la méthode du rapport des superficies pour la combinaison des bassins 28188, 28030, 28105, 28086 et 28108 ainsi que 28133, 28134, 28125 et 28003 50

Figure 3.5 Région hydrologique de Panuco qui servira à tester la méthode de transposition des débits par la méthode du rapport des superficies pour les combinaisons 26280, 26296 et 26249 ainsi que 26430, 26267 et 26224 51

Figure 4.1 Exemple de débit aberrant dans les stations hydrométriques à l'étude 54

Figure 4.2 Exemple de cassure évidente dans la prise de mesure d'une station hydrométrique 55

Figure 4.3 Exemple des données de base du bassin versant #27001 où la concordance des précipitations et des débits est bonne. 56

Figure 4.4 Exemple de séries de données issues du bassin versant #18348 où la précipitation ne concorde pas bien avec les crues ou les étiages 57

Figure 4.5 Boîtes à moustaches présentant les résultats de la FO pour la calibration sur l'ensemble des 91 bassins versants à l'étude, à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE; la ligne rouge représente le seuil pour juger une calibration comme bonne (FO > 0,71) 59

Figure 4.6 Répartition spatiale des valeurs de NSE en calibration sur les 91 bassins versants étudiés pour les modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE avec l'ensemble des simulations dont les performances sont inférieures à 0.1 sont de couleur pâle; la carte au bas à droite montre la localisation du secteur à l'étude sur le territoire du Mexique 61

Figure 4.7 Performance des modèles hydrologiques sur les différents bassins versants en fonction de la superficie des bassins, la ligne pointillée rouge représentant la limite pour qu'une simulation soit considérée comme bonne 62

Figure 4.8 Boîtes à moustaches du critère FO pour la méthode de régionalisation par proximité spatiale à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE, pour l'ensemble des 91 bassins versants à l'étude pour un seul donneur 63

Figure 4.9 Corrélation entre les différentes unités édaphologiques en fonction de la superficie occupée par chacune; l'échelle de couleurs indique les degrés de corrélation 65

Figure 4.10 Boîtes à moustaches montrant les résultats pour le critère FO obtenus pour les différentes simulations en régionalisation par similitude physique à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE et en fonction des différents descripteurs utilisés pour le transfert des paramètres pour un seul bassin versant donneur.....67

Figure 4.11 Analyse Kruskal Wallis pour les différents types de descripteurs physiques pour chacun des trois modèles hydrologiques pour tous les bassins pseudo non-jaugés avec un seul bassin versant donneur.....68

Figure 4.12 Analyse Kruskal Wallis pour les trois méthodes de régionalisation intégrée (méthodes 1 à 3) et pour la régionalisation par proximité spatiale (méthode 4), tous modèles hydrologiques confondus, pour un seul bassin versant donneur 71

Figure 4.13 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations par les trois méthodes de régionalisation intégrée (méthodes 1 à 3) et par la méthode de proximité spatiale(méthode 4), à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE.....72

Figure 4.14 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations en régionalisation par proximité spatiale avec des nombres de bassins versants donneurs variant de 1 à 15, à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE.....74

Figure 4.15 Variation des valeurs maximales et médianes du critère FO pour la régionalisation par proximité spatiale à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE, en fonction du nombre de bassins versants donneurs.....75

Figure 4.16 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations en régionalisation par proximité spatiale avec des nombres de bassins versants donneurs variant de 1 à 15, à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE, lorsque seulement les simulations dont les performances étaient supérieures à NSE=0 ont été considérées. 76

Figure 4.17 Seuil de retenue d'eau sur la rivière Naolinco pour le soutirage de l'eau...78

Figure 4.18 Station de mesure des niveaux d'eau installée sur le parcours de la rivière Naolinco 78

Figure 4.19 Simulation des débits sur le bassin versant de la rivière Naolinco en utilisant une moyenne arithmétique des séries de débit obtenues suite au transfert de paramètres suivant la méthode de régionalisation par proximité spatiale; cinq donneurs ont été considérés pour le modèle MOHYSE, et six donneurs ont été considérés pour le modèle de GR4J et sept donneurs ont été considérés pour le modèle HSAMI 79

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CICESE	Centre de recherche scientifique et d'enseignement supérieur d'Ensenada
CLICOM	Base de données climatologiques nationales du Mexique
CONABIO	Sistema Nacional De Información Sobre Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FO	Fonction objectif
GR4J	Génie rural à 4 paramètres journaliers
IAHS	Association Internationale des Sciences Hydrologiques
IMTA	Institut Mexicain des Technologies de l'eau
INEGI	l'Institut national de statistique et de géographie
MNE	Modèle numérique d'élévation
MOHYSE	Modèle hydrologique simplifié à l'extrême
NSE	Nash-Sutcliffe Efficency
SCEUA	Shuffled Complex Evolution-University of Arizona
SIG	Système d'information Géographique
SWAT	Soil and Water Assessment Tool

INTRODUCTION

L'hydrologie est la science qui étudie les processus liés au cycle hydrologique et sur laquelle repose, très souvent, la prise de décision en gestion de l'eau. Cette dernière passe par le calcul des quantités d'eau ainsi que l'analyse de la qualité de l'eau. Le Mexique est un pays qui fait souvent face aux phénomènes extrêmes, notamment aux inondations, en raison de ses côtes bordées par l'Océan Pacifique et le Golfe du Mexique d'où proviennent des cyclones tropicaux. D'autres régions du pays, plus arides, sont aux prises avec des problèmes d'alimentation en eau, en particulier lors de la saison sèche. Bien que l'accès à l'eau potable pour tous soit important, la disponibilité est très inégale à l'intérieur des frontières mexicaines. Dans les régions où la qualité de l'eau est un enjeu majeur, la quantité d'eau joue un grand rôle puisque la qualité de l'eau est liée aux quantités d'eau disponibles. La modélisation hydrologique, ayant pour but la simulation de débits, est primordiale dans l'exercice des prévisions et donc des calculs de quantités d'eau disponibles sur certaines régions. Les connaissances liées à la modélisation hydrologique font partie des moyens permettant de réduire la vulnérabilité de la population face aux enjeux liés à l'eau.

Dans certains secteurs du pays, les installations actuellement en place, notamment les stations météorologiques et les stations hydrométriques, sont soit désuètes, inactives ou simplement non disponibles. Il devient donc essentiel d'utiliser d'autres techniques pour être en mesure de bien comprendre le cycle hydrologique sur l'ensemble du territoire. Sans données de débits, entre autres, il est très difficile d'évaluer concrètement les quantités d'eau disponibles sur un territoire ou encore de mettre de l'avant des mesures visant à réduire la vulnérabilité.

L'État de Veracruz au Mexique est un état très important économiquement. On y trouve le principal port du Mexique dont les installations servent à l'importation ainsi qu'à l'exportation de marchandises. Une autre grande part de l'économie du pays passe par la confection artisanale du cuir qui est la principale activité d'un village nommé Naolinco de Victoria, aussi situé dans l'État de Veracruz. On y produit des quantités importantes de souliers qui sont par la suite exportés aux États-Unis, contribuant beaucoup à l'économie locale.

Le présent projet de recherche a comme principal objectif l'étude hydrologique du bassin versant de la rivière Naolinco. Ce bassin pose un ensemble de défis en matière de gestion de l'eau. Ces défis sont liés à des enjeux de qualité et de quantité d'eau et à la vulnérabilité des populations qui habitent ce bassin. Aucune donnée hydrométrique n'est disponible pour ce bassin, peu de données météorologiques y sont disponibles et aucune étude hydrologique n'y a été menée à ce jour, et ce, malgré les problèmes récurrents d'accès à l'eau en quantité suffisante par les villageois et les agriculteurs locaux. Puisque ce bassin est non-jaugé, différentes techniques pour cette étude devront être préalablement testées afin de vérifier leur applicabilité sur ce bassin versant mexicain. Ces techniques incluent trois méthodes de régionalisation qui seront testées sur un ensemble de 91 bassins versants jaugés, situés sur dans la portion centrale du Mexique. Une fois les méthodes testées à plus grande échelle, elles pourront être utilisées pour procéder à l'étude hydrologique sur le bassin versant de la rivière Naolinco. Cette étude permettra donc de procéder à l'étude hydrologique du bassin versant de la rivière Naolinco, mais aussi de tester l'application des méthodes de régionalisation sur le territoire central mexicain, territoire qui n'a pas encore fait spécifiquement partie d'études de régionalisation jusqu'à maintenant.

Le travail sera divisé de manière à comprendre l'ensemble des étapes qui ont été réalisées pour mener à bien cette étude, mais aussi pour encadrer les démarches dans la littérature. Plus particulièrement, le chapitre 1 présente une revue de la littérature montrant certains des ouvrages les plus pertinents concernant la modélisation hydrologique au Mexique et les méthodes de simulation en bassins versants non-jaugés, tandis que le chapitre 2 servira à décrire le secteur à l'étude. Au chapitre 3, la méthodologie de travail sera introduite, suivie des résultats obtenus lors de la recherche au chapitre 4. Finalement, au chapitre, 5 une discussion sur les observations en lien avec les résultats obtenus sera présentée.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre a pour but de présenter la littérature scientifique qui s'intéresse aux questions liées à la prévision hydrologique aux sites non-jaugés au Mexique. La modélisation hydrologique, les spécificités du territoire mexicain ainsi que les diverses approches de régionalisation y sont traitées.

1.1 Modélisation hydrologique

L'hydrologie est la science qui étudie les phénomènes relatifs au cycle de l'eau via l'interaction entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. Cette science est utile à des fins diverses telles que l'estimation des débits en rivière, le contrôle et le développement de bassins de rétention et de réservoirs hydroélectriques ainsi que la conception de différents ouvrages de retenue (Singh & Frevert, 2004). La modélisation hydrologique consiste en l'utilisation de modèles mathématiques qui représentent les divers processus du cycle hydrologique dont la précipitation, le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'accumulation et la fonte de neige, la recharge et le drainage de la nappe, le routage en rivière et le gel du sol (Singh & Woolhiser, 2002). Plusieurs types de modèles hydrologiques ont été conçus pour reproduire ces processus, ayant majoritairement comme objectif de pouvoir simuler efficacement les débits d'un bassin versant en se basant sur des informations de natures climatologique et physiographique.

Différents auteurs (Pechlivanidis, et al., 2011; Singh & Woolhiser, 2002) font état de différents types de classification des modèles hydrologiques, entre autres selon leur structure, selon leur degré de spatialisation des processus hydrologiques simulés, selon qu'ils soient stochastiques ou déterministes, ou encore selon leur application spatiale (la superficie maximale applicable par bassin versant analysé) ou temporelle (simulation continue ou événementielle). Au moment de choisir le modèle qui sera utilisé dans le cadre d'un projet de recherche, il est important de s'assurer d'identifier un modèle dont les informations

nécessaires pour son application sont disponibles et de s'assurer que le modèle réponde bien aux objectifs poursuivis par l'étude. Deux principales classifications des modèles sont présentées ci-après, soit en fonction de leur structure et en fonction de leur degré de spatialisation. Par la suite, un survol des études hydrologiques ayant eu lieu au Mexique est présenté.

1.1.1 Classification selon le degré de spatialisation

Suivant cette classification, les modèles peuvent être regroupés en trois types. Un modèle hydrologique global est un modèle qui considère comme en une seule unité spatiale l'ensemble du bassin versant étudié. Les caractéristiques du bassin versant ainsi que les paramètres du modèle seront les mêmes pour toute la superficie étudiée. Ces modèles ne prennent pas en considération la variabilité spatiale des caractéristiques et utilisent plutôt une moyenne pour représenter le bassin versant (Beven, 2011; Singh, 1995). À l'inverse, un modèle distribué permet d'incorporer la variabilité spatiale du bassin versant en ce qui a trait notamment à l'utilisation du sol et aux caractéristiques du sol (Carpenter & Georgakakos 2006). Les bassins versants sont séparés en carreaux ou en unités dont les caractéristiques locales sont similaires et chaque unité est vue comme un sous-bassin. Finalement, des modèles qualifiés de semi-distribués peuvent aussi être utilisés. Ces modèles ont l'avantage de bien représenter les caractéristiques du bassin sans toutefois demander autant de données et de temps de calcul que les modèles distribués (Pechlivanidis et al., 2011).

La décision du choix du modèle hydrologique quant au degré de spatialisation est souvent basée, dans un premier temps, sur la quantité de données disponibles. Un modèle hydrologique distribué demande beaucoup plus de données qu'un modèle global, données qui peuvent être difficiles à colliger ou encore inhomogènes (en quantité ou en qualité) dans la région d'étude. Il ne faut pas non plus négliger le fait qu'en présence d'un grand nombre de données, les manipulations et analyses nécessaires à la mise en place du modèle peuvent demander beaucoup de ressources matérielles et de temps. Un modèle distribué peut être d'un grand bénéfice pour la modélisation hydrologique, mais l'incertitude relative à

l'acquisition de données à une résolution suffisante peut venir rapidement contrer le bénéfice apporté (Carpenter & Georgakakos 2006). Un modèle global permet d'obtenir les débits uniquement à l'exutoire du bassin versant tandis que la plupart des modèles distribués permettent de connaître les débits en divers points du réseau hydrographique du bassin étudié. Dans un pays comme le Mexique où la quantité de données disponible est hétérogène, l'application des modèles distribués peut s'avérer compliquée et c'est pourquoi les modèles globaux auront été préconisés dans le cadre de ces travaux.

1.1.2 Classification selon la structure du modèle

La structure du modèle représente l'assemblage de sous-modules à partir desquels le modèle est construit. Quatre sortes de modèles sont répertoriées soit les modèles métriques, conceptuels, physiques ou hybrides. Un modèle métrique est un modèle principalement empirique basé sur les observations. Selon Pechlivanidis et al. (2011), la simplicité de ce type de modèles en fait de bons candidats pour la régionalisation pour les bassins non-jaugés puisque le lien entre les propriétés du modèle et les descripteurs est facilement observable. Il faut aussi être conscient que la performance des modèles métriques est directement liée à la quantité de données disponibles et qu'il est difficile de bien cerner l'incertitude relative à ces simulations sur des bassins non-jaugés. Deux exemples de modèles hydrologiques de type métrique sont bien connus, soit les modèles événementiels (qui simulent un événement hydrologique à la fois) de type hydrogramme unitaire (Sherman, 1932) ou encore de type réseaux de neurones artificiels (les lecteurs intéressés à en apprendre davantage sur les modèles utilisant les réseaux de neurones artificiels peuvent consulter les travaux de Besaw et al. (2010). Ces deux types de modèles ne seront pas abordés dans les présents travaux puisque l'approche privilégiée repose sur la régionalisation des paramètres de modèles conceptuels dont la mise en place demeure simple et ne requiert que des données météorologiques facilement accessibles (précipitation et température) ainsi que des données de débits (voir chapitre 3 pour la méthodologie).

Les modèles conceptuels sont des modèles où certains paramètres n'ont aucune interprétation physique, et ne peuvent donc pas être mesurés indépendamment. Ils impliquent la mise en place d'un processus de calibration visant à ajuster les valeurs des paramètres (voir la section 1.2 ci-après pour plus de détails concernant la calibration). Ces modèles sont aussi conçus sur le principe que leur structure est spécifiée avant que toute modélisation ne soit complétée (Pechlivanidis et al., 2011). Leur structure est souvent composée de réservoirs qui schématisent différents processus hydrologiques et leur complexité varie énormément.

Les modèles physiques, quant à eux, utilisent les équations de mouvement et de continuité pour représenter les différents processus du cycle hydrologique. En théorie, un modèle physique est construit de manière à ce que l'ensemble de ses paramètres soit mesurable et devrait pouvoir être utilisé sans calibration (bien que ce ne soit pas possible en pratique; Beven, 2011). L'information sur laquelle reposent ces modèles provient majoritairement d'essais en laboratoire (permettant de connaître la nature des sols ou ces propriétés physiques) ou de campagnes d'acquisition de données au site d'étude, et cette information est ensuite extrapolée à plus grande échelle. Bien qu'en théorie, les modèles physiques ne requièrent que des données mesurables, lorsque considérées à l'échelle des bassins versants entiers, ces données qui ne sont mesurées que ponctuellement ne permettent pas de connaître entièrement l'hétérogénéité du bassin versant (Wheater, 2002).

Un modèle hybride est un modèle qui regroupe les autres types de structures dans un même modèle. Ce type de modèle a comme avantage de combiner les forces de chacune des structures, notamment pour simplifier et améliorer les étapes de calibration. Considérant que la mise en place d'un modèle strictement physique est pratiquement impossible à l'échelle d'un bassin versant, certains modèles tels que Soil and Water Assessment Tool (SWAT; Arnold, Allen & Bernhardth, 1993) ou encore HYDROTEL (Fortin et al., 2001a, b) sont plutôt de type hybride physique. Cela simplifie la structure du modèle en représentant certains des processus physiques de manière conceptuelle lorsque les données sont difficilement mesurables (Pechlivanidis et al., 2011).

1.1.3 Modélisation hydrologique au Mexique

Les études publiées dans la littérature scientifique sur l'hydrologie au Mexique sont généralement récentes. Étant donné que le pays est sensible aux phénomènes hydrologiques extrêmes (Arreguin-Cortes & Lopez-Perez, 2013), les chercheurs mexicains ont principalement concentré leurs efforts sur l'étude des inondations ainsi que de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau. Les phénomènes climatiques extrêmes connus au Mexique (notamment les tempêtes tropicales) causent un problème dans l'acquisition des données hydrométéorologiques, par l'endommagement des stations qui les rend difficilement utilisables pour la modélisation hydrologique.

Martínez-Austria et al. (2014) ont mis à l'échelle des projections climatiques issues de modèles de circulation générale pour étudier le changement climatique dans la région Nord-Ouest du Mexique. Ils proposent une méthode alternative aux méthodes généralement non-paramétriques d'analyse des résultats telles que le test statistique de Mann Kendall ou l'es corrélations de Spearman et sont arrivés à la conclusion d'une tendance à la hausse dans les températures, mais sans changement majeur dans les précipitations. Velazquez et al. (2015) ont testé deux modèles hydrologiques (SWAT; Arnold et al., 1993) et Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J; Perrin, Michel & Andreassian, 2003) sur le bassin Tampaon situé dans le centre est du Mexique. Ces deux modèles ont montré des résultats satisfaisants pour la simulation des débits journaliers sur une période de 14 ans de données, SWAT affichant une meilleure performance que GR4J pour la reproduction du débit mensuel moyen. En vérifiant les impacts en contexte de changements climatiques, les deux modèles prédisent une baisse des débits lorsqu'alimentés par le modèle canadien de climat (CGCM3).

Alonso-Sánchez et al. (2014) se sont intéressés à trois micro-bassins de la région de Chiapas au Mexique, pour analyser les coefficients de ruissellement de la méthode du *Soil Conservation Service* des États-Unis (USDA-SCS, 1972). Ils ont déterminé par cette étude que les coefficients développés aux États-Unis fonctionnaient mal lorsqu'utilisés au Mexique en raison de l'utilisation du sol et des types de sols qui diffèrent entre les deux pays.

1.2 Études de régionalisation

1.2.1 Considérations générales liées à la régionalisation

Pour être en mesure de faire une modélisation hydrologique réaliste et valide, il faut que les données hydrométriques et météorologiques soient disponibles sur une période temporelle suffisamment longue (selon les objectifs poursuivis par la modélisation). Lorsque ces données sont disponibles sur une période trop courte pour les besoins de l'étude nécessitant la modélisation, ou encore lorsque les données ne sont pas facilement accessibles, les bassins concernés sont considérés comme des bassins versants non-jaugés. Dans le cas contraire, on parlera de bassins versants jaugés. Traditionnellement, les modèles hydrologiques doivent être calibrés pour pouvoir être utilisés. Le processus de calibration vise à ajuster les paramètres d'un modèle, de façon à ce que ce dernier reproduise le plus fidèlement possible des données historiques observées (le plus souvent les débits à l'exutoire d'un bassin). Cette calibration se base sur différentes métriques de performance telles que le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970), décrit à l'équation (1.1).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{io} - Q_{is})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{io} - \overline{Q_o})^2} \tag{1.1}$$

Où i est le nombre de données de débits qui servira au calcul, Q_{io} les débits observés individuels, Q_{is}, les débits simulés et $\overline{Qo}$ la moyenne des débits observés.

Afin d'inciter la communauté scientifique des hydrologues à se pencher plus sérieusement sur le problème de prévision aux sites non-jaugés, l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (IAHS) a décrété que la décennie 2003-2012 serait dédiée à la prévision aux bassins versants non-jaugés (Sivapalan et al., 2003). Ce type de prévision est majoritairement possible par ce qu'on appelle la régionalisation. Le terme « régionalisation » signifiera, dans cette étude, l'art de déterminer un jeu de paramètres optimal pour effectuer de la simulation par des modèles hydrologiques sur des bassins non-jaugés (Arsenault & Brissette, 2014). Plusieurs des études de régionalisation menées à ce jour se sont montrées concluantes et

permettent de faire des modélisations hydrologiques fiables aux sites non-jaugés. Cependant, puisque les méthodes reposent sur le transfert d'information à partir de bassins versants jaugés (et donc différents), les techniques de régionalisation ne sont pas universelles et doivent être testées sur le secteur d'étude afin d'identifier la méthode à privilégier (Razavi & Coulibaly 2013). Puisque l'accès à des données homogènes et complètes est particulièrement problématique sur le territoire du Mexique, les études de régionalisation peuvent être une option profitable quand il est question de prévision des débits.

Les études rapportées dans la littérature scientifique se sont principalement concentrées sur trois différentes méthodes pour la régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques, soit (1) par proximité spatiale, (2) par similitude physique ou encore (3) par régression linaire. Tel qu'évoqué précédemment, la régionalisation se base sur des données issues de bassins versants jaugés, dont les performances en modélisation hydrologique sont fiables et ont été préalablement vérifiées, afin de procéder à la modélisation hydrologique sur des bassins versants non-jaugés. Il doit exister une ressemblance entre le(s) bassin(s) jaugé(s) et le bassin non-jaugé, laquelle peut se situer tant au niveau de la localisation qu'au niveau d'attributs physiques. Différentes études ont par ailleurs démontré la pertinence d'utiliser plus d'un bassin versant jaugé lors de la régionalisation pour arriver à des résultats de bonne qualité. Plus de 70 études ont été publiées sur le sujet. (Hrachowtiz et al., 2013; He, Bardossy & Zehe, 2011; Parajka et al., 2013; Razavi & Coulibaly 2013). Razavi & Coulibaly (2013) les ont recensées et regroupées en 2 catégories, soit (1) les études utilisant des méthodes dépendantes du modèle hydrologique, et (2) les études utilisant des méthodes indépendantes. Un aperçu de la revue de Razavi & Coulibaly (2013) sera présenté dans les paragraphes suivants, de même que le seront d'autres études en régionalisation qui ont obtenu des résultats utiles.

1.2.2 Méthodes dépendantes du modèle hydrologique

La première catégorie de méthode de régionalisation est la régionalisation dépendante du modèle hydrologique. Selon Razavi & Coulibaly (2013), cinq étapes sont nécessaires lors d'études de régionalisation. Il faut :

- regrouper et gérer les données physiographiques ainsi que les attributs hydrométéorologiques pour l'ensemble des bassins considérés (jaugés et non-jaugé); cette étape peut nécessiter beaucoup de temps et d'énergie puisque ces informations sont souvent difficiles à trouver;
- déterminer les variables d'intérêt de l'étude (débit à l'exutoire ou débit à certains endroits sur le bassin, volume d'eau ruisselé, quantité de neige, etc.) ; cette étape sert aussi à déterminer les modèles hydrologiques qui serviront pour la modélisation;
- développer des relations entre les attributs, aussi appelés descripteurs, et le débit pour les bassins versants jaugés; les différentes techniques pour le développement de ces relations seront expliquées ci-après (section 1.2.2.1 à section 1.2.2.3);
- évaluer les performances des techniques de régionalisation par la méthode du bassin pseudo non-jaugé; un bassin pseudo non-jaugé est un bassin dont les caractéristiques physiques et hydrométéorologiques sont connues, mais qui, pour l'évaluation de la performance des méthodes, est considéré comme étant non-jaugé; l'ensemble des bassins de la région à l'étude seront tour à tour considérés comme tels; quatre métriques de performance sont principalement utilisées dans le cadre de l'étape de validation de la méthode, soit le Root Mean Square Error (RMSE), le NSE, le biais moyen;
- analyser l'incertitude liée à la modélisation; l'incertitude peut être classée en deux catégories, (1) relativement aux choix du modèle et à la calibration du modèle pour l'ensemble des bassins versants jaugés, (2) sur la procédure d'extrapolation des relations entre les bassins versants jaugés et non-jaugés (Wagener & Wheater, 2006).

Lorsqu'il est question de régionalisation par des méthodes dépendantes du modèle hydrologique, cela signifie que le choix du modèle ainsi que sa capacité à bien représenter la région à l'étude influenceront directement la performance des techniques de régionalisation.

Cette technique demande aussi un temps considérable en calcul pour s'assurer d'une bonne réussite de la méthode.

1.2.2.1 Régionalisation par régression linéaire multiple

La régionalisation par régression est l'une des plus anciennes méthodes de régionalisation des paramètres. Cette méthode consiste à mettre en lumière des relations liant les descripteurs physiques, morphologiques ou climatiques des bassins versants aux paramètres calibrés du modèle hydrologique utilisé (Oudin et al., 2008). Pour que cette méthode fonctionne bien, il doit exister une relation fiable entre la valeur des paramètres et les caractéristiques du bassin, et les descripteurs doivent permettre de bien comprendre le comportement des bassins versants non-jaugés.

Kokkenan et al. (2003) ont utilisé une méthode plus globale qui consiste à déterminer la variabilité des paramètres d'un grand secteur d'étude avant d'exploiter ces informations en prédiction pour de plus petites régions tout en conservant l'interrelation entre les paramètres du modèle hydrologique. Ils ont établi que, lorsque des bassins sont semblables sur le plan hydrologique, l'ensemble complet de paramètres devrait être transféré entre un bassin jaugé et un bassin non-jaugé plutôt que de chercher des relations pour chacun des paramètres individuellement. Selon cette étude, le paramètre de l'élévation moyenne du bassin versant est un paramètre qui apporte beaucoup d'information quant au comportement hydrologique des bassins versants Coweeta situés en Caroline du Nord. Cette méthode s'est aussi avérée concluante dans des secteurs semi-arides et plats (Bloschl et al., 2013), ce qui n'est pas représentatif du secteur à l'étude. La régression linéaire multiple demande aussi beaucoup d'information pour fournir des résultats satisfaisants (He et al., 2011) données qui sont très souvent non disponibles au Mexique. Arsenault et al. (2014) ont proposé une méthode alternative à la régression linéaire, où au lieu de prendre l'ensemble du jeu de paramètres pour faire les régressions, seuls les paramètres dont le coefficient de détermination serait élevé seront transférés au bassin non-jaugé, tandis que les autres seront issus d'une régionalisation par proximité spatiale ou similitude physique. Dans un secteur neigeux où

268 bassins sont étendus sur le territoire du Québec en entier, cette méthode a permis d'améliorer les résultats de régionalisation significativement, mais a ajouté un degré d'incertitude supérieur à la modélisation.

1.2.2.2 Proximité spatiale

Cette méthode est la plus simple à mettre en pratique. L'hypothèse derrière cette approche est qu'un bassin jaugé et un bassin non-jaugé spatialement rapprochés devraient, en théorie, avoir des caractéristiques physiques similaires et que tous deux devraient réagir de la même manière aux événements météorologiques. Cette méthode consiste en premier lieu à identifier les bassins versants jaugés les plus rapprochés spatialement du bassin versant non-jaugé. Ces bassins versants deviendront les bassins versants « donneurs », soient les bassins versants jaugés qui serviront pour le transfert de jeux de paramètres pour la modélisation hydrologique sur le bassin non-jaugé. Chaque jeu de paramètres aura été préalablement trouvé par calibration d'un bassin versant jaugé à l'aide d'un modèle hydrologique. Le jeu de paramètres sera en deuxième lieu appliqué au nouveau bassin versant non-jaugé et sa performance sera testée par différentes métriques de performance telles que le NSE. Une schématisation de cette méthode est présentée à la Figure 1.1.

Les flèches, dans la Figure 1.1, représentent les distances calculées à partir des centroïdes de trois bassins versants jaugés; les distances entre chacun des bassins et le bassin non-jaugé, à droite de l'image, sont identiques. Pour déterminer les bassins les plus près spatialement, la distance euclidienne est préconisée. Cette distance est calculée entre les centroïdes des bassins versants tel que démontré à l'équation (1.2).

$$d = \sqrt{(X_G - X_U)^2 + (Y_G - Y_U)^2} \tag{1.2}$$

Où d est la distance entre les centroïdes et (X_G, Y_G) et (X_U, Y_U) sont respectivement les coordonnées des centroïdes des bassins versants jaugé et non-jaugé. Plusieurs études ont

utilisé cette méthode dans leur comparaison des meilleures approches pour la régionalisation des paramètres, tel que décrit dans les paragraphes suivants.

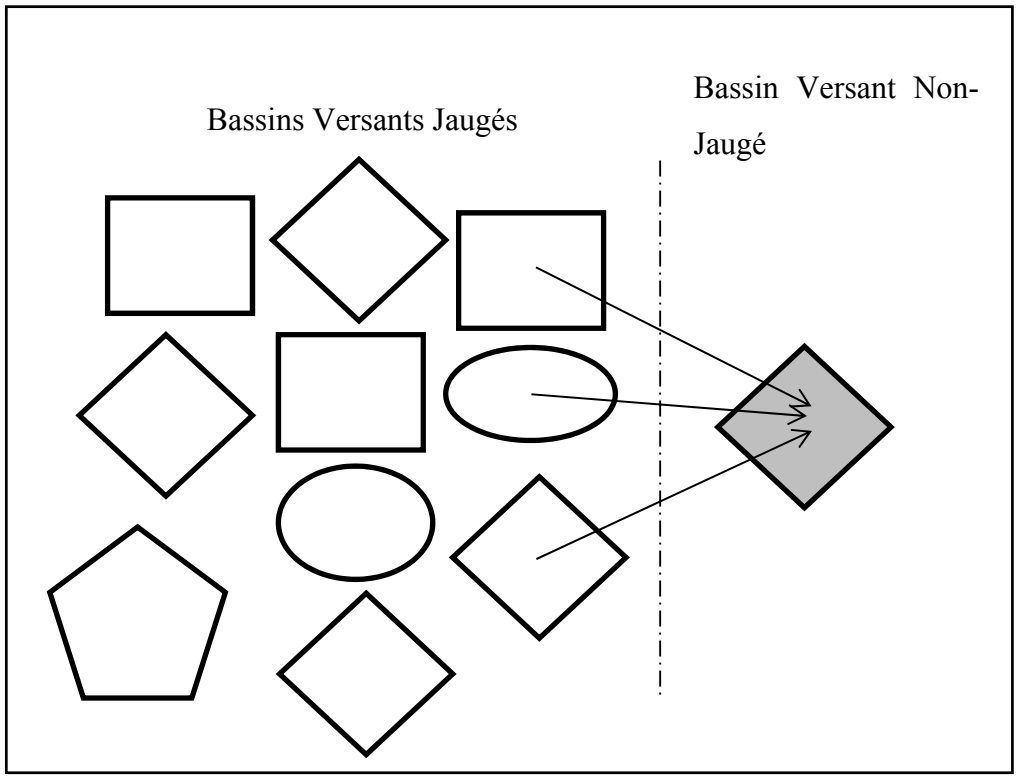

Figure 1.1 Schéma de la méthode de proximité spatiale pour le transfert de paramètres d'un bassin versant jaugé vers un bassin versant non-jaugé
Adaptée avec l'autorisation de Richard Arsenault (2015, p10)

Oudin et al. (2008) ont conclu que, pour 913 bassins français, la méthode de proximité spatiale par la distance euclidienne performait de manière plus satisfaisante que n'importe quelle autre méthode, mais que les performances de celle-ci étaient largement inférieures à la calibration complète d'un modèle hydrologique. Cette dernière conclusion est tout à fait légitime puisque la calibration est basée sur l'ensemble de l'information disponible donc est par définition la meilleure performance qu'il est possible d'atteindre pour les bassins. Tout comme Oudin et al. (2008), d'autres études ont trouvé que la régionalisation par proximité spatiale procurait généralement de bons résultats lorsque le secteur à l'étude disposait d'un réseau dense de bassins versants (Merz & Bloschl, 2004; Paparakja et al 2005). Dans un

secteur dense de bassins versants, les ensembles de paramètres devraient être sensiblement égaux ou sont jugés comme étant différents simplement en raison de facteurs aléatoires (Viviroli et al., 2009) ou encore de l'équifinalité possible des jeux de paramètres d'un modèle hydrologique (Arsenault & Brissette, 2014). L'équifinalité se définit comme étant le fait d'avoir plusieurs jeux de paramètres optimaux, qui donnent tous des résultats acceptables au niveau de la calibration ou de la validation des modèles hydrologiques (Beven, 2006).

L'étude d'Oudin et al. (2008) a permis l'émergence d'une autre méthode alternative aux méthodes traditionnelles, soit la régionalisation intégrée, qui est en fait la mise en commun des méthodes de régionalisation par proximité spatiale et par similitude physique, où la latitude et la longitude serviront de descripteurs pour le transfert de paramètres. Cette méthode est décrite à la section 1.2.2.3 du présent chapitre. Malgré un réseau de bassins versants dense, McIntyre et al. (2005) ont trouvé que la méthode par proximité spatiale d'un seul donneur performait le moins bien comparativement aux autres méthodes puisque la géologie du secteur à l'étude variait considérablement, rendant fausse l'hypothèse que les caractéristiques des bassins rapprochés spatialement sont homogènes.

1.2.2.3 Similitude physique

Chaque bassin versant possède des caractéristiques physiques qui lui sont propres. Qu'il s'agisse des sols qui le composent, de l'utilisation du sol, de sa superficie, de sa pente ou encore de son altitude moyenne, chacune des caractéristiques a une influence sur les schémas d'écoulement ainsi que sur la réponse hydrologique d'un bassin versant. La méthode de régionalisation basée sur la similitude physique repose sur l'hypothèse que les bassins dont les caractéristiques physiques sont similaires devraient réagir de la même façon, et donc que des sites jaugés devraient bien décrire les comportements hydrologiques de sites non-jaugés similaires. La Figure 1.2 montre la même schématisation que la Figure 1.1, mais avec les bassins versants de forme losange comme étant les donneurs de paramètres puisque ceux-ci sont physiquement similaires au bassin versant non-jaugé à droite.

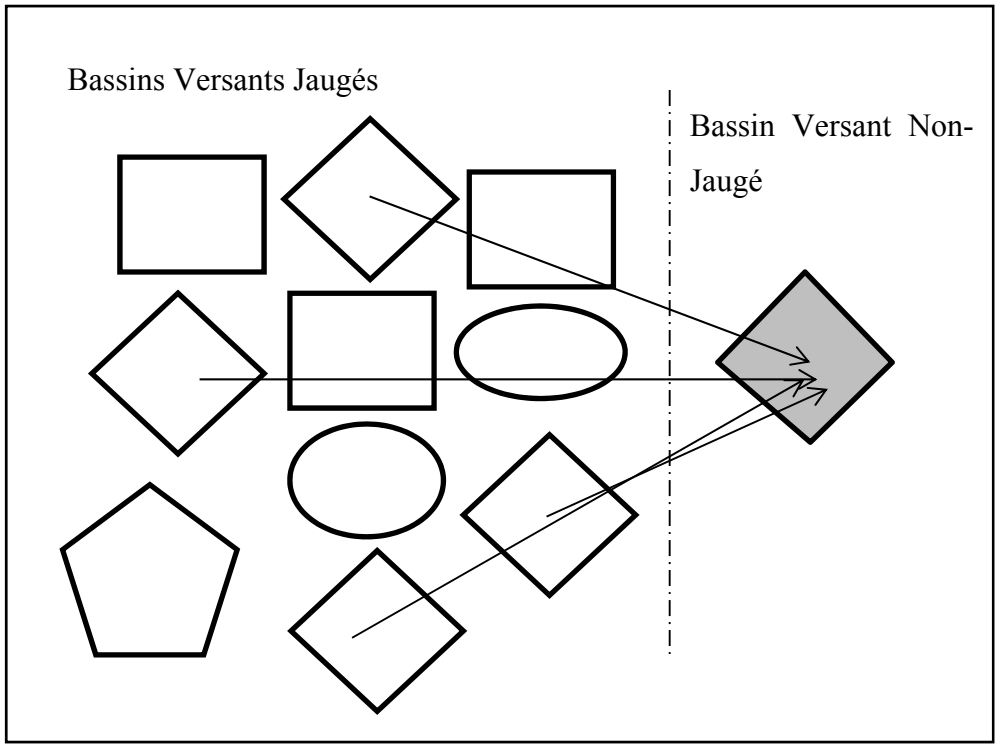

Figure 1.2 Schématisation de la régionalisation par similitude physique, dans le cadre du transfert de paramètres de bassins versants jaugés vers des bassins versants non-jaugés Adaptée avec l'autorisation de Richard Arsenault (2015, p.11)

Plusieurs descripteurs (ou caractéristiques physiques ou climatiques) ont été utilisés dans la littérature pour représenter les caractéristiques des bassins versants. Razavi & Couliably (2013) ont établi un registre des différents descripteurs physiques utilisés ainsi que le nombre de fois où ceux-ci ont été retenus dans les études considérées. Leurs travaux permettent de constater que le choix des descripteurs qui serviront dans le transfert des paramètres varie beaucoup d'une étude de régionalisation à l'autre. Globalement, les descripteurs le plus fréquemment utilisés sont les informations physiographiques, telles que l'aire de drainage, l'élévation moyenne et la pente du bassin ou du cours d'eau principal, ainsi que les attributs météorologiques comme les moyennes annuelles ou journalières des précipitations et des températures. Certains autres descripteurs sont utilisés moins souvent tels que les pourcentages de superficie recouverte par les différents types d'utilisation du sol, le centroïde des bassins, l'évaporation moyenne annuelle ou la hauteur de neige moyenne annuelle (Razavi & Coulibaly, 2013).

Lorsque les caractéristiques de l'ensemble des bassins versants jaugés et non jaugé ont été trouvées, un indice de similitude est calculé. Celui-ci repose sur le rapport entre, d'une part, les distances normalisées entre les caractéristiques des bassins jaugés et non jaugé, et, d'autre part, l'espace total de chacune des caractéristiques considérées. Le calcul est repris entre chaque bassin jaugé et le bassin non jaugé, et chacune des valeurs de distance θ obtenue sera ensuite considérée pour le transfert de paramètres (Burn & Boorman, 1993). La formule est décrite à l'équation (1.3).

$$\theta = \sum_{i=1}^{k} \frac{|CD_i^G - CD_i^U|}{\Delta CD_i} \tag{1.3}$$

Où les CD_i sont les valeurs du descripteur i pour un bassin jaugé (G) et le bassin non jaugé (U), k est le nombre de descripteurs physiques pris en compte, et ΔCD_i est la plage de valeurs disponibles pour le descripteur physique i, soit la valeur maximale moins la valeur minimale. De la même façon que pour la proximité spatiale, le donneur dont l'indice de similitude sera le plus petit servira pour le transfert des paramètres sur le bassin versant non-jaugé. Dépendamment du nombre de caractéristiques disponibles pour les bassins versants, un ou plusieurs descripteurs peuvent être utilisés selon ce qui donne les meilleurs résultats lorsque les essais de régionalisation sont effectués.

Pour une région à l'étude avec des données clairsemées, Reichl et al. (2009) ont trouvé qu'une bonne connaissance préalable des caractéristiques du bassin pouvait mener à une régionalisation par similitude physique concluante lorsque sept descripteurs étaient utilisés et que cette méthode était plus performante que la proximité spatiale. Tout comme Reichl et al. (2009), Oudin et al. (2010) ont trouvé que les processus hydrologiques et les descripteurs physiques ont des relations plus complexes que l'hypothèse simple derrière cette méthode de régionalisation et qu'une bonne connaissance des descripteurs est inévitable pour donner de bons résultats. Wagener et al. (2007) ont prouvé l'importance d'une bonne classification des bassins versants pour assurer des simulations concluantes. L'avantage de transférer les groupes de paramètres entièrement entre les bassins versants plutôt que par des relations

individuelles, comme pour la régression multiple (décrite à la section 1.2.2.5 ci-après), a été démontré dans plusieurs études, puisque cela a comme avantage de conserver l'intégrité de l'ensemble des paramètres du modèle hydrologique (McIntyre et al., 2005; Parajka et al., 2005; Oudin et al., 2010). L'élévation moyenne des bassins versants est considérée comme étant un descripteur important à considérer dans l'analyse par similitude physique puisque celui-ci a un impact sur plusieurs processus hydrologiques et climatiques (Parajka et al., 2013). L'élévation du Mexique étant très variable, ce paramètre sera attentivement analysé dans le présent rapport.

1.2.2.4 Approche intégrée

Oudin et al. (2008) ont trouvé que, bien que globalement la proximité spatiale donnait de meilleurs résultats que la similitude physique, ce n'était pas systématiquement le cas pour l'ensemble des bassins testés. Leurs travaux ont également montré que l'ajout de la latitude et de la longitude dans le calcul de l'indice de similitude, au même degré que les autres descripteurs physiques, pouvait apporter des résultats significativement meilleurs. Cette approche constitue une intégration entre la méthode de similitude physique et la méthode de proximité spatiale. La latitude et la longitude deviennent donc des descripteurs au même titre que les autres et sont ajoutées à l'indice de similitude, pour identifier les bassins versants jaugés les plus près du bassin versant non-jaugé. Suite à cette étude, la régionalisation intégrée est de plus en plus utilisée et démontre des résultats intéressants (Arsenault & Brissette, 2014; Samuel et al., 2011; Zhang & Chiew, 2009).

1.2.2.5 Régionalisation à donneurs multiples

Plusieurs études ont montré que d'utiliser plus d'un donneur, lors du transfert des paramètres, pouvait être bénéfique (Arsenault & Brisette, 2014; Oudin et al., 2008; Reichl et al., 2009; Samuel et al., 2011; Zhang & Chiew, 2009). Différentes techniques sont possibles pour travailler avec des donneurs multiples. En premier lieu, l'approche à donneurs multiples a été testée en utilisant le moyennage des paramètres issus de plusieurs donneurs (Oudin et al., 2008). Le traitement se fait donc préalablement au calcul du débit pour le bassin non-jaugé.

À la suite de l'application de cette approche, un seul hydrogramme sera simulé. En deuxième lieu, le moyennage est effectué après les simulations sur le bassin versant non-jaugé, c'est-à-dire qu'un hydrogramme est simulé avec chaque jeu de paramètres provenant d'un donneur différent et un hydrogramme moyen est ensuite calculé. La moyenne peut être effectuée de deux manières différentes, soit (1) une moyenne arithmétique des hydrogrammes simulés (McIntyre et al., 2005; Oudin et al., 2008) ou encore (2) une moyenne des hydrogrammes pondérée par l'inverse de la distance entre chaque bassin donneur et le bassin non jaugé (Samuel et al., 2011; Zhang & Chiew, 2009). En moyennant les hydrogrammes simulés, la relation entre les paramètres du modèle est conservée, pour chaque jeu considéré, et ceci permet de réduire l'impact d'une simulation qui serait de moins bonne qualité. Il a été déterminé que de garder le nombre de donneurs entre 5 et 10 permettait d'augmenter les performances de la modélisation hydrologique (Oudin et al., 2008; Reichl et al., 2009), mais qu'un nombre trop élevé de donneurs pouvait réduire la qualité des simulations (Arsenault & Brissette, 2014).

De plus, utiliser les jeux de paramètres complets et de faire la moyenne des hydrogrammes simulés, plutôt que de prendre les moyennes des paramètres, vient aussi éviter les problèmes soulevés par l'équifinalité et l'interdépendance des paramètres, ignorés dans la régionalisation par régression linéaire multiple (Arsenault & Brissette, 2014).

1.2.3 Régionalisation indépendante du modèle hydrologique

Certaines techniques de base pour déterminer le débit d'une superficie non-jaugée sont indépendantes du modèle hydrologique. Elles partent du principe que le débit est directement lié à certaines caractéristiques physiques telles que la superficie de drainage. Ces techniques sont basés simplement sur des débits connus environnants aux sites non-jaugés et ne demandent aucune modélisation hydrologique pour obtenir les débits.

1.2.3.1 Mise à l'échelle simple par un indice topographique

Lorsque des bassins versants sont imbriqués l'un dans l'autre ou que la station hydrométrique n'est pas localisée à l'exutoire d'un bassin versant, la mise à l'échelle simple des débits simulés en fonction du rapport des aires devrait pouvoir simuler de façon adéquate les débits sur la partie non jaugée.

Schreider et al. (2002) ont utilisé une technique qui prend comme hypothèse que la contribution de chaque sous-bassin sur la quantité d'eau totale est proportionnelle à un indice topographique. Le bassin versant est séparé en petite cellule contributrice. Cet indice utilise l'aire de drainage, la largeur de la cellule ainsi que la pente moyenne, de la façon suivante pour déterminer cette contribution:

$$\omega = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \ln\left(\frac{\frac{A_j}{l_j}}{tan(\emptyset_j)}\right) \tag{1.4}$$

Où A_j est l'aire de drainage contribuant à la cellule j, l_j est la largeur de chaque cellule, $Ø_j$ est la pente de la cellule et n est le nombre total de cellules considéré. La transposition des débits du bassin versant au sous-bassin non jaugé se fait par la relation ω/Ω où Ω est l'indice topographique pour l'ensemble du bassin versant. Cette méthode s'est montrée concluante lorsqu'utilisée dans le module de perte non linéaire du modèle conceptuel IHACRES.

1.2.3.2 Détermination du débit par un rapport des aires

Une autre méthode très répandue pour transposer des débits en sites non jaugés est un transfert de données entre bassins versants selon un rapport des aires de drainage (Anctil et al., 2012) et se calcule tel qu'énoncé à l'équation (1.5). Cette formule sera appelée ci-après la formule de base par rapport des superficies.

$$Q_{T1} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^b * Q_{T2} \tag{1.5}$$

Où Q_T représente le débit associé au temps de retour T, A est la superficie des bassins et l'exposant b est le facteur de correction régional du rapport des superficies; les indices 1 et 2 réfèrent aux bassins versants jaugé et non-jaugé, respectivement. Cette formule est juste lorsque le rapport des superficies se situe entre 0.5 et 2. L'exposant b varie généralement entre 0.6 et 0.9, les valeurs inférieures étant pour de longues périodes de retour et un faible emmagasinement de l'eau sur le bassin tandis que les valeurs supérieures sont pour l'inverse (Anctil et al., 2012). Si certaines données observées pour les deux sites sont disponibles, la valeur de l'exposant peut être déterminée par régression entre les deux sites d'étude. L'hypothèse derrière cette formule est qu'un sous-bassin devrait contribuer au débit final en un point en aval selon son aire de drainage et que, puisque les deux bassins considérés sont imbriqués l'un dans l'autre, ils devraient avoir des caractéristiques physiques similaires et réagir hydrologiquement de manière semblable. Pour simplifier les calculs de détermination de l'exposant, une moyenne des valeurs saisonnières de débit est préférable. Les saisons peuvent être variables selon la localisation du secteur à l'étude. Au Dakota par exemple, 3 saisons hydrologiques sont utilisées pour calculer les coefficients soit l'été (juin à octobre), l'hiver (novembre à février) et le printemps (mars à mai), qui ont été décidées en fonction de la quantité de précipitation pour ces périodes (Emerson et al., 2005). Cette étude a aussi permis de trouver des valeurs d'exposants de 1.02, 0.85 et 0.91 respectivement pour chacune des saisons.

CHAPITRE 2

SECTEUR À L'ÉTUDE

Cette section présentera le secteur d'étude qui a été considéré dans ces travaux. La localisation et la description physiographique des bassins versants ainsi que la description des données hydrométéorologiques utilisées y sont présentées. Les données utilisées dans cette étude proviennent majoritairement de quatre bases de données nationales. Il s'agit de

- l'Institut national de statistique et de géographie (INEGI; Inegi 2016),
- la base de données climatologiques nationales (CLICOM) du Centre de recherche scientifique et d'enseignement supérieur d'Ensenada (CICESE;CICESE,2013),
- la Commission nationale de l'eau (CONAGUA, CONAGUA [s.d]) sous la direction de l'Institut Mexicain des technologies de l'eau (IMTA; IMTA [s.d]),
- du Système National de l'Information sur la Biodiversité (CONABIO; CONABIO 2012).

Ces organismes fournissent l'ensemble des données de ressources naturelles ou d'informations hydrométéorologiques disponibles au Mexique. Le chapitre se termine par une description plus détaillée du bassin versant de la rivière Naolinco.

2.1 Localisation

Pour les besoins de cette étude, 91 bassins versants mexicains ont été sélectionnés sur la base de la quantité et la qualité des données disponibles. Ces 91 bassins versants ont été sélectionnés pour établir une base de données contenant les bassins versants qui seront considérés comme donneurs en régionalisation. En consultant les bases de données de CLICOM et de la CONAGUA, il est possible de s'apercevoir que plus de la moitié des stations hydrométriques et météorologiques disposent de moins de 25 ans de données effectives disponibles étalées sur plus de 100 ans de données possibles. Les bassins étudiés sont situés dans les états de Veracruz, Puebla, Tamaulipas, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo,

Mexico District Fédéral, Morelos, San Luis Potosi, Queretaro et Tlaxcala. Ces états forment la partie centrale du Mexique, tel que présenté à la Figure 2.1.

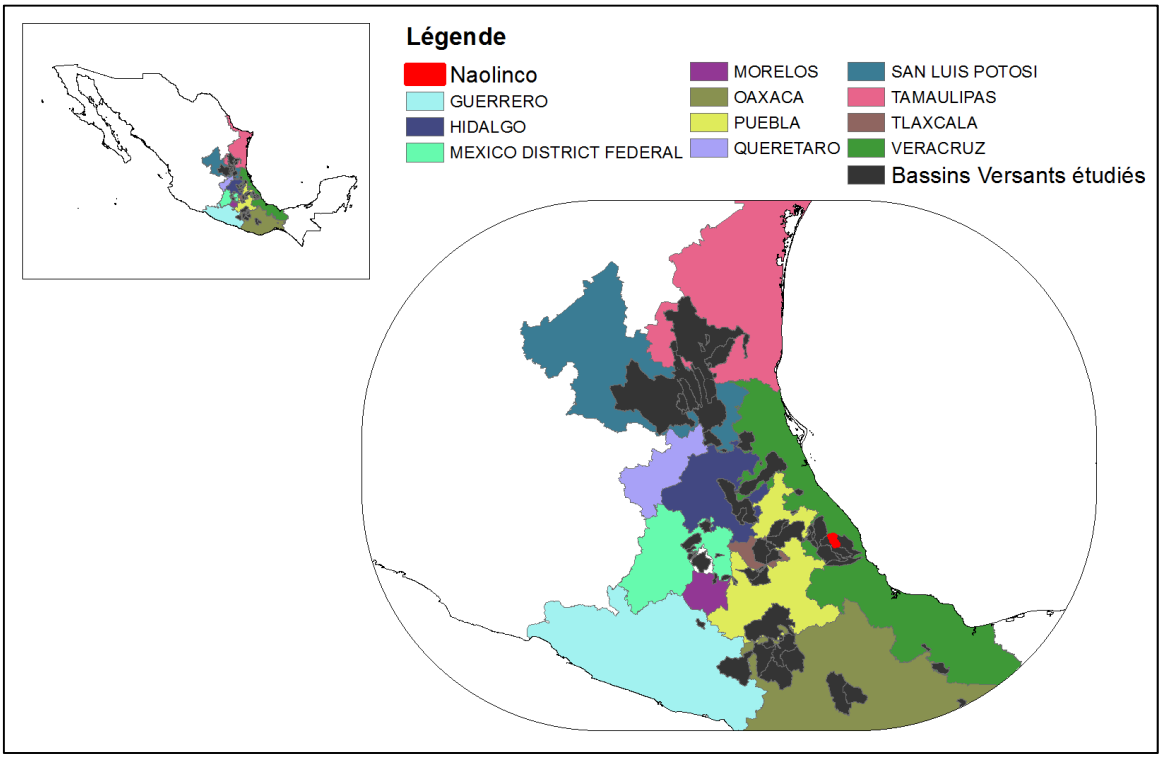

Figure 2.1 Carte du Mexique représentant le secteur à l'étude ainsi que les bassins versants étudiés

Compte tenu de la disponibilité des données, les 91 bassins versants étudiés ne sont pas répartis également à travers l'ensemble du secteur à l'étude. Leur distribution spatiale dans les 11 états est présentée au Tableau 2.1 ainsi qu'à la Figure 2.1. Il est aussi à noter que plusieurs bassins versants chevauchent plus d'un état, mais que ceux-ci ont été regroupés en fonction de la localisation de leur exutoire pour simplifier la classification. Le secteur à l'étude couvre une superficie totale de 106 700 km2 et inclut des bassins de superficies très variables (8,98 à 10 616 km^2;Tableau 2.2).

Tableau 2.1 Distribution spatiale des bassins versants étudiés en fonction de l'état où leur exutoire se retrouve

État	**Nombre de bassins inclus dans l'étude**
Guerrero	2
Tamaulipas	10
Tlaxcala	2
Veracruz	20
Puebla	17
Mexico District Federal	13
Oaxaca	12
San Luis Potosi	9
Morelos	2
Queretaro	0
Hidalgo	4

Le relief du Mexique est majoritairement montagneux. Ses deux chaînes de montagnes les plus importantes sont la Sierra Madre Oriental et la Sierra Madre Occidental, lesquelles sont orientées nord-sud (Figure 2.2). Le sommet le plus haut du Mexique, Pico de Orizaba, a une élévation de 5610 m au-dessus du niveau de la mer. Il se retrouve à la frontière entre les états de Veracruz et de Puebla, tel que montré à la Figure 2.2, mais ne fait partie d'aucun des bassins versants considérés dans l'étude.

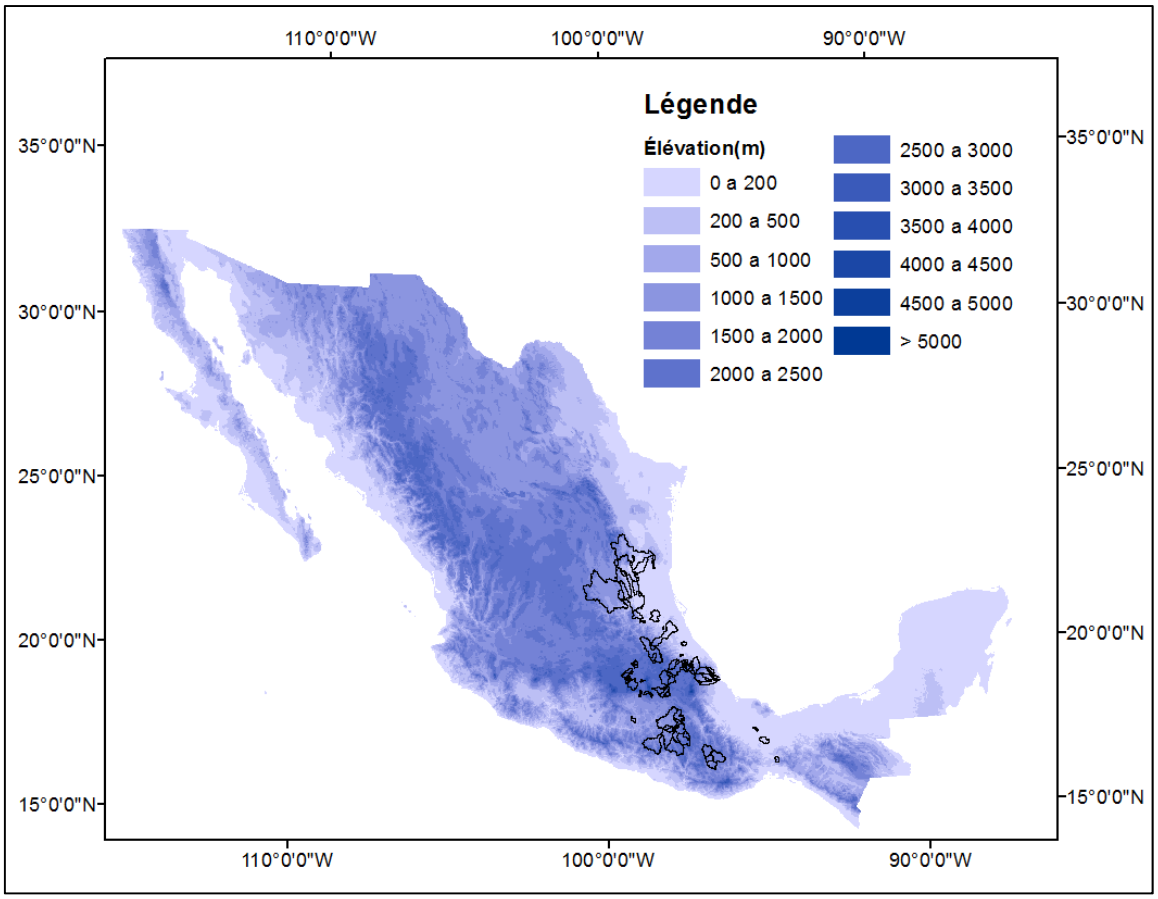

Figure 2.2 Carte du relief du Mexique

L'ensemble des statistiques relatives aux caractéristiques physiques, climatologiques et morphologiques des bassins versants à l'étude qui serviront ultérieurement pour la régionalisation se trouvent au Tableau 2.2. Les caractéristiques climatologiques proviennent des données journalières tandis que les caractéristiques données en pourcentage sont fonction du rapport des superficies occupées par chacune des caractéristiques sur la superficie totale du bassin. Des informations complémentaires à ce tableau seront fournies dans les sous-sections qui suivent, permettant de bien comprendre chacune des caractéristiques présentes au Tableau 2.2. Lorsque les données médianes sont égales à zéro, cela signifie que plus de la moitié des bassins versants étudiés n'avaient pas cette caractéristiques de présente sur son territoire.

Tableau 2.2 Statistiques générales sur les caractéristiques physiques, climatologiques et morphologiques des bassins versants du secteur à l'étude

	Maximum	**Minimum**	**Médiane**
Latitude du centroïde (°)	23,2	16,837	19,866
Longitude du centroïde (°)	-94,642	-100,029	-98,126
Altitude moyenne (m)	2810,91	46,694	1587,72
Pente ( )	30.8199	1.9196	12.4408
Précipitation journalière (mm)	198	0	3,2
Température maximale journalière (°C)	51	0	25,5
Température minimale journalière (°C)	38	-12,9	12,07
Température moyenne journalière (°C)	40	-3,8	18,8
Aire (km^2)	10 616	8,98	454,5
Agriculture(%)	100%	0%	93%
Eau (%)	3%	0%	0%
Urbain(%)	44%	0%	0%
Forêt(%)	100%	0%	2%
Sans Végétation(%)	9%	0%	0%
Acrisol(%)	32%	0%	0%
Chernozem(%)	83%	0%	7%
Cambisol (%)	68%	0%	0%
Luvisol (%)	86%	0%	0%
Andosol(%)	100%	0%	0%
Leptosol (%)	100%	0%	10%
Regosol(%)	83%	0%	8%
Vertisol (%)	70%	0%	4%
Histosol(%)	3%	0%	0%
Planosol (%)	3%	0%	0%
Calcisol (%)	12%	0%	0%
Solonchak(%)	2%	0%	0%
Fluvisol(%)	19%	0%	0%

2.2 Données hydrométéorologiques

En matière de climat, le Mexique comporte deux zones distinctes séparées par le Tropique du Cancer (Figure 2.3). Au nord de ce tropique, le climat est sec avec en moyenne entre 100 et 600 mm de pluie annuellement, tandis qu'au sud du tropique, le climat est humide avec en moyenne entre 800 et 4500 mm de pluie annuellement. Au sud du tropique, en région montagneuse, il est plus question d'un climat tempéré et humide que d'un climat chaud et humide (Inegi, 2014). La zone à l'étude se retrouve à l'intérieur de plusieurs zones climatiques, soit un climat semi-aride, tempéré humide, tempéré à hiver sec, climat de moussons et climat de savane à hiver sec. Un climat est considéré à hiver sec lorsqu'il y a une saison sèche en hiver (les précipitations du mois le plus sec correspondent à un maximum de 10 pourcent du mois le plus humide de l'été). Un climat de moussons est un climat tropical avec des précipitations annuelles supérieures à l'évaporation annuelle (Eduterre, 2014).

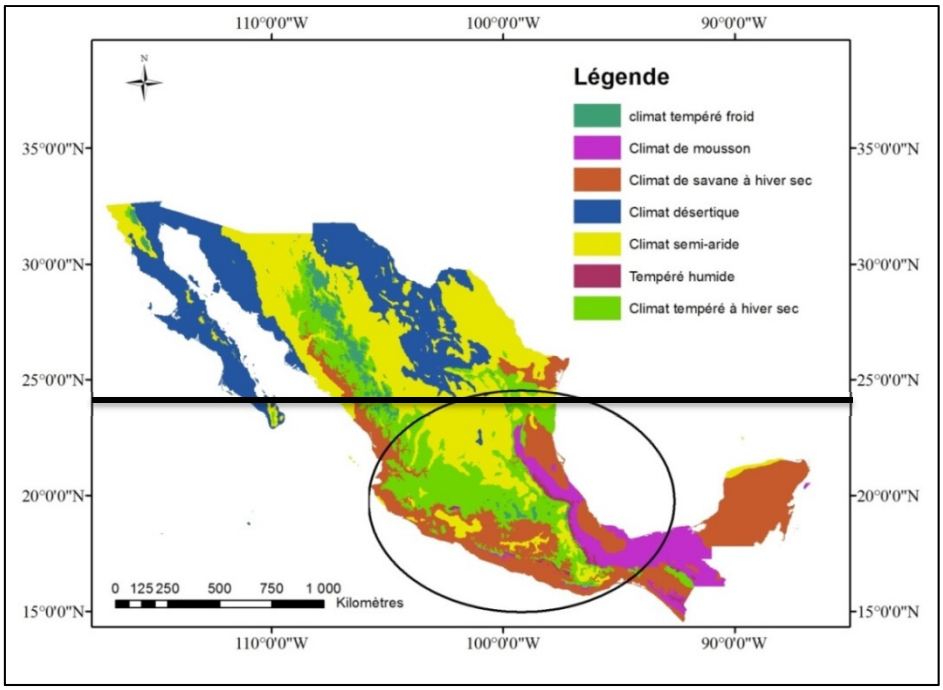

Figure 2.3 Zones climatiques du Mexique selon la classification de Koppen. Le trait noir, sur la figure, représente le Tropique du Cancer.

En termes de quantité d'eau, deux saisons distinctes peuvent être trouvées au Mexique: une saison de pluie et une saison sèche. C'est entre juin et septembre, lors de la saison des pluies, que la majeure partie des précipitations a lieu. Entre octobre et avril, le temps est majoritairement plus sec. Les précipitations moyennes annuelles sont montrées à la Figure 2.4.

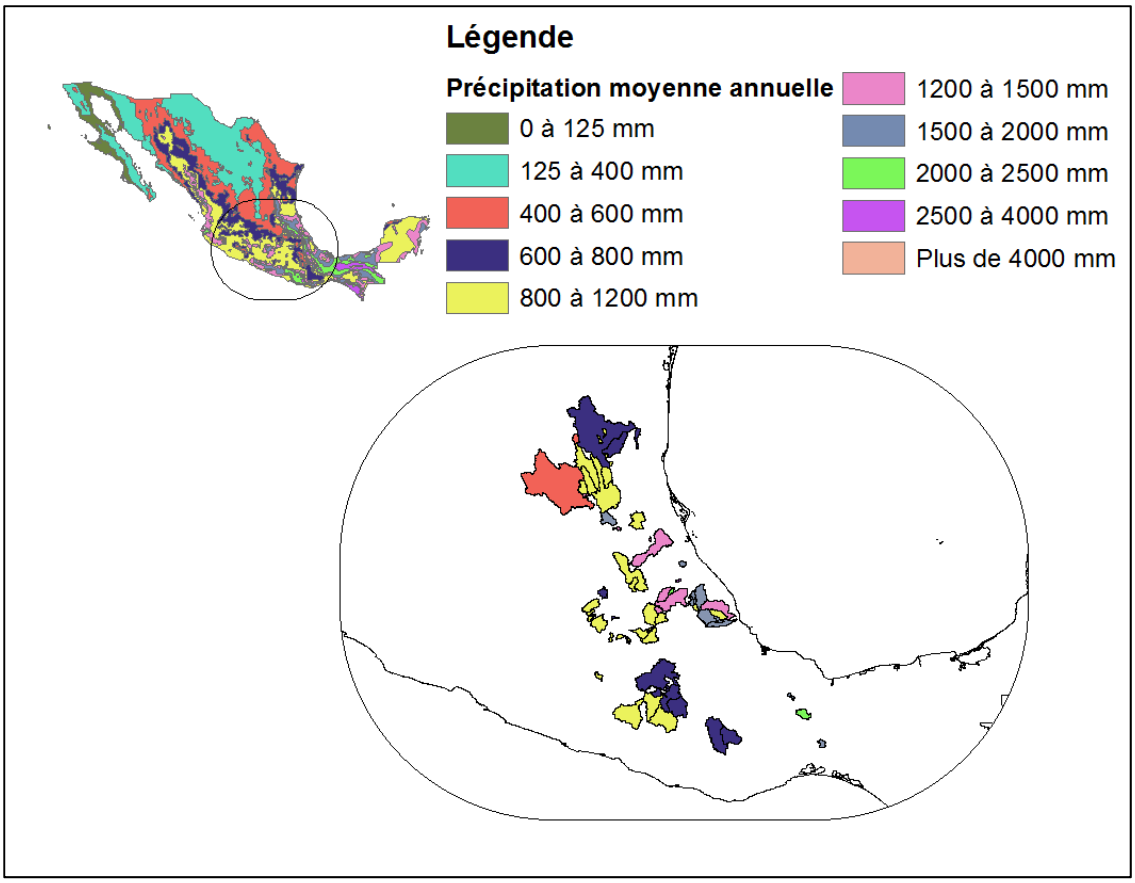

Figure 2.4 Carte des précipitations moyennes annuelles pour chaque bassin versant à l'étude

Les données maximales, minimales et médianes pour l'ensemble des types de données météorologiques, soient les précipitations journalières et les températures maximales, minimales et moyennes journalières, sont disponibles au Tableau 2.2. Malgré des températures journalières minimales moyennes sous zéro dans certains bassins (14 bassins versants parmi les bassins à l'étude) les précipitations sont considérées uniquement comme

étant liquides. Dans les rares cas où celles-ci tombent plutôt sous forme solide, aucune accumulation n'est créée autre que dans les hautes altitudes.

Suivant le même schéma que les précipitations, les débits que l'on retrouve au Mexique sont représentés par deux saisons distinctes, avec les crues importantes durant l'été (saison humide) et les étiages durant l'hiver (saison sèche). Les débits moyens varient entre 0 et 6700 m³/s parmi les bassins à l'étude. Au Mexique, il n'est pas rare de voir des rivières complètement à sec en saison hivernale (ou sèche) ou encore de voir des rivières sortir de leur lit et inonder les environs en période de pluie.

Conjointement avec la carte des précipitations moyennes annuelles, la Figure 2.5 permet de constater que le nord du Mexique présente un ruissellement moyen annuel très faible et qu'au niveau du secteur à l'étude, le ruissellement moyen varie entre 100 et 3000 mm par année.

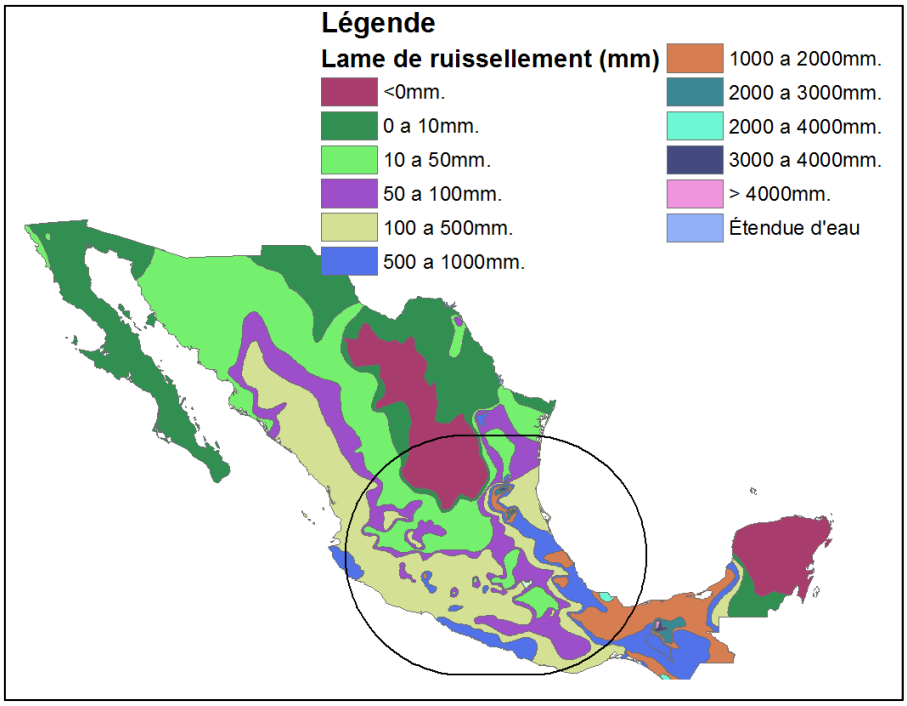

Figure 2.5 Carte des lames de ruissellement moyennes annuelles selon les stations hydrométriques des débits non-reconstruits

2.3 Données physiographiques

L'INEGI tient un registre détaillé de ses ressources naturelles. Celles qui ont servi pour cette recherche sont l'usage du sol ainsi que l'étude édaphologique.

Dans le premier cas, il s'agit d'une caractérisation du territoire en fonction du type de végétation ou encore d'utilisation du sol qui s'y retrouve, tandis que dans le deuxième cas, les sols sont classifiés selon leurs caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques, et sont regroupés en unités édaphologiques selon la carte mondiale des sols FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). Cette carte mondiale a été élaborée par la Société Internationale des Sciences du Sol lors d'un congrès en 1960. Cette carte «[…] s'inspire largement des concepts de classification des sols modernes, y compris la Soil Taxonomy, la légende de la carte des sols FAO du monde 1988, le Référentiel pédologique et les concepts russes » (FAO,2016) pour la classification des sols. Des 30 unités édaphologiques possibles, 22 se retrouvent au Mexique et 17 dans le secteur à l'étude comme le démontre la Figure 2.6. Chacune des unités se retrouvant sur le territoire étudié (portion encerclée sur la Figure 2.6) est accompagnée d'une description sommaire expliquant l'origine et la composition de l'unité, au Tableau 2.3.

Il est à noter que plus de vingt-cinq pourcent du territoire du Mexique en entier est de type Litosol et quinze pourcent est de type Regosol. De cette liste, quelques catégories ont pu être regroupées, pour les fins de la présente étude, puisque les processus physiques et chimiques majeurs sont les mêmes. Xerosol et Yermosol, tous deux étant caractérisés par l'accumulation de chaux secondaire, ont été groupés pour former la catégorie Calcisol et les trois unités composées de matières organiques (Chernozem, Feozem, Kastanozem) ont été groupées sous l'unité Chernozem. Cela a permis de réduire la classification des sols, sans perdre des données qui pourraient être d'une grande importance lors des étapes ultérieures.

Tableau 2.3 Description et regroupement des unités édaphologiques incluant l'annotation utilisée dans les différentes sections à venir

Unité édaphologique	**Description**	**Annotation**
Acrisol	Sol altéré par l'action des agents atmosphériques et de l'acide et composé d'argile dans la couche inférieure	Ac
Andosol	Sol foncé issu d'activités volcaniques, matériel riche en silicate	An
Cambisol	Matériel fin et moyen, début de séparation entre les 2 couches de sol	Ca
Chernozem	Couche épaisse de minéral noir en surface, riche en matière organique	Ch
Feozem	Couche épaisse de minéral noir en surface, riche en matière organique et lixiviée	Ch
Kastanozem	Matériel non consolidé, riche en matière organique	Ch
Fluvisol	Sol issu de dépôts marins	Fl
GleySol	Sol grandement influencé par l'eau souterraine, matériaux non-consolidés	Gl
Histosol	Tourbe et matériaux de déblais partiellement décomposés	Hi
Litosol	Sol qui contient moins de 20% de matériaux fins	Le
Luvisol	Sol qui contient plus d'argile dans la couche inférieure que celle supérieure et avec une grande saturation	Lu
Planosol	Couche supérieure avec matériau grossier qui est assise sur une sous-surface de matériau fin, mais dense	Pl
Regosol	Sol mal développé dans un matériel non-consolidé et fin	Re
Solonchak	Sol avec haute teneur en sel, matériaux non-consolidés	So
Vertisol	Argile lourde et gonflée	Ve
Xerosol	Sol avec une accumulation de chaux secondaire	Cal
Yermosol	Sol avec une accumulation de chaux secondaire	Cal

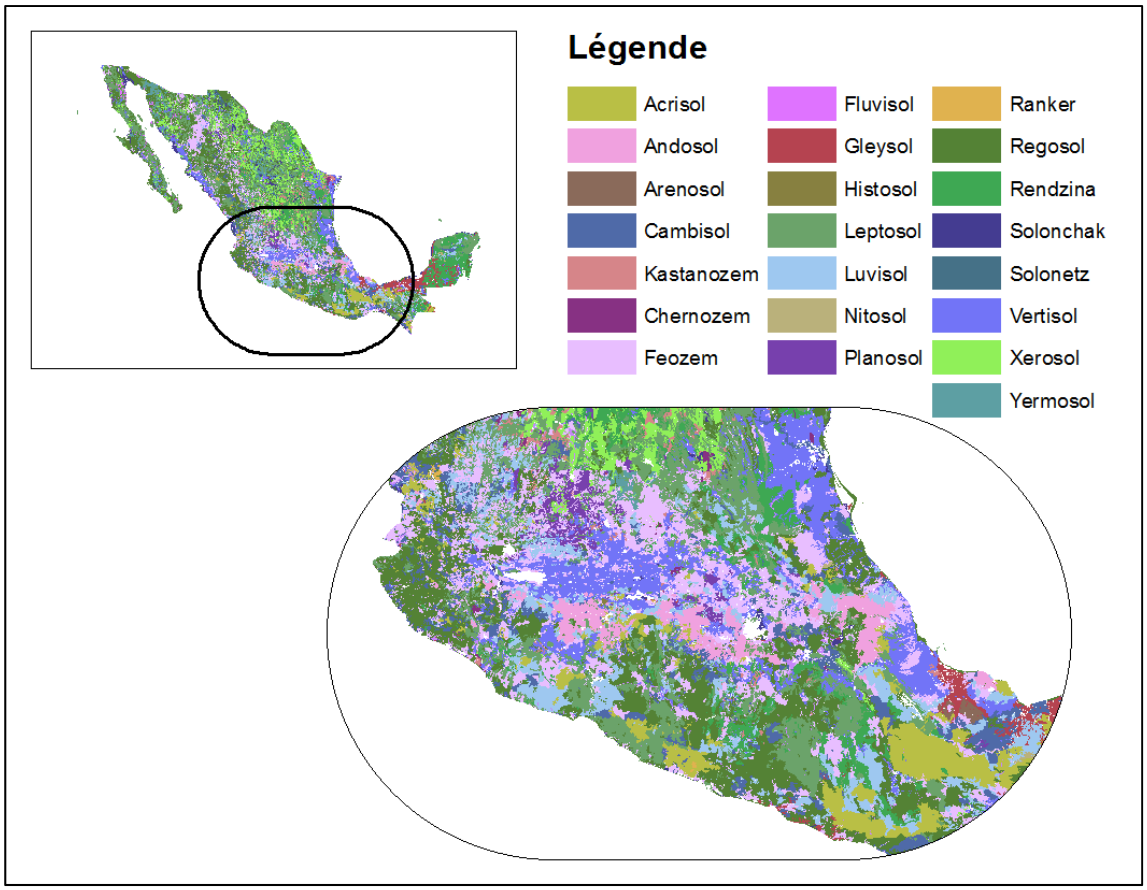

Figure 2.6 Répartition spatiale des unités édaphologiques sur le territoire mexicain

Grâce à un programme d'imagerie satellitaire et de recherche sur le terrain, l'INEGI fournit des renseignements sur l'utilisation du sol comme l'agriculture, la forêt, le territoire urbain ou les ressources en eau, mais aussi des renseignements tels que le type d'agriculture ou de forêt qui sont présents. Les données en régions difficiles d'accès sont cependant de moins bonne qualité puisqu'elles sont extraites uniquement par imagerie satellite. Chaque type d'agriculture ou de forêt est caractérisé par le type de végétation qui le compose et est montré au Tableau 2.4. Ce tableau donne aussi l'explication de chacune des catégories de végétation qui se retrouvent sur le territoire mexicain.

Tableau 2.4 Description des utilisations du sol

Toute possibilité	Description	Regroupement
Aire agricole	Agriculture	Agriculture
Aire agricole-Pâturage	Agriculture avec pâturage en moindre quantité	
Broussaille	Arbustes bas	
Autres Végétation	Autres types de végétation basse	
Pâturage	Végétation composée de graminées	
Pâturage Aire agricole	Végétation composée de graminées servant à l'agriculture	
Forêt	Forêt de conifères	Forêt
Pâturage Forêt(jungle)	Pâturage avec quelques grands arbres présents	
Forêt(jungle)	Très grands arbres de style jungle	
Forêt (jungle) Aire agricole	Grands arbres avec agriculture sous-jacente (café)	
Forêt(jungle) Pâturage	Grands arbres dominants avec pâturages présents sous les arbres	
Aire sans végétation	Sans véritable végétation	Sans Végétation
Urbain	Secteur urbain	Urbain
Étendue d'eau	Lac/rivière/océan	Eau

Le Tableau 2.4 montre aussi les regroupements qui ont été faits en fonction de l'utilisation principale du sol pour les fins de la présente étude. La distribution spatiale des différentes utilisations du territoire est montrée à la Figure 2.7.

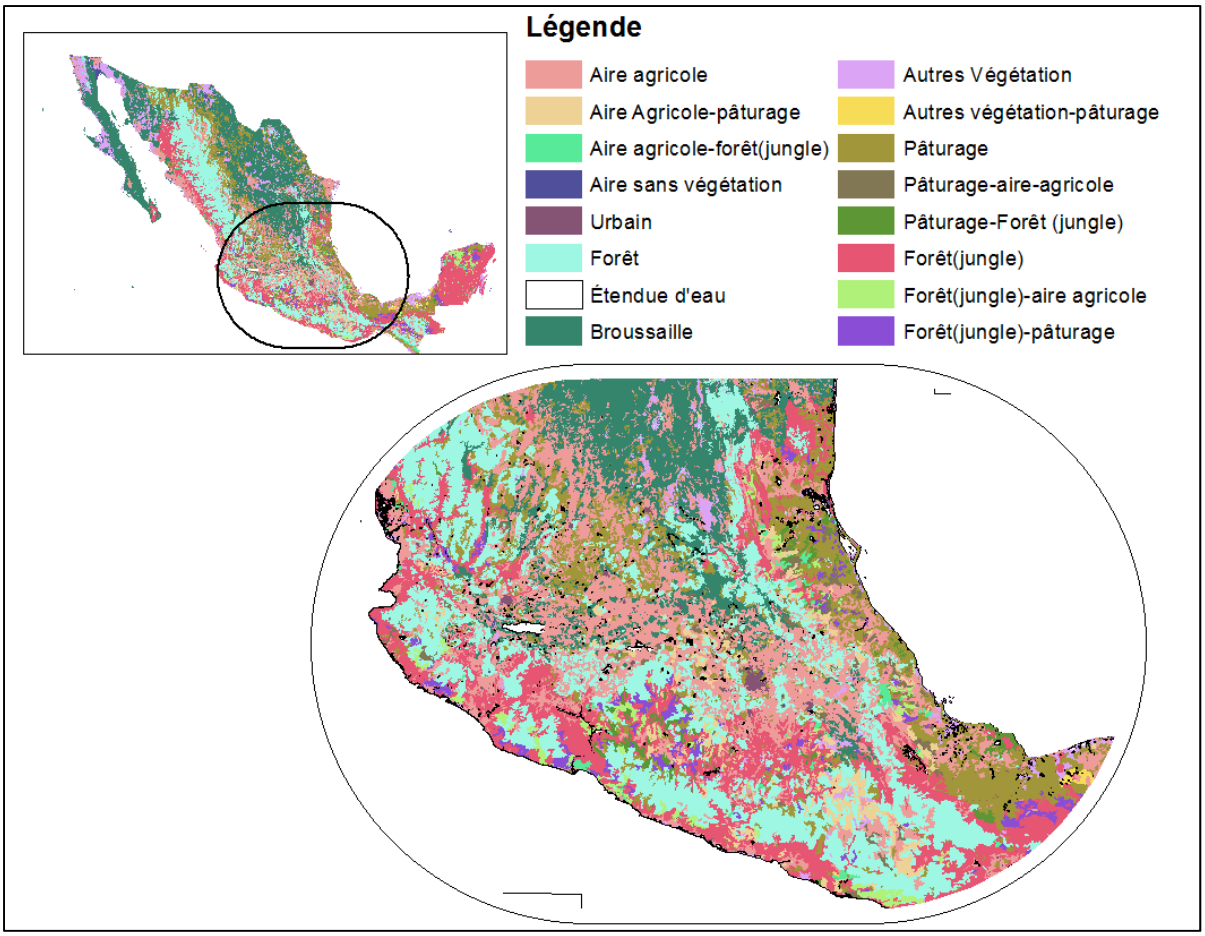

Figure 2.7 Répartition spatiale de l'utilisation du sol sur le territoire mexicain

2.4 Description détaillée du bassin versant de Naolinco de Victoria

Le bassin versant à la base de ce projet est le bassin versant non-jaugé de la rivière Naolinco, située dans l'état de Veracruz. Ce bassin, qui fait partie du secteur hydrologique d'Actopan (Figure 2.8), a une superficie de 114 km^2 (à l'entrée du village de Naolinco). Ses caractéristiques hydrométéorologiques et physiques sont décrites au Tableau 2.5. En ce qui concerne les informations données dans ce tableau, les statistiques sur les précipitations et les températures ont été calculées en considérant les 60 années de données qui étaient disponibles pour ce bassin (1950-2010). De plus, il est à noter que les pourcentages d'occupations du sol et des classes édaphologiques sont liés aux classifications indiquées au chapitre 3.

Ce bassin versant est d'une grande importance pour le village de Naolinco et les environs. Une partie importante des activités économiques, d'une part, reposent sur la qualité et la disponibilité de l'eau de ce bassin et, d'autre part, ont des impacts sur celles-ci. Pensons notamment à la production de chaussures (à Naolinco), à la production de fromages (à Miahuatlan, situé en amont) et à l'irrigation de terres agricoles (en aval de Naolinco).

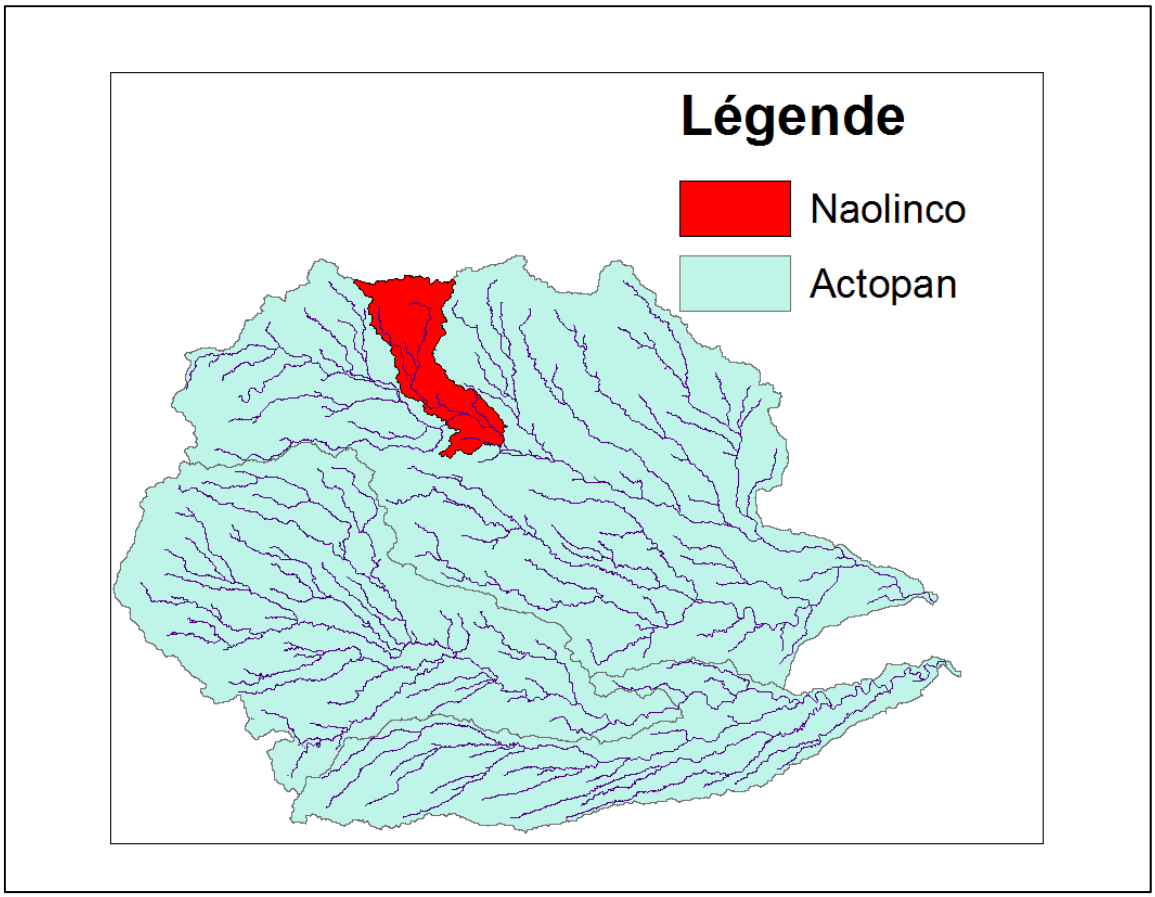

Figure 2.8 Localisation du bassin versant de Naolinco, dans le secteur d'Actopan

Tableau 2.5 Caractéristiques hydrométéorologiques et physiques du bassin versant de Naolinco

Catégories	**Caractéristiques**	**Valeurs Naolinco**
Géographiques	Latitude du centroïde (°)	19.656
	Longitude du centroïde (°)	-96.868
	Altitude moyenne (m)	1410
	Superficie (km^2)	114
	Pente (°)	10.02
Climatologiques	Précipitation journalière moyenne (mm)	4.04
	Température maximale journalière (°C)	22.23
	Température minimale journalière (°C)	11.07
	Température moyenne journalière (°C)	16.64
Utilisation du sol	Agriculture (%)	99,97%
	Forêt (%)	0,03%
Types de sol	Chernozem (%)	6,9%
	Luvisol (%)	7,1%
	Andosol (%)	84,3%
	Leptosol (%)	1,3%

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre a pour but de tracer un portrait global de l'ensemble des étapes qui ont été suivies afin de mener les études de régionalisation sur les bassins versants non-jaugés au Mexique, mais aussi d'émettre des recommandations issues des travaux pour l'application des méthodes sur le bassin versant de la rivière Naolinco. Dans un premier temps, l'étape d'acquisition des données ainsi que le traitement préalable des données par le système d'information géographique (SIG) est décrite. Puis, les modèles hydrologiques et les méthodes de calage utilisés sont détaillés. Finalement, les méthodes de régionalisation appliquées pour mener à bien l'étude hydrologique sur des bassins versants non-jaugés au Mexique sont présentées.

3.1 Survol de la méthodologie

La modélisation hydrologique nécessite une multitude de données. Il faut cependant être conscient que ces données sont souvent manquantes, comme c'est le cas pour bon nombre de bassins versants au Mexique. Ces problèmes de disponibilité des données hydrologiques rendent difficile voire impossible la calibration des modèles, qui nécessite des débits observés. Dans un tel cas, il est donc impossible de faire de la prévision. Pour contourner ce problème, différentes techniques ont été développées pour permettre la modélisation hydrologique sans information sur les débits observés. Ces techniques, qui se nomment régionalisation des paramètres, ont été testées dans plusieurs pays du monde, mais très peu utilisées au Mexique. Ce travail de recherche a donc comme objectif de tester différentes techniques de régionalisation des paramètres afin de procéder à une modélisation hydrologique à un site pseudo non-jaugé pour ensuite transposer les conclusions sur un site réellement non-jaugé, le bassin versant de Naolinco. Trois méthodes ont été testées, soit la régionalisation par proximité spatiale, la régionalisation par similitude physique et la régionalisation intégrée. Trois modèles hydrologiques ont également été utilisés afin de comparer leurs performances dans le secteur à l'étude. Pour y arriver, plusieurs étapes

préalables ont dû être effectuées et sont décrites plus en détails dans les sections suivantes. La Figure 3.1 schématise l'ensemble de la méthodologie adoptée dans le cadre de ces travaux.

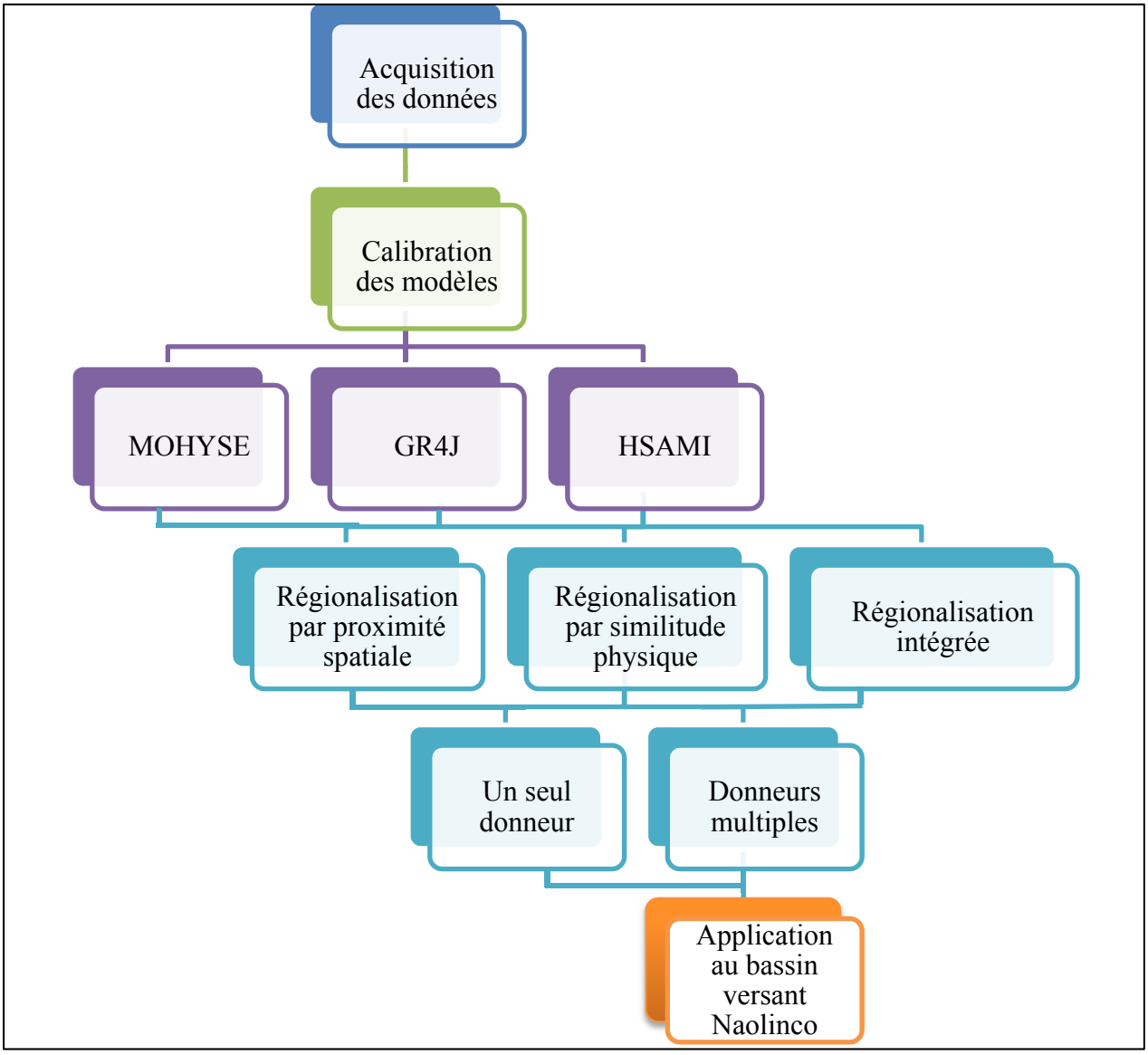

Figure 3.1 Schéma de l'ensemble des étapes de la méthodologie du projet

3.2 Acquisition et nettoyage des données

Ce projet de recherche fait partie d'une collaboration entre l'École de technologie supérieure et la Universidad Veracruzana du Mexique. Il a inclus un stage d'études de trois mois au Mexique, avec comme objectifs principaux l'acquisition de données de terrain, la collecte d'information en format électronique sur des bassins jaugés (ces données sont fournies, via téléchargement, par différents organismes mexicains), ainsi que la rencontre avec les différentes organisations en ressources hydriques mexicaines collaboratrices au projet : le département de génie civil et la faculté de biologie de la Universidad Veracruzana et la commission municipale de l'eau de la municipalité de Naolinco de Victoria. Il a aussi permis de se familiariser avec les ressources naturelles du pays, d'avoir une meilleure connaissance quant à la nécessité de bien calculer les débits des rivières, et de récolter la majeure partie des données qui ont servi aux calculs. Les autres données ont par la suite été téléchargées par l'entremise de collaborateurs locaux. Finalement, le stage a permis de mieux connaître une partie du territoire à l'étude, de mieux saisir les problématiques associées à la gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants au Mexique.

3.2.1 Manipulation des données brutes

Une fois les données physiographiques et hydrométéorologiques en main et avant de pouvoir procéder à la modélisation hydrologique, plusieurs manipulations ont dû être effectuées afin de délimiter (et donc, créer) les bassins versants à partir de modèles numériques d'élévation (MNE). Ces étapes sont décrites ci-dessous.

L'INEGI donne accès à l'ensemble des données de relief du Mexique à une résolution variant de 15 à 120 mètres. Pour la nécessité de ce projet, les MNE de l'ensemble des états de la partie centrale du Mexique, à la plus fine résolution, soit de 15 mètres, ont été extraits. La zone utilisée dans les calculs préliminaires est plus élargie que celle de la zone d'étude pour s'assurer que, lors du découpage des bassins versants, l'ensemble de la surface contributrice au débit soit intégrée au calcul. Aussi, afin d'avoir un secteur représentatif du Mexique central, une plus grande aire d'étude a été conservée jusqu'à la toute fin et c'est simplement

lors du choix final des bassins versants qui sont utilisés dans l'étude qu'un certain raffinement de la surface d'étude a été fait. En se basant sur le MNE, un ensemble d'étapes a été complété à l'aide du module ARC Hydro Tool Box de ArcGIS 10.3 (Esri, 2014). ArcGIS est un logiciel de système d'information géographique des données qui permet entre autres la construction de cartes basées sur des données satellites. C'est ainsi qu'il a été possible de modéliser les bassins versants en fonction d'un exutoire qui était en fait une station hydrométrique pour chaque bassin. Les étapes qui ont été suivies à cette fin sont résumées à la Figure 3.2.

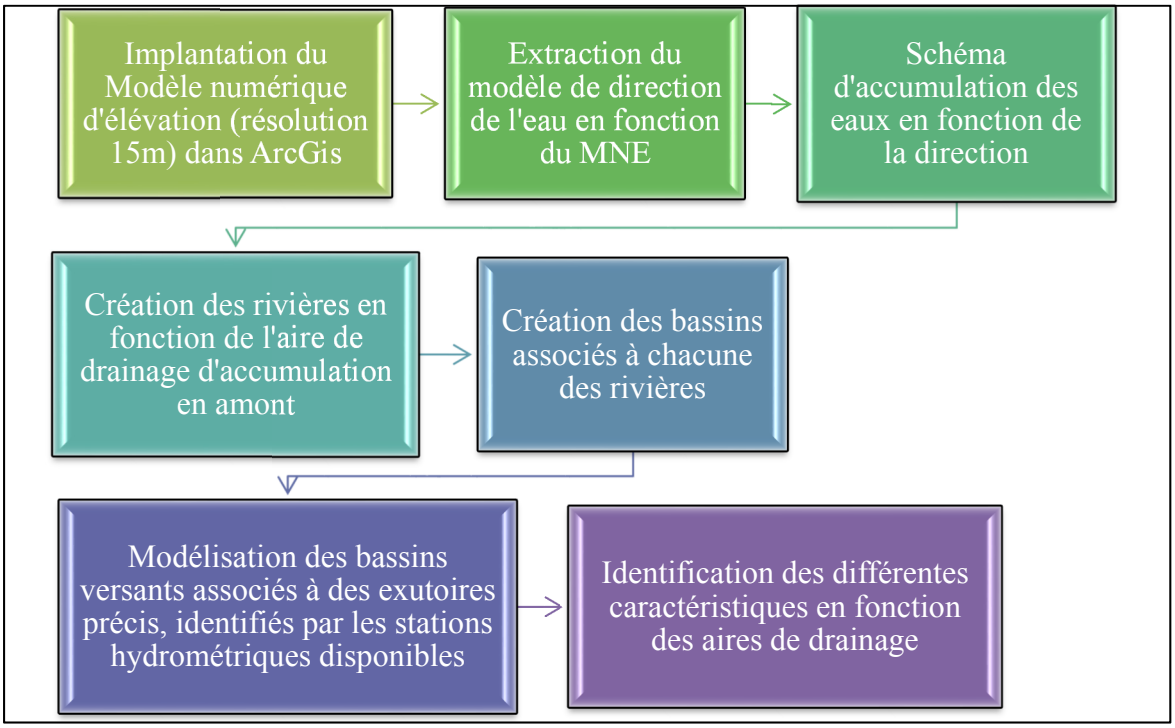

Figure 3.2 Étapes de modélisation réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS pour arriver à la modélisation de bassins versants spécifiques puis aux découpages des caractéristiques descriptives de chacune des aires de drainage

Bien qu'une multitude de stations hydrométriques soit disponible au Mexique, peu sont concrètement utilisables pour les fins de cette analyse. Plusieurs ont d'importantes lacunes dans leurs données, certaines sont de qualité jugée inacceptable ou encore plusieurs sont localisées dans des canaux non naturels avec un débit contrôlé ou sont approvisionnées par

de très petites aires de drainage. Il faut donc, préalablement à la création des bassins versants, s'assurer que les débits des différentes stations sont utilisables et que celles-ci soient correctement localisées sur les cours d'eau principaux de façon à ce que la résolution et la taille de bassin soient acceptables. De plus, étant des processus itératifs souvent coûteux en temps de calcul, plusieurs des étapes qui mènent à la modélisation des bassins versants sur ArcGIS ont demandé plus de 48h de calcul sur l'ordinateur utilisé pour ces travaux (Intel® Core™ i7-4510U CPU, 8.00 GB de Ram).

Une fois les bassins versants extraits, les caractéristiques physiques peuvent être identifiées à partir de chacune des aires de drainage et être associées aux bassins. Cette étape permet de calculer les aires représentatives pour chacune des catégories de caractéristiques du terrain qui serviront de descripteurs physiques lors de l'étape de régionalisation. Les caractéristiques ayant été extraites des bassins versants sont les unités édaphologiques, les utilisations et types de sol, l'altitude moyenne, les coordonnées des centroïdes ainsi que la pente des bassins versants.

Suite à la modélisation des bassins versants ainsi qu'à l'acquisition de l'ensemble de propriétés des bassins versants, une moyenne spatialisée des variables météorologiques (précipitations, températures) a été trouvée par la méthode des polygones de Thiessen (Rhynsburger, 1973). Cette méthode utilise le ratio des aires représentatives de chacune des stations météo disponibles par rapport à la superficie totale d'un bassin, de façon à déterminer le poids de chacune des stations lors du moyennage spatial des données météorologiques. Les aires représentatives des stations sont issues d'un découpage géométrique de l'espace en fonction de leur localisation par rapport au bassin versant étudié. Un exemple d'application de la méthode se trouve à la Figure 3.3, où les polygones de Thiessen sont illustrés en noir, les points numérotés indiquent les stations météorologiques et le bassin apparaît en gris. La moyenne selon Thiessen a été calculée sur une base journalière. Cette dernière étape complétant l'ensemble des étapes préliminaires à la modélisation hydrologique, il a donc été possible, ensuite, de commencer l'étape de calibration des différents modèles hydrologiques choisis pour cette étude.

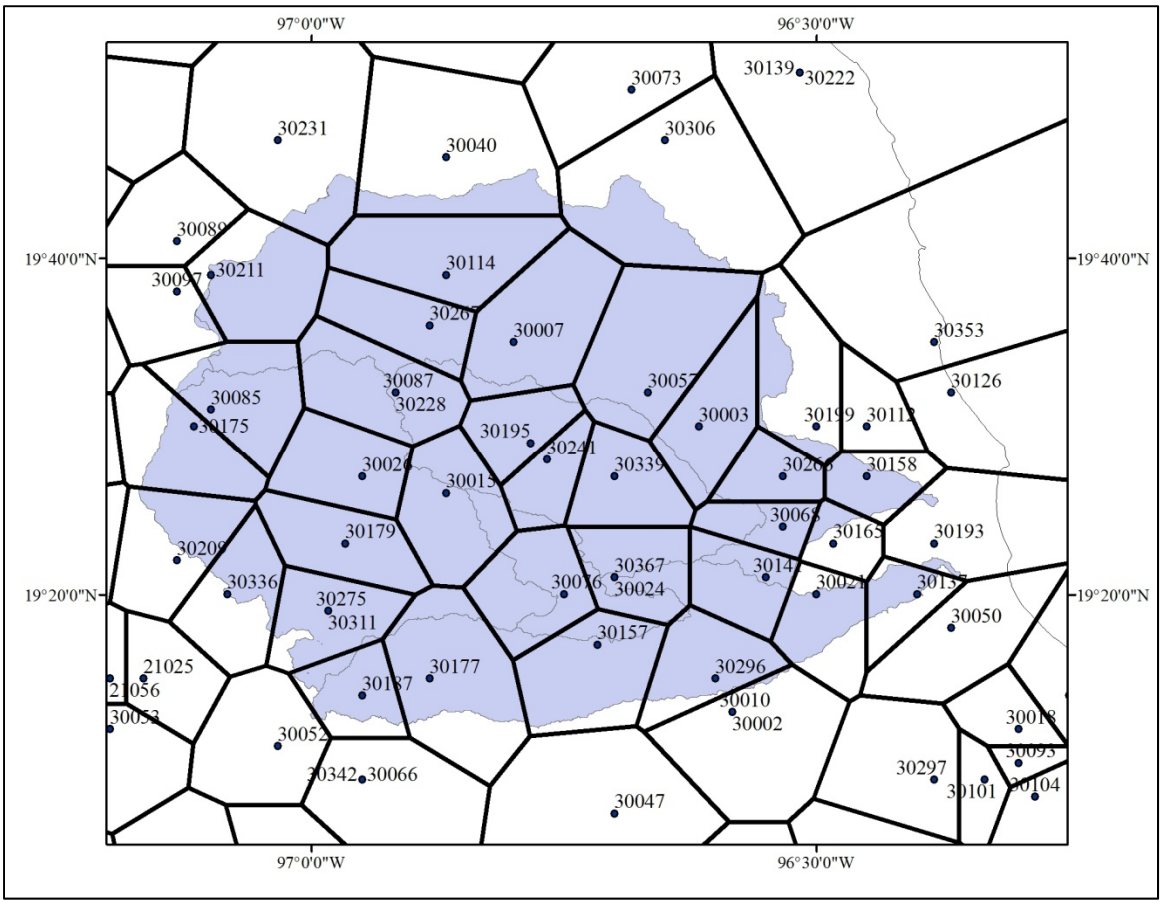

Figure 3.3 Exemple d'application de la méthode des polygones de Thiessen pour le calcul de moyenne des données météorologiques pour le secteur de la région hydrographique de Papaloapan, dans l'état de Veracruz

3.3 Description des modèles hydrologiques

Pour ce projet, trois modèles hydrologiques ont été retenus, soit le Modèle Hydrologique Simplifié à l'Extrême (MOHYSE) (Fortin & Turcotte, 2007), le modèle GR4J (Perrin et al., 2003) et HSAMI (Fortin, 2000), tant à l'étape de calibration qu'à celle de la régionalisation. Puisque les trois modèles sont différents quant à leur nombre de paramètres ainsi que dans leur structure, ils permettent de voir entre autres l'impact du choix du modèle sur les résultats obtenus. De plus, le choix des modèles hydrologiques s'est fait en fonction de la quantité de données nécessaires comme variables d'entrée par rapport aux données disponibles ainsi que

sur l'expérience acquise précédemment avec ces modèles et les performances obtenues lors d'études menées au Mexique. Des représentations schématiques de chacun des modèles sont présentées à l'ANNEXE I.

3.3.1 MOHYSE

MOHYSE est un modèle conceptuel global à 10 paramètres avec deux paramètres reliés aux processus de neige, qui seront négligés dans ce projet en raison de la localisation du secteur à l'étude. Ce modèle hydrologique a été conçu, au départ, pour des fins éducatives dans le cadre d'un cours gradué du département des sciences de la terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal, pour des bassins nordiques. Depuis, il a souvent été utilisé comme modèle hydrologique à des fins de recherche (Arsenault et al, 2014; Arsenault & Brissette, 2014), de par sa simplicité et le nombre réduit de données nécessaire à son utilisation. De plus, ce modèle a été retenu puisque des études précédentes ont démontré qu'il se comportait bien dans le secteur à l'étude décrit précédemment. Casteñeda Gonzales (2014) a appliqué le modèle MOHYSE pour la première fois en climat tropical avec succès. Elle a étudié un bassin versant dans la région centrale de l'État de Veracruz de 2000 à 2010. MOHYSE ne requiert que deux variables d'entrée, soit les températures moyennes journalières et les précipitations journalières totales, ainsi que deux constantes relatives au bassin versant, soit sa superficie et la latitude de son centroïde.

3.3.2 GR4J

Le modèle GR4J est un modèle conceptuel global à 4 paramètres. Il est fréquemment utilisé dans les études de régionalisation pour son nombre réduit de paramètres, ce qui facilite le traitement des bassins versants non-jaugés (Oudin et al., 2008; Rojas-Serna et al., 2006). Les données d'entrée de ce modèle sont l'évapotranspiration potentielle, les températures minimales et maximales et les précipitations, sur une base journalière. L'évapotranspiration potentielle n'étant pas une donnée disponible directement, la formule d'évapotranspiration potentielle d'Oudin (Oudin et al., 2005) a été utilisée (Équation (3.1).

$$PE = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda_p * 100} \; si \; T_a + 5 > 0 \tag{3.1}$$

Où PE est l'évapotranspiration potentielle, le R_e la radiation solaire (prise comme étant la valeur moyenne de toute la radiation solaire sur une période de 24h), T_a la température moyenne journalière et λ_p le flux de chaleur latente (calculé en fonction de la température moyenne journalière). Pour ce calcul, les données de latitude des bassins versants et les températures moyennes journalières sont nécessaires. Ce modèle hydrologique a aussi été choisi puisqu'il a été utilisé à quelques reprises sur des bassins versants au Mexique et a démontré des performances acceptables (Velázquez et al., 2015). Le modèle hydrologique GR4J est un modèle qui n'a pas de module de neige intégré.

3.3.3 HSAMI

Le modèle HSAMI est un modèle conceptuel à 23 paramètres dont 6 sont des paramètres liés à la neige. Étant un modèle avec beaucoup plus de paramètres que les deux modèles hydrologiques précédents, il a été choisi pour comparer les performances et valider si le nombre de paramètres a un impact sur le résultat obtenu en régionalisation. Tout comme les deux premiers modèles, il ne nécessite que très peu de variables d'entrée soit les températures minimum et maximum, les quantités de précipitations solides et liquides, le couvert nuageux et la hauteur du couvert neigeux. Le couvert nuageux a été fixé à une valeur par défaut de 0.5 puisque cette information n'était pas connue. Le couvert neigeux a été considéré comme inexistant, en raison de la localisation du secteur d'étude.

3.4 Calibration

L'étape de calibration est très importante pour arriver à des résultats fiables en régionalisation. Cette étape consiste à trouver le jeu de paramètres optimal qui permettra aux débits simulés par le modèle hydrologique de se rapprocher le plus possible des débits observés. Afin d'évaluer cette ressemblance, le coefficient NSE est utilisé ici comme métrique de performance. Le coefficient NSE est maximisé lorsque les débits simulés par le

modèle se rapprochent le plus possible des données observées. Il se calcule à l'aide de l'équation (1.1). Le coefficient de NSE varie entre -∞ et un, un étant la valeur maximale qui correspond à une concordance parfaite entre les débits observés et simulés. Une valeur de NSE négative signifie que la moyenne des débits observés constitue un meilleur estimateur des débits que ceux qui sont simulés par le modèle hydrologique. La performance des modèles hydrologiques est jugée selon les intervalles indiqués au Tableau 3.1 (Molnar, 2011). La métrique de performance du NSE a été choisie pour différentes raisons, notamment puisque c'est la métrique la plus commune en hydrologie, ce qui le rend facilement compréhensible et facilite la comparaison avec les autres études dans la littérature. Les qualificatifs indiqués au Tableau 3.1, en lien avec les valeurs de cette métrique, permettent d'introduire une terminologie qui sera utilisée dans le chapitre des résultats pour qualifier les performances des modèles hydrologiques. Il est à noter, par ailleurs, que le NSE a tendance à mettre l'accent, lors de la calibration, sur les crues plus que sur les étiages, mais il est généralement reconnu dans la littérature comme étant un bon compromis entre les autres métriques (Arsenault, 2015).

Tableau 3.1 Qualificatifs associés aux valeurs du coefficient de Nash-Sutcliffe

Nash-Sutcliffe	**Qualification de la performance**
<0.2	Insatisfaisant
0.2-0.4	Acceptable
0.4-0.6	Bien
0.6-0.8	Très bien
0.8-1.0	Excellent

La calibration a été faite automatiquement en utilisant l'algorithme « Shuffled Complex Evolution - University of Arizona » (SCEUA; Duan et al., 1993). Une période de 15 ans a été considérée et varie d'un bassin à l'autre en fonction des périodes au cours desquelles les données hydrométéorologiques sont disponibles. Les dates de début et de fin des périodes de calibration ainsi que les données disponibles pour chacun des bassins se trouvent à

l'ANNEXE IV. Pour chaque bassin, une seule calibration a été effectuée et un jeu de paramètres a été conservé pour pouvoir ensuite être utilisé à l'étape de régionalisation. L'étude de l'équifinalité, très souvent abordée dans les recherches sur la régionalisation des paramètres, ne sera pas abordée dans le cadre des travaux de ce projet, entre autres en se basant sur Arsenault & Brissette (2014) qui ont déterminé que l'équifinalité ne jouait pas un rôle majeur en régionalisation.

Tel que mentionné dans les paragraphes précédents, les modèles MOHYSE et HSAMI sont des modèles hydrologiques avec des modules de neige intégrés. Dans le cas du modèle MOHYSE, le module de neige a tout simplement été retiré du modèle puisque la structure et le code du modèle permettaient de le faire aisément. Pour le modèle de HSAMI, la stratégie adoptée a été de fixer les précipitations solides, requises en variables d'entrée, à 0.

3.5 Régionalisation

Les différentes méthodes de régionalisation ont été développées pour mieux estimer les débits sur n'importe quel bassin versant, même si les données hydrométriques ne sont pas disponibles. La régionalisation peut être réalisée par différentes méthodes, soit par régression linéaire, par similitude physique, par proximité spatiale ou encore par transposition en fonction du rapport des aires, conformément aux à ce qui a été présenté dans la revue de littérature (Chapitre 1). Afin d'évaluer l'applicabilité et le niveau de performance des différentes approches pour la région à l'étude, la méthode des bassins pseudo non-jaugés a été utilisée. Cette façon de faire, qui considère tour à tour chacun des bassins versants comme étant non-jaugés, permet d'appliquer les méthodes de régionalisation à des bassins où il est ensuite possible d'évaluer leur performance en calculant la valeur du NSE en calibration ainsi qu'en modélisation par régionalisation (puisque les débits sont connus, en réalité). Cela permet donc de connaître l'applicabilité et la robustesse de la méthode. Trois techniques ont été testées sur les 91 bassins versants pour en tirer des conclusions quant à leur applicabilité sur la région à l'étude, et ce, en se basant sur les résultats issus de chacun des trois modèles hydrologiques. Les techniques sont présentées dans les sous-sections 3.5.1à 3.5.3.

3.5.1 Régionalisation par proximité spatiale

Pour la régionalisation par proximité spatiale, la distance euclidienne entre les centroïdes des bassins versants potentiellement donneurs et le bassin versant pseudo non-jaugé a été calculée. Différentes analyses ont été effectuées, en considérant d'abord un seul donneur (bassin le plus près physiquement du site pseudo non-jaugé) et ensuite en augmentant graduellement le nombre de donneurs, jusqu'à les 15 bassins versants. Les jeux de paramètres issus de la calibration pour chacun des bassins versants retenus comme donneurs ont été implantés dans le modèle hydrologique pour faire une simulation, à chaque fois, au site pseudo non-jaugé. De cette simulation, un critère de NSE a été calculé et a permis d'évaluer quantitativement la simulation par le jeu de paramètres transféré au bassin pseudo non-jaugé.

3.5.2 Régionalisation par similitude physique

L'équation 1.2, introduite au Chapitre 1, a été utilisée pour la régionalisation par similitude physique. Puisque plusieurs descripteurs physiques étaient disponibles dans le secteur à l'étude, certaines étapes ont été préalablement réalisées afin d'étudier les possibilités, en termes de quantité de descripteurs à analyser.

En premier lieu, des essais de corrélation entre les ratios des différents types édaphologiques ont été complétés afin de voir si certaines unités édaphologiques avaient une corrélation avec d'autres, soit positivement ou négativement. Dans le cas où deux descripteurs démontreraient une forte corrélation, l'un d'entre eux n'apporterait pas de nouvelle information, et pourrait donc être mis de côté.

En deuxième lieu, chacun des descripteurs a été traité individuellement lors du calcul de l'indice de similitude. Cela avait pour but de voir lesquels des descripteurs avaient le potentiel de mieux représenter les phénomènes hydrologiques lorsqu'un seul bassin versant donneur était considéré. Un test statistique de Kruskal-Walis (Kruskal & Wallis, 1952) a été

effectué et a permis de vérifier si les descripteurs (représentés par les valeurs de NSE en régionalisation pour tous les bassins jaugés les plus près physiquement) étaient statistiquement différents les uns des autres. Ce test statistique non paramétrique permet de voir si les échantillons proviennent d'une même population. Une fois les descripteurs physiques les plus influents trouvés, l'indice de similitude a été calculé en ajoutant d'autres descripteurs jusqu'à trouver la combinaison idéale de descripteurs physiques pour décrire adéquatement l'ensemble des bassins versants pseudo non-jaugés.

3.5.3 Régionalisation intégrée

La régionalisation intégrée est la mise en commun des régionalisations par similitude physique et par proximité spatiale en considérant cette fois la latitude et la longitude parmi les descripteurs potentiels. À la lumière des résultats obtenus pour la régionalisation par similitude physique, trois différentes démarches ont entreprises pour la régionalisation intégrée et sont décrites dans le chapitre des résultats, à la section 4.5. De nouveaux indices de similitude ont été calculés, en incluant cette fois les distances euclidiennes entre les centroïdes de chaque paire de bassins jaugé et pseudo non-jaugé. Un bassin donneur par bassin pseudo non-jaugé a été considéré.

3.5.4 Combinaison des bassins versants donneurs et nombre de donneurs optimal

Plusieurs études dans la littérature ont démontré qu'utiliser plus d'un bassin versant donneur peut être d'une grande aide pour la modélisation hydrologique aux bassins non-jaugés. Afin de tester cette technique, le débit moyen, simulé suite au transfert de plusieurs jeux des paramètres provenant de donneurs multiples, a été calculé. Les débits permettant de calculer le débit moyen ont été choisis en se basant sur les 15 donneurs dont les distances (proximité spatiale) étaient les plus faibles (la section 4.6 expose les raisons pour lesquelles des donneurs multiples ont été considérés avec la méthode de régionalisation par proximité spatiale uniquement). Ainsi, 14 moyennes arithmétiques ont été obtenues, qui incluent à chaque fois un débit de plus dans leur calcul (moyennes de deux, jusqu'à 15 valeurs). Ces débits ont par la suite été comparés aux données observées, et ont permis de valider si le fait

d'ajouter des donneurs augmentait la performance en régionalisation et d'identifier le nombre de bassins versants donneurs optimal.

3.5.5 Transposition de site non-jaugé par rapport des superficies

La technique de transposition des débits par rapport de superficie est une méthode simple étant appliquée aux bassins versants non-jaugés. Bien qu'elle ait été testée dans le cadre de ce projet (deux secteurs ont été présélectionnés et sont montrés aux Figure 3.4 et Figure 3.5), elle n'a pas été retenue comme méthode possible pour le transfert des données de débits en raison du trop faible nombre de possibilités d'application de cette méthode (seulement trois situations pouvaient être testées). Il était donc difficile de tirer des conclusions basées sur un si petit échantillon (des explications supplémentaires sont données à la section 5.7.1).

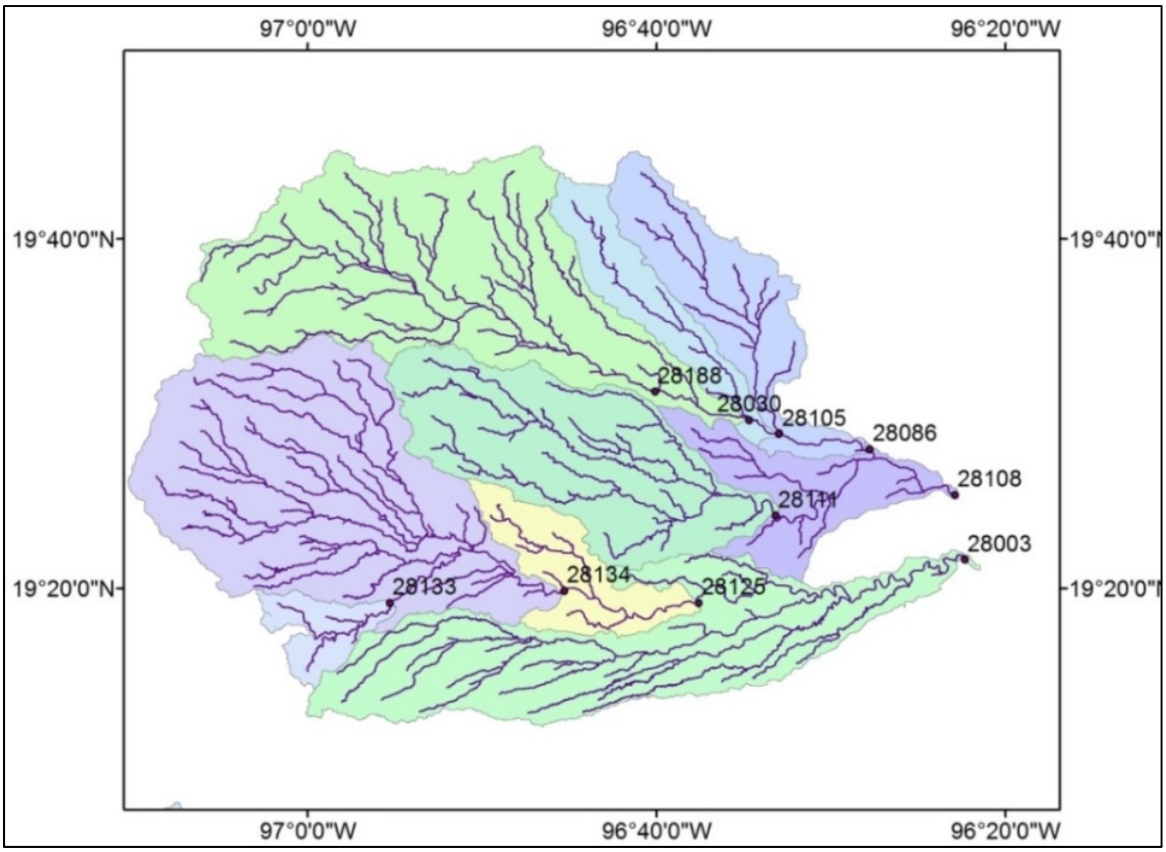

Figure 3.4 Région hydrologique d'Actopan qui devait servir pour la transposition des débits par la méthode du rapport des superficies pour la combinaison des bassins 28188, 28030, 28105, 28086 et 28108 ainsi que 28133, 28134, 28125 et 28003

3.6 Application des résultats sur le site non-jaugé de Naolinco

Suite à l'ensemble des vérifications effectuées en considérant, tour à tour, chacun des bassins étudiés comme pseudo non-jaugé, la méthode de régionalisation ayant obtenu les meilleurs résultats a été retenue pour être appliquée au bassin versant de la rivière Naolinco, pour lequel aucune donnée de débit observé n'est disponible. La description de ce bassin se retrouve à la section 2.4. À titre de rappel, l'objectif initial de ce projet est la prévision hydrologique sur cette rivière.

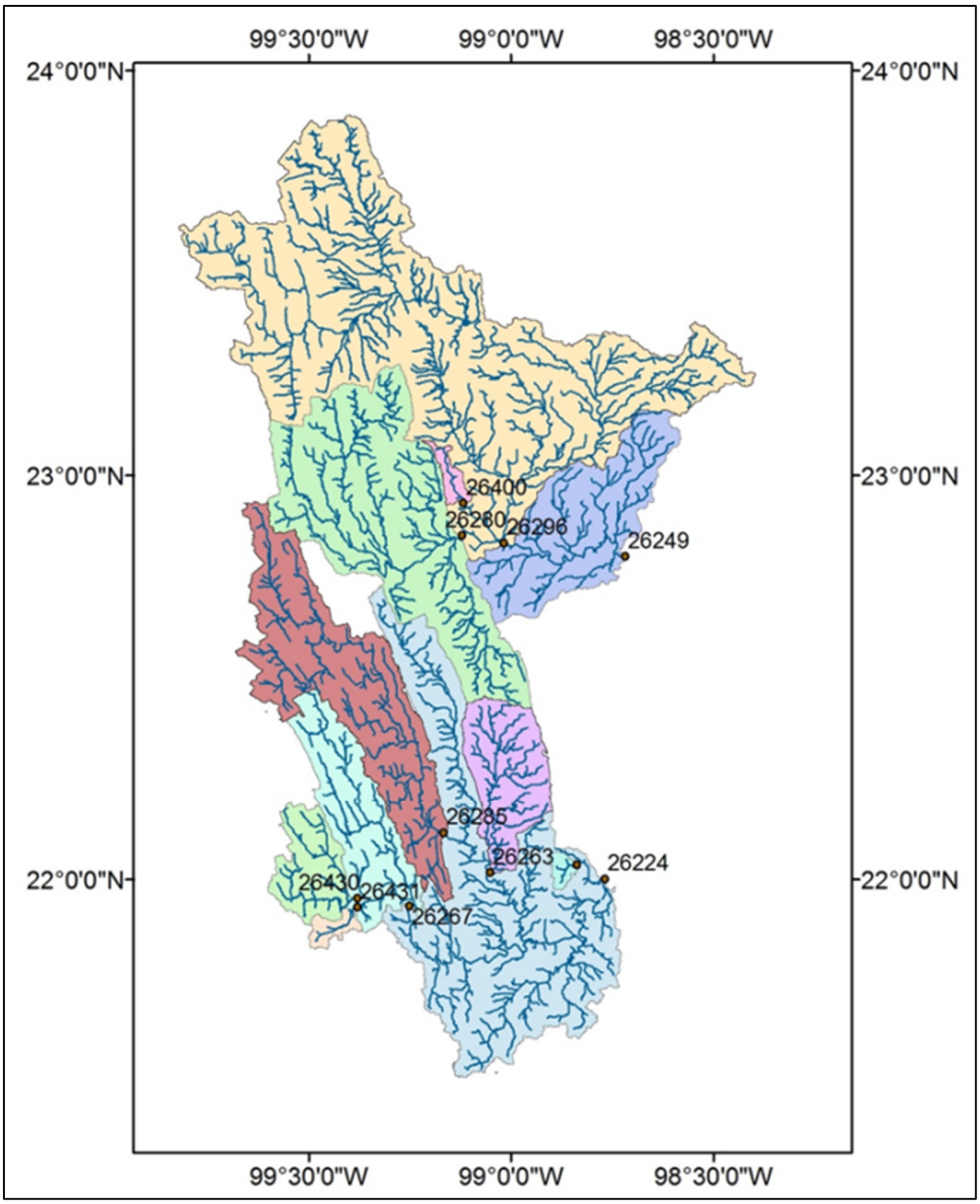

Figure 3.5 Région hydrologique de Panuco qui devait servir à tester la méthode de transposition des débits par la méthode du rapport des superficies pour les combinaisons 26280, 26296 et 26249 ainsi que 26430, 26267 et 26224

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSES

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats issus de l'ensemble des manipulations pour arriver à l'objectif principal du travail, soit la détermination du débit du bassin versant non-jaugé de Naolinco. Les étapes de calcul majeures ainsi que l'interprétation des résultats obtenus y sont abordées.

4.1 Analyse des données de base

Pour obtenir une modélisation hydrologique adéquate, il faut au départ un certain degré de confiance envers les données de base, soient les données hydrométriques et météorologiques. Une vérification visuelle de la qualité des données hydrométriques a été effectuée, visant à s'assurer que les données ne comportaient pas de débits négatifs ou aberrants. Lorsque rencontrées, ces deux types d'anomalies dans les données ont été effacées pour éviter de donner de mauvais indices aux modèles hydrologiques lors du processus de calibration. Cette vérification a aussi permis de déterminer si les stations hydrométriques étaient utilisables aux fins de cette analyse, et si elles avaient au minimum 15 années de données consécutives.

Deux types de stations problématiques ont été rencontrés lors du processus d'analyse. La première anomalie rencontrée était lorsque certaines stations dont les débits étaient globalement peu élevés (entre 0 et 200 m^3/s) et présentaient un pic considérable et soudain d'une durée d'une seule journée, qui faisait passer les débits à plus de 20000 m^3/s (Figure 4.1). Dans un tel cas, la valeur aberrante était effacée et devenait une donnée absente ou encore, lorsque possible, la période de simulation pour cette station a été sélectionnée de façon à exclure une telle valeur.

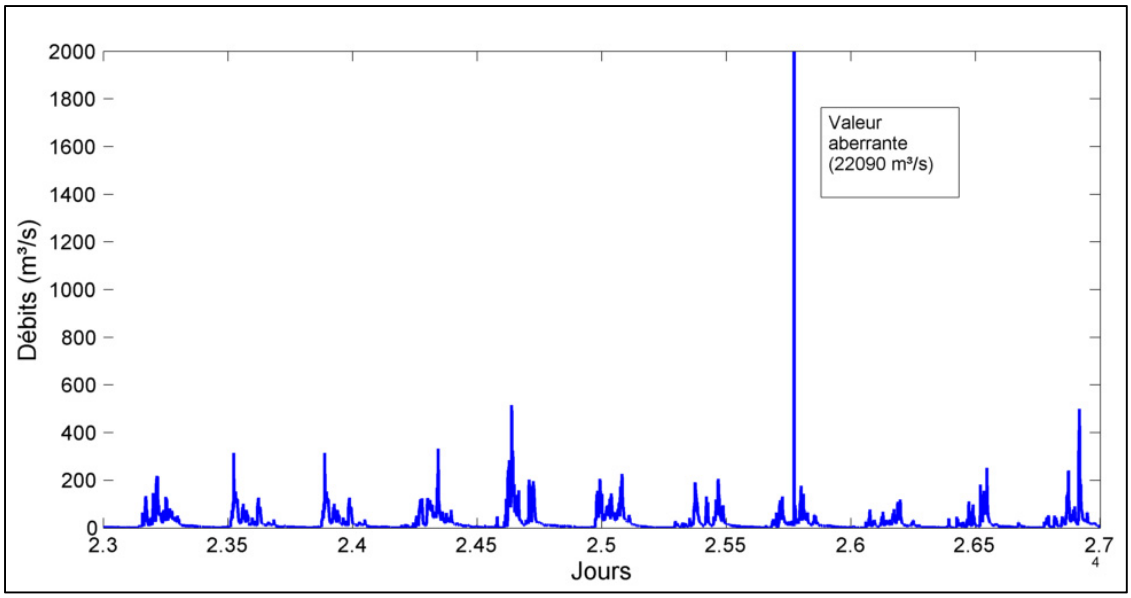

Figure 4.1 Exemple de débit aberrant dans les stations hydrométriques à l'étude

Un autre phénomène apparu lors du traitement des données de base a été la présence d'un changement visible au niveau des stations hydrométriques, illustré par une cassure évidente entre deux périodes de débits. Un exemple de ce type de phénomène se retrouve à la Figure 4.2, où à partir de la 27000e donnée, les débits n'ont pas du tout la même allure qu'avant cette journée. Ce phénomène peut être créé par différentes situations comme un changement d'emplacement de la station hydrométrique, un changement de station dû à un bris de la station ou un remplacement de celle-ci dû à la désuétude de l'appareil. Il se peut aussi que le territoire en amont de cette station ait complètement changé (dérivation de rivière, arrêt de prise d'eau par une municipalité ou par des agriculteurs, mise en service de barrage) faisant en sorte que le régime hydrologique du secteur soit complètement modifié. Ce type de série de données cause un problème au niveau de la modélisation hydrologique. En effet, les paramètres associés à chaque séquence de données de part et d'autre de la cassure peuvent varier considérablement étant donné que les débits sont clairement différents entre la première moitié et la deuxième, faisant en sorte que le modèle hydrologique ait de la difficulté à s'ajuster dans une telle situation.

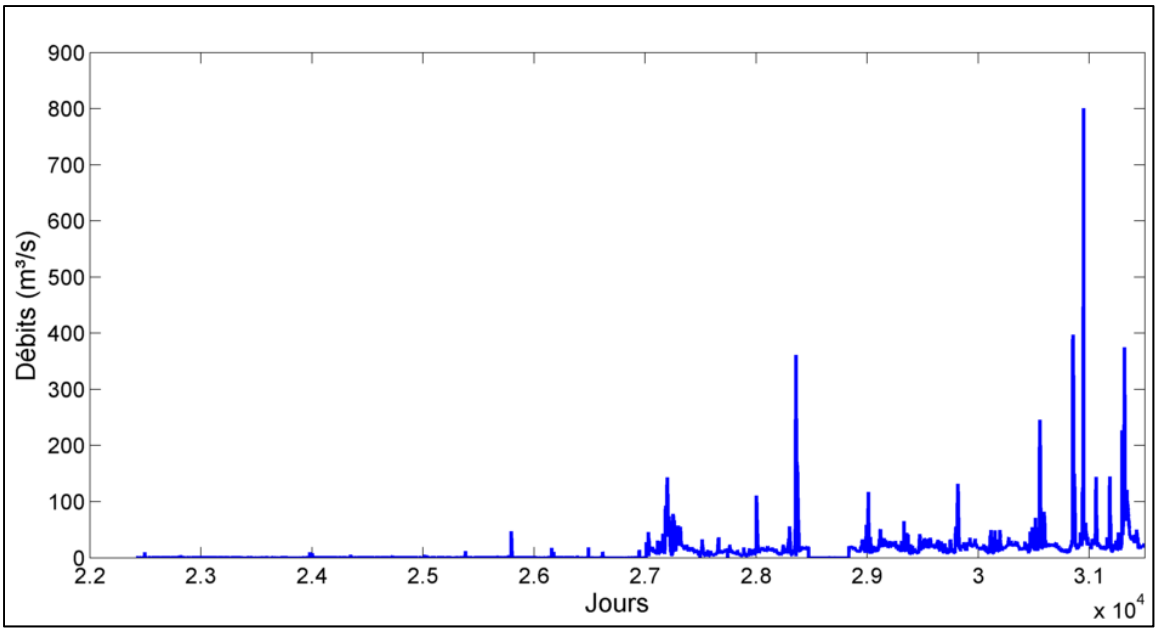

Figure 4.2 Exemple de cassure évidente dans la prise de mesure d'une station hydrométrique

Les deux premiers types de problèmes rencontrés, soit les débits aberrants et les cassures dans les séries temporelles, lors de l'analyse des données de base, ont fait en sorte que plusieurs stations hydrométriques devenaient inutilisables, et ont nécessité beaucoup de manipulations pour s'assurer que ces anomalies ne pénalisent pas la qualité des simulations dès l'étape de la calibration.

Enfin, certaines stations présentaient des données manquantes de façon récurrente, rendant leur usage impossible puisqu'il est difficile pour un modèle d'avoir des paramètres qui sont adéquats pour l'ensemble des situations, lorsque certaines parties de l'année ne présentent jamais d'observations.

Les données de base nécessaires à la modélisation hydrologique incluent aussi les données météorologiques, soit les températures et les précipitations. Pour obtenir des résultats représentatifs de ce qui se passe réellement sur le terrain, ces données doivent couvrir une période suffisamment longue pour les analyses subséquentes, avec le moins de données manquantes possibles et être fiables. Les données de précipitation et de températures

disponibles aux stations devaient être agrégées spatialement sur chaque bassin pour la modélisation hydrologique globale (section 3.3). Elles ont été estimées par la méthode des polygones de Thiessen, laquelle prend en considération la répartition inhomogène des stations sur le bassin versant lors du calcul de la moyenne. Les moyennes spatialisées ont été générées pour chaque jour puisque les stations qui ont été choisies pour faire partie des polygones de Thiessen n'étaient pas toutes complètes et plusieurs comportaient moins de 25 ans de données. Le choix de conserver l'ensemble des stations même si celles-ci pouvaient parfois comporter beaucoup de données manquantes a été fait en gardant en tête que, malgré que certaines données fussent absentes, les données présentes apportaient de l'information importante sur le bassin versant dans le cas notamment où la station météorologique était la seule dans un secteur. Dans certains cas, lorsque sur une longue période de temps les données météorologiques du secteur d'un bassin versant n'étaient pas disponibles, les polygones de Thiessen s'alimentaient de stations beaucoup plus éloignées pour calculer les précipitations et les températures moyennes du bassin versant. Cela peut être à l'origine d'incohérences entre les données pluviométriques et hydrométriques. Les précipitations journalières plus importantes devraient en théorie se montrer cohérentes avec les crues d'une rivière (Figure 4.3), ce qui n'était pas toujours le cas tel que montré à la Figure 4.4.

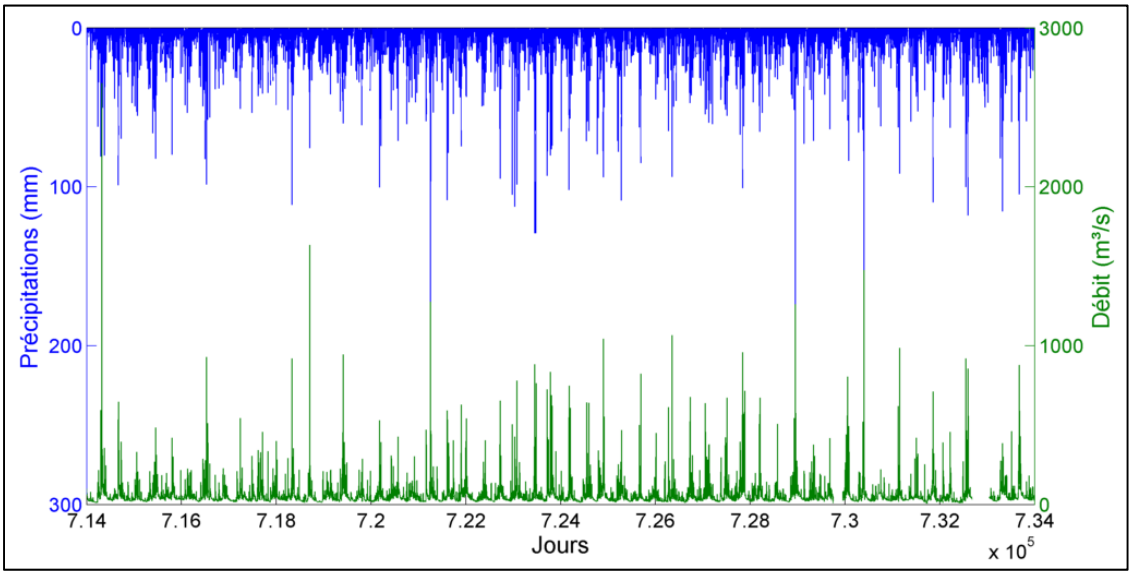

Figure 4.3 Exemple des données de base du bassin versant #27001 où la concordance des précipitations et des débits est bonne.

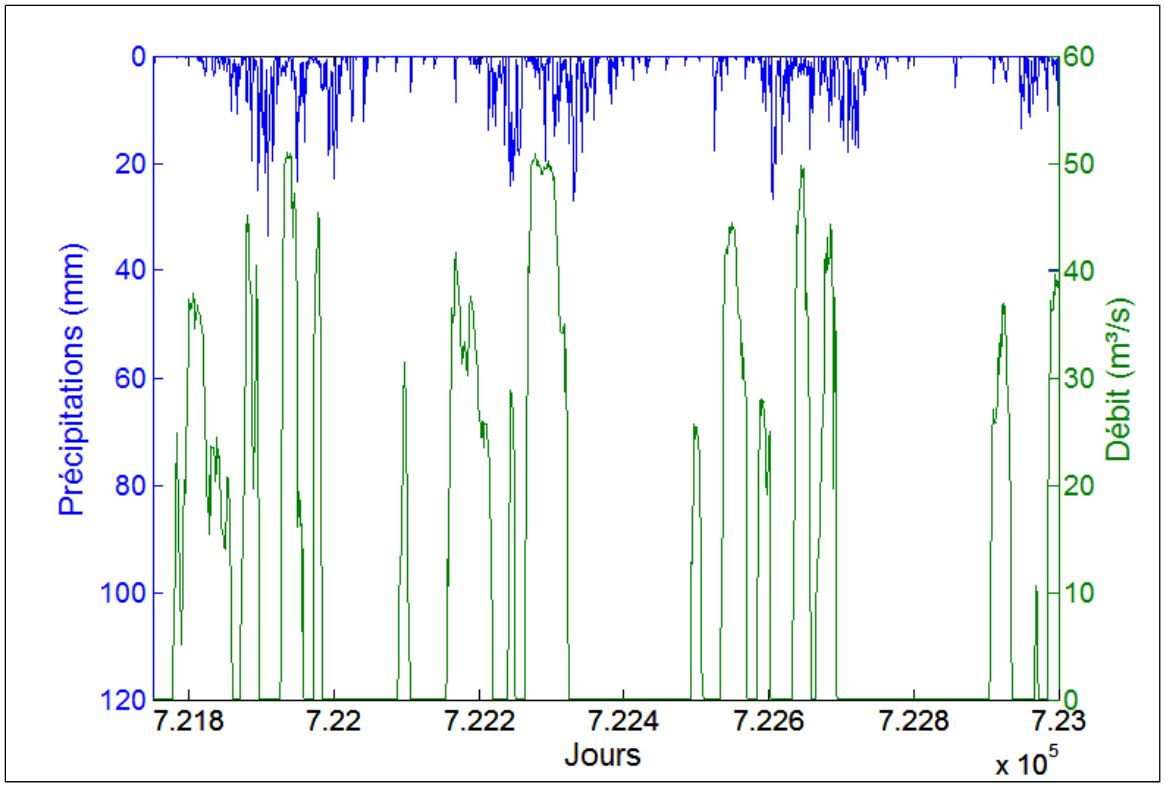

Figure 4.4 Exemple de séries de données issues du bassin versant #18348 où la précipitation ne concorde pas bien avec les crues ou les étiages

Les statistiques relatives au nombre de stations météorologiques utilisées pour chaque bassin versant ainsi que les distances des stations par rapport au bassin versant démontrent que les combinaisons de stations utilisées dans la création des polygones de Thiessen restent considérablement variables tout au long de la série de données. Les stations utilisées sont majoritairement assez approchées du bassin versant à l'étude et le nombre de stations contribuant aux calculs change en fonction de la donnée météo analysée. En effet, les stations météo n'incluent pas toujours les quatre types de données météorologiques disponibles soit les précipitations, les températures maximales, les températures minimales et les températures moyennes journalières. Pour assurer une plage de données météorologiques la plus grande possible, les polygones de Thiessen ont été créés entre 1905 et 2012 et globalement, le nombre de combinaisons des stations contributrices pour chaque bassin varie entre 40 et 550. Malgré que certains polygones varient dans le temps pour un bassin donné,

les combinaisons sont généralement stables sur des périodes assez longues et ont été modifiées en début de période, laquelle n'est pas utilisée dans les étapes ultérieures.

4.2 Calibration

Les résultats des diverses simulations en calibration, pour les 91 bassins versants, sont représentés par des boîtes à moustaches (Figure 4.5) selon le modèle hydrologique et selon la valeur d'une fonction objectif (FO) basée sur le critère NSE (Arsenault et al., 2015), présentée à l'équation (4.1). Cette transformation de NSE à FO a pour but, premièrement, de pallier le fait que plusieurs simulations ont des NSE très négatifs, d'éviter l'impact majeur des simulations jugées insatisfaisantes (NSE <0,2) et de représenter l'ensemble des simulations dans un intervalle de 0 à 1. Cette FO permet de linéariser les valeurs de NSE.

$$FO = \frac{1}{2 - NSE} \tag{4.1}$$

Une valeur de FO inférieure à 0,55 est considérée comme une simulation insatisfaisante selon les critères de performance associés à la métrique NSE. Les équivalences entre les valeurs du critère NSE et de la FO se retrouvent au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Équivalence entre les valeurs du critère de performance NSE et celles de la FO

Nash-Sutcliffe	**Fonction objectif**	**Qualification de la performance**
-Infini	0	
<0,2	<0,55	Insatisfaisant
0,2-0,4	0,55-0,625	Acceptable
0,4-0,6	0,625-0,71	Bien
0,6-0,8	0,71-0,83	Très bien
0,8-1,0	0,83-1	Excellent
1	1	Parfait

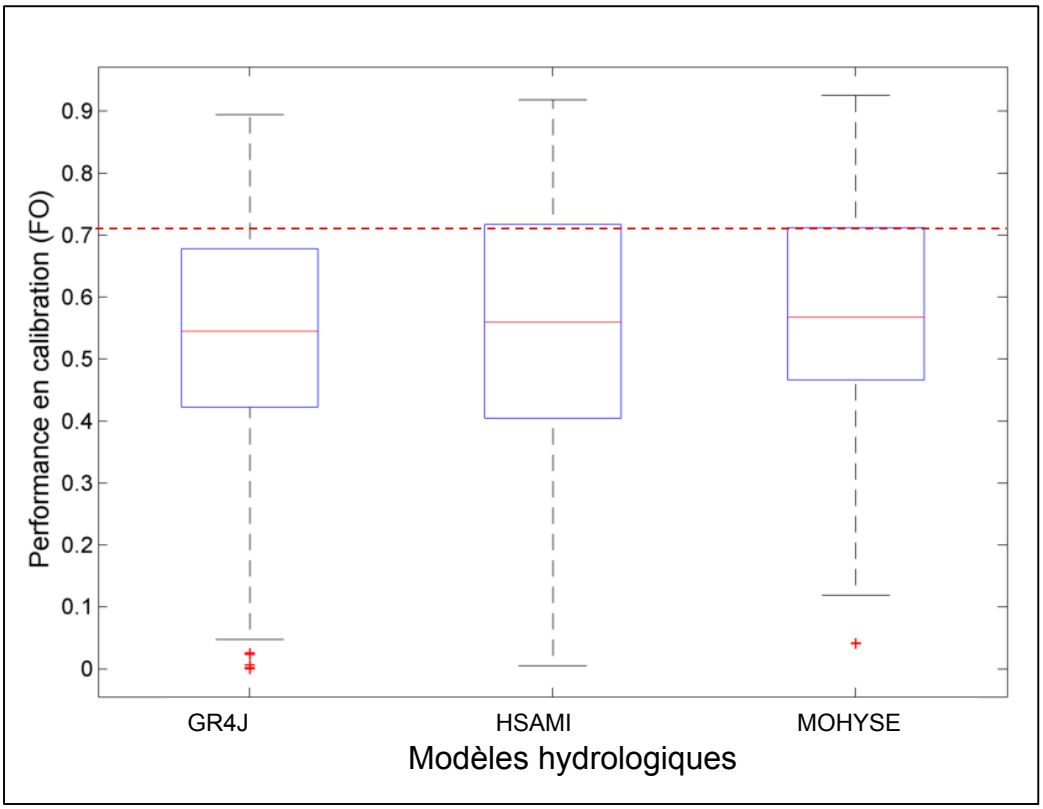

Figure 4.5 Boîtes à moustaches présentant les résultats de la FO pour la calibration sur l'ensemble des 91 bassins versants à l'étude, à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE; la ligne rouge représente le seuil pour juger une calibration comme bonne (FO > 0,71)

La Figure 4.5 démontre la dispersion du critère de performance FO pour chacun des trois modèles utilisés pour cette étude. Il est possible de s'apercevoir que les trois modèles réagissent, globalement, de façon similaire. La dispersion des résultats obtenus avec le modèle HSAMI est légèrement plus importante que pour les deux autres modèles, et les maxima atteints sont très similaires pour les trois modèles. Le Tableau 4.2 détaille les résultats de la Figure 4.5. Ce tableau donne les statistiques du critère de performance du NSE, critère ayant été utilisé pour qualifier les simulations. Le changement de qualificatif des performances des simulations du FO au NSE facilite la comparaison des résultats avec les autres études dans la littérature. Globalement, le Tableau 4.2 démontre que MOHYSE tend à performer légèrement mieux que les deux autres modèles (NSE maximum et médian plus

élevés, écart interquartile le plus faible et moins de simulations donnant des NSE sous zéro). Ce tableau indique aussi que le modèle GR4J a un NSE médian sous 0,2, ce qui signifie que plus de la moitié des simulations sont jugées insatisfaisantes suivant la terminologie introduite aux tableaux 3.1 et 4.1.

Tableau 4.2 Statistiques sur le critère de performance NSE pour les différentes calibrations des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE sur les 91 bassins versants étudiés

Performance des modèles	**Nombre de simulations avec NSE<0**	**NSE Médian**	**NSE Maximum**	**Écart interquartile**
GR4J	34	0,1656	0,8816	0.8915
HSAMI	36	0,2121	0,9110	1.08
MOHYSE	32	0,2370	0,9188	0.74

La Figure 4.6 montre par ailleurs que la répartition spatiale des performances des simulations est majoritairement la même pour les modèles HSAMI et MOHYSE. Pour le modèle GR4J, la performance obtenue sur certains bassins plus au Nord tend à être plus faible qu'avec les deux autres modèles. Aussi, cette figure permet de noter que même si certaines régions telles que Panuco (Figure 3.5) et Actopan (Figure 3.4) réagissent mieux à la modélisation hydrologique, cela ne garantit pas la performance des modèles puisque même à l'intérieur des bonnes régions de modélisation, certains bassins réagissent moins bien que l'ensemble. Les données relatives à chacun des 91 bassins se retrouvent à l'ANNEXE IV.

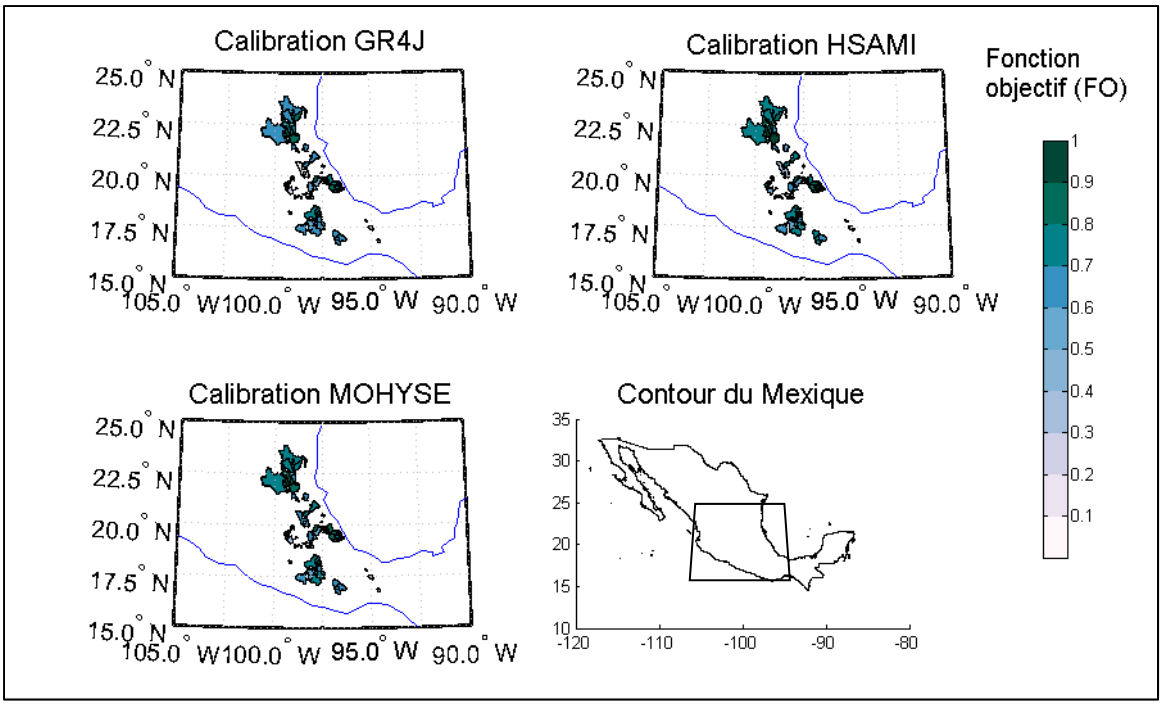

Figure 4.6 Répartition spatiale des valeurs de FO en calibration sur les 91 bassins versants étudiés pour les modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE; l'ensemble des simulations dont les performances sont inférieures à 0.1 sont de couleur pâle; la carte au bas à droite montre la localisation du secteur à l'étude sur le territoire du Mexique

La Figure 4.7 montre la dispersion des performances obtenues pour les différentes simulations selon le critère FO, en fonction de la superficie du bassin versant étudié. Deux observations sont apparentes pour cette figure :

1) la performance des modèles tend à augmenter, globalement, avec la superficie des bassins versants; par contre, le lien entre les performances et la superficie, en deçà de 2000 km^2, est plus aléatoire;
2) la performance du modèle GR4J est très souvent inférieure à celle des deux autres modèles, tandis que la performance de HSAMI et MOHYSE est mitigée et varie selon le bassin versant analysé.

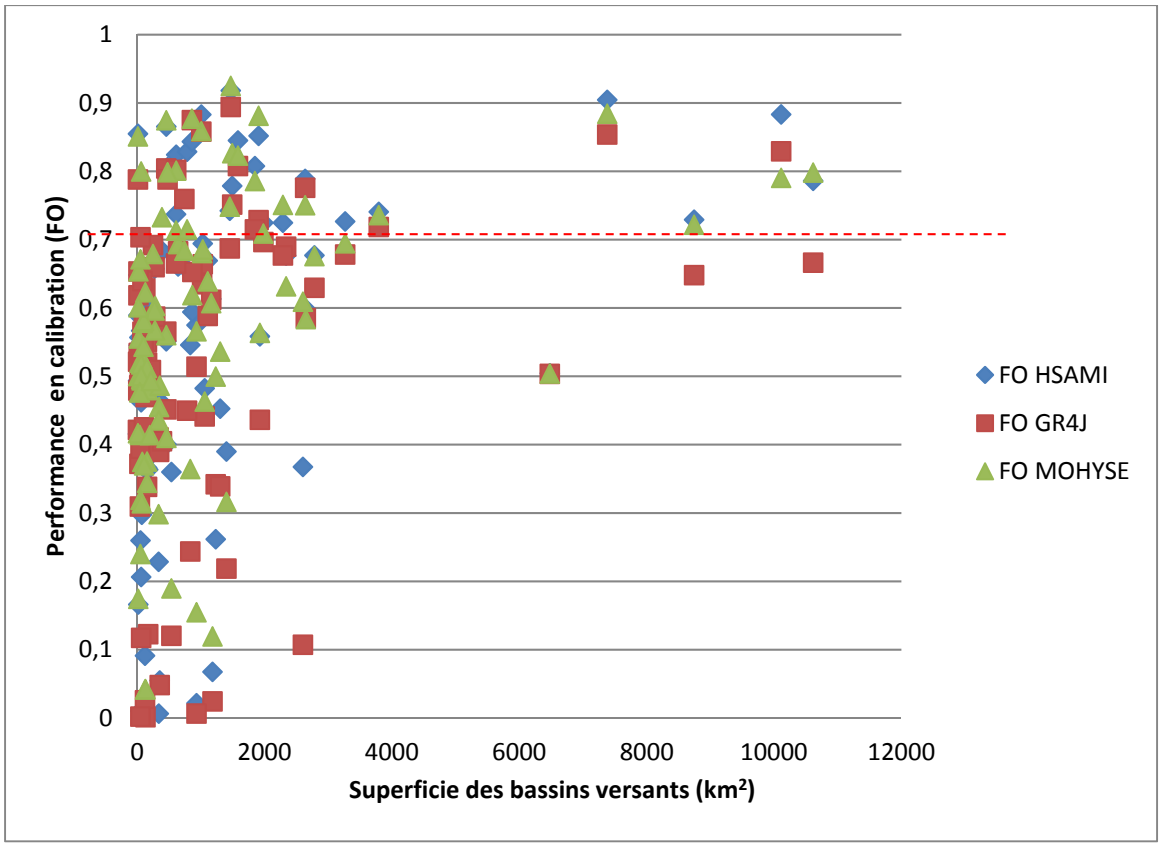

Figure 4.7 Performance des modèles hydrologiques sur les différents bassins versants en fonction de la superficie des bassins, la ligne pointillée rouge représentant la limite pour qu'une simulation soit considérée comme bonne (FO > 0.71)

L'ensemble des figures et tableaux de cette section permet de voir que, bien que certaines simulations peuvent atteindre des résultats jugés excellents, plus du tiers des bassins versants analysés ne sont pas capables d'être calibrés correctement (NSE<0), près de la moitié des simulations à l'aide de chaque modèle ont des performances jugées pires qu'acceptables (NSE médian d'environ 0,2), 35 simulations sont jugées bonnes (NSE>0,4) pour les trois modèles et 16, 23 et 22 sont jugées très bonnes (NSE>0,6) pour les modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE respectivement. Les performances des trois modèles sont assez similaires, MOHYSE performant légèrement mieux en matière de NSE maximum et médian et d'écart interquartile, et GR4J étant le modèle le moins performant.

4.3 Régionalisation par proximité spatiale

La régionalisation par proximité spatiale est le transfert des paramètres des modèles hydrologiques à partir de bassins versants donneurs se trouvant les plus près, physiquement, du bassin non-jaugé (plus petites distances euclidiennes entre les centroïdes des bassins). Les bassins versants potentiellement donneurs ont été retenus lorsque les performances en calibration étaient supérieures à 0,5, selon le critère NSE, choix basé selon les travaux de Arsenault & Brissette (2014) et de Oudin et al. (2008) qui montrent la pertinence de trier préalablement les bassins versants potentiellement donneurs selon leur performance en calibration. La figure 4.8 montre la performance des différents modèles lorsqu'un seul bassin versant donneur est utilisé.

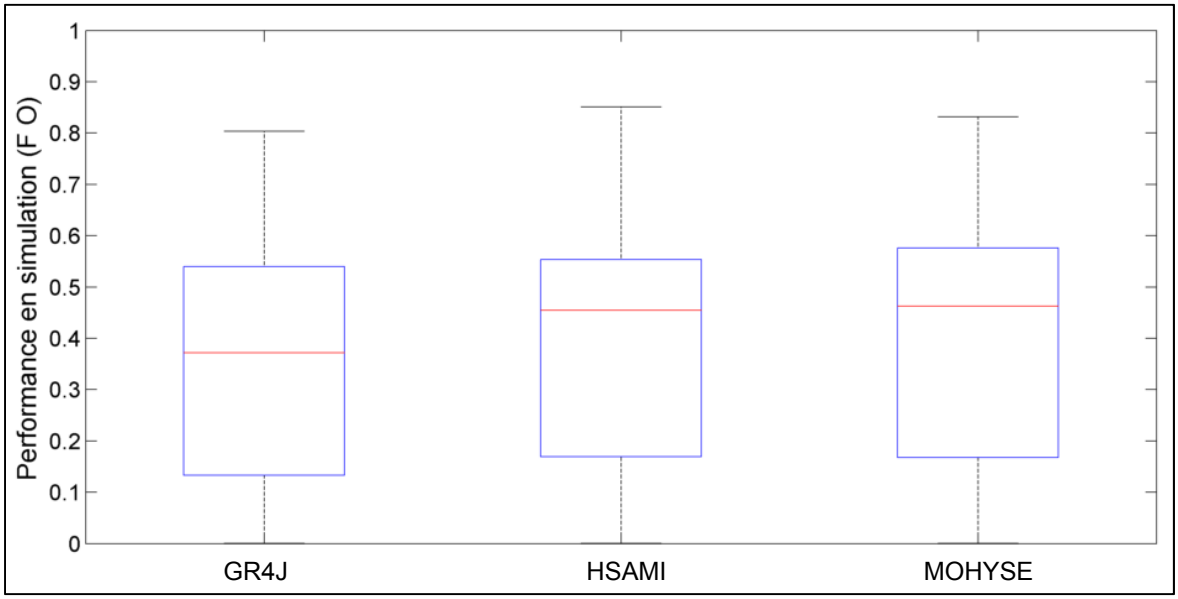

Figure 4.8 Boîtes à moustaches du critère FO pour la méthode de régionalisation par proximité spatiale à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE, pour l'ensemble des 91 bassins versants à l'étude pour un seul donneur

La Figure 4.8 montre que les performances des modèles HSAMI et MOHYSE sont similaires alors que celle du modèle GR4J diffère, en ce qui concerne le critère FO médian. En effet, le modèle GR4J donne de moins bons résultats que les deux autres modèles. Cette tendance peut aussi s'apercevoir au Tableau 4.3, avec les performances exprimées en termes du critère

NSE. Des 35 simulations qui étaient jugées bonnes en calibration, seulement 11 pour GR4J et HSAMI, et 15 pour MOHYSE, peuvent maintenant être jugées comme tel, tandis que 5,7 et 7 ont respectivement des NSE>0,6. L'ensemble des statistiques des simulations et des méthodes de régionalisation basées sur le critère NSE et selon le bassin versant se retrouve à l'ANNEXE III**.**

Tableau 4.3 Statistiques sur les performances des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE en régionalisation par proximité spatiale, lorsque les 91 bassins versants à l'étude sont considérés à tour de rôle comme pseudo non-jaugés

Performance des modèles en régionalisation spatiale	**Nombre de simulations avec NSE<0**	**Nombre de simulations jugées bonnes (NSE >0.4)**	**NSE Médian**	**NSE Maximal**
GR4J	61	11	-0,6889	0,7552
HSAMI	58	11	-0,1989	0,8249
MOHYSE	58	15	-0,1618	0,7974

Une analyse plus poussée des résultats issus des simulations par régionalisation spatiale démontre qu'il n'y a aucun lien apparent entre la densité du réseau de bassins versants et la performance des modèles hydrologiques puisque les bassins versants non-jaugés dont les donneurs sont les plus près n'obtiennent pas nécessairement de bons résultats en régionalisation.

4.4 Régionalisation par similitude physique

La première étape de la régionalisation par similitude physique incluait l'étude de corrélation entre les superficies attribuables à chacune des unités édaphologiques. Cette étape avait pour but d'analyser si certaines unités édaphologiques étaient globalement corrélées entre elles, afin de pouvoir réduire le nombre de descripteurs possibles pour analyser les performances en régionalisation par similitude physique. La figure 4.9 montre les résultats de cette étude.

Les noms des unités ont été abrégés, par souci de concision. La concordance avec les appellations complètes peut être retrouvée au Tableau 2.3.

	Ac	Ch	Ca	Lu	An	Le	Re	Ve	Hi	Pl	Cal	Gl	So	Fl
Ac	1,00	-0,19	0,01	-0,03	-0,02	-0,17	0,18	-0,01	-0,04	0,16	-0,05	0,21	-0,04	-0,02
Ch	-0,19	1,00	0,14	-0,10	-0,21	-0,25	-0,29	0,14	0,00	0,02	-0,01	-0,06	0,00	-0,12
Ca	0,01	0,14	1,00	-0,01	-0,23	-0,21	-0,02	-0,17	-0,04	0,40	-0,05	0,54	-0,05	0,22
Lu	-0,03	-0,10	-0,01	1,00	0,07	-0,25	-0,23	-0,09	-0,04	0,04	-0,06	-0,05	-0,04	-0,09
An	-0,02	-0,21	-0,23	0,07	1,00	-0,44	-0,19	-0,27	0,02	-0,09	-0,10	-0,08	-0,06	-0,18
Le	-0,17	-0,25	-0,21	-0,25	-0,44	1,00	-0,22	-0,04	-0,05	-0,09	0,16	-0,05	0,10	-0,08
Re	0,18	-0,29	-0,02	-0,23	-0,19	-0,22	1,00	-0,16	-0,08	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08	0,35
Ve	-0,01	0,14	-0,17	-0,09	-0,27	-0,04	-0,16	1,00	-0,07	0,01	0,00	-0,05	-0,03	-0,12
Hi	-0,04	0,00	-0,04	-0,04	0,02	-0,05	-0,08	-0,07	1,00	-0,02	-0,02	-0,01	0,18	-0,03
Pl	0,16	0,02	0,40	0,04	-0,09	-0,09	-0,08	0,01	-0,02	1,00	0,04	0,67	0,04	0,06
Cal	-0,05	-0,01	-0,05	-0,06	-0,10	0,16	-0,07	0,00	-0,02	0,04	1,00	-0,02	0,93	0,02
Gl	0,21	-0,06	0,54	-0,05	-0,08	-0,05	-0,08	-0,05	-0,01	0,67	-0,02	1,00	-0,02	-0,04
So	-0,04	0,00	-0,05	-0,04	-0,06	0,10	-0,08	-0,03	0,18	0,04	0,93	-0,02	1,00	0,02
Fl	-0,02	-0,12	0,22	-0,09	-0,18	-0,08	0,35	-0,12	-0,03	0,06	0,02	-0,04	0,02	1,00

Échelle de corrélation
-1,00
-0,75
-0,50
-0,25
0,00
0,25
0,50
0,75
1,00

Figure 4.9 Corrélation entre les différentes unités édaphologiques en fonction de la superficie occupée par chacune; l'échelle de couleurs indique les degrés de corrélation

Des unités édaphologiques considérées comme corrélées entre elles donneraient des résultats très près des bornes ([-1,1]). Dans le cas de la présente analyse,la corrélation entre les unités Calcisol (Cal) et Solonchak (So), peut être considérée comme étant importante avec une valeur de 0,93. Mais puisqu'il s'agit du seul cas de la sorte, il devient inutile d'essayer de réduire le nombre de descripteurs potentiels pour une seule relation.

En plus des 14 descripteurs potentiels pour les différents types d'unités édaphologiques, cinq sont issus des utilisations de sol tandis que 3 autres sont de types morphologiques (l'altitude moyenne, la superficie du bassin versant et la pente moyenne du bassin).

Chacun des 22 descripteurs a été utilisé individuellement pour le calcul de l'indice de similitude (équation (1.3)) afin d'examiner les performances en régionalisation par similitude physique à un seul descripteur. Les résultats obtenus pour le critère FO à l'aide des trois

modèles hydrologiques utilisés sont montrés à la Figure 4.10. Cette figure montre que les différents descripteurs n'agissent pas tous de la même manière pour le transfert des paramètres et les simulations issues de la régionalisation par similitude physique donnent des résultats très variables, pour un même modèle et d'un modèle à l'autre. Plus de 75% des simulations avec chacun des descripteurs sont jugées comme étant acceptables ou insatisfaisantes (FO<0,625). De plus, comme ce fut le cas pour la régionalisation par proximité spatiale, seuls les bassins dont les calibrations permettaient d'obtenir une valeur du critère NSE supérieure à 0.5 ont été retenus comme donneurs potentiels pour le transfert des paramètres. Bien que certains descripteurs semblent procurer de meilleurs résultats que d'autres en regardant la Figure 4.10, il est impossible de tirer clairement une conclusion quant à l'importance de chacun de descripteurs sur la réponse hydrologique des différents bassins versants.

Pour y arriver, un test de Kruskal Walis a été effectué, pour chaque modèle hydrologique, pour l'ensemble des 91 simulations (une par bassin pseudo non-jaugé) en régionalisation par similitude physique. Cette analyse est présentée à la Figure 4.11, où les descripteurs ont été considérés un à la fois.

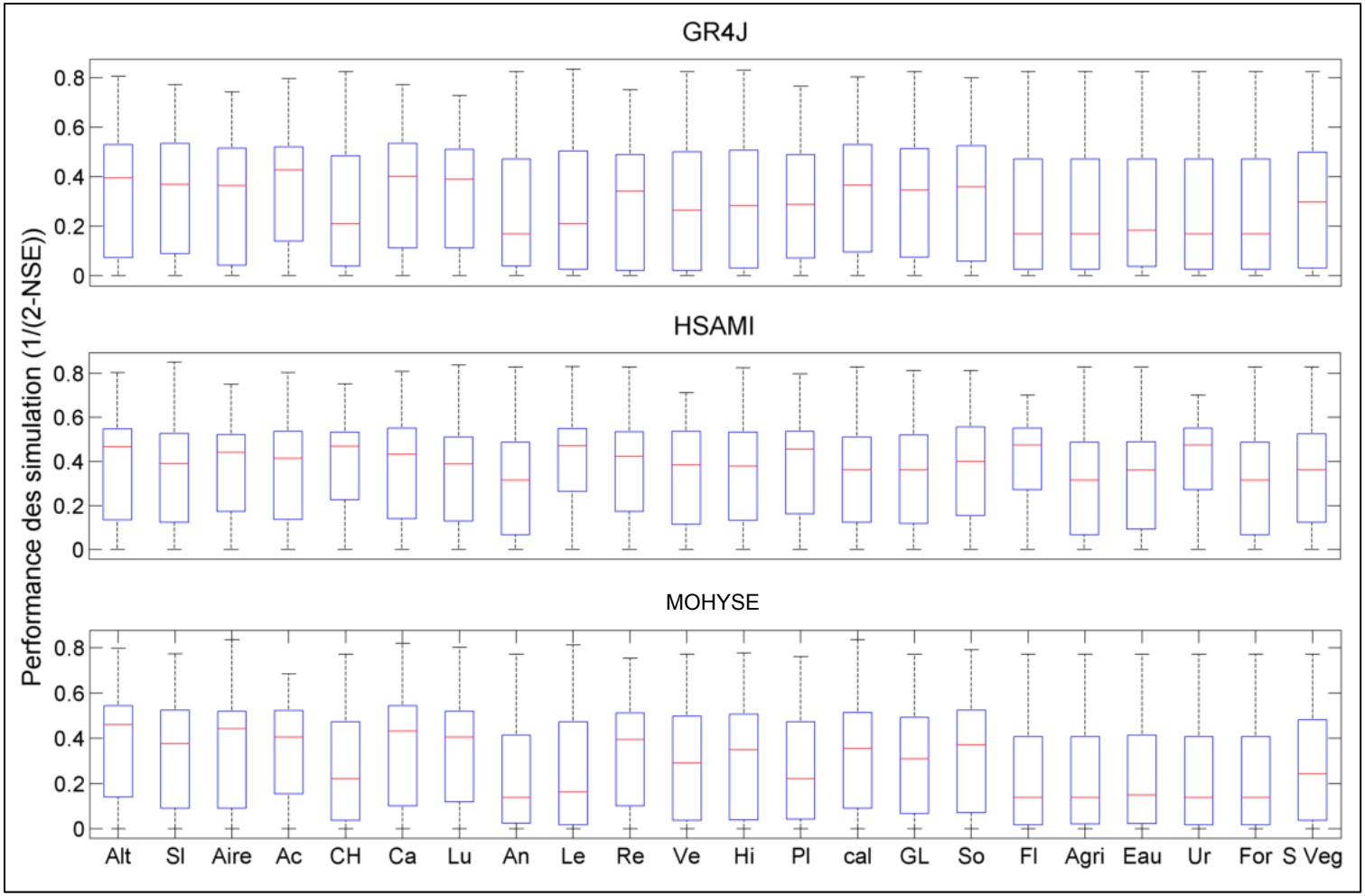

Figure 4.10 Boîtes à moustaches montrant les résultats pour le critère FO obtenus pour les différentes simulations en régionalisation par similitude physique à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE et en fonction des différents descripteurs utilisés pour le transfert des paramètres pour un seul bassin versant donneur

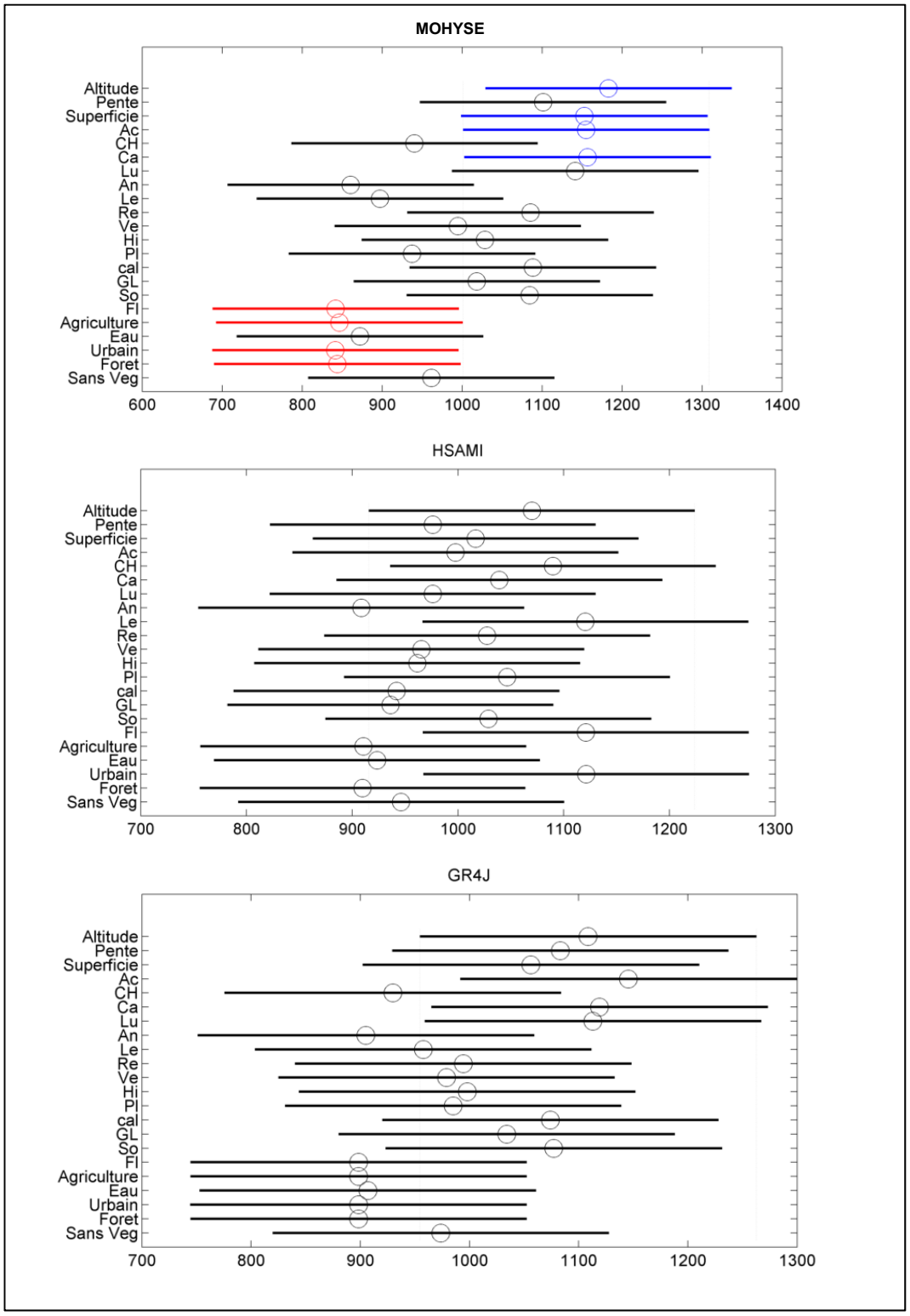

Figure 4.11 Résultats du test statistique de Kruskal Wallis par modèle hydrologique, pour les différents descripteurs physiques considérés et pour tous les bassins pseudo non-jaugés lorsqu'un seul bassin versant donneur est pris en compte

Le test statistique de Kruskal Wallis a pour but de déterminer si, statistiquement, les différents ensembles de données sont similaires ou s'ils sont suffisamment différents pour dire que certains descripteurs sont meilleurs que d'autres. Dans une telle analyse, chaque ensemble de données (dans ce cas, les performances exprimées sous forme de NSE pour les 91 simulations issues à chaque fois d'un descripteur différent) est comparé aux autres pour déterminer s'ils font partie d'une même population de données ou non. Les ensembles sont jugés différents lorsque les intervalles de données (les lignes associées à chaque ensemble) ne se recoupent pas. Dans un tel cas, les lignes les plus à droite sont considérées comme meilleures que les lignes plus à gauche. Lorsque les intervalles se chevauchent (même si ce n'est que de très peu) les ensembles analysés sont jugés statistiquement égaux et ne peuvent mener à la conclusion que les simulations sont plus performantes à l'aide un descripteur ou un autre.

L'analyse a été effectuée pour chaque modèle hydrologique. Les simulations analysées pour le modèle HSAMI ainsi que le modèle GR4J démontrent que, peu importe le descripteur utilisé, l'ensemble des simulations issues de la régionalisation par similitude physique est similaire et non statistiquement différent. Pour les simulations effectuées à l'aide du modèle hydrologique MOHYSE, certains descripteurs (intervalles dont les médianes sont notées à l'aide de points bleus sur la figure 4.11 : altitude moyenne du bassin versant, superficie, pourcentages d'occupation de l'unité édaphologique Acrisol et celui du Cambisol) se sont montrés meilleurs que d'autres (intervalles dont les médianes sont notées à l'aide de points rouges sur la figure 4.11 : pourcentages d'occupation des unités édaphologiques Fluvisol et Andosol, pourcentages d'occupation du sol par l'eau ainsi que par l'agriculture, les zones urbaines et la forêt) puisque les intervalles des premiers sont plus à droite et ne chevauchent pas les intervalles des derniers. Enfin, il est donc possible de dire que, même si ce n'est pas constant pour les trois modèles, comparativement aux autres descripteurs, les différents pourcentages d'occupation du sol (cinq derniers descripteurs dans chacun des panneaux à la figure 4.11) ne sont pas des descripteurs efficaces pour le transfert de jeux de paramètres entre les bassins versants jaugés et ceux non-jaugés. Les statistiques détaillées des performances obtenues en régionalisation par similitude physique pour chacun des bassins

versants se retrouvent à l'ANNEXE V. Différentes combinaisons de descripteurs ont été testées pour essayer de déterminer quel ensemble décrivait le mieux les bassins. Cependant, puisqu'aucune amélioration n'a été trouvée lorsque comparées soit aux descripteurs utilisés individuellement ou encore testés sur l'ensemble, ces résultats ne sont pas montrés ici.

4.5 Régionalisation intégrée

La régionalisation intégrée est une méthode hybride entre les méthodes par similitude physique et par proximité spatiale, elle inclut donc la latitude et la longitude lors du calcul de l'indice de similitude. Trois méthodes sont analysées ici pour le calcul de l'indice de similitude et sont comparées avec les résultats issus de la régionalisation par proximité spatiale. Chacune des méthodes a été testée pour un seul bassin versant donneur.

1) la première méthode repose sur le calcul de l'indice de similitude à partir de tous les descripteurs disponibles, considérant que, pour les modèles HSAMI et GR4J, aucun descripteur n'a montré de performance statistiquement différente de celle des autres en régionalisation par similitude physique (cette méthode est en fait une méthode par similitude physique, mais puisque plus d'un descripteur a été utilisé dans le calcul de l'indice de similitude, elle est considérée ici comme une régionalisation intégrée « de base » – nommée méthode 1 ci-après);
2) la deuxième méthode repose sur la simulation par régionalisation intégrée où la latitude et la longitude sont ajoutées à l'indice de similitude obtenu en considérant l'ensemble des descripteurs pour le transfert des paramètres (méthode 2);
3) la troisième méthode testée est une régionalisation intégrée, mais en considérant seulement les descripteurs morphologiques, soit l'altitude, la pente, la superficie et les coordonnées des centroïdes, considérant que, pour MOHYSE, les descripteurs morphologiques avaient précédemment montré des performances intéressantes (méthode 3).

Finalement, comme base de comparaison, les données issues de la régionalisation par proximité spatiale ont été compilées pour former un 4e ensemble (méthode 4). Les différentes

combinaisons utilisées pour les quatre méthodes seront analysées selon les deux mêmes types de représentations que précédemment, soit par (1) des boîtes à moustaches qui montrent la dispersion des simulations pour chaque bassin versant et (2) l'analyse Kruskal Walis qui décrit statistiquement les ensembles de données.

Peu importe le modèle hydrologique utilisé ou encore le type de données composant l'indice de similitude, les performances des simulations ne sont pas statistiquement différentes l'une de l'autre puisque les 4 intervalles de données se chevauchent sur la Figure 4.12 (dans chacun des cas, les résultats obtenus à l'aide des trois modèles hydrologiques sont confondus). Cette observation permet d'émettre l'hypothèse que la localisation des bassins occupe un poids important parmi les descripteurs des bassins versants.

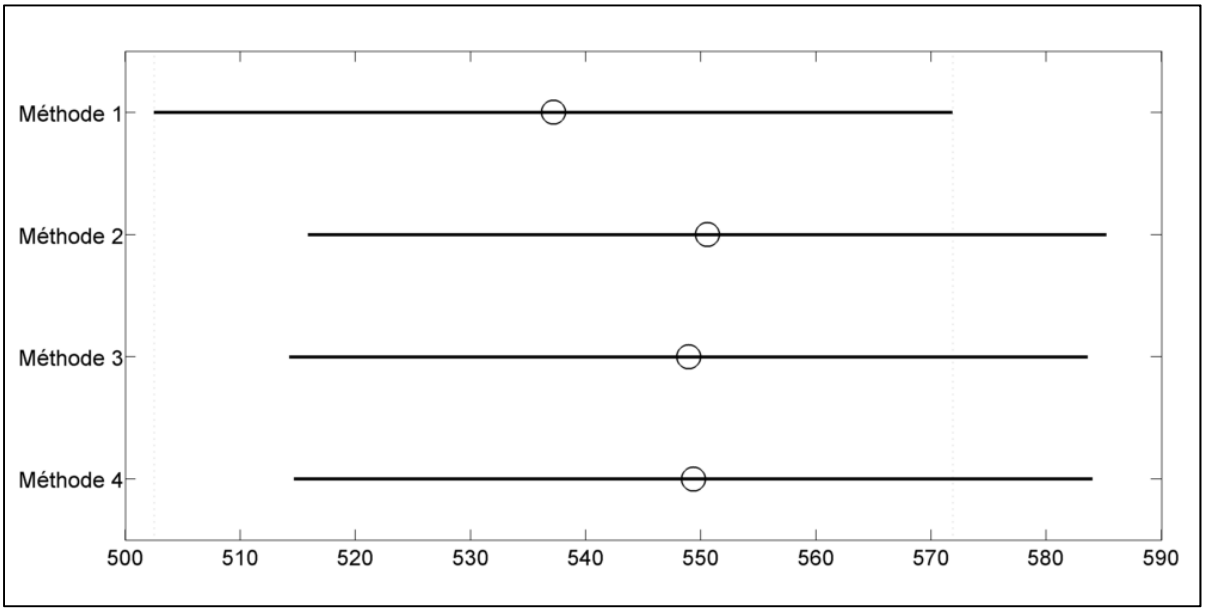

Figure 4.12 Analyse Kruskal Wallis pour les trois méthodes de régionalisation intégrée (méthodes 1 à 3) et pour la régionalisation par proximité spatiale (méthode 4), tous modèles hydrologiques confondus, pour un seul bassin versant donneur

Par ailleurs, la Figure 4.13 montre que l'impact du modèle hydrologique choisi pour l'analyse de régionalisation n'a que très peu d'influence sur les performances (FO) puisque la dispersion des différentes boîtes est pratiquement la même pour les 3 modèles utilisés.

MOHYSE tend toutefois à produire des valeurs un peu plus élevées que les deux autres modèles. Cette figure permet aussi de noter que, dans le cas de ce secteur d'étude, il n'y a pratiquement aucun avantage à essayer d'obtenir différentes combinaisons pour composer l'indice de similitude pour la méthode par régionalisation intégrée ou par la régionalisation par similitude physique puisque la régionalisation par proximité spatiale donne des résultats similaires à ceux des autres méthodes en termes de performance.

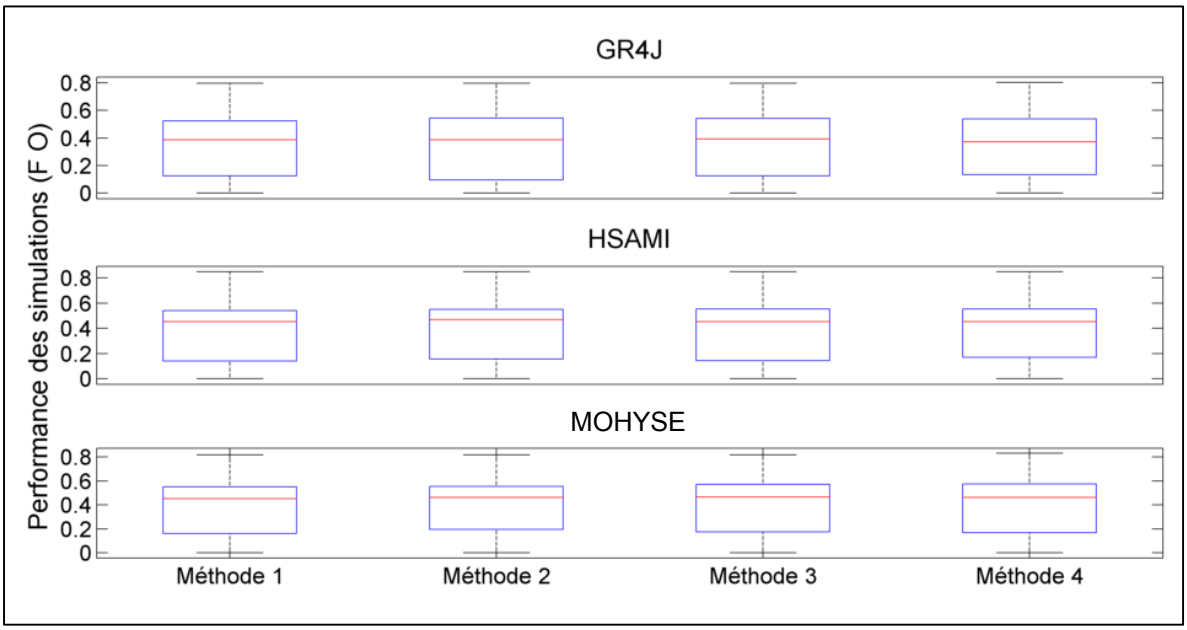

Figure 4.13 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations par les trois méthodes de régionalisation intégrée (méthodes 1 à 3) et par la méthode de proximité spatiale (méthode 4), à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE

De façon similaire aux résultats de la régionalisation par similitude physique, moins de 25 pourcent des bassins obtiennent des simulations jugées minimalement bonnes (FO > 0,625), tandis que les médianes de toutes les combinaisons pour les trois modèles sont sous la barre des simulations jugées insuffisantes (FO < 0,55).

4.6 Nombre de bassins versants optimal

La dernière analyse de régionalisation dépendante du modèle hydrologique porte sur le nombre de donneurs pour le transfert de paramètres. Deux méthodes sont reconnues pour la détermination du nombre de bassins versants optimal : la moyenne des paramètres des modèles donneurs et la moyenne des hydrogrammes générés indépendamment. À partir des conclusions tirées des études précédentes (Arsenault & Brissette 2014), seule la moyenne des hydrogrammes finaux a été retenue dans la présente étude. Il s'agit d'une moyenne arithmétique.

Puisque les régionalisations intégrée ou par similitude physique n'ont pas donné de meilleurs résultats que la méthode par proximité physique, la détermination du nombre de bassins versants optimal a été faite en considérant les résultats obtenus à l'aide de cette dernière méthode uniquement. La sélection du nombre optimal a été effectuée en testant la moyenne issue d'un nombre maximal de 15 bassins, soient les plus près physiquement du bassin pseudo non-jaugé. Pour cette analyse, les 91 bassins versants, peu importe leur performance en calibration, ont été considérés comme bassins pseudo non-jaugés et seuls les bassins versants dont la performance en calibration était supérieure à zéro (NSE>0) ont été considérés comme donneurs potentiels. Cette sélection a été retenue dans un premier temps pour s'assurer que l'ensemble de bassins versants potentiellement donneurs soit suffisamment grand et diversifié. La Figure 4.14 donne des indications à l'effet que, bien qu'il soit possible que l'ajout de donneurs augmente la performance des modèles, cette augmentation est minime et n'arrive pas à rendre les simulations concluantes pour la majorité des bassins versants pseudo non-jaugés.

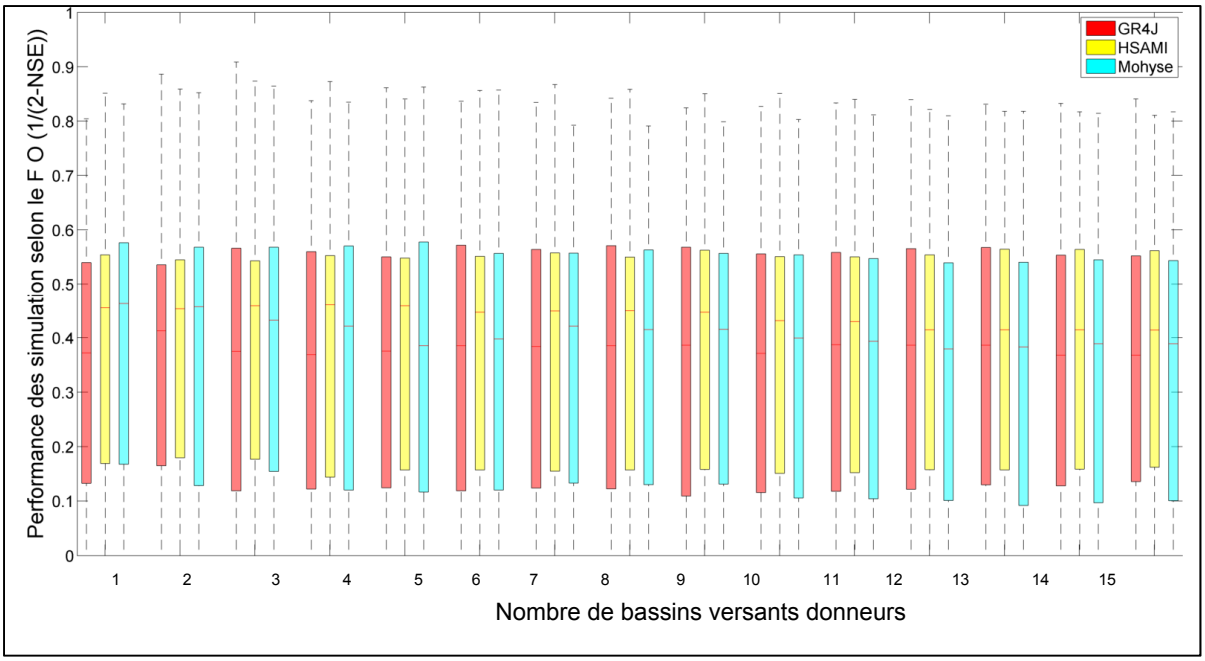

Figure 4.14 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations en régionalisation par proximité spatiale avec des nombres de bassins versants donneurs variant de 1 à 15, à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE

En observant la Figure 4.15, on remarque que, bien que les performances des modèles augmentent en utilisant plus d'un donneur potentiel, l'impact sur les valeurs médianes et les valeurs maximales du critère FO n'est pas constant d'un modèle hydrologique à l'autre. Pour MOHYSE, les meilleures performances sont trouvées lorsqu'entre trois et cinq donneurs sont utilisés, ce qui est inférieur comparativement aux résultats obtenus dans le cadre de précédentes recherches (Arsenault & Brissette 2014; Oudin et al., 2008) qui estiment le nombre optimal de donneurs potentiels entre cinq et dix. Pour GR4J et HSAMI, il faudrait 6 et 7 donneurs, respectivement, pour arriver à de meilleurs résultats tant au niveau des valeurs maximales de FO que des valeurs médianes, ce qui est en concordance avec les études précédentes.

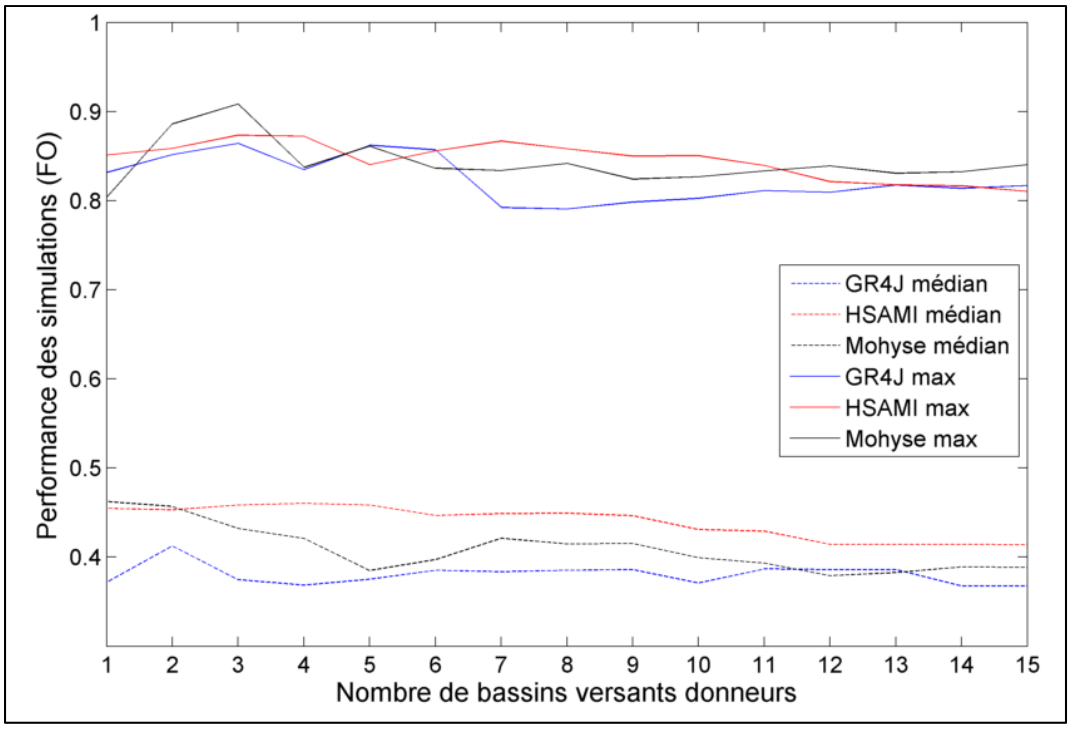

Figure 4.15 Variation des valeurs maximales et médianes du critère FO pour la régionalisation par proximité spatiale à l'aide des modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE, en fonction du nombre de bassins versants donneurs

La Figure 4.15 permet aussi de constater que d'avoir plus d'un bassin versant donneur est généralement bénéfique pour la régionalisation, tel qu'établi dans la littérature (Arsenault & Brissette 2014; Oudin et al., 2008). L'ensemble des statistiques pour chacun des bassins versants pour des donneurs multiples se retrouvent à l'ANNEXE VI.

En conservant seulement les simulations en régionalisation dont les performances sont au-dessus du seuil NSE>0, il est possible de s'apercevoir que le nombre optimal de bassins versants donneurs pour le modèle HSAMI est de 6 tandis que pour GR4J il se situerait cette fois à 3 donneurs et pour MOHYSE entre 3 et 7 donneurs lorsque le critère de sélection est la valeur maximale de FO, tandis que pour GR4J et MOHYSE, il est possible de voir de meilleures performances, en regard du 75e percentile, pour un nombre de donneurs supérieur à 13. Pour arriver à de tels résultats, les nombres de bassins versants considérés comme donneurs potentiels sont de 31, 35 et 36, respectivement, pour GR4J, MOHYSE et HSAMI

lorsque les donneur considérés ont une performance supérieure à NSE=0,5. En moyenne, 30, 35 et 33 bassins versant pseudo non-jaugés ont été retenus pour créer la figure 4.16, respectivement pour les modèles GR4J, HSAMI et MOHYSE. Bien que sous certains aspects les performances des modèles GR4J et MOHYSE tendent à augmenter lorsque le nombre de donneurs potentiels est au-dessus de 13 donneurs, différents auteurs ont soulevé le fait qu'un nombre élevé de donneur venait diminuer la signification des hydrogrammes obtenus par la moyenne.

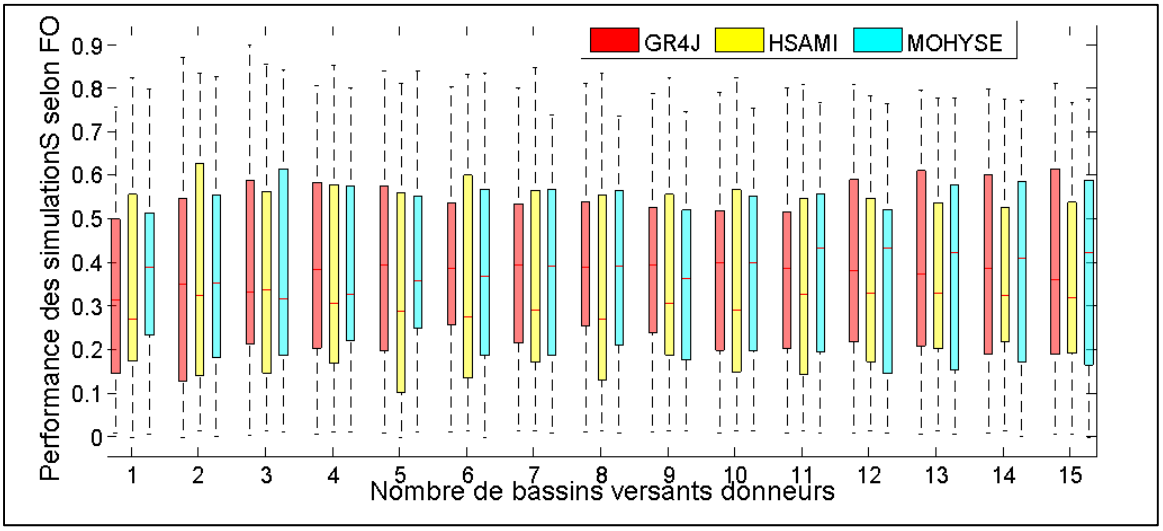

Figure 4.16 Boîtes à moustaches des performances pour le critère FO issues des simulations en régionalisation par proximité spatiale avec des nombres de bassins versants donneurs variant de 1 à 15, à l'aide des modèles hydrologiques GR4J, HSAMI et MOHYSE, lorsque les simulations en régionalisation dont les performances étaient supérieures à NSE=0 ont été considérées.

4.7 Application des résultats sur le bassin Naolinco

Un objectif important de ce projet était la détermination des débits pour le bassin versant de la rivière Naolinco, situé dans l'état de Veracruz au Mexique et décrit à la section 2.4. Puisque le bassin versant de la rivière Naolinco est un bassin non-jaugé, il a fallu utiliser les techniques de régionalisation des paramètres pour déterminer des valeurs possibles des débits à l'exutoire de ce bassin, donc les débits qui entrent dans le village. Des techniques de

régionalisation des paramètres sélectionnées ont été testées par la méthode des bassins pseudo non-jaugés, pour vérifier et analyser leur performance sur un ensemble de bassins versants mexicains. Ce projet incluait aussi une partie de collecte de données de terrain qui, en plus de servir pour l'analyse des descripteurs potentiels, devaient permettre d'obtenir une série de données de débit d'un an pour la comparaison avec les conclusions tirées des méthodes de régionalisation via l'installation d'une station de mesure des niveaux d'eau. Cependant, sur le terrain, deux problèmes ont empêché l'utilisation des observations pour l'année 2015-2016. Premièrement, le site de la station pose problème: la station a été installée en aval d'un point de prise d'eau pour le village de Naolinco, où se trouve un seuil important (Figure 4.17). Le soutirage d'eau à cet endroit est de plus ou moins constant et varie selon les nécessités du village. À cela s'ajoute le rejet d'eaux polluées provenant du village en amont, qui perturbent également les débits. Bien que l'accès aux données de rejets et de soutirages soit possible, un important travail de collecte et de traitement de ces données serait nécessaire et dépasse le cadre des présents travaux. Les contraintes liées aux fluctuations des quantités d'eau, de même que d'autres liées à la disponibilité d'un point d'ancrage pour les équipements de la station, ont d'ailleurs complexifié le choix de son emplacement. Deuxièmement, le stage au Mexique a été effectué pendant la saison sèche, soit la saison hivernale (janvier à avril). La rivière, à ce moment de l'année, est en étiage et la variation du débit est en général très faible. Bien que l'installation de la station de mesure du niveau d'eau ait été possible, il a été impossible, dans ces seules conditions, de reconstruire les débits, sans une courbe de tarage qui permette la conversion entre les données de niveau et les débits. La Figure 4.18 montre l'installation de la station au moment où la rivière est pratiquement à son minimum. La roche sur laquelle est installée la station est quelques fois complètement submergée lors de la saison des pluies. Des campagnes de jaugeage étaient normalement prévues au cours de l'année mais n'ont pu avoir lieu en raison notamment de bris d'équipements et du manque de ressources humaines.

Figure 4.17 Seuil de retenue d'eau sur la rivière Naolinco pour le soutirage de l'eau

Figure 4.18 Station de mesure des niveaux d'eau installée sur le parcours de la rivière Naolinco

En considérant que la méthode de régionalisation par proximité spatiale avec plus d'un donneur donnait les meilleurs résultats dans les essais préalables, une simulation a permis

d'obtenir une enveloppe de débits possible pour le bassin versant de la rivière Naolinco (Figure 4.19). Pour cet exercice, cinq, six et sept donneurs ont été considérés pour les modèles MOHYSE, GR4J et HSAMI, respectivement, à la lumière des résultats obtenus et présentés à la section 4.6. La moyenne arithmétique des séries de débits provenant de simulations à l'aide chaque modèle, suite au transfert des paramètres, a été effectuée. Bien que les similitudes entre les bassins versants jaugés et le bassin versant non-jaugé soient les mêmes peu importe le modèle utilisé, les séries temporelles de débits issues du transfert des paramètres diffèrent d'un modèle à l'autre. La méthode préconisée ici tient compte de la performance des bassins jaugés en calibration et seuls les bassins versants dont les NSE étaient supérieurs à 0.5 ont été gardés. Puisque les modèles n'avaient pas donné les mêmes résultats à l'étape de calibration, certains bassins versants jaugés ont été utilisés pour certains modèles et ont été retirés des donneurs potentiels pour d'autres.

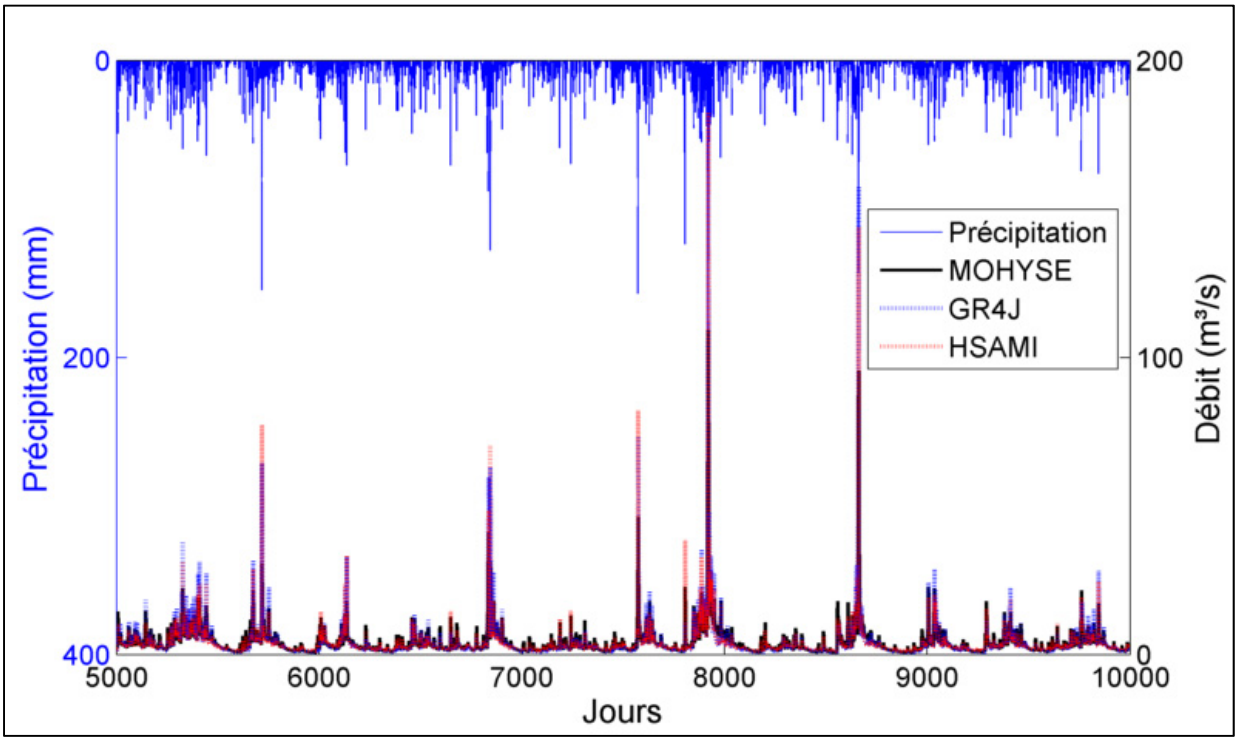

Figure 4.19 Simulation des débits sur le bassin versant de la rivière Naolinco en utilisant une moyenne arithmétique des séries de débit obtenues suite au transfert de paramètres suivant la méthode de régionalisation par proximité spatiale; cinq donneurs ont été considérés pour le modèle MOHYSE, et six donneurs ont été considérés pour le modèle de GR4J et sept donneurs ont été considérés pour le modèle HSAMI

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Le chapitre suivant présente une discussion suite aux résultats obtenus. Cette discussion permet de cerner la pertinence de cette étude, mais aussi les limites associées au travail qui a été réalisé. Une grande partie de cette discussion concerne les données de base, puisqu'elles sont le fondement de cette recherche. Par la suite, les méthodes de régionalisation des paramètres elles-mêmes seront abordées afin de vérifier si elles sont applicables au territoire central du Mexique. Finalement, l'application de la meilleure méthode sur un bassin versant non-jaugé est abordée, de même que des considérations liées à la modélisation hydrologique.

5.1 La confiance dans les données hydrométéorologiques de base

L'étape d'acquisition des données a exigé du temps et des efforts considérables. Les données du Mexique sont non seulement des données non reconstruites, mais il semble qu'aucune vérification ne soit faite de la part des autorités locales à savoir si les débits et les données météorologiques sont justes. Il est donc fort probable que les données provenant de certaines des stations hydrométriques prises en compte dans ces travaux ne soient pas des débits naturels. Les débits ont pu, par exemple, être modifiés soit par des soutirages d'eau en amont des stations, ce qui réduit les débits enregistrés, soit par des rejets d'eau, qui augmentent alors les débits. La présence de soutirages ou de rejets d'eau sont des informations qu'il est pratiquement toujours impossible d'obtenir, ce qui rend par le fait même impossible la reconstruction des données par les utilisateurs. Plusieurs types de barrages sont aussi présents sur le territoire mexicain, soit pour contrôler les inondations aux abords d'une ville, soit pour assurer un débit plus constant lorsqu'une prise d'eau se trouve à proximité ou encore pour créer un réservoir pour les fins de production hydroélectrique. Les plus importants barrages sont munis de stations hydrométriques qui permettent de connaître les débits aux abords des ouvrages. Cependant, les données quant à la quantité d'eau qui est soutirée dû aux différents ouvrages n'est pas une information rendue publique ce qui complique le traitement des données sur des bassins versants où il est possible de retrouver ces ouvrages.

Plusieurs vérifications des données hydrométriques et météorologiques ont été effectuées de façon préalable à la régionalisation pour retirer notamment les données aberrantes. Cette étape a diminué considérablement le nombre de stations utilisables puisque les données de plusieurs des stations initialement retenues soulevaient trop de doutes quant à leur qualité. Dans plusieurs cas, même après le retrait des données aberrantes, les séries temporelles de débits présentaient des allures qui ne ressemblaient pas à l'hydrogramme typique que l'on connaît, soit une alternance entre les périodes de crue et d'étiage. Théoriquement, l'hydrologie du Mexique comporte deux périodes assez distinctes, soit une période sèche (étiage) durant l'hiver et une période humide l'été (crue). Ce cycle était pourtant difficile à retrouver dans certaines stations hydrométriques.

La localisation des stations hydrométriques et météorologiques est aussi problématique lorsque vient le temps de modéliser les bassins versants. Les bassins ont été modélisés en prenant les stations hydrométriques comme exutoires, afin de s'assurer que les stations hydrométriques étaient associées aux bonnes superficies de drainage en amont et non pas seulement une partie de l'aire de drainage. Différentes bases de données (CONABIO; CONABIO, 2012; CONAGUA; CONAGUA [s.d]; IMTA; IMTA [s.d]) fournissant des débits observés donnent des coordonnées différentes les unes des autres pour les mêmes stations hydrométriques. Même lorsque la différence paraît petite, cela a pu faire en sorte que certaines stations soient mal placées sur la carte produite dans ArcGIS lors de la modélisation et la délimitation des bassins versants. Le lien entre les superficies des bassins associés à ces stations et les débits observés aurait donc pu ne pas être tout à fait cohérent. De plus, certaines des stations hydrométriques ont été déplacées sur la carte de modélisation puisqu'elles tombaient directement entre deux rivières modélisées; cette tâche a été effectuée au meilleur de la connaissance de l'auteure, qui a chaque fois tenté de contrevérifier les coordonnées au moyen d'une source d'information supplémentaire et qui a tenté de faire le choix d'emplacement le plus logique suivant l'ordre de grandeur des débits mesurés.

Lorsque la superficie drainée associée aux stations hydrométriques n'est pas la bonne, il devient pratiquement impossible, pour les modèles hydrologiques, de bien performer en

calibration. La modélisation hydrologique nécessite, en entrée, la superficie de drainage (facteur de mise à l'échelle des données) et le lien entre les débits simulés et observés est alors corrompu lorsque cette superficie n'est pas la bonne.

5.1.1 Changements dans le répertoire des données hydrométriques

L'acquisition et l'analyse des données à l'aide du catalogue CONAGUA (CONAGUA,[s.d.]) a eu lieu durant la première année et demie de la recherche (entre janvier 2014 et mars 2016). Depuis, une nouvelle version de ce catalogue a été mise à la disposition des utilisateurs, soit à la fin avril 2016. Cette nouvelle version inclut notamment la position exacte des stations par des coordonnées précises, de même que la superficie de drainage équivalente pour les stations, et ce pour beaucoup de stations du catalogue. Cette information, qui n'était pas disponible lors du traitement initial des données, se serait avérée d'une grande utilité pour vérifier l'emplacement des stations dans ArcGIS. Après vérification à l'aide de ce nouveau catalogue, il ressort que plusieurs stations ont été mal localisées lors de la modélisation et que 18 des stations hydrométriques du secteur à l'étude sont des stations installées dans des canaux où le débit est régularisé. Ces 18 stations se trouvent sur des bassins faisant partie de ceux qui ont obtenu les moins bonnes performances en calibration avec les trois modèles hydrologiques. Sachant que les débits enregistrés ne sont pas des débits naturels et qu'ils ne présentent pas l'allure de l'hydrogramme auquel on pourrait s'attendre, il est compréhensible que les modèles ne soient pas en mesure de reproduire ces débits de manière satisfaisante. Le reste des analyses et des résultats ont été obtenus à partir des informations acquises avant la sortie de ce nouveau catalogue.

5.2 La pertinence d'une étape de validation avant la régionalisation

Alors que certaines stations hydrométriques ne disposaient pas des 15 ans de données nécessaires au calage des modèles hydrologiques (tel qu'établi dans la méthodologie, section 3.4), certaines autres stations avaient une base de données plus complète. Dans ces derniers cas, il était alors possible de procéder à la calibration des modèles et une étape de validation aurait aussi pu être envisagée. La validation demeure un concept plutôt ambigu en

régionalisation, avec deux modes de pensées très différents sur le sujet. Le premier étant que la validation devrait toujours avoir lieu, peu importe le type d'étude réalisé, de façon à s'assurer que les jeux de paramètres soient bien représentatifs du bassin versant étudié et donc de son hydrologie. Cette façon de faire est celle qui est largement utilisée lors des études hydrologiques des bassins versants afin d'assurer la justesse des paramètres trouvés. Suivant le second mode de pensée, à l'inverse, l'étape de validation sur le même bassin versant est inutile puisque la validation se fait lors de l'application de méthodes de régionalisation aux bassins versants pseudo non-jaugés (Hrachowitz et al., 2013). Il devient donc inutile de savoir si le jeu de paramètre est bien adapté à ce bassin versant jaugé, mais qu'au contraire, il est préférable d'utiliser au maximum les informations disponibles pour assurer une calibration la plus juste possible. Puisque plus de la moitié des 91 bassins versants à l'étude ont obtenu des performances jugées moins que bonnes en calibration, l'étape de validation pourrait ici s'avérer utile et informative. Elle pourrait en effet permettre de vérifier le niveau d'adaptabilité des modèles hydrologiques avant de procéder à la régionalisation des paramètres. Lorsque la validation donne des résultats considérablement différents de ceux de la calibration, cela signifie que le modèle a de la difficulté à s'adapter, possiblement en raison d'une surparamétrisation (Hrachowitz et al., 2013; Wagener, 2007).

En suivant les recommandations issues du second mode de pensée cité précédemment, une étape de validation a été réalisée sur les 91 bassins versants à l'étude. Les statistiques (nombres de bassins avec des performances similaires ainsi que la valeur du NSE pour chaque simulation) sur les performances selon le critère de NSE pour les périodes de calibration et celles de validation changent légèrement, tel que montré au Tableau 5.1. Ce tableau montre par ailleurs que le modèle HSAMI est celui dont les performances en calibration et validation sont les plus similaires, les nombres de bassins de même que les bassins avec des statistiques similaires demeurant sensiblement les mêmes peu importe la période de simulation choisie. GR4J et MOHYSE réagissent de façon similaire avec des diminutions plus importantes des nombres de bassins jugés bons (NSE>0.6), entre les périodes de calibration et les périodes de validation (les nombres de bassins versants jugés bons passent, respectivement, de 16 à 12 et de 22 à 18). Seuls deux bassins versants (# 26053

et 26243) obtiennent de meilleures performances en validation qu'en calibration, tandis que les autres bassins versants restent constants ou ont des performances en calibration toujours supérieures à la validation.

Tableau 5.1 Comparaison des performances en périodes de calibration et de validation en considérant les nombres de bassins pour diverses plages de valeurs du critère NSE

	GR4J		**HSAMI**		**MOHYSE**	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation
NSE<0	34	35	36	35	32	31
0.4<NSE < 0.6	19	20	12	11	13	14
NSE>0.6	16	12	23	21	22	18

Dans le cadre de cette étude, avoir procédé à une validation des résultats préalablement à la régionalisation n'aurait pas réellement changé les résultats obtenus puisque le critère de performance NSE>0,5 qui permettait à des bassins d'être sélectionnés comme donneurs potentiels de paramètres ne donnerait pas de donneurs potentiels différents si celui-ci avait été pris sur les performances en validation plutôt que sur celles en calibration (sauf pour les deux exceptions nommées plus haut). Il est donc vrai de dire que l'étape de validation des modèles n'est pas essentielle, dans le cas présent, puisqu'elle n'apporterait aucune information complémentaire à cette étude de régionalisation, mais elle a permis dans ce cas de vérifier les résultats obtenus en calibration sur une plus grande série de données.

5.3 Différences dans les dates de disponibilité des données entre les bassins versants jaugés et non jaugés

Les dates des simulations varient pour chacun des bassins versants, en fonction des périodes au cours desquelles les données sont disponibles. Plus de la moitié des simulations ont eu lieu dans les années 1960 et 1970, tandis que d'autres ont eu lieu au cours des années 1940 et 1950. Le changement de date entre les différentes simulations des bassins versants ont-ils pu avoir un impact sur la concordance des paramètres? Vélasquez et al., (2015) ont démontré

que le Mexique était sujet au changement climatique. Le fait d'utiliser des paramètres issus de calibrations réalisées dans les années 1940 et de les transférer sur un bassin pseudo non-jaugé pour lequel la calibration (servant de référence) a eu lieu en 1970 pourrait influencer les résultats en régionalisation. Le même constat s'applique dans le cas où un exercice de régionalisation serait effectué sur un bassin réellement non-jaugé et où l'utilisateur s'intéresserait à obtenir une série de débits représentative du bassin maintenant, mais en ayant seulement accès à des jeux de paramètres issus de bassins jaugés calibrés dans le passé.

Les précédentes considérations sous-entendent que l'on suppose également que les caractéristiques physiques des bassins versants à l'étude soient statiques (aucun changement dans le temps). Les données d'utilisation du sol et d'édaphologie sont des données datant des années 1990 et 2000, lorsqu'une campagne nationale avait été menée pour caractériser le territoire. Ces données ne sont pas nécessairement le reflet du territoire durant les années de simulations, soit entre 1950 et 1980 majoritairement. L'évolution du Mexique a été majeure dans les dernières décennies, mais très peu de données sont disponibles sur l'état réel du territoire avant ces évolutions.

Pour essayer de s'affranchir des possibles incohérences causées soit par le changement climatique ou encore l'évolution du territoire, il aurait été préférable de travailler avec des données provenant toutes de la même période d'observation pour l'ensemble des bassins versants de l'étude. Ceci dit, la question des données et de leur disponibilité au cours de périodes spécifiques et « idéales » demeure un enjeu dans bon nombre d'études hydrologiques.

5.4 L'accès aux données physiques et morphologiques

La connaissance des caractéristiques physiques morphologiques et climatologiques est essentielle à l'application des méthodes de régionalisation par similitude physique et intégrée. Dans le cas du secteur à l'étude, bien que plusieurs données physiques étaient disponibles pour les bassins versants étudiés, jusqu'à 40% des superficies de chacun des

bassins versants ne comportaient aucune information édaphologique. Ce pourcentage, lorsqu'il est important, pourrait biaiser les résultats puisque des bassins versants qui étaient similaires en considérant 40% de superficie sans données, pourraient, en réalité, être très différents l'un de l'autre. Il est probable aussi que les résultats de l'analyse des corrélations entre les unités édaphologiques eussent été différents si les informations manquantes avaient été connues. Ainsi, très peu de caractéristiques physiques ou morphologiques ont été trouvées comme étant prédominantes dans le transfert des paramètres entre les bassins jaugés et ceux pseudo non-jaugés selon le test de Kruskal-Wallis. Ces résultats auraient pu être bien différents si l'ensemble des informations avait été disponible.

Le Mexique est un pays où le relief est très irrégulier. Dans un tel environnement, l'altitude moyenne des bassins versants a joué un rôle souvent important dans le transfert des paramètres dans les études précédentes. Comme il était possible de s'y attendre, sur la base des études dans des secteurs similaires, l'altitude fait bel et bien partie des descripteurs les plus informatifs (figure 4.11), elle s'est notamment démarquée pour la modélisation avec MOHYSE, mais pas dans les cas de GR4J et HSAMI. Considérant les sources d'erreur précédemment énoncées, il est possible que l'impact de l'altitude qui s'est avérée importante dans les autres études en reliefs semblables (Pechlivanidis et al., 2011; Viviroli et al., 2009), ait été masqué par le bruit causé par ces erreurs.

5.5 La sélection intelligente des bassins donneurs de paramètres sur la base des performances en calibration

Selon les études précédentes (Arsenault & Brissette 2014; Oudin et al., 2008), la sélection des bassins jugés bons, en tant que donneurs, apporte une certaine amélioration aux simulations par régionalisation. De façon cohérente, dans une base de données où les simulations jugées inacceptables sont nombreuses, cette étude montre une amélioration lorsque le choix des bassins versants donneurs est fait selon un critère de performance et non seulement en fonction des distances/indices calculés (des essais de régionalisation ont été effectués en considérant la totalité des 91 bassins versants comme donneurs potentiels mais les résultats obtenus ne sont pas montrés puisqu'aucune information d'intérêt ne pouvait en

être tirée). Il faut cependant faire preuve de jugement dans le choix de la limite de performance qui permette de sélectionner les bassins donneurs. Dans la présente étude, les bassins affichant une valeur de NSE au-dessus de 0.5 en calibration ont été gardés. Cette limite est inférieure à celle qui a été considérée par Arsenault & Brissette (2014) et qui avait été fixée à NSE=0,6. Considérant les performances obtenues en calibrations pour les bassins mexicains, le nombre de donneurs potentiels aurait considérablement diminué si une telle limite avait plutôt été retenue. Les résultats n'auraient évidemment pas été les mêmes puisque les donneurs auraient été différents. De plus, on peut penser qu'un critère plus restrictif aurait diminué l'amélioration apportée par l'utilisation de donneurs multiples puisque les derniers donneurs utilisés n'auraient probablement pas été près spatialement/physiquement des bassins pseudo non-jaugés. Pour le modèle GR4J, avec seulement 16 simulations supérieures à la cible NSE en calibration, les donneurs potentiels auraient été toujours les mêmes, peu importe le bassin pseudo non-jaugé analysé. La seule différence aurait été dans l'ordre d'apparition des bassins les plus près.

5.6 La taille de la base de données de bassins versants pour l'essai de régionalisation par bassins pseudo non-jaugés

Les études précédentes ont souvent attribué le succès de la méthode de régionalisation par proximité spatiale à un réseau dense de stations hydrométriques, donc à un réseau dense de bassins versants dans le secteur d'étude. Dans le cas de cette étude, bien que certains bassins versants soient très près les uns des autres, certains sont aussi très éloignés. La majorité des bassins versants analysés sont regroupés en secteurs, mais entre les différents secteurs, il peut y avoir jusqu'à 300 kilomètres de distance. Pour cette raison, il est donc possible de croire que la méthode de régionalisation par proximité spatiale ne sera pas la meilleure pour le transfert des paramètres entre les bassins jaugés et non-jaugés. Cette méthode étant basée simplement sur la distance entre les centroïdes, plus les bassins versants jaugés et non-jaugés sont situés près l'un de l'autre, plus les chances de réussite sont fortes. Cette méthode a de plus comme hypothèse sous-jacente que des bassins situés près spatialement, auront des caractéristiques physiques similaires. Donc si les bassins sont éloignés, les caractéristiques ont plus tendances à être différentes. Dans le cas de réseaux de bassins versants étudiés peu

denses, la méthode par similitude physique a tendance à mieux performer. Le nombre de bassins versants retenus dans cette étude a été choisi en fonction de la disponibilité et la qualité des données de base. Avoir eu accès à un plus grand éventail de bassins versants, ou encore, avoir considéré le même nombre de bassins mais suivant un réseau plus dense, aurait pu augmenter les chances de performance de la méthode de régionalisation par proximité spatiale.

5.7 La régionalisation au Mexique est-elle possible?

En analysant les résultats issus des régionalisations précédentes, il est clair que ce projet n'a pas donné les résultats escomptés et que la régionalisation au Mexique s'avère difficile. Plusieurs raisons peuvent être citées en cause. Premièrement, les données hydrométriques du Mexique (du moins celles qui ont été utilisées pour cette étude) nécessitent un temps important pour procéder aux vérifications initiales qui permettent de passer outre certains problèmes comme des débits vraisemblablement trop hauts ou des données négatives. Ensuite, les différentes bases de données n'étant pas toutes reliées, elles donnent quelques fois des informations contradictoires comme il est arrivé ici avec les coordonnées pour la localisation des stations. Les organismes responsables au Mexique ne font pas non plus la différence entre les stations situées sur des bassins naturels et celles situées sur des canaux, donc en débit régulé. Les deux types de stations donnent des informations complémentaires aux différentes recherches, mais ne peuvent pas être utilisés dans le même but. Il pourrait donc être intéressant que les deux types soient séparés en des bases de données différentes pour permettre aux utilisateurs d'avoir accès à l'information juste, qui correspond à leurs besoins.

En analysant les simulations issues de l'étape de calibration, il est possible de voir que bien que certaines simulations soient très mauvaises, près du tiers des simulations ont de bonnes performances. Cela porte à croire que si la qualité des données de base pour toutes les stations ainsi que l'information quant à leur nature étaient meilleures, il serait possible d'obtenir encore plus de bonnes simulations dans le secteur à l'étude. Il est aussi important

de comprendre, à ce stade, que ce n'est pas l'ensemble des stations qui bénéficient du même entretien de la part des autorités. Lorsque les stations sont dans un secteur plus développé, la qualité des stations et des données est prise beaucoup plus au sérieux que dans les secteurs plus ruraux du Mexique. Le choix des bassins versants pour faire partie du secteur à l'étude vient donc jouer un rôle important dans les performances obtenues. La régionalisation aurait pu être testée en n'utilisant que les bassins pour lesquels de bonnes performances étaient obtenues, par contre le nombre de donneurs potentiels aurait été réduit grandement. Une telle comparaison pourrait faire partie, par exemple, de travaux futurs.

Les conclusions issues de l'étape de calibration s'appliquent aussi à la régionalisation puisque plusieurs des bassins versants ayant bien performé en calibration réussissent aussi très bien en régionalisation. Cependant, aucune méthode n'a pu être déterminée comme étant la meilleure approche de régionalisation sur les bassins mexicains. La trop faible densité des bassins versants de l'étude cause des problèmes lors de la régionalisation par proximité spatiale et l'incertitude quant à la qualité des caractéristiques morphologiques et physiques rend difficile la tâche de déterminer quels bassins sont hydrologiquement similaires. L'insuccès de la méthode de régionalisation par similitude physique appuie les affirmations d'Oudin et al. (2010) qui remettent en cause l'hypothèse derrière la méthode, selon laquelle deux bassins qui sont physiquement similaires devraient être également hydrologiquement similaires. Dans le cadre des présents travaux, il est possible de s'apercevoir que les caractéristiques physiques permettent difficilement de prédire l'hydrologie des bassins versants.

5.7.1 L'utilisation de méthodes de régionalisation complexes remplace-t-elle les méthodes simples pour la détermination des débits sur des bassins versants non-jaugés?

Les méthodes de régionalisation indépendantes du modèle hydrologique sont souvent considérées comme des méthodes simples pour déterminer les débits en un site non-jaugé. Ces méthodes fonctionnent dans des secteurs où les bassins sont imbriqués l'un dans l'autre. Certaines conditions doivent aussi être respectées concernant la disposition et les

caractéristiques morphologiques des bassins. Pour toutes les autres situations, les méthodes plus complexes doivent être utilisées. À la base de ce projet, la méthode simple du ratio des aires avait été incluse parmi les méthodes de régionalisation à l'étude. Plusieurs problèmes ont mené à l'abandon de cette méthode. Premièrement, sur les 91 bassins versants utilisés dans l'analyse, seulement trois séries permettaient l'application de la méthode en raison de la disposition des bassins versants ou du ratio des aires qui ne permettaient pas l'application de la méthode dans les autres cas. Étant donné que la technique devait préalablement inclure la détermination des coefficients de l'équation, les trois séries de bassins utilisables n'étaient pas suffisantes pour arriver à des conclusions sur l'applicabilité de la méthode. Les problèmes relatifs à l'application de la méthode du ratio des aires de base laissent croire que pour la section à l'étude, une méthode simple qui est indépendante du modèle hydrologique ne peut pas résoudre la difficulté associée à un manque de données observées sur des bassins versants et qu'une modélisation hydrologique basée sur des bassins versants calibrés reste la méthode la plus applicable, et ce, malgré son incertitude et le travail supplémentaire requis dans l'application de la méthode dépendante du modèle hydrologique.

5.7.2 Le choix du modèle hydrologique influence-t-il les conclusions en régionalisation?

L'étude de régionalisation a été réalisée avec trois modèles globaux et conceptuels dont les nombres de paramètres sont différents. En examinant les performances somme toute semblables des trois modèles, il apparaît que le nombre de paramètres très différent entre les modèles HSAMI, MOHYSE et GR4J ne joue pas de rôle significatif quant à la réussite des méthodes de régionalisation qui ont été utilisées dans cette étude. Les trois modèles montrent des performances similaires, tant en calibration qu'en régionalisation. Par ailleurs, le modèle GR4J, qui est ajusté à l'aide de seulement quatre paramètres, semble être trop parcimonieux pour le secteur mexicain étudié puisque les performances globales en termes du nombre de simulations jugées concluantes sont moins élevées qu'avec les modèles MOHYSE ou HSAMI. Il est possible de croire que les six des 23 paramètres du modèle HSAMI qui sont des paramètres de neige, dans un environnement sans neige, n'influencent pas les performances du modèle, mais augmentent l'équifinalité possible dans le nombre de jeux de

paramètres puisqu'un seul paramètre supplémentaire ajoute un grand nombre de possibilités de jeux de paramètres qui obtiendraient des performances très similaires en calibration. Ces résultats ne concordent cependant pas avec ceux d'Oudin et al. (2008) et de Parajka et al. (2013) qui avaient trouvé que les modèles simples performaient mieux que les modèles complexes. Selon Pechlivanidis et al. (2011), un modèle métrique devrait être un bon modèle en régionalisation par sa facilité à trouver des relations entre les caractéristiques physiques des bassins versants et les paramètres du modèle. Suite aux présents travaux, malgré le fait que les modèles utilisés étaient de type conceptuel plutôt que métrique, le manque de confiance dans les caractéristiques physiques du secteur à l'étude confirme qu'il est peu probable qu'un modèle métrique eut pu mieux fonctionner en régionalisation qu'un modèle conceptuel.

5.8 Le pas de temps de la simulation a-t-il un impact sur les résultats obtenus?

La base de données utilisée dans la présente étude englobe une grande variété de superficies de bassins versants (entre 10 et 11000 km^2) et comporte des données disponibles au pas de temps journalier. Les petits bassins versants sont considérés comme étant des bassins généralement réactifs. Lorsque les simulations sont effectuées sur un pas de temps journalier, pour ces petits bassins en particulier, il est fort probable que les modèles hydrologiques n'arrivent pas à reproduire adéquatement la forte réactivité et la variabilité au sein des processus hydrologiques. Les données disponibles, pour le moment, ne permettent pas de faire des simulations sur de plus petits pas de temps. Ceci a très certainement pu affecter la qualité des calibrations effectuées sur les plus petits des bassins versants.

Vingt-six (26) pourcent des bassins versants à l'étude ont une superficie inférieure à 100 km^2, 27 pourcent sont entre 100 et 500 km^2, 40 pourcent entre 500 et 3000 km^2 et 7 pourcent ont une superficie supérieure à 3000 km^2. Les résultats de la Figure 4.7, montrent bien que la performance des simulations est beaucoup plus constante et concluante au fur et à mesure que la superficie des bassins versants étudiés augmente. Les bassins versants dont la

superficie est supérieure à 3000 km^2 ont tous bien performé à l'exception d'un bassin versant.

5.9 L'application des conclusions sur un bassin versant non jaugé du Mexique

Bien que certaines informations puissent être tirées des résultats présentés à la Figure 4.18, il est impossible de commenter la performance des modèles puisque c'est un bassin versant non-jaugé, donc qui n'a pas de données observées. Premièrement les trois modèles semblent suivre adéquatement les saisons de pluies avec une alternance bien définie entre crues et étiages suivant les précipitations. Le modèle HSAMI a tendance à surestimer les débits de pointe comparativement aux deux autres modèles et GR4J est le modèle qui génère les débits les plus faibles en étiage. Comme les observations de débit sont inexistantes, il n'est pas possible d'évaluer à quel point les trois modèles arrivent à les reproduire adéquatement. Il faut par ailleure être conscient, lors de l'analyse de la figure, que les trois modèles sont de même type, soit des modèles globaux conceptuels. Avoir eu recours à d'autres modèles aurait vraisemblablement donné des résultats différents et aurait augmenté l'enveloppe de résultats possibles. Le choix des modèles avait été fait en fonction de leur applicabilité dans la région durant de précédentes études : MOHYSE a été appliqué sur le bassin versant Actopan avec une performance de NSE = 0.76 sur cinq ans de calibration tandis que GR4J a été appliqué sur un le bassin versant Tampaon et a eu une performance de NSE=0.87 (Casteneda Gonzales 2014; Velázquez et al., 2015). La quantité de données disponibles pour la calibration avait également constitué un critère lors du choix des modèles hydrologiques (un modèle physique demande plus d'information que ce qui est disponible pour l'ensemble des bassins versants mexicains). Les trois modèles étudiés, dans le cadre de cette étude, pourraient cependant être mieux adaptés au climat aride, notamment en ce qui concerne la simulation des étiages par l'essai d'autres formules d'évapotranspiration, par exemple. Le bassin versant de la rivière Naolinco est de plus un bassin dont la superficie est inférieure à 500 km^2, ce qui vient mettre un doute quant à la performance des modèles pour ce bassin puisque, tel que discuté à la section 5.8, les petits bassins versants tendent à moins bien performer lorsque des données au pas de temps journalier sont considérées. Avec la

multitude de modèles hydrologiques disponibles, plusieurs autres modèles pourraient être testés et permettraient d'apporter des informations supplémentaires sur les débits possibles à l'exutoire du bassin de la rivière Naolinco.

Enfin, lorsque la courbe de tarage sera construite, il sera possible de reconstruire les débits par bilan hydrique et de les comparer avec les simulations présentées à la Figure 4.19. Avec le temps, il sera possible de vérifier la qualité des simulations et des efforts de régionalisation, ce qui mènera à une meilleure capacité à prévoir les apports sur le bassin versant de la Rivière Naolinco.

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce document avaient pour but l'étude hydrologique du bassin versant non-jaugé de la rivière Naolinco au Mexique. Pour y arriver, les techniques habituellement utilisées pour la simulation sur les bassins versants non-jaugés ont d'abord été testées. Ces techniques, portant sur la régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques, sont : (1) la régionalisation par proximité spatiale, (2) la régionalisation par similitude physique et (3) la régionalisation intégrée. Toutes trois ont été appliquées à 91 bassins versants jaugés de la partie centrale du Mexique. Chaque bassin a été tour à tour considéré comme pseudo non-jaugé de façon à vérifier l'applicabilité de chacune des méthodes. Les bassins du secteur à l'étude couvraient une vaste plage de débits observés, de précipitations moyennes annuelles, de superficies et de variation dans les élévations moyennes. Trois modèles hydrologiques globaux et conceptuels (GR4J, HSAMI et MOHYSE) ont été utilisés, comportant des nombres différents de paramètres.

Les travaux ont permis de conclure que les méthodes de régionalisation des paramètres donnent des résultats très variables sur l'ensemble des bassins versants. Certaines simulations ont permis d'obtenir des performances très satisfaisantes, en ce qui a trait au critère NSE, tandis que pour d'autres bassins versants, même l'application des trois modèles hydrologiques en calibration s'est avérée infructueuse (NSE < 0.2). Il ressort de ces travaux que la régionalisation par proximité spatiale performe aussi bien que la méthode par similitude physique. La méthode par proximité spatiale demande beaucoup moins de données, qui sont souvent non disponibles pour le secteur étudié. Aucun avantage n'a donc été trouvé à procéder à des recherches et des calculs poussés pour trouver des relations entre les descripteurs des bassins versants jaugés et non-jaugés. De la même façon, aucun avantage n'a été trouvé à combiner les deux méthodes, soit à utiliser la régionalisation intégrée, qui demande beaucoup d'habiletés pour bien analyser les caractéristiques (descripteurs) influentes des bassins versants. Utiliser plus d'un donneur s'est cependant avéré bénéfique pour les trois types de régionalisation et les résultats indiquent que le nombre de bassins versants donneurs dans le transfert de paramètres devrait se situer entre 5 et 8 lorsque l'ensemble des bassins versants à l'étude est retenu et que ce sont les performances

maximales qui sont analysées, ce qui rejoint les résultats d'études similaires (Arsenault & Brissette, 2014; Oudin et al., 2008).

Suite à la conclusion de ce projet, il est clair que pour arriver à faire de la modélisation hydrologique sur des bassins versants non-jaugés du Mexique, il y a encore de travail à faire. Une part importante du travail pouvant mener à une application concluante des méthodes de régionalisation réside dans le travail exhaustif en début d'étude, soit dans le nettoyage des données de base et dans le choix du modèle hydrologique utilisé pour l'étude. L'étape de nettoyage des données de base concerne notamment la vérification des stations hydrométriques. En connaissant désormais l'aire de drainage associée aux stations hydrométriques grâce à la mise à jour du répertoire CONAGUA qui a été utilisé, le nettoyage des données pourra être facilité. Les stations qui sont localisées dans des canaux à débits régularisés pourront plus facilement être identifiées et retirées. Puisque seulement les bassins versants ayant eu une bonne performance en calibration (NSE > 0.5) ont été retenus pour l'étape de régionalisation, il serait pertinent d'augmenter le nombre de bassins dans l'étude pour assurer une banque de bassins disponibles de plus grande taille. De cette façon, la densité des bassins versants utilisés dans l'étude augmenterait, ce qui donnerait plus de chances de réussite à la méthode par proximité spatiale qui est majoritairement influencée par cet aspect. Finalement, afin d'assurer des précipitations plus homogènes à l'intérieur des bassins versants étudiés, faire les essais de régionalisation avec des données météorologiques sur grilles pourrait apporter une dimension intéressante à l'étude et permettrait d'avoir une base de comparaison avec les données météorologiques issues des polygones de Thiessen.

ANNEXE I

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES 3 MODÈLES HYDROLOGIQUES UTILISÉS

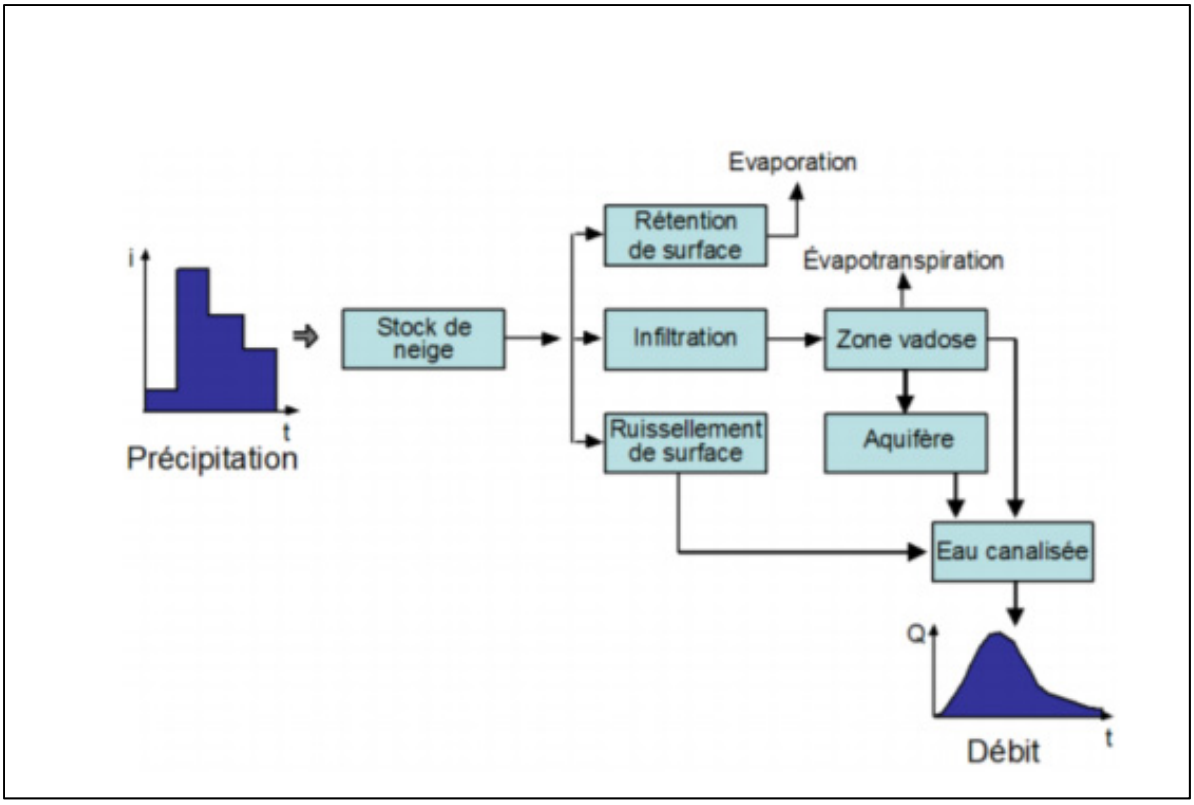

Figure-A I-1 Représentation schématique du modèle MOHYSE
Tirée de Fortin et Turcotte (2007, p4)

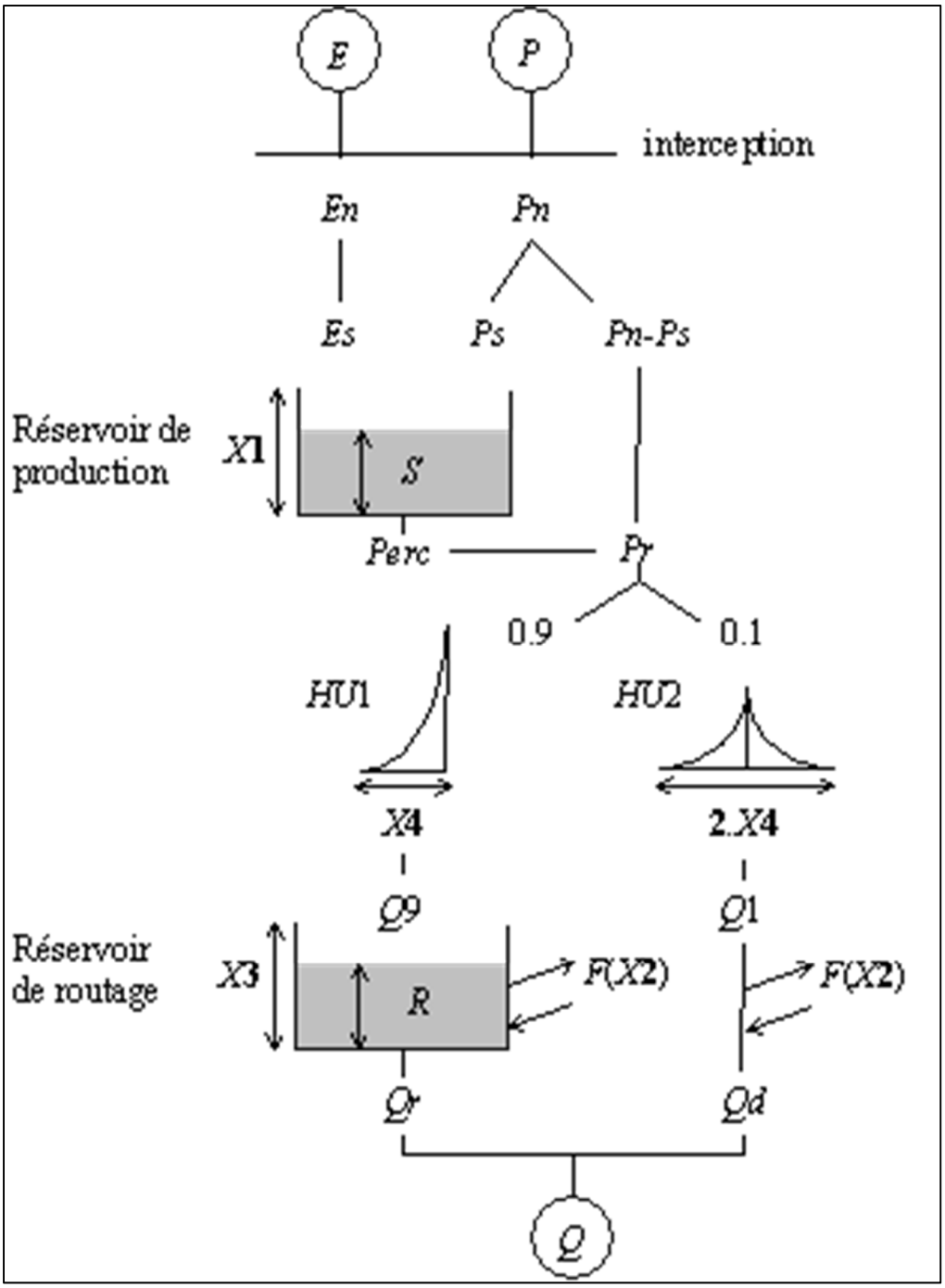

Figure-A I-2 Représentation schématique du modèle hydrologique GR4J
Tirée de Perrin et al.,(2003, p3)

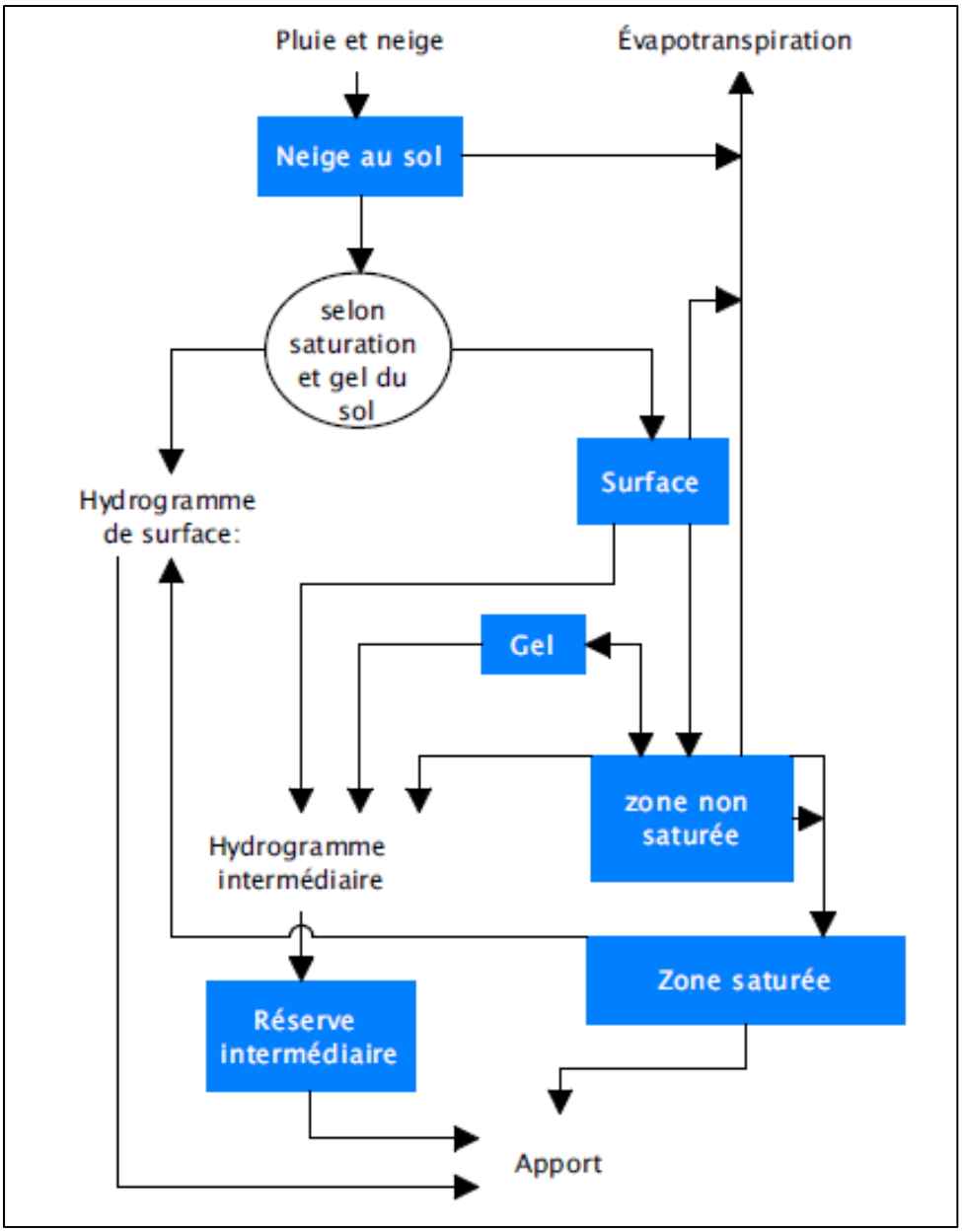

Figure-A I-3 Représentation schématique du modèle hydrologique HSAMI
Tirée de Fortin (2000 p 7)

ANNEXE II

STATISTIQUES COMPLÈTES DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DE CHACUN DES BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE

Tableau-A II-1 Caractéristiques physiques et morphologiques de chacun des bassins versants à l'étude

	18002	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**
Latitude (°)	19,055	19,050	19,037	18,991	19,090	18,919	18,959	19,009
Longitude(°)	-98,218	-98,214	-98,191	-98,924	-98,281	-98,592	-98,572	-98,740
Altitude (m)	2269,99	2263,70	2253,95	2042,29	2252,63	2525,83	2708,87	2743,55
Aire (km^2)	1016,97	1058,67	1232,66	121,79	535,84	32,96	41,51	131,65
Pente (°)	3,985	4,110	4,520	6,327	2,588	11,938	12,942	11,968
Agriculture	81%	81%	84%	98%	82%	98%	100%	89%
Eau	2%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	17%	16%	14%	0%	18%	0%	0%	2%
Forêt	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	9%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	15%	15%	15%	0%	21%	17%	0%	0%
Cambisol	7%	9%	12%	0%	8%	53%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Andosol	0%	0%	0%	37%	0%	0%	0%	44%
Leptosol	9%	9%	16%	12%	1%	6%	3%	3%
Regosol	41%	40%	34%	44%	45%	12%	77%	51%
Vertisol	7%	6%	5%	7%	6%	0%	0%	0%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	1%	1%	1%	0%	2%	13%	19%	0%

	18322	18342	18344	18348	18349	18352	18361	18374
Latitude (°)	19,466	17,440	17,571	17,681	19,376	17,328	18,269	17,868
Longitude(°)	-98,129	-98,545	-97,822	-97,646	-97,914	-97,844	-97,710	-97,989
Altitude (m)	2578,62	1814,04	2015,22	2099,51	2598,97	2195,94	1863,37	1655,60
Aire (km^2)	1106,10	2338,54	6478,75	2782,36	455,88	1979,97	929,51	276,79
Pente (°)	4,904	20,380	18,273	17,872	5,612	18,947	12,094	18,389
Agriculture	99%	77%	91%	96%	99%	99%	97%	95%
Eau	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Forêt	0%	23%	9%	3%	0%	1%	3%	5%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	33%	0%	29%	27%	2%	46%	2%	7%
Cambisol	38%	1%	1%	1%	20%	2%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	5%	0%	0%	15%	0%	0%
Andosol	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Leptosol	2%	82%	51%	58%	11%	32%	56%	8%
Regosol	15%	16%	11%	8%	51%	4%	40%	83%
Vertisol	1%	0%	3%	5%	0%	1%	2%	2%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	1%	0%	0%	15%	0%	0%	0%

	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026
Latitude (°)	17,678	18,197	18,207	17,812	17,583	17,197	17,065	17,010
Longitude(°)	-97,484	-97,969	-99,175	-97,820	-97,568	-96,841	-96,686	-96,689
Altitude (m)	2258,54	1543,22	1061,85	1804,88	2211,05	1976,29	1915,22	1859,91
Aire (km^2)	341,77	3792,91	153,10	13,14	1453,80	1027,23	2647,33	3264,29
Pente (°)	12,870	13,364	12,678	9,672	16,581	15,769	14,158	13,011
Agriculture	99%	57%	32%	100%	100%	99%	94%	95%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	1%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	2%
Forêt	0%	43%	68%	0%	0%	0%	3%	3%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	22%	24%	19%
Chernozem	21%	4%	11%	0%	33%	1%	6%	4%
Cambisol	0%	0%	7%	43%	0%	0%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	0%	0%	1%	8%	7%	8%
Andosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Leptosol	61%	30%	76%	16%	58%	9%	10%	8%
Regosol	0%	56%	5%	38%	1%	47%	39%	42%
Vertisol	17%	8%	0%	2%	6%	9%	11%	15%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	1%	0%	0%	1%	2%	1%	1%

	20027	26007	26039	26053	26057	26076	26118	26120
Latitude (°)	16,987	19,848	19,274	19,380	19,453	20,283	19,894	19,575
Longitude(°)	-96,513	-99,070	-99,163	-99,336	-99,311	-98,521	-99,084	-99,385
Altitude (m)	1931,42	2287,77	2622,09	2796,75	2628,55	2098,49	2306,30	2761,13
Aire (km^2)	1161,77	152,66	832,47	125,24	22,92	2600,13	335,32	281,77
Pente(°)	14,288	1,920	7,048	15,758	14,971	10,280	3,282	12,748
Agriculture	90%	95%	56%	89%	76%	97%	95%	94%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%
Urbain	2%	5%	44%	11%	24%	1%	5%	5%
Forêt	8%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	32%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
Chernozem	12%	63%	15%	30%	44%	26%	55%	7%
Cambisol	0%	30%	0%	16%	19%	5%	26%	0%
Luvisol	8%	0%	0%	7%	0%	20%	0%	38%
Andosol	0%	0%	24%	36%	13%	4%	0%	42%
Leptosol	13%	0%	11%	0%	0%	9%	5%	0%
Regosol	25%	0%	1%	0%	0%	8%	0%	0%
Vertisol	6%	0%	0%	0%	0%	18%	8%	7%
Histosol	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%

	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270
Latitude (°)	22,026	22,152	21,398	21,367	23,157	22,261	22,104	21,197
Longitude(°)	-98,874	-99,208	-98,988	-98,385	-99,176	-99,012	-99,421	-98,882
Altitude (m)	173,39	543,08	845,22	88,08	773,63	314,85	972,09	731,77
Aire (km^2)	50,33	7380,36	639,76	864,81	10112,11	739,16	1468,43	8,99
Pente(°)	5,125	9,691	20,215	5,076	11,762	4,029	13,640	30,265
Agriculture	43%	63%	44%	70%	72%	35%	84%	0%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Urbain	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
Forêt	57%	37%	55%	29%	28%	64%	15%	100%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	0%	3%	0%	20%	5%	10%	0%	0%
Cambisol	0%	1%	0%	3%	2%	6%	2%	0%
Luvisol	0%	1%	6%	0%	0%	0%	3%	0%
Andosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Leptosol	95%	67%	94%	36%	56%	65%	77%	100%
Regosol	0%	10%	0%	2%	12%	15%	8%	0%
Vertisol	5%	17%	0%	39%	20%	2%	10%	0%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

	26273	26280	26285	26289	26292	26293	26296	26311
Latitude (°)	19,475	22,882	22,467	20,983	22,109	21,202	23,200	20,072
Longitude(°)	-99,339	-99,297	-99,410	-98,128	-100,029	-98,779	-99,229	-98,466
Altitude (m)	2808,10	795,34	831,64	274,01	1273,68	336,08	876,44	2450,64
Aire (km^2)	17,10	2636,06	1905,76	31,29	10615,70	68,35	8744,75	337,33
Pente(°)	14,390	12,405	12,982	9,822	10,236	21,480	13,344	5,414
Agriculture	100%	62%	79%	66%	98%	43%	72%	100%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Forêt	0%	38%	21%	34%	2%	57%	28%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	2%	6%	6%	83%	14%	0%	5%	34%
Cambisol	1%	1%	1%	0%	1%	0%	1%	6%
Luvisol	45%	1%	2%	0%	1%	0%	0%	21%
Andosol	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6%
Leptosol	0%	66%	68%	0%	57%	100%	62%	11%
Regosol	0%	13%	5%	0%	4%	0%	11%	0%
Vertisol	0%	12%	17%	17%	6%	0%	17%	22%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	12%	0%	3%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	2%	0%	1%	0%

	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423	26429
Latitude (°)	22,689	22,706	19,693	19,632	23,153	22,999	22,517	23,071
Longitude(°)	-99,023	-99,041	-99,300	-99,327	-99,053	-99,149	-98,932	-98,393
Altitude (m)	122,70	158,22	2448,53	2571,04	325,61	362,20	164,12	568,07
Aire (km^2)	60,52	16,23	245,33	607,84	81,34	77,67	49,30	272,46
Pente(°)	3,209	5,701	8,364	9,662	8,568	11,119	5,817	13,017
Agriculture	81%	59%	96%	88%	53%	38%	76%	53%
Eau	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
Urbain	2%	0%	4%	12%	0%	2%	0%	0%
Forêt	17%	41%	0%	0%	47%	60%	24%	47%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	15%	6%	36%	18%	12%	9%	25%	6%
Cambisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	21%	26%	7%	0%	0%	0%
Andosol	0%	0%	7%	23%	0%	0%	0%	0%
Leptosol	13%	24%	0%	0%	0%	49%	23%	88%
Regosol	0%	0%	0%	0%	40%	29%	0%	0%
Vertisol	70%	70%	30%	21%	41%	12%	52%	6%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

	26430	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004
Latitude (°)	22,030	21,881	19,495	19,392	19,349	19,791	20,485	20,810
Longitude(°)	-99,495	-99,441	-99,343	-98,866	-99,312	-97,162	-97,472	-98,067
Altitude (m)	1231,32	983,00	2810,91	2417,46	2782,62	1470,29	110,79	525,32
Aire (km^2)	454,48	80,70	103,88	59,80	16,57	1489,50	150,16	2287,51
Pente(°)	15,719	13,626	15,381	6,968	15,152	16,126	6,786	12,441
Agriculture	93%	63%	98%	97%	87%	96%	71%	77%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	0%	1%	2%	3%	13%	1%	14%	0%
Forêt	7%	36%	0%	0%	0%	3%	16%	22%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Chernozem	0%	0%	15%	55%	58%	4%	6%	36%
Cambisol	2%	0%	0%	5%	0%	0%	10%	4%
Luvisol	0%	0%	23%	0%	0%	13%	0%	2%
Andosol	0%	0%	50%	0%	31%	69%	0%	0%
Leptosol	80%	98%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Regosol	14%	0%	8%	33%	0%	11%	60%	19%
Vertisol	2%	1%	0%	4%	0%	0%	10%	39%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%

	27020	27023	27029	27033	27035	27036	27037	27038
Latitude (°)	19,762	19,592	19,780	19,816	19,818	19,735	19,923	19,863
Longitude(°)	-97,275	-97,204	-97,540	-97,435	-97,330	-97,220	-97,705	-97,851
Altitude (m)	1946,58	2618,18	2288,84	2186,57	1852,04	2054,17	1416,96	1971,11
Aire (km^2)	386,09	129,03	172,04	59,68	11,18	59,78	97,24	610,58
Pente(°)	12,168	5,297	10,757	9,396	13,466	16,053	30,820	26,095
Agriculture	100%	99%	98%	100%	100%	100%	100%	100%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
Forêt	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chernozem	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Cambisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	86%
Andosol	75%	48%	93%	73%	100%	100%	48%	9%
Leptosol	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	4%
Regosol	24%	51%	1%	26%	0%	0%	0%	0%
Vertisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018
Latitude (°)	19,757	19,758	20,144	19,710	19,694	19,734	19,360	17,799
Longitude(°)	-97,500	-97,311	-97,559	-97,768	-97,787	-97,688	-96,862	-95,271
Altitude (m)	2435,88	2184,60	264,93	2341,73	2404,67	2294,38	1071,82	85,09
Aire (km^2)	352,42	48,60	40,13	1400,31	1301,23	1926,00	1582,02	106,08
Pente(°)	9,017	7,607	11,917	19,815	19,655	17,529	13,360	3,110
Agriculture	99%	100%	100%	100%	100%	100%	66%	100%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
Forêt	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	5%	0%	0%	0%	16%	0%
Chernozem	0%	0%	0%	23%	25%	17%	6%	0%
Cambisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%
Luvisol	0%	0%	0%	15%	15%	11%	3%	71%
Andosol	63%	74%	0%	30%	26%	41%	35%	0%
Leptosol	11%	0%	61%	19%	20%	16%	13%	0%
Regosol	24%	26%	25%	13%	14%	15%	0%	0%
Vertisol	0%	0%	2%	0%	0%	0%	26%	0%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%

	28030	28086	28105	28108	28111	28125	28133	28134
Latitude (°)	19,628	19,622	19,625	19,560	19,461	19,407	19,293	19,417
Longitude(°)	-96,879	-96,795	-96,847	-96,755	-96,747	-96,952	-96,988	-96,988
Altitude (m)	1498,60	1224,42	1390,17	994,55	754,62	1374,16	1166,29	1512,91
Aire (km^2)	782,25	1182,58	929,65	1848,54	475,58	1006,20	71,09	857,10
Pente(°)	13,338	13,671	13,425	11,429	8,811	14,929	22,575	15,583
Agriculture	97%	93%	97%	91%	85%	76%	4%	79%
Eau	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Urbain	1%	1%	1%	1%	3%	1%	0%	1%
Forêt	2%	6%	2%	7%	11%	23%	96%	20%
Sans Végé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acrisol	0%	0%	0%	1%	2%	14%	12%	16%
Chernozem	20%	38%	29%	37%	46%	5%	0%	2%
Cambisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Luvisol	3%	2%	2%	2%	2%	5%	0%	2%
Andosol	65%	45%	55%	31%	10%	55%	68%	65%
Leptosol	6%	4%	5%	7%	17%	10%	19%	7%
Regosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Vertisol	5%	10%	7%	21%	19%	10%	0%	7%
Histosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Planosol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GleySol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

	29005	29007	37012
Latitude (°)	17,442	16,837	23,024
Longitude(°)	-95,020	-94,643	-99,638
Altitude (m)	46,69	516,05	1500,74
Aire (km²)	458,51	197,22	212,95
Pente(°)	2,897	18,240	12,221
Agriculture	98%	3%	99%
Eau	1%	0%	0%
Urbain	1%	0%	1%
Forêt	0%	97%	0%
Sans Végé	0%	0%	0%
Acrisol	15%	19%	0%
Chernozem	8%	0%	41%
Cambisol	68%	0%	0%
Luvisol	0%	0%	0%
Andosol	0%	0%	0%
Leptosol	0%	0%	43%
Regosol	2%	81%	13%
Vertisol	1%	0%	0%
Histosol	0%	0%	0%
Planosol	3%	0%	0%
Calcisol	0%	0%	1%
GleySol	0%	0%	0%
Solonchak	0%	0%	0%
Fluvisol	0%	0%	0%

ANNEXE III

STATISTISQUES DES PERFORMANCES DE LA RÉGIONALISATION PAR PROMIXITÉ SPATIALE

Tableau-A III-1 Performance des simulations par la méthode de proximité spatiale pour chacun des bassins versants en fonction des modèles hydrologiques et distances entre le bassin versant jaugé et celui non-jaugé

Numéro des bassins versants	Distance des bassins versants donneurs	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
'18002.xlsx'	0,18	0,31	-0,03	0,44
'18161.xlsx'	0,00	-2,83	-0,30	-2,50
'18198.xlsx'	0,01	-2366,13	-181,00	-2710,46
'18200.xlsx'	0,14	-1090,92	-53,28	-1258,90
'18237.xlsx'	0,02	-210,22	-15,66	-226,43
'18288.xlsx'	0,09	-33,51	-1,69	-32,19
'18292.xlsx'	0,08	-151,49	-16,57	-124,33
'18301.xlsx'	0,10	-20,77	-6,15	-26,73
'18322.xlsx'	0,08	-0,86	-0,52	-22,71
'18342.xlsx'	0,15	0,15	0,15	0,19
'18344.xlsx'	0,04	0,01	0,02	0,01
'18348.xlsx'	0,03	-0,19	0,06	0,31
'18349.xlsx'	0,09	-2,76	-1,04	-15,01
'18352.xlsx'	0,09	0,47	0,55	0,53
'18361.xlsx'	0,06	-5,21	-4,37	-3,33
'18374.xlsx'	0,06	-0,28	-0,20	-0,11
'18433.xlsx'	0,03	-6,05	-5,04	-3,17
'18434.xlsx'	0,14	-0,06	0,00	-0,03
'18436.xlsx'	0,23	-0,73	-0,76	-0,75
'18485.xlsx'	0,05	-0,07	-0,07	-0,07
'18538.xlsx'	0,03	0,42	0,43	0,51
'20005.xlsx'	0,06	0,38	0,39	0,39
'20023.xlsx'	0,01	0,26	0,27	0,25
'20026.xlsx'	0,06	-0,61	-0,20	-0,22
'20027.xlsx'	0,04	0,35	0,32	0,29
'26007.xlsx'	0,07	-2,00	-2,01	-1,24
'26039.xlsx'	0,09	-43,10	-3,31	-2,49
'26053.xlsx'	0,04	-3,20	0,27	0,35
'26057.xlsx'	0,03	-7,90	-0,06	0,02
'26076.xlsx'	0,17	-384,23	-185,24	-216,60
'26118.xlsx'	0,07	-4,24	-3,95	-3,69
'26120.xlsx'	0,02	-1,27	0,18	0,23
'26217.xlsx'	0,06	-5,65	-3,44	-6,16
'26224.xlsx'	0,05	0,60	0,76	0,79
'26243.xlsx'	0,14	0,50	0,31	0,50
'26248.xlsx'	0,12	0,34	0,20	0,28

Numéro des bassins versants	Distance des bassins versants donneurs	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
'26249.xlsx'	0,02	0,10	0,57	0,51
'26263.xlsx'	0,05	0,18	0,25	0,27
'26267.xlsx'	0,03	0,76	0,79	0,80
'26270.xlsx'	0,05	-0,40	-0,41	-0,40
'26273.xlsx'	0,03	-1,59	0,19	0,24
'26280.xlsx'	0,06	-3,52	-1,05	-0,07
'26285.xlsx'	0,06	0,09	0,27	0,46
'26289.xlsx'	0,04	-0,12	-0,14	-0,14
'26292.xlsx'	0,11	-11,89	-23,49	-24,01
'26293.xlsx'	0,07	-0,04	-0,08	-0,07
'26296.xlsx'	0,02	-0,93	-1,03	-0,47
'26311.xlsx'	0,15	-1818,37	-13057,37	-32876,89
'26334.xlsx'	0,04	0,05	-0,34	-0,17
'26336.xlsx'	0,05	-3,17	-4,46	-4,29
'26356.xlsx'	0,01	0,15	-0,04	-0,06
'26357.xlsx'	0,01	-5,02	-5,20	-4,99
'26388.xlsx'	0,02	-0,04	-0,04	-0,08
'26400.xlsx'	0,03	-0,75	-0,74	-0,74
'26423.xlsx'	0,06	0,44	0,11	0,37
'26429.xlsx'	0,16	-2,73	-3,80	-0,96
'26430.xlsx'	0,03	0,63	0,73	0,78
'26431.xlsx'	0,03	0,14	0,14	0,10
'26443.xlsx'	0,02	-1,53	0,19	0,22
'26445.xlsx'	0,12	-89,87	-4,26	-4,06
'26458.xlsx'	0,05	0,16	-0,06	-0,15
'27001.xlsx'	0,03	0,33	0,29	0,44
'27002.xlsx'	0,11	-0,13	-0,11	-0,18
'27004.xlsx'	0,19	0,08	0,00	0,10
'27020.xlsx'	0,02	-0,78	-0,71	-0,01
'27023.xlsx'	0,04	-7340,02	-7569,38	-6394,85
'27029.xlsx'	0,03	-12,15	-28,25	-2,37
'27033.xlsx'	0,02	-38,26	-33,46	-32,81
'27035.xlsx'	0,02	-0,69	0,31	0,43
'27036.xlsx'	0,01	-0,36	-0,14	-0,19
'27037.xlsx'	0,04	0,16	0,16	0,13
'27038.xlsx'	0,08	0,21	0,45	-0,16
'27040.xlsx'	0,02	-207,49	-225,36	-4,42
'27041.xlsx'	0,01	-2308,98	-3435,06	-4387,16

Numéro des bassins versants	Distance des bassins versants donneurs	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
'27049.xlsx'	0,07	-0,19	-0,19	-0,22
'27053.xlsx'	0,04	-25,95	-25,91	-35,94
'27055.xlsx'	0,04	-58,47	-68,21	-113,58
'27069.xlsx'	0,05	-4,00	-2,72	-2,37
'28003.xlsx'	0,02	0,63	0,74	0,73
'28018.xlsx'	0,39	-0,80	-0,80	-0,81
'28030.xlsx'	0,03	-1,52	-1,00	-0,02
'28086.xlsx'	0,02	-276,51	-159,69	-180,65
'28105.xlsx'	0,01	-1169,73	-724,73	-733,77
'28108.xlsx'	0,02	0,04	0,25	0,40
'28111.xlsx'	0,02	0,50	0,61	0,62
'28125.xlsx'	0,01	0,65	0,82	0,70
'28133.xlsx'	0,02	-1,19	-1,37	-1,25
'28134.xlsx'	0,01	0,75	0,78	0,71
'29005.xlsx'	0,38	-0,55	-0,58	-0,58
'29007.xlsx'	0,41	-0,62	-0,74	-0,72
'37012.xlsx'	0,09	-0,10	-0,09	-0,10

ANNEXE IV

STATISTISQUES DES PERFORMANCES DES BASSINS VERSANT À L'ÉTAPE DE CALIBRATION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

Tableau-A IV-1 Performances des bassins versants à l'étape de calibration et données de calibration

Numéro des bassins versants	Années de simulation		% de données présentes	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
18002	1928	1942	99%	0,424	0,463	0,530
18161	1970	1984	100%	-0,267	-0,073	-0,160
18198	1950	1964	100%	-0,926	-1,823	-0,002
18200	1959	1973	100%	-36,779	-8,980	-22,143
18237	1954	1968	100%	-6,328	-0,779	-3,277
18288	1959	1973	100%	-0,690	0,204	0,076
18292	1960	1974	100%	-1,233	-0,122	-0,415
18301	1963	1977	100%	-0,130	-0,107	-0,019
18322	1962	1976	100%	0,300	0,506	0,435
18342	1964	1978	99%	0,550	0,522	0,416
18344	1966	1980	100%	0,014	0,017	0,016
18348	1967	1981	91%	0,412	0,523	0,520
18349	1964	1978	100%	0,231	0,186	0,214
18352	1966	1980	90%	0,564	0,620	0,589
18361	1976	1990	94%	0,054	0,260	0,232
18374	1965	1979	100%	0,216	0,212	0,237
18433	1953	1967	85%	-0,568	-0,151	-0,198
18434	1979	1993	100%	0,608	0,650	0,641
18436	1981	1995	100%	0,078	-0,730	-0,666
18485	1967	1981	79%	0,082	-0,026	0,001
18538	1973	1987	65%	0,544	0,653	0,664
20005	1970	1984	68%	0,494	0,560	0,541
20023	1973	1987	100%	0,291	0,329	0,287
20026	1973	1987	100%	0,525	0,624	0,560
20027	1973	1987	100%	0,366	0,370	0,353
26007	1949	1963	100%	-0,957	-0,637	-0,907
26039	1936	1950	100%	-2,105	0,168	-0,746
26053	1953	1967	100%	0,409	0,358	0,395
26057	1949	1963	100%	0,128	0,167	0,199
26076	1938	1952	100%	-7,334	-0,721	0,358
26118	1933	1947	72%	-0,436	-2,375	-1,355
26120	1958	1972	99%	0,297	0,263	0,341

Numéro des bassins versants	Années de simulation		% de données présentes	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
26217	1974	1988	100%	-0,537	-1,849	-1,132
26224	1954	1968	100%	0,829	0,894	0,869
26243	1955	1969	100%	0,536	0,487	0,558
26248	1955	1969	100%	0,468	0,317	0,384
26249	1959	1973	100%	0,794	0,868	0,735
26263	1959	1973	100%	0,683	0,486	0,537
26267	1960	1974	100%	0,882	0,911	0,919
26270	1960	1974	100%	-0,372	-0,406	-0,401
26273	1960	1974	100%	0,383	0,457	0,470
26280	1961	1975	100%	0,711	0,732	0,667
26285	1961	1975	100%	0,627	0,826	0,865
26289	1961	1975	100%	-0,054	-0,119	-0,098
26292	1961	1975	100%	0,499	0,728	0,747
26293	1961	1975	100%	0,046	-0,053	-0,025
26296	1963	1977	100%	0,457	0,628	0,615
26311	1938	1952	100%	-0,568	-153,745	-0,297
26334	1938	1952	100%	0,134	-0,164	-0,016
26336	1967	1981	100%	-0,087	-4,020	-3,739
26356	1967	1981	100%	0,555	0,552	0,527
26357	1961	1975	100%	0,496	0,644	0,598
26388	1927	1941	66%	0,230	0,041	0,097
26400	1973	1987	100%	-0,079	-0,707	-0,670
26423	1973	1987	100%	0,578	0,475	0,510
26429	1973	1987	100%	0,484	0,479	0,323
26430	1985	1999	97%	0,756	0,845	0,857
26431	1989	2003	79%	0,436	0,230	0,270
26443	1979	1993	81%	0,275	0,304	0,279
26445	1953	1967	100%	0,104	0,236	0,067
26458	1953	1967	100%	0,469	0,303	0,336
27001	1959	1973	92%	0,669	0,716	0,790
27002	1948	1962	100%	0,183	0,013	0,047
27004	1951	1965	100%	0,522	0,620	0,668
27020	1985	1999	98%	-0,470	0,537	0,635
27023	1965	1979	100%	-911,906	-171,049	-21,663
27029	1957	1971	96%	-6,167	-0,752	-0,085
27033	1957	1971	100%	-6,536	-2,844	0,749
27035	1957	1971	96%	0,731	0,830	0,825
27036	1961	1975	100%	-0,009	-0,001	0,001
27037	1958	1972	100%	0,166	0,164	0,160
27038	1958	1972	100%	0,753	0,787	0,751

Numéro des bassins versants	Années de simulation		% de données présentes	NSE Gr4J	NSE HSAMI	NSE MOHYSE
27040	1986	2000	100%	-18,817	-16,198	-0,057
27041	1969	1983	100%	-528,972	-97,461	-2,171
27049	1964	1978	100%	-0,022	-0,128	-0,099
27053	1981	1995	100%	-2,575	-0,565	-1,163
27055	1951	1965	100%	-0,950	-0,209	0,135
27069	1949	1963	100%	-0,292	0,209	0,225
28003	1966	1980	100%	0,762	0,817	0,785
28018	1972	1986	100%	-0,352	-0,726	-0,705
28030	1964	1978	100%	-0,224	0,793	0,601
28086	1962	1976	100%	-39,232	-12,825	-6,379
28105	1964	1978	100%	-152,466	-44,182	-4,473
28108	1967	1981	100%	0,601	0,762	0,727
28111	1963	1977	100%	0,731	0,759	0,748
28125	1961	1975	100%	0,835	0,867	0,836
28133	1954	1968	100%	0,048	-1,362	-1,184
28134	1967	1981	87%	0,857	0,814	0,860
29005	1969	1983	100%	-0,215	-0,497	-0,441
29007	1979	1993	81%	0,020	-0,544	-0,417
37012	1953	1967	100%	0,036	-0,042	-0,027

ANNEXE V

STATISTISQUES DES PERFORMANCES DE LA RÉGIONALISATION PAR SIMILITUDE PHYSIQUE

Tableau-A V-1 Performance des simulations par similitude physique selon le descripteur utilisé et le modèle HSAMI (selon NSE)

	18002	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**
Altitude	0,062	-0,572	-492	-122	-44	-0,306	-16,6	-6,152	0,349	-0,094	0,008	-0,045	-1,036
Pente	-0,033	-0,298	-181	-88	-16	-17,997	-11,1	-6,013	-10,930	0,153	0,008	-0,045	-1,036
Superficie	0,039	-0,837	-181	-44	-36	-0,082	-3,5	-21,910	-0,805	-0,328	-0,018	0,260	-31,07
Ac	0,382	-1,727	-860	-184	-70	-7,843	-43,6	-5,136	-0,805	-0,328	0,011	-4,015	-4,605
CH	-0,033	-0,298	-181	-55	-13	-0,572	-11,1	-5,114	0,349	0,065	-0,052	0,352	-2,486
Ca	-0,031	-0,285	-124	-192	-12	-8,206	-37,5	-5,683	0,188	0,200	0,016	0,175	-35,84
Lu	0,039	-0,837	-391	-42	-39	-4,344	-30,6	-10,607	-0,805	0,058	0,011	-4,015	-5,729
An	0,407	-1,946	-1871	-706	-152	-17,997	-74,7	-19,711	-14,218	-0,129	-0,052	-7,142	-31,07
Le	-0,160	-0,296	-64	-42	-8	-0,208	-4,5	-3,718	0,188	-0,096	0,002	0,352	-0,053
Re	-0,160	-0,296	-64	-706	-24	-0,306	-93,8	-21,283	-0,157	-0,129	0,008	0,403	-34,31
Ve	0,438	-1,675	-1941	-215	-154	-1,691	-30,6	-10,607	-15,727	-0,181	0,008	0,260	-32,71
Hi	0,229	-0,496	-734	-192	-51	-8,206	-37,5	-12,485	-2,908	-0,746	-0,035	-2,185	-7,893
Pl	-0,160	-0,296	-64	-810	-8	-0,208	-4,5	-25,738	-0,517	-0,096	0,002	0,352	-0,053
cal	0,039	-0,837	-482	-810	-12	-3,409	-25,0	-6,152	-0,517	-0,129	-0,006	0,063	-28,99
GL	0,057	-0,422	-219	-81	-39	-11,485	-123,9	-10,607	-14,218	0,086	-0,012	-1,233	-38,49
So	0,062	-0,296	-192	-778	-8	-8,206	-37,5	-12,485	-0,672	0,200	-0,052	-2,314	-7,893
Fl	-0,160	-0,296	-64	-42	-8	-0,208	-4,5	-3,718	0,188	-0,096	0,002	0,352	-0,053
Agriculture	0,407	-1,946	-1871	-706	-152	-20,582	-93,8	-21,283	-14,218	-0,129	-0,052	-7,142	-31,07
Eau	0,407	-1,946	-1871	-706	-152	-20,582	-93,8	-21,283	-14,218	-0,129	-0,052	-7,142	-31,07
Urbain	-0,160	-0,296	-64	-42	-8	-0,208	-4,5	-3,718	0,188	-0,096	0,002	0,352	-0,053
Foret	0,407	-1,946	-1871	-706	-152	-20,582	-93,8	-21,283	-14,218	-0,129	-0,052	-7,142	-31,07
Sans Veg	0,229	-0,496	-1233	-706	-8	-4,344	-30,6	-21,283	-14,218	0,202	0,008	-2,185	-5,729

	18352	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007	26039
Altitude	0,555	0,042	-0,203	-5,042	0,532	-0,766	-0,070	0,586	0,420	0,028	0,415	-0,182	-2,239	-8,6
Pente	0,368	-0,406	0,133	-2,268	0,580	-0,764	-0,077	-0,466	-0,560	0,176	0,387	-1,017	-1,978	-41,2
Superfi-cie	0,287	-3,014	-0,031	-3,853	0,136	-0,786	-0,079	0,206	-0,365	0,077	-0,112	0,282	-2,008	-48,9
Ac	0,428	-0,307	0,151	-5,042	-0,118	-0,762	-0,079	-0,047	0,329	0,273	-2,514	0,287	-1,639	-58,7
CH	0,287	-0,163	0,103	-2,268	0,051	-0,872	-0,075	0,329	0,271	0,193	0,387	0,169	-1,432	-3,2
Ca	0,555	-0,346	0,137	-15,26	0,278	-0,831	-0,070	0,586	0,320	0,273	-0,199	0,324	-2,008	-3,3
Lu	-0,028	-0,307	0,133	-6,454	-0,118	-0,762	-0,061	0,371	0,424	0,205	-0,990	0,287	-2,218	-12,7
An	-0,361	-2,796	-0,097	-24,07	0,567	-0,769	-0,051	-1,644	-0,560	-0,642	-2,536	-1,407	-1,452	-41,7
Le	0,197	0,097	0,081	-0,343	-0,091	-0,887	-0,082	0,192	0,391	0,181	-2,952	0,050	-1,432	-3,3
Re	0,569	-3,014	0,103	-4,833	0,518	-0,887	-0,051	0,474	0,420	-0,674	-0,837	0,206	-2,118	-3,3
Ve	-0,361	-1,387	0,120	-6,454	-0,091	-0,764	-0,075	0,371	0,391	0,181	-0,199	0,050	-1,978	-12,7
Hi	0,151	-0,346	0,137	-5,548	0,265	-0,831	-0,070	-1,644	0,391	0,273	-0,199	0,050	-1,813	-16,1
Pl	0,197	0,097	0,081	-0,343	-0,091	-0,887	-0,082	0,192	0,207	0,109	0,291	0,206	-1,432	-3,3
cal	-0,554	-1,197	0,151	-1,707	0,250	-0,837	-0,066	0,432	-0,365	0,181	-0,199	-1,500	-1,682	-33,5
GL	0,197	0,042	-0,203	-18,40	0,147	-0,872	-0,073	-0,920	0,391	0,273	-0,199	-0,182	-2,008	-19,5
So	0,428	-2,796	-0,097	-1,707	0,532	-0,831	-0,051	0,192	-0,365	0,176	-0,039	0,206	-1,813	-16,1
Fl	0,197	0,097	0,081	-0,343	-0,091	-0,887	-0,082	0,192	0,207	0,109	0,291	0,206	-1,432	-3,3
Agricul-ture	-0,361	-2,796	-0,097	-24,07	0,567	-0,769	-0,051	-1,644	-0,560	-0,642	-2,536	-1,407	-1,452	-41,7
Eau	-0,361	-2,796	-0,097	-24,07	0,567	-0,769	-0,051	-1,644	-0,560	-0,642	-2,536	-1,407	-1,452	-41,7
Urbain	0,197	0,097	0,081	-0,343	-0,091	-0,887	-0,082	0,192	0,207	0,109	0,291	0,206	-1,432	-3,3
Foret	-0,361	-2,796	-0,097	-24,07	0,567	-0,769	-0,051	-1,644	-0,560	-0,642	-2,536	-1,407	-1,452	-41,7
Sans Veg	-0,361	-2,796	-0,097	-24,07	-0,091	-0,769	-0,051	0,451	0,207	-0,110	-0,990	-1,407	-1,452	-41,7

	26053	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273
Altitude	0,063	-0,567	-103	-6,189	-0,025	-3,979	0,385	0,126	0,202	0,544	0,403	0,523	-0,412	0,295
Pente	-0,827	-8,237	-43	-6,097	0,243	-5,797	0,218	0,326	0,074	0,437	0,083	0,469	-0,413	-1,527
Superficie	0,277	-0,039	-39	-3,501	-1,047	-4,490	0,216	0,318	0,199	0,335	0,014	-0,085	-0,419	0,235
Ac	0,269	-8,237	-39	-5,319	0,171	-6,221	0,046	0,458	0,223	0,565	0,460	0,317	-0,408	-0,418
CH	0,024	-0,735	-79	-3,917	-0,025	-3,785	0,243	0,126	0,024	0,531	0,083	0,669	-0,419	-0,069
Ca	0,269	-0,064	-140	-3,948	-1,047	-4,660	0,243	0,414	0,074	0,531	0,403	0,091	-0,412	-0,504
Lu	-0,827	-1,328	-39	-6,314	-0,334	-6,221	0,046	0,458	0,156	0,565	0,460	0,317	-0,408	-0,321
An	-3,568	-9,262	-165	-3,917	-1,164	-3,954	0,706	0,395	0,160	0,335	0,354	0,793	-0,411	-1,806
Le	0,273	0,088	-149	-5,887	0,141	-4,914	0,289	0,173	0,059	0,335	0,037	0,575	-0,418	0,189
Re	0,000	-2,212	-103	-5,693	0,243	-3,954	0,205	0,395	-0,013	0,565	0,081	0,793	-0,411	-2,130
Ve	-3,536	-9,701	-185	-6,097	-0,334	-6,738	0,597	0,328	0,223	0,481	0,403	0,180	-0,412	-1,383
Hi	0,132	-3,098	-224	-4,487	0,183	-4,660	0,046	0,238	0,131	0,505	0,212	0,233	-0,412	0,194
Pl	-4,476	-1,790	-224	-5,887	-1,724	-4,914	0,289	0,173	0,059	0,335	0,037	0,575	-0,418	-1,527
cal	-3,097	-7,598	-82	-5,730	-1,047	-4,660	0,046	0,326	0,151	0,335	-0,047	0,793	-0,412	-1,639
GL	-3,097	-7,598	-103	-3,948	-1,047	-5,171	-0,101	0,438	0,120	0,451	0,083	0,306	-0,408	-1,639
So	-0,923	-3,098	-149	-4,558	-1,672	-5,746	0,597	0,326	0,202	0,499	0,354	0,600	-0,412	-0,504
Fl	0,273	0,088	-43	-5,887	0,141	-4,914	0,289	0,173	0,059	0,335	0,037	0,575	-0,418	0,189
Agriculture	-3,568	-9,262	-43	-3,917	-1,164	-3,954	0,706	0,395	0,160	0,481	0,354	0,793	-0,411	-1,806
Eau	-3,568	-9,262	-165	-3,917	-1,164	-3,954	0,706	0,395	0,160	0,565	0,354	0,793	-0,411	-1,806
Urbain	0,273	0,088	-43	-5,887	0,141	-4,914	0,289	0,173	0,059	0,335	0,037	0,575	-0,418	0,189
Foret	-3,568	-9,262	-165	-3,917	-1,164	-3,954	0,706	0,395	0,160	0,481	0,354	0,793	-0,411	-1,806
Sans Veg	-3,568	-9,262	-155	-3,917	-1,164	-3,954	0,706	0,395	0,160	0,505	0,354	0,793	-0,411	-1,806

	26270	26273	26280	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388
Altitu-de	-0,412	0,295	-5,576	0,177	-0,137	-23,494	-0,085	0,338	-48937	-0,215	-4,179	-0,043	0,351	-0,026
Pente	-0,413	-1,527	-6,278	0,032	-0,147	-10,770	-0,085	-0,542	-4767	-0,308	-4,434	0,282	-3,818	-0,017
Super-ficie	-0,419	0,235	-1,346	0,014	-0,158	-6,921	-0,125	-1,473	-15505	-0,320	-4,421	0,126	-0,267	-0,107
Ac	-0,408	-0,418	-4,160	-2,161	-0,130	-3,841	-0,077	-1,032	-10953	-0,205	-4,263	0,117	-0,217	0,012
CH	-0,419	-0,069	-0,517	0,177	-0,158	-0,759	-0,141	-3,698	-4268	-0,295	-4,352	0,117	0,351	-0,111
Ca	-0,412	-0,504	-0,517	0,177	-0,142	-13,160	-0,085	-0,025	-15056	-0,311	-4,333	0,282	-5,200	-0,071
Lu	-0,408	-0,321	-4,160	-2,161	-0,130	-3,841	-0,077	-1,032	-24829	-0,294	-4,263	0,142	-0,601	0,012
An	-0,411	-1,806	-6,050	-0,304	-0,141	-23,494	-0,097	-3,698	-61954	-0,223	-4,245	0,481	-6,045	-0,039
Le	-0,418	0,189	0,484	0,480	-0,156	-23,494	-0,123	0,367	-1226	-0,339	-4,449	-0,207	0,494	-0,106
Re	-0,411	-2,130	-0,517	0,177	-0,142	0,176	-0,097	-1,032	-10953	-0,339	-4,465	0,062	-1,219	-0,106
Ve	-0,412	-1,383	-1,346	-0,439	-0,139	-2,802	-0,080	0,338	-60993	-0,274	-4,446	0,142	-0,601	-0,034
Hi	-0,412	0,194	-4,479	-1,254	-0,142	-10,770	-0,085	-3,698	-48937	-0,290	-4,333	-0,043	-5,200	-0,085
Pl	-0,418	-1,527	0,484	0,480	-0,156	-23,494	-0,123	0,367	-48937	-0,339	-4,449	-0,022	0,503	-0,106
cal	-0,412	-1,639	-4,160	0,261	-0,132	-6,921	-0,085	-0,816	-60798	-0,217	-4,263	0,126	-6,250	-0,017
GL	-0,408	-1,639	-5,576	-1,688	-0,132	-3,412	-0,072	-2,274	-48937	-0,233	-4,252	-0,043	-5,200	-0,085
So	-0,412	-0,504	-2,177	0,261	-0,147	-3,591	-0,085	0,338	-6574	-0,215	-4,179	0,539	0,503	-0,026
Fl	-0,418	0,189	0,484	0,480	-0,156	-23,494	-0,123	0,367	-1226	-0,339	-4,449	-0,207	0,494	-0,106
Agricu lture	-0,411	-1,806	-6,050	-0,304	-0,141	-23,494	-0,097	-3,698	-61954	-0,223	-4,245	0,481	-6,045	-0,039
Eau	-0,411	-1,806	-6,050	-0,304	-0,141	-0,031	-0,097	-1,032	-61954	-0,223	-4,245	0,481	-6,045	-0,039
Urbain	-0,418	0,189	0,484	0,480	-0,156	-23,494	-0,123	0,367	-1226	-0,339	-4,449	-0,207	0,494	-0,106
Foret	-0,411	-1,806	-6,050	-0,304	-0,141	-23,494	-0,097	-3,698	-61954	-0,223	-4,245	0,481	-6,045	-0,039
Sans Veg	-0,411	-1,806	-6,050	-0,304	-0,141	-35,153	-0,097	-0,816	-61954	-0,223	-4,245	0,481	-6,045	-0,039

	26400	26423	26429	26430	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004	27020	27023	27029
Altitude	-0,720	0,290	-1,828	0,275	0,111	-0,019	-87,2	-0,020	0,326	-0,048	0,500	-4,474	-7675	-128
Pente	-0,770	0,239	-0,310	0,246	0,111	-1,781	-87,2	0,169	0,401	-0,029	-0,563	-2,491	-7675	-36
Superfi-cie	-0,776	0,155	-4,860	0,438	-0,041	0,152	-3,2	-0,150	0,315	-0,029	0,328	-1,489	-10345	-156
Ac	-0,721	0,309	-7,465	0,370	0,098	0,143	-38,5	-0,057	0,411	-0,050	0,328	-0,708	-10031	-138
CH	-0,760	0,115	-0,282	0,463	-0,024	0,185	-11,6	-0,075	0,203	-0,127	0,074	-0,051	-2235	-25
Ca	-0,769	0,288	-1,123	0,764	0,149	0,169	-22,6	-0,057	0,213	-0,089	0,525	-4,020	-7675	-120
Lu	-0,721	0,253	-7,465	0,370	0,098	-0,021	-17,5	0,025	0,411	-0,094	0,515	-5,324	-9856	-120
An	-0,723	0,260	-2,718	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,155	0,457	-0,062	0,525	-1,489	-6153	-108
Le	-0,777	0,150	-0,143	0,275	0,001	0,143	-1,2	-0,119	0,430	-0,107	-0,389	-1,906	-3936	-36
Re	-0,760	0,257	-5,521	0,470	0,136	0,143	-22,6	0,081	0,175	-0,127	0,512	-1,489	-6153	-108
Ve	-0,762	0,335	-5,501	0,367	0,113	-1,941	-113,7	0,025	0,401	-0,048	0,391	-5,324	-9856	-120
Hi	-0,752	0,253	-1,123	0,463	0,086	-1,396	-29,7	0,089	0,396	-0,051	0,074	-4,020	-8746	-115
Pl	-0,777	0,150	-0,143	0,275	0,001	-1,307	-1,2	-0,078	0,563	-0,107	-0,389	-2,734	-8820	-28
cal	-0,744	0,296	-1,123	0,470	0,086	-1,396	-87,2	0,202	0,451	-0,029	-0,280	-4,842	-10345	-96
GL	-0,752	0,341	-4,860	0,098	0,183	0,114	-12,8	0,202	0,303	-0,023	0,328	-2,909	-9856	-128
So	-0,784	0,290	-2,262	0,214	0,110	-0,567	-38,5	0,089	0,572	-0,032	0,512	-4,020	-8746	-115
Fl	-0,777	0,150	-0,143	0,275	0,001	0,143	-1,2	-0,119	0,213	-0,107	-0,389	-1,906	-3936	-36
Agricul-ture	-0,723	0,260	-2,718	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,155	0,457	-0,062	0,525	-1,489	-6153	-108
Eau	-0,723	0,260	-2,718	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,155	0,457	-0,062	0,525	-1,489	-6153	-108
Urbain	-0,777	0,150	-0,143	0,275	0,001	0,143	-1,2	-0,119	0,213	-0,107	-0,389	-1,906	-3936	-36
Foret	-0,723	0,260	-2,718	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,155	0,457	-0,062	0,525	-1,489	-6153	-108
Sans Veg	-0,723	0,260	-2,718	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,155	0,572	-0,062	0,391	-1,489	-6153	-108

	27033	27035	27036	27037	27038	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018
Altitude	-211	0,055	-0,236	0,156	0,515	-1889	-11047	-0,158	-65,4	-199,6	-5,920	0,225	-0,747
Pente	-88	-2,176	-0,341	0,156	0,665	-1093	-11113	-0,156	-36,0	-98,4	-2,603	0,708	-0,813
Superficie	-33	-1,440	-0,065	0,085	0,564	-591	-2569	-0,189	-51,4	-118,0	-0,132	0,668	-0,828
Ac	-60	0,307	-0,140	0,054	0,274	-1371	-3435	-0,190	-7,9	-48,9	-5,920	0,543	-0,794
CH	-50	0,515	-0,112	0,068	0,374	-391	-3289	-0,191	-58,7	-31,9	-0,643	0,166	-0,806
Ca	-171	-0,857	-0,383	0,157	0,665	-2166	-8924	-0,152	-36,0	-100,7	-6,396	0,336	-0,840
Lu	-159	-1,294	-0,377	0,140	0,515	-1168	-9654	-0,160	-54,9	-114,1	-5,529	0,543	-0,800
An	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,262	-1575	-8124	-0,162	-58,7	-206,1	-4,755	0,670	-0,749
Le	-58	0,450	-0,102	0,098	0,411	-286	-3307	-0,155	-6,2	-10,6	-0,643	0,795	-0,826
Re	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,515	-1575	-8124	-0,162	-8,9	-41,2	-1,069	-0,073	-0,749
Ve	-159	-1,294	-0,377	0,140	0,515	-1168	-9654	-0,160	-102,0	-308,0	-5,529	0,404	-0,813
Hi	-171	-0,857	-0,383	0,118	0,564	-1403	-8924	-0,152	-47,0	-98,4	-3,674	0,156	-0,796
Pl	-60	0,307	-0,065	0,156	0,744	-507	-3435	-0,187	-7,6	-19,8	-7,812	0,225	-0,826
cal	-215	-1,440	-0,484	0,154	0,583	-1679	-11113	-0,160	-31,6	-81,7	-3,951	0,742	-0,752
GL	-60	-1,440	-0,484	0,154	0,347	-591	-3435	-0,190	-4,8	-206,1	-3,070	0,770	-0,752
So	-171	-0,857	-0,383	0,157	0,665	-1403	-8924	-0,162	-36,0	-100,7	-4,641	0,770	-0,779
Fl	-58	0,450	-0,102	0,098	0,411	-286	-3307	-0,187	-6,2	-10,6	-0,643	0,127	-0,826
Agriculture	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,262	-1575	-8124	-0,162	-58,7	-206,1	-4,755	0,670	-0,749
Eau	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,262	-1575	-8124	-0,162	-58,7	-206,1	-4,755	0,670	-0,749
Urbain	-58	0,450	-0,102	0,098	0,411	-286	-3307	-0,187	-6,2	-10,6	-0,643	0,127	-0,826
Foret	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,262	-1575	-8124	-0,162	-58,7	-206,1	-4,755	0,670	-0,749
Sans Veg	-160	-0,375	-0,358	0,123	0,262	-1575	-8124	-0,160	-58,7	-206,1	-4,755	0,670	-0,749

	28030	28086	28105	28108	28111	28125	28133	28134	29005	29007	37012
Altitude	-6,349	-666	-3062	-0,038	0,269	0,756	-1,444	0,071	-0,522	-0,592	-0,052
Pente	-5,028	-489	-635	-1,166	0,466	0,825	-1,497	0,658	-0,592	-0,714	-0,063
Superficie	-6,349	-582	-4142	0,354	0,366	0,513	-1,844	0,071	-0,530	-0,587	-0,069
Ac	-1,187	-666	-725	-0,414	0,363	0,755	-1,397	0,028	-0,605	-0,568	-0,089
CH	-0,236	-164	-700	0,354	0,315	0,264	-1,770	0,028	-0,592	-0,749	-0,082
Ca	-3,567	-1143	-4292	-1,031	0,565	0,273	-1,497	0,245	-0,517	-0,631	-0,067
Lu	-1,187	-666	-725	-0,414	0,611	0,805	-1,397	0,028	-0,576	-0,568	-0,098
An	-3,072	-666	-2594	-0,414	0,366	0,756	-1,444	0,658	-0,530	-0,610	-0,072
Le	-1,187	-209	-935	-0,092	0,638	0,787	-1,405	0,793	-0,517	-0,735	-0,092
Re	-2,149	-229	-2193	-0,844	0,714	0,702	-1,444	0,365	-0,603	-0,610	-0,085
Ve	-7,149	-885	-3430	-0,673	0,593	0,513	-1,656	0,365	-0,592	-0,683	-0,098
Hi	-7,137	-820	-2125	0,252	0,315	0,787	-1,497	0,718	-0,549	-0,631	-0,078
Pl	-6,349	-1143	-3062	-1,063	0,746	0,273	-1,495	0,071	-0,605	-0,759	-0,092
cal	-6,349	-554	-725	-1,031	0,496	0,513	-1,587	0,245	-0,522	-0,587	-0,087
GL	-6,804	-1049	-3976	-0,844	0,466	0,770	-1,408	0,747	-0,605	-0,568	-0,093
So	-3,960	-489	-4142	0,546	0,269	0,693	-1,497	0,503	-0,552	-0,631	-0,078
Fl	-1,187	-209	-935	0,508	0,403	0,364	-1,771	0,133	-0,605	-0,759	-0,092
Agricul-ture	-3,072	-666	-2594	-0,414	0,366	0,756	-1,444	0,658	-0,605	-0,610	-0,072
Eau	-3,072	-666	-2594	-0,414	0,366	0,756	-1,444	0,658	-0,530	-0,610	-0,083
Urbain	-1,187	-209	-935	0,508	0,403	0,364	-1,771	0,133	-0,536	-0,759	-0,092
Foret	-3,072	-666	-2594	-0,414	0,366	0,756	-1,444	0,658	-0,530	-0,610	-0,072
Sans Veg	-3,072	-666	-2594	-0,414	0,366	0,756	-1,444	0,658	-0,530	-0,610	-0,072

Tableau-A V-2 Performance des simulations en régionalisation par similitude physique selon le descripteur et le modèle GR4J (critère de NSE)

	18002	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**
Altitude	-0,024	-0,888	-685	-294	-76	-26	-114	-21	-11,1	-0,064	0,011	0,105	-29,27
Pente	-1,207	-12,88	-12038	-10495	-1085	-9	-14	-9	-143,1	-2,168	0,010	0,105	-527,2
Superficie	0,143	-0,566	-685	-10495	-54	-241	-976	-186	-3,1	-1,076	-0,020	0,168	-16,46
Ac	0,245	-2,008	-726	-318	-65	-9	-55	-5	-0,2	-1,076	0,010	-0,136	-4,737
CH	-1,207	-12,89	-12038	-2763	-430	-69	-272	-52	-143,1	-2,168	-0,003	-3,333	-89,21
Ca	0,409	-1,797	-1891	-383	-160	-16	-55	-11	-1,2	-0,064	0,007	-9,210	-24,50
Lu	-0,024	-0,888	-685	-318	-76	-14	-55	-12	-0,6	0,461	0,010	-0,136	-4,73
An	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-9	-45	-9	-41,3	-2,168	-0,243	-25,1	-89,2
Le	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,1	-89,2
Re	-1,207	-12,89	-12038	-2763	-1766	-162	-272	-52	-0,6	-2,168	-1,595	-145,3	-36,3
Ve	-1,207	-12,89	-12038	-2763	-1085	-162	-272	-52	-143,1	0,000	-0,003	0,168	-247,4
Hi	-1,207	-12,89	-12038	-5878	-1085	-162	-580	-132	-143,1	-7,664	0,006	-1,371	-247,4
Pl	0,121	-5,221	-4896	-1276	-430	-69	-272	-35	-0,9	-2,168	-0,243	-25,1	-89,2
cal	0,143	-0,566	-585	-1276	-331	-45	-41	-13	-0,9	0,109	0,005	-0,186	-6,610
GL	0,071	-0,476	-514	-213	-41	-11	-151	-25	-143,1	-7,664	0,008	-0,335	-45,18
So	-0,024	-0,888	-685	-1160	-76	-69	-272	-52	-0,2	-2,168	-0,836	-0,186	-89,21
Fl	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,06	-89,21
Agricultu-re	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,06	-89,21
Eau	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,06	-89,21
Urbain	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,06	-89,21
Foret	0,121	-5,221	-4896	-2763	-430	-69	-272	-52	-41,3	-2,168	-0,243	-25,06	-89,21
Sans Veg	0,225	-0,676	-626	-2763	-210	-34	-151	-52	-41,3	0,454	0,005	-1,371	-45,18

	18352	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007
Altitude	0,465	0,151	-0,281	-6,054	0,092	-0,773	-0,071	0,417	0,413	0,261	0,029	0,303	-2,474
Pente	-2,774	-0,004	0,149	-1,102	0,256	-0,737	-0,069	0,176	0,151	0,148	0,080	0,056	-3,074
Superfi-cie	0,101	-2,481	-0,054	-26,6	-0,003	-0,743	-0,090	0,193	0,238	0,025	-3,922	0,056	-2,004
Ac	0,465	-0,009	0,143	-6,054	-0,217	-0,565	-0,090	-0,070	0,460	0,261	-2,281	0,161	-1,757
CH	-2,774	-10,529	-1,027	-77,717	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-1,669
Ca	0,465	-0,094	0,157	-3,883	-0,051	-0,832	-0,071	0,417	0,315	0,261	0,142	0,348	-2,004
Lu	0,465	-0,009	0,092	-6,054	-0,217	-0,565	-0,068	-1,353	0,452	0,136	0,231	0,161	-2,474
An	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Le	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	0,378	0,261	-3,063	0,348	-2,675
Re	0,505	-2,481	0,001	-416,1	-0,095	-0,565	-0,019	-2,596	0,413	-0,247	-0,167	-17,098	-1,985
Ve	0,360	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,565	-0,004	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-3,074
Hi	0,348	-25,766	-2,997	-177,9	-2,888	-0,565	-0,004	-0,307	0,378	0,261	-10,399	0,348	-3,074
Pl	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
cal	-0,543	-1,059	0,143	-6,054	-0,059	-0,842	-0,063	0,153	0,238	0,115	0,142	-0,881	-1,883
GL	0,101	0,151	-0,281	-77,7	-0,003	-0,885	-0,078	-8,115	0,378	0,261	-3,922	-1,951	-2,675
So	0,360	-25,766	0,095	-1,102	0,092	-0,654	-0,056	-2,177	0,238	0,148	0,080	0,175	-2,675
Fl	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Agricul-ture	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Eau	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Urbain	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Foret	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,251	-0,654	-0,019	-8,115	-2,558	-2,953	-10,399	-5,588	-2,675
Sans Veg	-2,774	-10,529	-1,027	-77,7	0,141	-0,654	-0,019	-2,596	-0,546	0,136	0,231	-5,588	-2,675

	26039	26053	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267
Altitu-de	-43,1	-3,205	-7,900	-136,5	-7,167	-1,272	-12,994	-0,502	0,230	0,376	0,622	0,328	0,703
Pente	-502,8	-1,309	-3,545	-171,2	-5,110	0,251	-12,994	-0,158	0,350	0,376	0,229	0,328	0,494
Superfi-cie	-59,8	-54,157	0,055	-47,6	-4,243	-1,272	-12,994	0,261	0,347	0,203	0,208	0,628	-0,261
Ac	-62,5	0,230	-3,545	-136,5	-6,076	0,061	-6,097	-0,048	0,501	0,179	-13,845	0,628	0,299
CH	-121,5	-11,320	-23,911	-112,8	-4,395	-14,309	-6,097	0,261	0,230	0,336	0,208	0,329	-0,582
Ca	-43,1	-3,205	-7,900	-117,8	-4,243	-1,272	-4,407	0,261	0,501	0,086	-13,845	0,516	-0,177
Lu	-25,7	-0,929	-1,915	-136,5	-7,167	-0,554	-6,097	-0,048	0,501	0,179	-13,845	0,628	0,299
An	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Le	-121,5	-11,320	-23,911	-114,1	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Re	-309,2	-0,929	-0,947	-1308,3	-6,244	0,251	-6,097	0,483	0,410	0,376	0,261	-0,069	-0,582
Ve	-121,5	-32,005	-67,446	-844,0	-5,110	-5,061	-6,097	0,500	0,332	0,179	0,718	0,516	0,257
Hi	-309,2	-11,320	-67,446	-204,5	-5,110	-1,272	-5,645	-0,048	0,324	0,385	0,718	0,328	0,289
Pl	-7,1	-5,551	-1,179	-204,5	-4,376	-1,889	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
cal	-14,6	-3,205	-7,900	-101,4	-6,335	-1,272	-6,097	-0,048	0,350	0,113	0,116	-0,070	0,756
GL	-25,7	-11,320	-23,911	-111,9	-4,376	-5,061	-6,097	0,483	0,332	0,104	0,208	0,171	0,713
So	-121,5	-11,320	-23,911	-114,1	-3,964	-2,041	-6,650	0,500	0,350	0,252	0,229	0,381	0,702
Fl	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Agricul-ture	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Eau	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Urbain	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Foret	-121,5	-11,320	-23,911	-437,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582
Sans Veg	-121,5	-11,320	-23,911	-275,7	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	0,414	0,628	-0,582

	26270	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273	26280
Altitu-de	-0,414	-7,167	-1,272	-12,994	-0,502	0,230	0,376	0,622	0,328	0,703	-0,414	-1,593	-3,522
Pente	-0,412	-5,110	0,251	-12,994	-0,158	0,350	0,376	0,229	0,328	0,494	-0,412	-0,875	-10,946
Super-ficie	-0,419	-4,243	-1,272	-12,994	0,261	0,347	0,203	0,208	0,628	-0,261	-0,419	0,128	-1,774
Ac	-0,397	-6,076	0,061	-6,097	-0,048	0,501	0,179	-13,845	0,628	0,299	-0,397	0,128	-3,982
CH	-0,401	-4,395	-14,309	-6,097	0,261	0,230	0,336	0,208	0,329	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Ca	-0,412	-4,243	-1,272	-4,407	0,261	0,501	0,086	-13,845	0,516	-0,177	-0,412	-0,741	-0,142
Lu	-0,397	-7,167	-0,554	-6,097	-0,048	0,501	0,179	-13,845	0,628	0,299	-0,397	-0,171	-3,982
An	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Le	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Re	-0,401	-6,244	0,251	-6,097	0,483	0,410	0,376	0,261	-0,069	-0,582	-0,401	-3,500	-0,142
Ve	-0,401	-5,110	-5,061	-6,097	0,500	0,332	0,179	0,718	0,516	0,257	-0,401	-1,873	-1,774
Hi	-0,397	-5,110	-1,272	-5,645	-0,048	0,324	0,385	0,718	0,328	0,289	-0,397	-1,593	-3,737
Pl	-0,401	-4,376	-1,889	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-0,875	-21,777
cal	-0,401	-6,335	-1,272	-6,097	-0,048	0,350	0,113	0,116	-0,070	0,756	-0,401	-1,593	-3,982
GL	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	0,483	0,332	0,104	0,208	0,171	0,713	-0,401	-5,589	-3,522
So	-0,401	-3,964	-2,041	-6,650	0,500	0,350	0,252	0,229	0,381	0,702	-0,401	-5,589	-1,518
Fl	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Agricul-ture	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Eau	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Urbain	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Foret	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	-0,954	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777
Sans Veg	-0,401	-4,376	-5,061	-6,097	-0,951	0,410	0,336	0,414	0,628	-0,582	-0,401	-5,589	-21,777

	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423	26429	26458
Altitude	-5,25	-0,11	-11,89	-0,03	-16,97	-4E+04	0,05	-3,17	-0,04	0,35	-0,03	-0,72	0,29	-1,83	0,16
Pente	0,25	-0,15	-8,23	-0,09	-1,17	-1E+06	-0,09	-3,17	0,28	-3,82	-0,02	-0,77	0,24	-0,31	0,14
Superfi-cie	0,21	-0,09	-8,53	0,00	-1,31	-4E+04	0,05	-4,51	0,13	-0,27	-0,11	-0,78	0,16	-4,86	-0,19
Ac	-1,44	-0,13	-0,43	-0,04	-0,93	-3E+03	-0,28	-4,23	0,12	-0,22	0,01	-0,72	0,31	-7,47	-0,03
CH	-5,25	-0,12	-11,89	-0,04	-1,61	-3E+04	-0,12	-3,90	0,12	0,35	-0,11	-0,76	0,12	-0,28	0,31
Ca	-0,04	-0,14	0,14	-0,09	0,00	-1E+04	-0,35	-4,33	0,28	-5,20	-0,07	-0,77	0,29	-1,12	0,16
Lu	-1,44	-0,13	-0,43	-0,04	-0,93	-3E+03	-0,34	-4,23	0,14	-0,60	0,01	-0,72	0,25	-7,47	0,04
An	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	0,48	-6,05	-0,04	-0,72	0,26	-2,72	0,31
Le	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	-0,21	0,49	-0,11	-0,78	0,15	-0,14	0,31
Re	-0,04	-0,14	-173,1	-0,04	-0,93	-3E+03	-0,09	-4,51	0,06	-1,22	-0,11	-0,76	0,26	-5,52	-0,03
Ve	0,14	-0,12	-1,37	-0,04	0,00	-5E+05	-0,12	-3,90	0,14	-0,60	-0,03	-0,76	0,34	-5,50	0,31
Hi	-1,09	-0,11	-8,23	-0,03	-1,61	-4E+04	-0,09	-3,31	-0,04	-5,20	-0,09	-0,75	0,25	-1,12	0,37
Pl	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-4E+04	-0,12	-3,90	-0,02	0,50	-0,11	-0,78	0,15	-0,14	-0,05
cal	0,14	-0,13	-8,53	-0,04	-35,85	-5E+03	-0,28	-3,17	0,13	-6,25	-0,02	-0,74	0,30	-1,12	0,16
GL	-1,13	-0,12	-0,43	-0,04	0,26	-1E+05	-0,12	-3,90	-0,04	-5,20	-0,09	-0,75	0,34	-4,86	0,31
So	0,14	-0,15	-2,20	-0,04	0,00	-5E+02	0,05	-3,17	0,54	0,50	-0,03	-0,78	0,29	-2,26	0,31
Fl	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	-0,21	0,49	-0,11	-0,78	0,15	-0,14	0,31
Agricul-ture	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	0,48	-6,05	-0,04	-0,72	0,26	-2,72	0,31
Eau	-5,25	-0,12	-8,53	-0,04	-0,93	-1E+05	-0,12	-3,90	0,48	-6,05	-0,04	-0,72	0,26	-2,72	0,31
Urbain	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	-0,21	0,49	-0,11	-0,78	0,15	-0,14	0,31
Foret	-5,25	-0,12	-74,35	-0,04	-16,97	-1E+05	-0,12	-3,90	0,48	-6,05	-0,04	-0,72	0,26	-2,72	0,31
Sans Veg	-5,25	-0,12	-41,75	-0,04	-0,44	-1E+05	-0,12	-3,90	0,48	-6,05	-0,04	-0,72	0,26	-2,72	0,31

	26430	26431	26443	26445	27001	27002	27004	27020	27023	27029	27033	27035	27036	27037
Altitude	0,275	0,111	-0,019	-87,2	0,322	0,115	0,402	-4,063	-8829	-135,5	-130,7	-0,535	-0,400	0,158
Pente	0,246	0,111	-1,781	-87,2	0,326	0,115	-0,712	-2,769	-38465	-46,1	-203,7	-2,253	-0,357	0,156
Superfi-cie	0,438	-0,041	0,152	-3,2	0,172	-0,022	0,218	-2,445	-38465	-142,0	-960,3	-17,410	-2,914	-0,243
Ac	0,370	0,098	0,143	-38,5	0,432	-0,058	0,218	-0,776	-10516	-104,5	-38,3	-1,212	-0,060	0,073
CH	0,463	-0,024	0,185	-11,6	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Ca	0,764	0,149	0,169	-22,6	-0,061	-0,022	0,406	-3,778	-7340	-46,1	-206,6	-1,541	-0,475	0,155
Lu	0,370	0,098	-0,021	-17,5	0,394	-0,090	0,348	-6,781	-10516	-135,5	-178,2	-1,934	-0,416	0,114
An	0,731	0,136	-1,418	-106,8	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Le	0,275	0,001	0,143	-1,2	0,528	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Re	0,470	0,136	0,143	-22,6	0,184	-0,115	0,491	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Ve	0,367	0,113	-1,941	-113,7	-0,027	0,038	0,122	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Hi	0,463	0,086	-1,396	-29,7	0,483	0,038	-0,033	-14,388	-25455	-506,4	-680,8	-10,642	-1,868	0,149
Pl	0,275	0,001	-1,307	-1,2	0,322	0,028	0,194	-2,914	-8241	-12,1	-168,4	-0,690	-0,060	0,158
cal	0,470	0,086	-1,396	-87,2	0,432	-0,022	0,224	-3,737	-8829	-100,9	-181,9	-0,944	-0,454	0,149
GL	0,098	0,183	0,114	-12,8	0,241	0,001	0,218	-8,789	-12198	-135,5	-374,1	-4,394	-0,993	0,105
So	0,214	0,110	-0,567	-38,5	-0,027	-0,073	0,491	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Fl	0,275	0,001	0,143	-1,2	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Agricul-ture	0,731	0,136	-1,418	-106,8	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Eau	0,731	0,136	-1,418	-106,8	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Urbain	0,275	0,001	0,143	-1,2	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Foret	0,731	0,136	-1,418	-106,8	-0,027	0,028	0,194	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105
Sans Veg	0,731	0,136	-1,418	-106,8	0,602	0,028	0,122	-8,031	-15961	-287,2	-373,7	-4,394	-0,993	0,105

	27038	27040	27041	27049	27055	27069	28003	28018	28030	28086	28105	28108	28111	28125
Altitude	0,623	-1696	-7410	-0,107	-201,0	-6,903	0,366	-0,598	-6,901	-639	-1998	0,042	0,448	0,760
Pente	0,704	-810	-10465	-0,170	-539,6	-6,903	0,699	-0,639	-9,078	-386	-338	-0,211	0,402	0,653
Superfi-cie	-0,792	-1059	-51435	-0,077	-104,8	-0,823	0,574	-0,598	-26,182	-432	-4122	0,233	0,409	0,653
Ac	0,211	-1302	-2309	-0,188	-2,2	-6,903	0,487	-0,800	-1,590	-639	-2479	-0,225	0,265	0,744
CH	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-2,495	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Ca	0,704	-2601	-11364	-0,149	-539,6	-4,083	0,574	-0,839	-2,008	-1183	-4569	-0,612	0,482	0,653
Lu	0,529	-1302	-10212	-0,158	-104,8	-6,903	0,487	-0,800	-4,980	-639	-2479	-0,225	0,501	0,491
An	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Le	-0,792	-3720	-20429	-0,166	-539,6	-16,634	0,717	-0,686	-13,534	-1859	-6617	0,553	0,460	0,611
Re	0,429	-3720	-20429	-0,123	-2553,9	-44,493	0,029	-0,686	-46,102	-277	-17782	-0,715	0,670	0,604
Ve	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-312,3	-16,634	0,690	-0,639	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Hi	0,408	-7215	-35323	-0,107	-60,3	-2,976	0,489	-0,789	-9,078	-1469	-1692	0,035	0,095	0,489
Pl	0,695	-2891	-9072	-0,123	-21,0	-11,959	0,366	-0,686	-6,901	-1183	-1998	-0,840	0,597	0,653
cal	0,112	-1437	-10465	-0,158	-79,6	-2,738	0,632	-0,739	-6,901	-463	-1975	-0,612	0,467	0,708
GL	-0,792	-3274	-19823	-0,127	-119,1	-2,495	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
So	-0,792	-3720	-20429	-0,164	-539,6	-16,634	0,750	-0,686	-7,336	-386	-4122	-0,211	0,448	0,656
Fl	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Agricul-ture	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Eau	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Urbain	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Foret	-0,792	-3720	-20429	-0,123	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489
Sans Veg	-0,792	-3720	-20429	-0,140	-539,6	-16,634	0,690	-0,686	-13,534	-1859	-6617	-3,454	-0,400	0,489

	28133	28134	29005	29007	37012
Altitude	-1,572	0,644	-0,381	-0,466	-0,027
Pente	-1,468	0,507	-0,401	-0,633	-0,099
Superficie	-0,803	0,456	-0,544	-0,538	-0,063
Ac	-0,881	0,352	-0,569	-0,340	-0,098
CH	-1,179	0,786	-0,401	-0,431	-0,046
Ca	-1,468	0,335	-0,490	-0,578	-0,088
Lu	-0,881	0,352	-0,569	-0,340	-0,098
An	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,046
Le	-1,399	0,801	-0,490	-0,618	-0,046
Re	-1,179	0,622	-0,401	-0,431	-0,097
Ve	-1,179	0,786	-0,401	-0,431	-0,046
Hi	-0,881	0,797	-0,401	-0,340	-0,013
Pl	-1,480	0,656	-0,456	-0,431	-0,046
cal	-1,696	0,335	-0,514	-0,538	-0,098
GL	-1,179	0,786	-0,569	-0,524	-0,099
So	-1,179	0,324	-0,542	-0,431	-0,046
Fl	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,046
Agriculture	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,046
Eau	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,082
Urbain	-1,179	0,786	-0,522	-0,431	-0,046
Foret	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,046
Sans Veg	-1,179	0,786	-0,456	-0,431	-0,046

Tableau-A V-3 Performance des simulations en régionalisation par similitude physique selon le descripteur et le modèle Mohyse (critère de NSE)

	18002	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**	**18352**
Altitude	0,082	-2,499	-2710	-139	-226	-0,52	-7,4	-2,944	0,256	0,079	0,007	-0,067	-1,190	-0,192
Pente	-0,276	-8,476	-7408	-5877	-226	-8,19	-20,6	-9,352	-83,123	-4,661	0,008	-1,854	-267,18	0,342
Superficie	0,093	-1,009	-514	-41	-49	-126,71	-520,9	-0,050	-1,318	-0,990	-0,044	0,177	-38,672	0,437
Ac	0,345	-2,499	-1358	-408	-226	-7,69	-25,8	-2,944	-1,318	-0,990	0,005	-7,806	-3,214	0,386
CH	-0,276	-2,499	-2710	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	0,256	-4,661	-0,084	0,413	-163,12	-6,073
Ca	-0,049	-2,499	-134	-324	-226	-7,28	-43,0	-4,024	0,196	0,374	0,014	-0,256	-71,885	0,526
Lu	0,093	-1,009	-514	-50	-51	-7,72	-39,4	-9,127	-1,318	-0,353	0,005	-7,806	-8,690	0,303
An	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-8,19	-44,7	-10,568	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Le	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Re	-0,184	-2,499	-2710	-3747	-27	-0,52	-321,7	-60,593	0,037	-4,661	0,008	-72,1	-104,1	0,401
Ve	-0,276	-2,499	-2710	-3747	-226	-32,19	-321,7	-60,593	-22,709	-0,284	0,008	0,177	-43,579	-0,574
Hi	-0,276	-8,476	-7408	-3752	-629	-83,51	-321,7	-60,582	-83,123	-4,711	-0,077	-2,307	-163,16	0,041
Pl	-0,248	-8,404	-7401	-1791	-629	-83,37	-321,7	-32,613	-3,128	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
cal	0,093	-2,499	-542	-1791	-11	-4,26	-52,1	-10,425	-3,128	-0,333	0,008	0,306	-45,022	-0,421
GL	0,072	-2,499	-2710	-137	-51	-18,89	-109,6	-9,127	-83,123	-4,711	-0,029	-3,154	-44,698	0,137
So	0,082	-0,325	-169	-2316	-8	-83,37	-321,7	-60,593	-3,129	-4,661	-0,583	-1,668	-163,12	-0,574
Fl	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Agriculture	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Eau	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Urbain	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Foret	-0,248	-8,404	-7401	-3747	-629	-83,37	-321,7	-60,593	-82,694	-4,661	-0,577	-46	-163	-6,073
Sans Veg	0,379	-2,499	-1738	-3747	-8	-7,72	-39,4	-60,593	-82,694	-0,539	0,008	-2,307	-8,690	-6,073

	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007	26039	26053
Altitude	0,024	-0,107	-28	-0,190	-0,692	-0,074	0,183	0,320	0,139	0,422	-0,207	-1,703	-2,5	0,351
Pente	-0,737	0,147	-6	0,458	-0,715	-0,078	-1,488	-0,677	0,065	0,412	-1,784	-1,703	-278,4	-0,627
Superficie	-8,032	0,013	-11	0,076	-0,762	-0,074	-0,259	-0,848	0,013	0,327	-0,036	-1,240	-112,8	-0,207
Ac	0,110	0,160	-3	-0,186	-0,599	-0,066	-0,155	0,379	0,254	-2,212	0,219	-1,143	-48,6	0,351
CH	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,03	-25,17	-11,60	-1,27	-176,7	-14,50
Ca	-0,737	0,079	-28	0,346	-0,807	-0,066	0,183	0,302	0,254	-0,217	0,288	-1,240	-59,8	0,351
Lu	0,110	0,147	-10	-0,186	-0,599	-0,060	0,265	0,428	0,203	-1,848	0,219	-1,866	-14,5	-0,627
An	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,03	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Le	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	0,390	0,178	-15,41	-0,036	-2,096	-176,7	-14,50
Re	-8,032	0,149	-7	0,482	-0,599	-0,012	-3,914	0,320	-2,249	0,005	-11,71	-1,691	-2,6	0,272
Ve	-17,061	-1,923	-120	-0,117	-0,737	-0,046	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-1,703	-176,7	-4,171
Hi	-17,328	-1,973	-120	-1,253	-0,599	-0,013	-2,485	0,390	0,254	-0,217	-0,036	-1,985	-176,8	-14,50
Pl	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-2,5	-6,611
cal	-0,923	0,160	-3	0,330	-0,814	-0,060	0,506	-0,848	-1,140	-0,217	-3,541	-1,390	-45,0	-2,678
GL	-2,178	-0,107	-120	0,164	-0,848	-0,046	-16,83	0,390	-1,140	-4,313	-0,207	-2,096	-9,1	-14,50
So	-17,328	-0,048	-3	-0,190	-0,601	-0,049	0,269	-0,711	0,065	0,411	0,233	-2,096	-176,7	-14,50
Fl	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Agriculture	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Eau	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Urbain	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Foret	-17,061	-1,923	-120	-1,245	-0,601	-0,012	-16,83	-6,123	-9,029	-25,17	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50
Sans Veg	-17,061	-1,923	-120	-0,117	-0,601	-0,012	0,500	0,193	-0,379	-1,848	-11,60	-2,096	-176,7	-14,50

	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273	26280
Altitude	0,017	-57,9	-3,916	0,229	-13,703	0,542	0,170	0,283	0,326	0,200	0,497	-0,416	0,237	-1,987
Pente	-9,878	-18,4	-3,916	0,219	-13,703	0,297	0,293	0,283	0,424	0,375	0,581	-0,415	-1,583	-8,085
Superficie	-0,448	-18,4	-3,405	-0,849	-13,703	0,536	0,291	0,228	0,167	0,070	0,430	-0,420	0,195	0,381
Ac	-9,878	-47,6	-5,213	0,217	-6,453	0,058	0,504	0,091	0,511	0,521	0,439	-0,405	-0,498	-4,568
CH	-33,97	-22,7	-4,376	-6,919	-6,453	0,699	0,170	0,284	0,422	-0,045	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Ca	-10,92	-146,2	-3,689	-0,849	-2,710	0,699	0,504	-0,022	-9,377	0,421	0,739	-0,419	-0,498	-0,650
Lu	-1,237	-47,6	-6,017	-0,181	-6,453	0,058	0,504	0,056	0,511	0,521	0,439	-0,405	-0,119	-4,568
An	-33,97	-449,7	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,367	0,284	0,167	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Le	-33,9	-99,9	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,087	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Re	-2,617	-738,8	-6,010	0,219	-6,453	0,263	0,367	-0,003	0,511	0,104	-0,534	-0,405	-3,724	-0,650
Ve	-10,92	-442,3	-3,916	-6,929	-6,453	0,653	0,344	0,091	0,509	0,375	0,702	-0,405	-1,321	0,381
Hi	-33,99	-126,5	-6,099	0,229	-6,161	0,058	0,170	0,286	0,363	0,200	-0,035	-0,405	0,237	-0,329
Pl	-3,560	-126,5	-6,115	-2,841	-6,453	-1,049	0,087	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-1,583	-26,703
cal	-7,507	-37,0	-4,876	-0,849	-6,453	0,058	0,367	0,080	0,167	-0,096	0,797	-0,405	-1,287	-4,568
GL	-33,97	-57,9	-6,115	-6,929	-6,453	0,147	0,344	0,067	0,159	0,322	0,503	-0,405	-6,335	-1,987
So	-33,97	-99,9	-2,470	-3,737	-5,017	0,653	0,172	0,193	0,269	0,322	0,445	-0,405	-6,335	-2,253
Fl	-33,97	-449,7	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,087	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Agriculture	-33,97	-18,4	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,367	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Eau	-33,97	-449,7	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,367	0,284	0,511	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Urbain	-33,97	-449,7	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,087	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Foret	-33,97	-449,7	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,367	0,284	-3,329	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703
Sans Veg	-33,97	-129,4	-6,115	-6,929	-6,453	-1,049	0,367	0,284	0,363	0,521	-0,534	-0,405	-6,335	-26,703

	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423	26429
Altitude	-5,218	-0,123	-24,01	-0,081	-39,5	-5E+04	-0,168	-4,290	-0,056	-4,987	0,053	-0,670	0,375	-1,845
Pente	0,709	-0,149	-18,70	-0,068	-0,005	-6E+05	-0,233	-4,290	0,101	-4,607	-0,067	-0,761	0,375	0,028
Superficie	0,468	-0,108	-9,58	-0,182	-2,7	-2E+04	-0,373	-4,359	0,347	-1,224	-0,170	-0,797	-0,022	-1,603
Ac	-3,073	-0,133	-3,47	-0,068	-0,5	-6E+03	-0,233	-4,227	0,078	-0,905	-0,037	-0,670	0,283	-2,995
CH	-5,218	-0,121	-0,16	-0,068	-3,5	-3E+03	-0,115	-4,083	-1,016	-1,278	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Ca	0,372	-0,154	-22,44	-0,141	0,3	-2E+04	-0,312	-4,168	0,101	-8,124	-0,103	-0,764	0,170	-0,645
Lu	-3,073	-0,133	-3,47	-0,068	-0,5	-2E+04	-0,308	-4,227	0,132	-0,686	-0,037	-0,670	0,283	-2,995
An	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Le	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Re	0,372	-0,147	-24,65	-0,068	-0,5	-6E+03	-0,233	-4,479	0,027	-8,124	0,053	-0,670	0,171	-6,281
Ve	0,647	-0,121	0,15	-0,068	0,302	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Hi	-0,272	-0,123	-18,70	-0,081	-3,5	-5E+04	-0,123	-4,082	-0,056	-4,987	-0,107	-0,670	0,375	-12,131
Pl	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-5E+04	-0,115	-4,083	0,307	0,249	0,060	-0,671	0,412	-12,416
cal	0,409	-0,147	-9,58	-0,068	-39,4	-8E+04	-0,157	-4,290	0,347	-10,084	-0,067	-0,745	0,234	-12,416
GL	0,344	-0,121	-9,49	-0,068	-4,1	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	-0,033	-0,797	0,412	-12,416
So	0,409	-0,149	-1,97	-0,068	0,302	-1E+04	-0,168	-4,290	0,240	0,249	-0,028	-0,785	0,272	-0,095
Fl	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Agriculture	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Eau	-5,218	-0,121	-1,30	-0,068	-0,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Urbain	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Foret	-5,218	-0,121	-153,19	-0,068	-39,5	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416
Sans Veg	-5,218	-0,121	-32,37	-0,068	0,272	-3E+05	-0,115	-4,083	-1,016	-27,205	0,060	-0,671	0,412	-12,416

	26430	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004	27020	27023	27029	27033	27035	27036
Altitude	0,194	0,075	0,221	-89,2	-0,150	0,439	0,050	0,547	-1,964	-1537	-124	-73,0	0,748	-0,099
Pente	0,441	0,075	-4,410	-872,3	0,162	0,303	0,050	-0,655	-0,581	-24248	-13	-20,9	-0,232	-0,344
Superficie	0,467	-0,237	-0,178	0,0	-0,101	0,338	-0,184	0,142	-0,567	-201	-73	-563,6	-9,447	0,000
Ac	0,410	0,053	0,172	-30,1	-0,150	0,308	-0,104	0,501	-0,013	-5338	-51	-68,9	0,430	-0,185
CH	0,596	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Ca	0,782	0,138	0,180	-43,4	-0,150	0,081	-0,140	0,528	-0,013	-1583	-85	-68,9	0,430	-0,185
Lu	0,410	0,053	-0,202	-16,6	-0,019	0,308	-0,117	0,501	-3,061	-6521	-85	-102,5	-0,404	-0,276
An	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Le	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,480	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Re	0,005	0,263	-2,360	-43,4	-0,026	0,511	-0,136	0,570	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Ve	0,685	0,263	-1,781	-512,9	0,240	0,095	-0,060	0,272	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Hi	0,596	0,258	-1,328	-512,9	0,226	0,629	-0,021	0,160	-4,631	-11893	-265	-319,1	-3,264	-0,848
Pl	0,005	0,263	-1,822	-512,3	-0,115	-0,286	-0,002	-0,458	-1,145	-7071	-23	-68,9	0,430	-0,076
cal	0,777	0,263	-1,328	-89,2	0,130	0,551	-0,099	-0,245	0,045	-3962	-71	-110,6	0,196	-0,268
GL	0,126	0,263	0,132	0,0	0,240	0,408	-0,078	-0,480	-1,145	-6521	-60	-68,9	-3,187	-0,860
So	0,685	0,033	-6,707	-512,9	0,240	0,095	-0,051	0,570	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Fl	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Agriculture	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Eau	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Urbain	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Foret	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,095	-0,002	-0,458	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860
Sans Veg	0,005	0,263	-6,707	-512,3	0,240	0,586	-0,002	0,272	-5,054	-12612	-271	-323,7	-3,187	-0,860

	27037	27038	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018	28030	28086	28105	28108
Altitude	0,142	0,408	-1185	-145	-0,142	-67	-169	-5,952	0,177	-0,693	-7,336	-588	-2817	0,129
Pente	0,135	-1,431	-821	-6055	-0,184	-235	-856	-0,502	0,689	-0,748	-0,323	-402	-525	0,362
Superficie	-0,054	0,293	-711	-30656	-0,110	-15	-35	-0,239	0,656	-0,864	-12,91	-557	-4832	0,436
Ac	0,084	0,473	-451	-4387	-0,185	-15	-80	-0,961	0,540	-0,820	-0,672	-588	-734	-0,256
CH	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-58	-856	-0,124	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Ca	0,084	0,473	-2331	-4387	-0,185	-15	-856	-1,305	-0,090	-0,852	-3,225	-1079	-3703	-2,530
Lu	0,109	0,408	-741	-6872	-0,176	-37	-76	-3,351	0,540	-0,808	-0,672	-588	-734	-0,256
An	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Le	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,172	-235	-856	-20,67	0,708	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-0,078
Re	0,081	0,408	-4049	-16446	-0,136	-421	-1453	0,106	-0,201	-0,688	-0,355	-208	-856	0,076
Ve	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-66	-242	-20,67	0,526	-0,748	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Hi	0,044	0,293	-3997	-16084	-0,142	-26	-86	-3,78	0,252	-0,792	-5,417	-862	-1557	0,400
Pl	0,142	0,686	-524	-4387	-0,136	-13	-10	-8,868	0,177	-0,688	-7,336	-1079	-2817	-1,240
cal	0,111	0,425	-1678	-6055	-0,185	-40	-114	-2,882	0,728	-0,766	-7,336	-581	-734	-2,530
GL	0,081	-1,431	-711	-145	-0,185	-8	-212	-4,468	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
So	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,173	-235	-856	-20,67	0,621	-0,688	-1,31	-402	-4832	0,514
Fl	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Agriculture	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Eau	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Urbain	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Foret	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,136	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571
Sans Veg	0,081	-1,431	-4049	-16446	-0,176	-235	-856	-20,67	0,526	-0,688	-12,92	-1936	-6479	-4,571

	28111	28125	28133	28134	29005	29007	37012
Altitude	0,484	0,715	-1,493	0,150	-0,464	-0,543	-0,070
Pente	0,456	0,698	-1,232	0,589	-0,521	-0,718	-0,066
Superficie	0,371	0,804	-2,127	0,150	-0,539	-0,617	-0,068
Ac	0,346	-0,416	-1,244	0,081	-0,639	-0,474	-0,090
CH	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,470	-0,463	-0,098
Ca	0,503	0,371	-1,672	0,043	-0,513	-0,670	-0,068
Lu	0,624	0,752	-1,244	0,081	-0,579	-0,474	-0,094
An	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,471	-0,463	-0,098
Le	0,579	0,771	-1,446	0,764	-0,513	-0,725	-0,098
Re	0,675	0,610	-1,232	0,278	-0,470	-0,463	-0,084
Ve	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,521	-0,463	-0,098
Hi	0,366	0,422	-1,244	0,712	-0,470	-0,474	-0,099
Pl	0,649	0,371	-1,523	0,150	-0,471	-0,463	-0,098
cal	0,332	0,804	-1,726	0,043	-0,551	-0,617	-0,084
GL	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,639	-0,587	-0,095
So	0,484	0,669	-1,232	0,736	-0,553	-0,463	-0,098
Fl	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,471	-0,463	-0,098
Agriculture	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,639	-0,463	-0,098
Eau	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,471	-0,463	-0,081
Urbain	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,554	-0,463	-0,098
Foret	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,471	-0,463	-0,098
Sans Veg	-0,813	0,422	-1,232	0,705	-0,471	-0,463	-0,098

ANNEXE VI

STATISTIQUES DES SIMULATIONS DE RÉGIONALISATION PAR PROXIMITÉ SPATIALE POUR DES DONNEURS MULTIPLES

Tableau-A VI-1 Performance des simulations par des donneurs multiples pour chaque bassin versant à l'étude, avec le modèle hydrologique MOHYSE (critère NSE)

Bassin/ Nombre de donneur	**18002**	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**	**18352**
1	0,438	-0,796	-889	-5E+04	-7	-2614	-41	-2	0,161	0,086	0,004	-37,3	-891	0,041
2	0,401	-0,807	-881	-4E+04	-10	-2142	-40	-2	0,203	0,117	0,006	-35,8	-808	0,068
3	0,274	-0,882	-877	-4E+04	-12	-1890	-39	-2	0,243	0,137	0,008	-36,4	-641	0,216
4	0,237	-0,818	-877	-4E+04	-11	-1912	-39	-3	0,260	0,227	0,011	-28,5	-580	0,275
5	0,389	-0,652	-878	-3E+04	-11	-1817	-39	-4	0,196	0,306	0,012	-26,6	-561	0,293
6	0,375	-0,765	-908	-2E+04	-14	-1443	-39	-4	-0,474	0,292	0,014	-27,1	-435	0,406
7	0,403	-0,694	-921	-2E+04	-16	-1325	-40	-4	-1,370	0,279	0,015	-19,4	-450	0,446
8	0,370	-0,818	-947	-1E+04	-28	-842	-50	-5	-2,169	0,266	0,015	-17,7	-396	0,441
9	0,408	-0,683	-1156	-9E+03	-30	-705	-44	-6	-3,266	0,304	0,016	-18,2	-380	0,454
10	0,416	-0,772	-1207	-5E+03	-40	-467	-49	-7	-4,264	0,302	0,016	-20,0	-232	0,534
11	0,436	-0,787	-1108	-5E+03	-54	-244	-44	-9	-4,292	0,297	0,014	-11,5	-188	0,544
12	0,437	-0,886	-1113	-3E+03	-69	-97	-52	-11	-6,090	0,280	0,012	-10,8	-118	0,553
13	0,419	-1,023	-1167	-1E+03	-84	-35	-55	-11	-7,736	0,322	0,011	-8,1	-53	0,530
14	0,406	-1,011	-1189	-1148	-85	-26	-53	-12	-8,181	0,326	0,005	-4,9	-29	0,500
15	0,397	-1,044	-1262	-711	-91	-11	-60	-15	-8,633	0,311	0,002	-3,3	-20	0,487

Bassin/ Nombre de donneur	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007	26039
1	-28,4	-1,451	-10,0	-0,148	-0,247	0,037	-0,087	-0,485	0,053	0,343	-7,058	-2,687	-4,554
2	-27,1	-1,343	-9,5	-0,101	-0,251	0,038	0,067	-0,385	0,094	0,325	-6,669	-2,362	-3,437
3	-21,4	-1,219	-8,9	-0,080	-0,248	0,033	0,280	-0,228	0,124	0,267	-5,873	-2,208	-2,751
4	-19,6	-1,005	-9,6	0,010	-0,290	0,026	0,365	-0,173	0,158	0,299	-5,792	-1,968	-2,495
5	-19,0	-0,787	-8,0	0,047	-0,300	0,028	0,410	-0,209	0,184	0,245	-5,235	-1,922	-3,519
6	-14,0	-0,587	-7,6	0,045	-0,296	0,026	0,521	-0,126	0,209	-0,018	-3,462	-1,653	-5,121
7	-11,9	-0,607	-6,4	0,073	-0,298	0,026	0,521	-0,217	0,257	0,173	-3,736	-1,196	-4,926
8	-12,1	-0,536	-7,5	0,083	-0,304	0,023	0,537	-0,188	0,265	-0,048	-2,513	-1,181	-5,127
9	-12,2	-0,211	-8,2	0,226	-0,449	-0,006	0,552	-0,117	0,295	-0,139	-1,730	-0,929	-8,297
10	-6,92	-0,116	-10,9	0,249	-0,488	-0,005	0,520	-0,041	0,291	-0,476	-0,572	-0,818	-9,478
11	-5,97	-0,001	-9,2	0,317	-0,577	-0,005	0,429	0,058	0,227	-0,155	-0,679	-0,810	-12,5
12	-3,95	0,131	-10,6	0,399	-0,703	-0,008	0,248	0,135	0,227	-0,341	-0,261	-0,909	-17,1
13	-1,74	0,139	-12,0	0,434	-0,773	-0,034	0,148	0,142	0,189	-0,306	-0,161	-1,027	-22,6
14	-1,00	0,176	-12,3	0,442	-0,783	-0,041	-0,056	0,210	0,157	-0,277	-0,134	-1,177	-26,8
15	-0,92	0,167	-12,8	0,453	-0,791	-0,058	-0,163	0,234	0,136	-0,225	-0,186	-1,242	-31,5

Bassin/ Nombre de donneur	26053	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273	26280
1	-231	-400	-0,303	-392	-0,515	-21,05	-0,330	-6,838	-0,031	0,103	-5,301	0,354	-0,195	-2,588	0,116
2	-203	-349	-1,534	-342	-0,489	-17,85	-0,055	-4,977	-0,013	0,116	-5,149	0,407	-0,180	-2,069	0,286
3	-170	-295	-3,873	-292	-0,415	-14,61	0,094	-4,093	0,010	0,353	-2,950	0,446	-0,171	-1,916	0,365
4	-154	-262	-8,646	-236	-0,227	-12,5	0,175	-3,653	0,020	0,387	-2,639	0,574	-0,133	-1,535	0,581
5	-111	-195	-10,6	-220	-0,256	-8,332	0,325	-1,982	0,049	0,439	-2,155	0,577	-0,124	-1,114	0,507
6	-87	-194	-21,8	-147	-0,254	-8,841	0,349	-1,761	0,060	0,567	-1,015	0,559	-0,113	-0,810	0,422
7	-89	-153	-22,4	-146	-0,219	-7,035	0,377	-1,553	0,070	0,593	-0,790	0,646	-0,081	-0,580	-0,05
8	-83	-140	-26,3	-129	-0,293	-5,135	0,493	-0,626	0,083	0,627	-0,447	0,703	-0,102	-0,547	-0,41
9	-56	-99	-31,8	-109	-0,264	-4,591	0,541	-0,322	0,092	0,651	0,106	0,726	-0,119	-0,420	-0,48
10	-47	-82	-41,6	-80	-0,234	-4,175	0,572	-0,101	0,107	0,655	0,142	0,749	-0,148	-0,482	-1,44
11	-33	-63	-61,1	-41	-0,270	-3,499	0,616	0,113	0,107	0,650	0,257	0,762	-0,197	-0,567	-2,00
12	-19	-42	-68,3	-33	-0,245	-2,926	0,628	0,202	0,104	0,645	0,311	0,765	-0,216	-0,748	-2,19
13	-10	-27	-89,5	-15	-0,369	-2,987	0,659	0,349	0,109	0,642	0,324	0,782	-0,283	-0,794	-3,02
14	-5	-16	-103,6	-9,799	-0,380	-3,133	0,644	0,400	0,117	0,620	0,346	0,772	-0,333	-0,861	-3,60
15	-2	-6	-139,4	-3,886	-0,469	-4,011	0,625	0,344	0,123	0,590	0,272	0,761	-0,415	-0,856	-4,54

Bassin/ Nombre de donneur	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423	26429	26430
1	-1,497	0,347	0,421	-0,173	-0,004	-9E+07	-0,07	-3,94	-0,48	0,520	0,050	-0,71	-0,02	0,207	0,272
2	-1,278	0,382	0,610	-0,098	0,026	-9E+07	-0,07	-3,99	-0,39	0,437	0,041	-0,71	-0,01	0,245	0,350
3	-1,104	0,393	0,653	0,006	0,129	-9E+07	-0,09	-3,97	-0,25	0,400	0,037	-0,71	0,008	0,221	0,369
4	-0,456	0,410	0,601	0,055	0,534	-6E+07	-0,10	-3,99	-0,03	0,128	0,030	-0,71	0,019	0,225	0,393
5	-0,348	0,427	-0,556	0,263	0,596	-5E+07	-0,10	-4,01	-0,03	0,125	0,044	-0,72	0,036	0,030	0,488
6	-0,328	0,403	-0,633	0,270	0,383	-3E+07	-0,09	-4,05	0,01	0,048	0,043	-0,72	0,050	-0,02	0,495
7	0,085	0,388	-3,979	0,355	0,318	-2E+07	-0,1	-4,05	0,07	-0,10	0,040	-0,72	0,063	-0,13	0,583
8	0,210	0,361	-8,521	0,318	0,094	-2E+07	-0,11	-4,06	0,15	-0,33	0,033	-0,72	0,082	-0,20	0,657
9	0,222	0,351	-9,328	0,307	0,062	-2E+07	-0,12	-4,08	0,23	-0,67	0,021	-0,72	0,117	-0,31	0,670
10	0,320	0,256	-11,0	0,275	-0,918	-8E+06	-0,15	-4,15	0,3	-1,02	0,018	-0,72	0,122	-0,81	0,681
11	0,328	0,196	-13,3	0,215	-1,377	-5E+06	-0,16	-4,15	0,38	-1,54	-0,01	-0,73	0,145	-1,08	0,706
12	0,312	0,169	-14,0	0,199	-1,484	-4E+06	-0,2	-4,19	0,43	-1,97	-0,01	-0,73	0,158	-1,1	0,719
13	0,276	0,068	-17,1	0,097	-2,156	-2E+06	-0,22	-4,23	0,45	-2,25	-0,02	-0,73	0,165	-1,38	0,753
14	0,192	-0,02	-19,3	0,017	-2,576	-7E+05	-0,25	-4,25	0,505	-2,16	-0,02	-0,73	0,184	-1,72	0,757
15	0,069	-0,143	-22,8	-0,116	-3,327	-4E+04	-0,25	-4,28	0,516	-3,27	-0,05	-0,73	0,205	-1,65	0,776

Bassin/ Nombre de donneur	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004	27020	27023	27029	27033	27035	27036	27037
1	-0,069	-6,520	-1306	0,060	-0,433	0,484	-0,661	-50	-66340	-52	-547	-69	-0,006	0,057
2	-0,038	-5,884	-1152	0,071	-0,356	0,476	-0,409	-37	-57299	-48	-522	-60	-0,014	0,051
3	-0,014	-5,413	-983,6	0,083	-0,339	0,475	-0,411	-37	-56446	-45	-491	-52	-0,017	0,056
4	0,004	-5,035	-887,0	0,098	-0,254	0,469	-0,360	-35	-51667	-43	-443	-45	-0,016	0,065
5	0,060	-4,084	-645,1	0,131	-0,072	0,428	-0,223	-29	-42031	-37	-386	-40	-0,022	0,076
6	0,077	-3,709	-699,1	0,109	0,065	0,390	-0,131	-26	-34625	-32	-376	-30	-0,037	0,076
7	0,134	-2,657	-583,5	0,128	0,132	0,370	-0,026	-21	-27992	-39	-305	-24	-0,052	0,084
8	0,128	-2,444	-579,9	0,097	0,266	0,318	0,138	-13	-24467	-41	-250	-20	-0,062	0,098
9	0,157	-1,393	-512,9	0,116	0,346	0,280	0,226	-10	-18621	-36	-245	-14	-0,084	0,104
10	0,157	-1,268	-412,6	0,113	0,435	0,232	0,277	-9	-15039	-40	-194	-11	-0,102	0,112
11	0,145	-1,091	-341,3	0,110	0,512	0,166	0,293	-9	-11040	-41	-184	-7	-0,121	0,114
12	0,152	-0,968	-255,8	0,098	0,568	0,093	0,402	-5	-7966	-45	-158	-3	-0,146	0,121
13	0,120	-1,159	-172,8	0,087	0,609	0,027	0,458	-3	-6000	-51	-133	-1,284	-0,176	0,125
14	0,115	-0,960	-131,7	0,090	0,638	-0,028	0,497	-2	-4743	-56	-117	-0,022	-0,207	0,129
15	0,082	-0,932	-87,6	0,104	0,652	-0,080	0,491	-0,310	-4227	-64	-100	0,442	-0,238	0,132

Bassin/ Nombre de donneur	27038	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018	28030	28086	28105	28108	28111
1	-0,041	-2217	-1E+05	-0,197	-1,962	-219,0	0,014	0,133	-0,257	-1,413	-222	-2095	-0,127	-11,3
2	0,009	-2137	-1E+05	-0,196	-1,974	-217,9	0,019	0,238	-0,342	-0,852	-190	-1985	-0,052	-10,5
3	0,073	-2028	-1E+05	-0,193	-1,637	-211,2	0,058	0,287	-0,360	-0,437	-173	-1946	0,128	-8,2
4	0,178	-1859	-9E+04	-0,192	-1,077	-202,1	0,099	0,308	-0,393	-0,234	-192	-1659	0,245	-6,3
5	0,273	-1590	-8E+04	-0,190	-0,922	-188,2	0,143	0,330	-0,409	0,093	-190	-1534	0,331	-4,346
6	0,357	-1357	-8E+04	-0,188	-0,951	-181,9	0,129	0,381	-0,461	0,224	-225	-1409	0,432	-3,207
7	0,384	-1428	-6E+04	-0,188	-1,791	-168,8	0,032	0,388	-0,505	0,311	-253	-1353	0,472	-2,633
8	0,459	-1188	-5E+04	-0,185	-4,003	-155,9	-0,026	0,397	-0,529	0,324	-269	-1330	0,506	-2,198
9	0,506	-988	-4E+04	-0,182	-6,673	-146,8	-0,036	0,395	-0,524	0,321	-290	-1320	0,533	-2,116
10	0,535	-1071	-3E+04	-0,182	-8,224	-142,6	-0,302	0,417	-0,558	0,262	-269	-1317	0,536	-1,373
11	0,574	-886	-3E+04	-0,178	-13,0	-136,6	-0,606	0,461	-0,636	0,140	-284	-1318	0,524	-0,601
12	0,611	-934	-2E+04	-0,177	-18,0	-131,9	-0,769	0,497	-0,663	-0,081	-329	-1326	0,562	-0,098
13	0,615	-908	-1E+04	-0,175	-21,8	-132,2	-1,253	0,521	-0,741	-0,343	-344	-1385	0,561	0,123
14	0,607	-891	-9E+03	-0,174	-27,7	-132,6	-1,662	0,513	-0,766	-0,676	-387	-1433	0,520	0,459
15	0,609	-979	-6E+03	-0,173	-33,2	-133,2	-2,054	0,505	-0,788	-0,878	-409	-1608	0,436	0,665

Bassin/ Nombre de donneur	28125	28133	28134	29005	29007	37012
1	-0,260	-1,059	-0,652	-0,582	-0,525	-0,219
2	-0,105	-0,856	-0,491	-0,589	-0,524	-0,167
3	-0,025	-0,684	-0,409	-0,588	-0,523	-0,126
4	0,037	-0,691	-0,339	-0,590	-0,520	-0,093
5	0,073	-0,637	-0,282	-0,587	-0,528	-0,068
6	0,172	-0,659	-0,169	-0,591	-0,531	-0,038
7	0,233	-0,745	-0,100	-0,586	-0,543	-0,011
8	0,283	-0,763	-0,047	-0,587	-0,548	0,000
9	0,291	-0,745	-0,042	-0,577	-0,561	0,008
10	0,363	-0,797	0,044	-0,573	-0,574	0,010
11	0,462	-1,003	0,158	-0,572	-0,592	0,000
12	0,528	-1,044	0,248	-0,577	-0,604	-0,012
13	0,604	-1,349	0,310	-0,574	-0,619	-0,031
14	0,635	-1,441	0,355	-0,572	-0,633	-0,053
15	0,679	-1,629	0,412	-0,573	-0,641	-0,070

Tableau-A VI-2 Performance des simulations par donneurs multiples selon le bassin versant et le modèle GR4 (critère NSE)

Bassin/ Nombre de donneur	**18002**	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**	**18352**
1	0,306	-2,825	-2366	-1091	-210	-34	-151	-21	-0,857	0,147	0,010	-0,186	-2,757	0,465
2	0,329	-1,287	-1264	-1262	-108	-22	-89	-23	0,149	0,107	0,010	0,074	-0,494	0,544
3	0,224	-0,669	-661	-863	-123	-23	-96	-20	-2,530	-0,006	0,006	-1,176	-6,264	0,466
4	0,290	-0,780	-1011	-662	-72	-19	-77	-18	-5,757	0,208	0,009	-0,880	-6,323	0,539
5	0,266	-0,716	-977	-948	-91	-13	-53	-13	-5,116	0,188	0,012	-0,492	-9,685	0,555
6	0,294	-0,876	-1171	-668	-86	-16	-64	-16	-5,843	0,280	0,014	-0,303	-11,5	0,580
7	0,323	-0,968	-1426	-705	-102	-16	-61	-16	-4,911	0,348	0,015	0,030	-9,9	0,526
8	0,344	-1,155	-1467	-638	-98	-15	-70	-18	-5,701	0,391	0,013	-0,390	-9,0	0,507
9	0,327	-1,037	-1350	-693	-116	-17	-81	-21	-6,102	0,419	0,013	-0,377	-7,5	0,472
10	0,321	-0,989	-1305	-777	-107	-20	-74	-20	-5,253	0,398	0,011	-0,696	-9,8	0,474
11	0,314	-0,947	-1204	-707	-99	-19	-70	-22	-4,370	0,357	0,012	-0,585	-11,1	0,504
12	0,299	-0,894	-1131	-658	-91	-18	-67	-20	-3,768	0,388	0,012	-0,506	-9,9	0,520
13	0,283	-0,863	-1073	-625	-86	-17	-63	-19	-3,740	0,374	0,013	-0,383	-9,0	0,482
14	0,272	-0,802	-1000	-600	-83	-16	-59	-18	-3,295	0,381	0,010	-0,748	-9,0	0,471
15	0,312	-0,938	-1156	-558	-96	-18	-68	-17	-4,469	0,333	0,009	-0,968	-11,7	0,411

Bassin/ Nombre de donneur	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007	26039
1	-5,210	-0,281	-6,054	-0,059	-0,725	-0,073	0,417	0,378	0,261	-0,612	0,348	-2,004	-43,1
2	-1,685	0,135	-4,156	-0,025	-0,778	-0,071	-0,018	0,456	0,287	-0,330	0,352	-1,969	-23,5
3	-0,898	0,189	-10,11	0,046	-0,766	-0,058	0,236	0,468	0,283	-0,125	0,340	-2,124	-45,8
4	-0,493	0,202	-8,985	0,021	-0,788	-0,061	0,411	0,453	0,314	-0,386	0,341	-1,797	-48,6
5	-0,336	0,205	-7,476	-0,025	-0,801	-0,064	0,532	0,440	0,310	-0,164	0,245	-1,947	-39,8
6	-0,083	0,206	-5,066	0,059	-0,810	-0,067	0,355	0,423	0,309	-0,021	0,260	-1,909	-26,8
7	-0,204	0,204	-6,540	0,049	-0,787	-0,070	0,343	0,420	0,306	-0,145	0,279	-1,783	-29,4
8	-0,154	0,193	-6,330	0,084	-0,800	-0,069	0,261	0,438	0,322	-0,013	0,226	-1,841	-26,6
9	-0,285	0,186	-7,525	0,066	-0,796	-0,070	0,303	0,385	0,318	-0,151	0,241	-1,815	-29,8
10	-0,219	0,180	-7,002	0,061	-0,801	-0,068	0,319	0,401	0,281	-0,037	0,164	-1,790	-34,4
11	-0,226	0,177	-6,663	0,082	-0,798	-0,069	0,355	0,404	0,284	0,129	0,189	-1,846	-31,2
12	-0,182	0,171	-6,461	0,126	-0,793	-0,069	0,382	0,414	0,294	0,168	0,237	-1,876	-30,0
13	-0,138	0,178	-5,804	0,110	-0,798	-0,069	0,309	0,418	0,295	0,008	0,251	-1,870	-28,0
14	-0,257	0,179	-7,030	0,159	-0,799	-0,068	0,270	0,397	0,280	-0,063	0,193	-1,898	-25,6
15	-0,334	0,181	-7,829	0,238	-0,801	-0,066	0,116	0,383	0,277	-0,297	0,155	-1,839	-24,5

Bassin/ Nombre de donneur	26053	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273
1	-3,205	-7,900	-384	-4,243	-1,272	-5,645	0,595	0,501	0,336	0,096	0,179	0,756	-0,401	-1,593
2	-1,546	-4,150	-238	-4,953	-0,353	-3,387	0,084	0,486	0,297	-1,708	0,539	0,871	-0,399	-0,750
3	-3,836	-8,823	-221	-4,223	-1,379	-4,560	0,307	0,527	0,328	0,022	0,489	0,899	-0,403	-1,890
4	-3,963	-4,756	-264	-4,276	-0,822	-3,842	0,630	0,521	0,280	0,326	0,393	0,756	-0,403	-0,854
5	-2,187	-6,038	-192	-4,366	-0,711	-3,876	0,132	0,511	0,313	0,050	0,395	0,839	-0,401	-0,737
6	-2,671	-5,065	-176	-4,543	-0,273	-4,170	0,329	0,486	0,287	0,325	0,449	0,520	-0,403	-0,713
7	-2,222	-4,867	-237	-4,360	-0,277	-3,793	0,213	0,492	0,275	0,420	0,395	0,421	-0,404	-0,810
8	-2,075	-5,084	-244	-3,638	-0,504	-3,758	0,257	0,470	0,255	0,349	0,390	0,490	-0,406	-1,043
9	-1,970	-6,027	-229	-3,812	-0,390	-3,901	0,250	0,463	0,232	0,379	0,408	0,494	-0,406	-1,281
10	-1,885	-5,711	-289	-3,843	-0,223	-4,020	0,200	0,466	0,213	0,409	0,416	0,454	-0,407	-1,223
11	-1,952	-5,969	-273	-3,203	-0,324	-4,093	0,250	0,460	0,211	0,502	0,397	0,497	-0,408	-1,120
12	-2,315	-5,529	-271	-3,227	-0,291	-4,092	0,366	0,444	0,213	0,578	0,362	0,596	-0,408	-1,153
13	-2,499	-5,362	-248	-3,317	-0,369	-4,006	0,405	0,438	0,197	0,612	0,347	0,623	-0,409	-1,097
14	-2,323	-5,672	-239	-3,414	-0,276	-3,979	0,408	0,441	0,190	0,602	0,353	0,614	-0,409	-1,192
15	-2,090	-5,208	-243	-3,488	-0,624	-3,945	0,438	0,438	0,191	0,616	0,343	0,632	-0,409	-1,041

Bassin/ Nombre de donneur	26280	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423
1	-3,522	0,088	-0,124	-11,9	-0,042	-0,926	-2E+03	0,054	-3,166	0,151	-5,016	-0,037	-0,747	0,442
2	-0,423	0,007	-0,119	-3,7	-0,047	0,543	-2E+04	0,002	-3,697	0,550	-2,191	-0,081	-0,767	0,287
3	-11,64	0,306	-0,127	-4,1	-0,040	0,608	-2E+04	-0,101	-3,555	0,460	-5,990	0,010	-0,692	0,239
4	-8,238	0,488	-0,135	-1,6	-0,060	-5,422	-1E+04	-0,139	-3,744	0,404	-2,643	0,026	-0,713	0,216
5	-6,023	-0,665	-0,130	-13,8	-0,047	-3,830	-1E+04	-0,181	-3,876	0,427	-2,097	-0,007	-0,690	0,229
6	-9,069	-1,436	-0,132	-8,7	-0,056	-6,612	-2E+04	-0,199	-3,917	0,435	-2,036	-0,022	-0,697	0,222
7	-8,227	-1,202	-0,134	-28,2	-0,062	-4,557	-2E+04	-0,217	-3,985	0,488	-2,292	-0,030	-0,706	0,231
8	-9,520	-1,578	-0,128	-32,1	-0,069	-4,025	-2E+04	-0,220	-4,017	0,459	-3,213	-0,030	-0,709	0,262
9	-9,321	-1,570	-0,131	-28,1	-0,070	-4,969	-2E+04	-0,208	-4,002	0,415	-2,829	-0,020	-0,704	0,276
10	-9,333	-1,685	-0,131	-27,3	-0,075	-4,822	-2E+04	-0,212	-4,014	0,511	-2,208	-0,018	-0,704	0,284
11	-8,102	-1,429	-0,131	-26,4	-0,077	-4,605	-2E+04	-0,211	-4,028	0,507	-2,719	-0,016	-0,705	0,279
12	-6,589	-0,985	-0,131	-22,2	-0,078	-3,683	-2E+04	-0,222	-4,061	0,494	-4,644	-0,023	-0,710	0,262
13	-5,861	-0,817	-0,132	-18,3	-0,082	-2,800	-2E+04	-0,233	-4,093	0,514	-4,368	-0,032	-0,716	0,256
14	-5,851	-0,833	-0,131	-15,7	-0,083	-2,266	-3E+04	-0,241	-4,115	0,500	-4,419	-0,038	-0,720	0,258
15	-5,407	-0,722	-0,133	-15,2	-0,082	-2,222	-3E+04	-0,243	-4,112	0,516	-3,274	-0,054	-0,732	0,205

Bassin/ Nombre de donneur	26429	26430	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004	27020	27023	27029	27033	27035
1	-2,731	0,634	0,145	-1,529	-89,9	0,161	0,326	-0,128	0,078	-0,776	-7340	-12	-38	-0,690
2	-15,05	0,680	0,129	-0,986	-34,2	0,129	0,633	-0,069	0,519	-1,299	-4373	-42	-89	-0,833
3	-6,473	0,628	0,119	-2,071	-86,1	0,209	0,609	-0,076	0,414	-2,262	-6712	-53	-114	-1,492
4	-8,035	0,745	0,089	-1,490	-47,9	0,198	0,633	-0,075	0,380	-2,425	-7041	-81	-158	-1,360
5	-4,806	0,746	0,162	-0,826	-54,7	0,140	0,636	-0,068	0,534	-2,661	-6354	-84	-165	-0,702
6	-3,670	0,684	0,192	-0,753	-62,9	0,175	0,648	-0,069	0,538	-2,406	-7374	-74	-143	-1,033
7	-2,856	0,646	0,162	-0,843	-53,1	0,171	0,649	-0,073	0,541	-2,938	-7197	-89	-163	-0,769
8	-2,780	0,681	0,204	-1,180	-48,1	0,168	0,634	-0,068	0,537	-2,939	-7319	-86	-152	-1,104
9	-3,455	0,685	0,195	-1,421	-53,8	0,157	0,611	-0,067	0,528	-3,387	-8085	-100	-171	-1,139
10	-3,538	0,663	0,196	-1,328	-54,2	0,147	0,604	-0,057	0,520	-3,526	-8327	-106	-174	-1,080
11	-3,044	0,679	0,201	-1,309	-47,6	0,162	0,614	-0,051	0,522	-3,487	-8374	-108	-174	-1,030
12	-3,148	0,719	0,192	-1,330	-43,5	0,163	0,615	-0,049	0,532	-3,611	-8344	-107	-170	-0,957
13	-2,526	0,726	0,175	-1,311	-38,2	0,179	0,610	-0,050	0,538	-3,687	-8320	-106	-166	-1,102
14	-2,213	0,719	0,168	-1,155	-58,8	0,175	0,598	-0,043	0,538	-3,523	-8107	-115	-177	-1,011
15	-1,653	0,776	0,082	-0,932	-87,578	0,163	0,606	-0,045	0,538	-3,678	-8118	-113	-177	-1,011

Bassin/ Nombre de donneur	27036	27037	27038	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018	28030	28086	28105
1	-0,357	0,156	0,211	-207	-2309	-0,188	-26	-58	-4,002	0,632	-0,797	-1,517	-277	-1170
2	-0,171	0,134	0,539	-569	-4993	-0,170	-9	-18	-1,138	0,712	-0,799	-3,835	-444	-2527
3	-0,332	0,144	0,706	-747	-8363	-0,166	-11	-26	-1,566	0,727	-0,798	-3,024	-632	-2423
4	-0,357	0,162	0,638	-1137	-8608	-0,156	-20	-58	-3,037	0,670	-0,782	-3,025	-558	-2255
5	-0,294	0,165	0,635	-1190	-8978	-0,151	-20	-61	-3,216	0,656	-0,785	-3,422	-617	-2539
6	-0,352	0,165	0,666	-1028	-7854	-0,151	-17	-51	-2,616	0,589	-0,789	-3,021	-565	-2368
7	-0,324	0,163	0,657	-1202	-8877	-0,155	-23	-68	-3,473	0,593	-0,781	-2,100	-456	-1945
8	-0,329	0,165	0,699	-1127	-8351	-0,152	-31	-89	-3,197	0,641	-0,780	-2,141	-453	-1938
9	-0,379	0,165	0,693	-1306	-9356	-0,154	-30	-85	-4,093	0,629	-0,774	-2,781	-534	-2239
10	-0,394	0,165	0,678	-1365	-9616	-0,152	-34	-98	-4,346	0,627	-0,775	-3,147	-508	-2407
11	-0,396	0,165	0,701	-1385	-9642	-0,152	-36	-105	-4,364	0,669	-0,776	-2,908	-560	-2293
12	-0,387	0,165	0,722	-1345	-9490	-0,152	-35	-100	-4,291	0,661	-0,780	-3,044	-568	-2303
13	-0,375	0,164	0,686	-1299	-9265	-0,150	-34	-95	-4,176	0,675	-0,781	-3,135	-589	-2363
14	-0,366	0,166	0,698	-1417	-9090	-0,151	-39	-113	-4,649	0,675	-0,776	-3,185	-589	-2352
15	-0,395	0,166	0,619	-1415	-9636	-0,148	-38	-111	-4,609	0,706	-0,774	-3,105	-580	-2329

Bassin/ Nombre de donneur	28108	28111	28125	28133	28134	29005	29007	37012
1	0,035	0,501	0,653	-1,193	0,746	-0,554	-0,618	-0,099
2	-0,152	0,604	0,658	-1,294	0,811	-0,561	-0,617	-0,089
3	0,247	0,569	0,781	-1,292	0,730	-0,563	-0,622	-0,091
4	0,122	0,537	0,806	-1,389	0,663	-0,566	-0,628	-0,085
5	0,280	0,540	0,809	-1,451	0,668	-0,551	-0,600	-0,086
6	0,495	0,525	0,804	-1,455	0,608	-0,549	-0,596	-0,048
7	0,517	0,540	0,801	-1,500	0,616	-0,554	-0,606	-0,045
8	0,544	0,539	0,812	-1,503	0,639	-0,548	-0,595	-0,030
9	0,473	0,606	0,787	-1,493	0,620	-0,545	-0,591	-0,031
10	0,372	0,647	0,790	-1,508	0,665	-0,538	-0,579	-0,033
11	0,389	0,657	0,800	-1,513	0,658	-0,539	-0,580	-0,034
12	0,337	0,659	0,808	-1,488	0,668	-0,544	-0,591	-0,037
13	0,352	0,668	0,796	-1,501	0,654	-0,544	-0,591	-0,040
14	0,377	0,670	0,799	-1,496	0,659	-0,539	-0,581	-0,042
15	0,266	0,670	0,810	-1,494	0,689	-0,537	-0,578	-0,041

Tableau-A VI-3 Performance des simulations par donneurs multiples selon le bassin versant et le modèle HSAMI (Critère NSE)

Bassin/ Nombre de donneur	**18002**	**18161**	**18198**	**18200**	**18237**	**18288**	**18292**	**18301**	**18322**	**18342**	**18344**	**18348**	**18349**	**18352**
1	-0,033	-0,298	-181	-53	-16	-1,691	-17	-6,152	-0,517	0,153	0,015	0,063	-1,036	0,555
2	0,300	-0,862	-870	-225	-67	-9,329	-52	-5,269	0,199	0,167	0,016	0,056	-2,249	0,527
3	0,260	-0,699	-695	-155	-53	-8,370	-45	-9,058	0,046	0,068	0,015	-1,373	-1,437	0,564
4	0,204	-0,511	-470	-280	-37	-5,155	-32	-12,1	-1,549	0,076	0,014	-1,154	-5,406	0,544
5	0,281	-0,618	-685	-252	-51	-7,307	-40	-12,0	-3,189	0,001	0,015	-0,742	-5,132	0,552
6	0,267	-0,486	-603	-226	-38	-6,534	-37	-11,6	-4,330	0,053	0,016	-0,475	-7,709	0,563
7	0,299	-0,572	-723	-178	-49	-5,392	-30	-9,8	-5,433	0,096	0,016	-0,228	-10,44	0,570
8	0,271	-0,492	-857	-220	-42	-4,108	-37	-11,1	-5,745	0,106	0,017	-0,181	-12,68	0,569
9	0,308	-0,584	-947	-189	-48	-5,434	-33	-10,2	-4,423	0,134	0,017	-0,016	-13,44	0,557
10	0,327	-0,661	-825	-213	-57	-4,723	-36	-10,9	-5,239	0,151	0,017	-0,365	-12,41	0,568
11	0,348	-0,714	-889	-249	-56	-5,497	-33	-11,9	-5,667	0,161	0,017	-0,330	-11,75	0,557
12	0,352	-0,737	-913	-226	-62	-5,573	-38	-12,5	-5,084	0,198	0,017	-0,605	-10,53	0,547
13	0,346	-0,711	-829	-248	-63	-6,540	-41	-11,8	-4,765	0,229	0,016	-0,913	-11,67	0,543
14	0,329	-0,652	-819	-257	-57	-7,167	-40	-12,0	-4,142	0,251	0,015	-1,072	-10,44	0,530
15	0,321	-0,635	-797	-249	-55	-7,018	-41	-12,1	-3,519	0,263	0,014	-0,990	-11,20	0,537

Bassin/ Nombre de donneur	18361	18374	18433	18434	18436	18485	18538	20005	20023	20026	20027	26007	26039	26053
1	-4,369	-0,203	-5,042	0,001	-0,762	-0,072	0,432	0,391	0,273	-0,199	0,324	-2,008	-3,309	0,269
2	-1,461	0,131	-2,696	0,135	-0,796	-0,069	0,581	0,436	0,251	-0,057	0,270	-1,760	-13,7	-0,628
3	-1,013	0,159	-3,176	0,153	-0,822	-0,068	0,385	0,444	0,280	-0,087	0,287	-1,815	-10,1	-0,206
4	-0,892	0,177	-6,912	0,190	-0,813	-0,061	0,452	0,446	0,294	-0,044	0,269	-1,816	-9,9	-0,221
5	-0,603	0,181	-6,534	0,159	-0,826	-0,063	0,475	0,411	0,289	0,031	0,288	-1,660	-15,5	-0,735
6	-0,504	0,191	-5,982	0,169	-0,831	-0,063	0,509	0,385	0,295	-0,099	0,285	-1,636	-15,0	-0,404
7	-0,432	0,187	-5,357	0,170	-0,837	-0,064	0,548	0,339	0,308	-0,059	0,204	-1,458	-11,6	-0,723
8	-0,284	0,189	-4,428	0,144	-0,839	-0,065	0,474	0,286	0,305	0,093	0,202	-1,472	-14,2	-0,585
9	-0,420	0,190	-5,641	0,227	-0,841	-0,066	0,473	0,306	0,308	-0,051	0,233	-1,418	-11,8	-0,624
10	-0,320	0,190	-5,090	0,215	-0,844	-0,067	0,509	0,253	0,294	-0,125	0,161	-1,410	-13,2	-0,809
11	-0,411	0,189	-5,959	0,268	-0,848	-0,066	0,452	0,285	0,271	-0,264	0,105	-1,406	-15,6	-0,954
12	-0,543	0,186	-7,069	0,314	-0,840	-0,067	0,392	0,273	0,240	-0,163	0,031	-1,346	-16,9	-0,931
13	-0,560	0,182	-7,544	0,335	-0,841	-0,066	0,418	0,254	0,242	-0,203	0,055	-1,386	-17,3	-1,006
14	-0,602	0,178	-6,825	0,324	-0,836	-0,064	0,381	0,253	0,226	-0,107	0,023	-1,408	-17,5	-1,130
15	-0,576	0,175	-6,599	0,320	-0,832	-0,064	0,399	0,277	0,231	0,010	0,044	-1,439	-16,8	-1,281

Bassin/ Nombre de donneur	26057	26076	26118	26120	26217	26224	26243	26248	26249	26263	26267	26270	26273	26280
1	-0,064	-185	-3,948	0,183	-3,445	0,764	0,314	0,202	0,565	0,253	0,793	-0,413	0,194	-1,052
2	-2,406	-147	-4,639	-0,034	-3,843	0,784	0,327	0,157	0,431	0,238	0,835	-0,411	-0,350	-2,715
3	-1,461	-120	-4,946	0,063	-3,829	0,808	0,354	0,148	0,463	0,189	0,855	-0,412	-0,023	-1,427
4	-1,518	-141	-5,147	0,060	-3,780	0,700	0,307	0,152	0,548	0,235	0,853	-0,411	-0,056	-1,816
5	-1,072	-125	-4,665	0,077	-3,928	0,643	0,336	0,147	0,562	0,187	0,810	-0,413	0,076	-1,837
6	-1,081	-103	-4,732	-0,020	-4,054	0,653	0,309	0,137	0,619	0,224	0,832	-0,412	-0,032	-2,351
7	-1,864	-87	-4,488	0,073	-4,159	0,618	0,293	0,122	0,602	0,220	0,846	-0,413	-0,013	-1,702
8	-2,040	-92	-4,366	0,107	-4,231	0,601	0,313	0,110	0,657	0,199	0,835	-0,414	-0,144	-2,069
9	-2,539	-83	-4,259	0,082	-4,163	0,571	0,333	0,105	0,670	0,226	0,824	-0,414	-0,239	-1,692
10	-2,812	-93	-4,286	0,020	-4,203	0,577	0,336	0,118	0,665	0,250	0,824	-0,414	-0,357	-2,022
11	-3,250	-94	-4,209	-0,017	-4,253	0,545	0,329	0,128	0,670	0,237	0,809	-0,413	-0,454	-1,864
12	-3,567	-100	-4,111	0,025	-4,310	0,507	0,331	0,119	0,657	0,235	0,783	-0,413	-0,523	-1,627
13	-3,941	-108	-4,060	-0,046	-4,370	0,503	0,328	0,122	0,643	0,226	0,777	-0,413	-0,537	-1,362
14	-4,064	-104	-4,090	-0,028	-4,363	0,526	0,315	0,119	0,627	0,212	0,775	-0,414	-0,611	-1,216
15	-3,970	-106	-4,035	-0,065	-4,216	0,522	0,304	0,111	0,634	0,201	0,766	-0,414	-0,594	-1,346

Bassin/ Nombre de donneur	26285	26289	26292	26293	26296	26311	26334	26336	26356	26357	26388	26400	26423	26429
1	0,273	-0,137	-23,5	-0,085	-1,03	-1E+04	-0,343	-4,465	-0,043	-5,200	-0,038	-0,744	0,115	-3,800
2	0,089	-0,140	-11,1	-0,100	0,420	-8E+03	-0,309	-4,402	-0,025	-1,083	-0,058	-0,763	0,146	-2,013
3	0,469	-0,143	-10,8	-0,103	0,497	-2E+04	-0,304	-4,385	0,077	-0,719	-0,076	-0,763	0,150	-0,928
4	0,502	-0,147	-7,473	-0,102	0,338	-2E+04	-0,293	-4,391	0,038	-0,069	-0,085	-0,762	0,188	-0,527
5	0,435	-0,149	-4,367	-0,109	0,336	-2E+04	-0,298	-4,365	0,081	-0,047	-0,082	-0,757	0,190	-0,598
6	0,305	-0,148	-3,361	-0,103	0,031	-2E+04	-0,297	-4,365	0,159	-0,238	-0,081	-0,756	0,197	-0,641
7	0,400	-0,148	-3,701	-0,104	0,265	-1E+04	-0,286	-4,347	0,272	-0,674	-0,075	-0,751	0,207	-0,839
8	0,240	-0,148	-4,833	-0,106	0,073	-2E+04	-0,293	-4,359	0,318	-0,955	-0,079	-0,754	0,200	-1,077
9	0,244	-0,147	-3,958	-0,108	0,202	-2E+04	-0,284	-4,338	0,371	-1,340	-0,073	-0,750	0,211	-0,904
10	0,165	-0,145	-5,004	-0,106	0,025	-2E+04	-0,279	-4,329	0,392	-1,487	-0,067	-0,748	0,225	-0,880
11	0,125	-0,146	-4,643	-0,104	0,089	-2E+04	-0,282	-4,337	0,374	-1,330	-0,069	-0,750	0,224	-0,799
12	0,113	-0,147	-3,989	-0,103	0,181	-3E+04	-0,283	-4,343	0,362	-1,100	-0,068	-0,751	0,229	-1,006
13	0,181	-0,146	-3,433	-0,102	0,260	-2E+04	-0,285	-4,349	0,394	-1,376	-0,069	-0,752	0,231	-0,880
14	0,293	-0,145	-3,128	-0,104	0,299	-3E+04	-0,287	-4,354	0,411	-1,569	-0,072	-0,754	0,226	-0,836
15	0,257	-0,144	-3,567	-0,106	0,220	-25527	-0,288	-4,342	0,436	-1,782	-0,075	-0,754	0,217	-0,709

Bassin/ Nombre de donneur	26430	26431	26443	26445	26458	27001	27002	27004	27020	27023	27029	27033	27035	27036
1	0,731	0,136	0,194	-4,256	-0,057	0,290	-0,106	0,003	-0,708	-7569	-28	-33	0,307	-0,140
2	0,764	0,125	-0,148	-32	0,088	0,370	-0,115	-0,137	-1,251	-3880	-21	-42	0,425	-0,207
3	0,704	0,117	-0,016	-20	0,057	0,363	-0,092	-0,181	-0,380	-3340	-37	-68	0,325	-0,148
4	0,636	0,084	-0,023	-19	0,062	0,561	-0,081	-0,041	-0,929	-2785	-50	-82	0,557	-0,131
5	0,561	0,070	-0,067	-15	0,095	0,609	-0,075	0,097	-1,285	-3865	-42	-71	0,350	-0,182
6	0,576	0,052	0,041	-25	0,059	0,602	-0,081	0,196	-1,688	-4512	-46	-90	0,235	-0,210
7	0,622	0,063	0,052	-24	0,086	0,636	-0,071	0,204	-1,795	-4630	-58	-101	0,282	-0,195
8	0,661	0,078	-0,021	-32	0,087	0,644	-0,066	0,160	-2,059	-5240	-64	-97	0,129	-0,225
9	0,638	0,092	-0,080	-38	0,072	0,641	-0,068	0,239	-2,335	-5620	-62	-109	0,038	-0,233
10	0,668	0,087	-0,168	-37	0,083	0,645	-0,068	0,293	-2,438	-5885	-70	-113	0,035	-0,238
11	0,662	0,095	-0,258	-42	0,087	0,644	-0,063	0,330	-2,364	-5955	-72	-112	0,042	-0,235
12	0,644	0,096	-0,292	-47	0,094	0,639	-0,061	0,351	-2,427	-6009	-75	-116	-0,035	-0,242
13	0,626	0,092	-0,348	-48	0,105	0,637	-0,058	0,324	-2,566	-6233	-80	-122	-0,108	-0,259
14	0,615	0,083	-0,414	-46	0,107	0,630	-0,056	0,354	-2,610	-6249	-85	-127	-0,089	-0,271
15	0,625	0,074	-0,415	-45	0,112	0,636	-0,057	0,363	-2,735	-6416	-83	-125	-0,136	-0,266

Bassin/ Nombre de donneur	27037	27038	27040	27041	27049	27053	27055	27069	28003	28018	28030	28086	28105
1	0,156	0,450	-225	-3435	-0,189	-26	-68	-2,717	0,742	-0,800	-1,002	-160	-725
2	0,136	0,605	-359	-2757	-0,173	-13	-57	-0,828	0,781	-0,807	-2,880	-171	-811
3	0,120	0,567	-609	-4080	-0,178	-9	-39	-0,332	0,735	-0,809	-2,963	-285	-1623
4	0,133	0,639	-660	-3568	-0,173	-11	-35	-0,789	0,651	-0,805	-3,267	-439	-1842
5	0,137	0,655	-611	-4704	-0,170	-15	-51	-0,972	0,589	-0,803	-3,721	-489	-2044
6	0,128	0,628	-792	-5096	-0,173	-13	-50	-0,727	0,607	-0,793	-3,527	-570	-2334
7	0,135	0,662	-894	-5613	-0,172	-18	-70	-1,205	0,560	-0,792	-2,298	-585	-2381
8	0,143	0,664	-854	-5422	-0,168	-21	-81	-1,482	0,512	-0,795	-1,748	-502	-2072
9	0,147	0,676	-790	-6005	-0,165	-19	-73	-1,263	0,503	-0,789	-1,921	-450	-1861
10	0,146	0,685	-891	-6232	-0,166	-23	-86	-1,618	0,508	-0,785	-2,006	-456	-1903
11	0,150	0,705	-899	-6207	-0,164	-25	-93	-1,734	0,509	-0,781	-2,302	-458	-1900
12	0,152	0,701	-940	-6338	-0,163	-25	-91	-1,863	0,551	-0,783	-2,303	-480	-1979
13	0,154	0,694	-1009	-6669	-0,162	-28	-101	-2,192	0,533	-0,782	-2,538	-495	-2033
14	0,156	0,705	-1058	-6917	-0,161	-30	-106	-2,447	0,523	-0,782	-2,367	-472	-2147
15	0,155	0,713	-1019	-6835	-0,161	-28	-97	-2,234	0,530	-0,783	-2,410	-507	-2066

Bassin/ Nombre de donneur	28108	28111	28125	28133	28134	29005	29007	37012
1	0,252	0,611	0,825	-1,371	0,776	-0,576	-0,735	-0,093
2	0,701	0,735	0,814	-1,387	0,797	-0,584	-0,708	-0,090
3	0,408	0,699	0,807	-1,387	0,731	-0,578	-0,690	-0,086
4	0,304	0,689	0,816	-1,435	0,646	-0,580	-0,681	-0,085
5	0,113	0,693	0,780	-1,494	0,582	-0,575	-0,688	-0,081
6	0,101	0,693	0,785	-1,532	0,601	-0,573	-0,685	-0,081
7	0,293	0,684	0,755	-1,526	0,552	-0,565	-0,668	-0,082
8	0,421	0,687	0,716	-1,550	0,496	-0,563	-0,663	-0,081
9	0,442	0,705	0,700	-1,581	0,484	-0,567	-0,671	-0,079
10	0,465	0,714	0,708	-1,593	0,495	-0,562	-0,660	-0,080
11	0,441	0,732	0,706	-1,591	0,535	-0,558	-0,654	-0,078
12	0,493	0,729	0,738	-1,574	0,530	-0,555	-0,646	-0,079
13	0,414	0,728	0,728	-1,580	0,517	-0,559	-0,652	-0,079
14	0,379	0,731	0,726	-1,588	0,522	-0,558	-0,650	-0,080
15	0,392	0,741	0,719	-1,587	0,544	-0,561	-0,656	-0,078

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alonso-Sánchez, H., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, et M. A Vázquez-Peña. .2014. «Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México». *Tecnología y Ciencias del Agua*. En ligne. vol 5, issue 4,p 153-161.<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000400010 > Consulté le 24 mars 2015

Anctil, François, Jean Rousselle et Nicolas Lauzon. 2005. *Hydrologie : cheminements de l'eau*, 1ere édition. Montreal :Presses internationales Polytechnique, 317 p

Arnold J.G., Allen P.M. and Bernhardt G., 1993, «A comprehensive surface–groundwater flow model». *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 142, issue 1,p :47–69. < doi:10.1016/0022-1694(93)90004-S >. Consulté le 5 septembre 2016

Arreguin-Cortes F. I et M. Lopez-Perez. 2013. «Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle in Mexico». International Journal of Water Resources Development. En ligne. Vol 29, issue 2, p:172-183. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2012.721712 > Consulté le 14 juin 2016

Arsenault, Richard., Annie Poulin, Pascal Côté et François Brissette. (2014) «A comparaison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration». Journal of Hydrologic. Engineering. vol 19 issue 7, 1374-1384. < 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000938> Consulté le 15 octobre 2015

Arsenault, Richard et François Brissette. 2014. « Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches.» *Water Resources Research*. En ligne, Vol 50 Issues 7. P6135-6153. < http://dx.doi.org/10.1002/2013WR014898.>. Consulté le 21 septembre 20165

Arsenault Richard. 2015. «Équifinalité, incertitude et procédures multi-modèle en prévision hydrologique aux sites non-jaugés». Thèse par article pour l'obtention du doctorat en génie, Montréal, École de technologie supérieure, p405

Arsenault, Richard, Dominic Poissant et François Brissette. 2015. «Parameter dimensionality reduction of a conceptual model for streamflow prediction in Canadian, snowmelt dominated ungauged basins». *Advances in Water Resources*. En ligne. Vol 85, p27-44. < http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.014> Consulté le 5 juin 2016

Beven K. 2006 «A manifesto for the equifinality thesis». *Journal of hydrology*. En ligne. Vol *320, issue* 1,p:18-36. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007 > Consulté le 4 octobre 2016

Beven, Keith. (2011). *Rainfall-runoff modelling – The primer*, 2e edition. , Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 457p.

Besaw L.E., D.M. Rizzo, P.R Bierman et W.R Hackett.2010. «Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks». *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 386, issue 1, p27-37, < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.037 > Consulté le 22 septembre 2016

Bloschl Gunter, Muruguse Sivapalan, Thorsten Wagener, Alberto Viglione et Hubert Savenije. 2013. *Runoff Preduction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Plances and Scales.* Cambridge: Cambrige University press, p465.

Burn, Donald.H., et David B Boorman (1993),«Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments», *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 143(issues 3–4), 429-454. < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002216949390203L>. Consulté le 20 septembre 2015

Carpenter, Theresa M.et Konstantine P Georgakakos. 2006. «Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales». *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 329, Issues 1-2, p174-185. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.013>. Consulté le 20 septembre 2016

Casteneda Gonzales Mariana. 2014. «Análisis y simulación hidrológica de cuencas tropicales en México aplicando el modelo hidrológico global simplificado al extremo (MOHYSE)» Rapport de fin d'étude pour l'obtention du baccalauréat en génie civil de l'Université Veracruzana, Xalapa, p244

Cicese. 2013. «BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA CLICOM)» In *Site internet du centre de recherche scientifique et* d'enseignement supérieur d'Ensenada. En ligne. < http://clicom-mex.cicese.mx/> Consulté le 15 mars 2016

Conabio. 2012 « SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD» In Portail de géoinformation de CONABIO. En ligne. < http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ > Consulté le 14 octobre 2015

CONAGUA. [s.d]. « BANCO NACIONAL DE DATOS DE AGUAS SUPERFICIALES (BANDAS) » In Site internet de la sous-drection général technique de gérération des eaux superficielles et d'ingénierie de l'eau. En ligne. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm > Consulté le 4 avril 2016

Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, S. (1993). « Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization ». Journal of Optimization Theory and Applications, Volume 76, n°3, p. 501-521 < http://link.springer.com/article/10.1007/BF00939380 > Consulté le 5 novembre 2015.

Eduterre .2014. «Les climats du globe» In *Le site internet de l'institut Français de l'éducation : acces- Eduterre*. En ligne. < http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/climats-de-la-terre> Consulté le 14 aout 2016

Emerson Douglas, Aldo V Vecchia et Ann L Dahl. 2005. *Evaluation of Drainage Area Ratio Method Used to Estimate Streamflow for the Red River of the North Basin, North Dakota and Minnesota.*«Scientific Investigations Report 2005-5017». Virginia: U.S Geological Survey, 13p

Esri. 2014. «Arc Gis: ArcHydro Toolbox, version 10.3. Logiciel. Californie(USA)L ESRI

FAO. 2016. «Base de référence mondiale». In : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : Portail d'information sur les sols. En ligne. <http://www.fao.org/soils-portal/etude-des-sols/classification-des-sols/base-de-reference-mondiale/fr/ > Consulté le 3 mars 2016

Fortin, Vincent. 2000. *Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application*. «Rapport de recherche». Varennes: Institut de Recherche d'Hydro-Québec, 68p.

Fortin, J.P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fiztback. 2001a. « A Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data, Part 1: Description of the model ». *Journal of Hydrologic Engineering.* En ligne. Vol 6, n°2, p. 91-99.< http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:2(91) > Consulté le 5 octobre 2016

Fortin, J.P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fiztback. 2001b. « A Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data, Part 2: Application to the Chaudière watershed ». *Journal of Hydrologic Engineering*. En ligne Vol 6, n°2, p. 100-108.< http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6%3A2(100)> Consulté le 5octobre 2016

Fortin, V. et R. Turcotte. 2007. *Le modèle hydrologique MOHYSE (bases théoriques et manuel de l'usager)*. [Notes de cours pour SCA7420, Département des sciences de la terre et de l'atmosphère], Montréal : Université du Québec à Montréal, 17p.

He, Y., A. Bárdossy, and E. Zehe. 2011. «A review of regionalisation for continuous streamflow simulation», *Hydrology and Earth System. Sciences*. En ligne vol 15,issue 11 p 3539-3553,< http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3539/2011/hess-15-3539-2011.pdf > Consulté le 15 juin 2015

Hrachowitz, M., H.H.G. Savenije, G. Blöschl, J.J. McDonnell, M. Sivapalan, J.W. Pomeroy, B. Arheimer, T. Blume, M.P. Clark, U. Ehret, F. Fenicia, J.E. Freer, A. Gelfan, H.V. Gupta, D.A. Hughes, R.W. Hut, A. Montanari, S. Pande, D. Tetzlaff, P.A. Troch, S. Uhlenbrook, T. Wagener, H.C. Winsemius, R.A. Woods, E. Zehe et C. Cudennec. 2013. « A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review ». *Hydrological Sciences Journal,* En ligne vol 58 issue 6, p, 1198–1255. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.803183 >. Consulté le 20 juin 2015

Inegi. 2014. *Conocimiendo: Veracruz de Ignacio de la Llave*, Mexico: Institut National de Statistique et de Géographie, p30

Inegi. 2016. «geografía». In *Instituto nacional de estadistica y geografia* . En ligne. < http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx > Consulté le 5 février 2016

IMTA. [s.d]. «BANDAS». In Site intenet de l'Institut MExicaine des Technologie de l'eau. En ligne. < https://www.imta.gob.mx/bandas > Consulté le 5 mars 2015

Kokkonen, T., , A. J Jakeman., P. C Young, et H. J. Koivusalo. 2003. «Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina.», *Hydrological Processes.* En ligne. Vol 17, issu 11, p 2219-2238. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.1329/full>. Consulté le 15 septembre 2015

Kruskal, W. H. et W.A. Wallis. 1952. « Use of ranks in one-criterion variance analysis ». *Journal of the American Statistical Association*. En ligne. Vol 47,p :583-621. < http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1952.10483441 > Consulté le 4 juin 2016

Martínez-Austria, P. F., C. Patiño-Gómez, et J. E Tamayo-Escobar. 2014.« Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora,México». *Tecnología y Ciencias del Agua*. En ligne.vol 5 issue 6, p135-149. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000600009 > Consulté le 13 janvier 2016

McIntyre, Neil., Hyosang Lee, Howard Wheater, Andy Young et Thorsten Wagener .2005.« Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments», *Water Resources Research*. En ligne.vol, 41, issue 12 W12434. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005WR004289/full >. Consulté le 23 juillet 2015

Merz, Ralf. et Gunter Blöschl. 2004. «Regionalization of catchment model parameters» *Journal of Hydrology*. En ligne, vol 287, issues 1-4,p 95–123. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028> Consulté le 6 juin 2015

Nash, J. E. et J.V. Sutcliffe. 1970. « River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles ». *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 10 issue 3, p :282–290. < doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6> Consulté le 4mai 2015

Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil et C. Loumagne. 2005. « Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling ». *Journal of Hydrology*. En ligne. Vol 303 issue 1-4,p:290-306. <DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026> Consulté le 29 septembre 2015.

Oudin, Ludovic, Vazken Andréassian, Charles Perrin, Claude Michel et Nicolas Le Moine. 2008. « Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments». *Water Resources. Research*. En ligne. Vol 44 issue 3 W03413. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006240/epdf >. Consulté le 17 juin 2015

Oudin, Ludovic, Alison Kay, Vazken Andréassian et Charles Perrin. 2010. «Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?» *Water Resources. Research*. En ligne. Vol 46 issue 11, W11558. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009WR008887/full >.Consulté le 15 juillet 2015

Parajka, J., Ralf Merz et Gunter Blöschl. 2005. « A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters*», Hydrology and Earth System Sciences.* En ligne, vol , 9 issue 3 p 157–171. < http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/9/157/2005> Consulté le 8 juin 2015

Parajka, J., A Viglione, M Rogger., J.L Salinas, M Sivapalan et G Blöschl. 2013, «Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff hydrograph studies», Hydrology and Earth System Sciences. En ligne. Vol 17 issue 5 p 1783-1795 <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1783/2013/hess-17-1783-2013.html >Consulté le 6 juin 2015

Pechlivanidis, I. G., B Jackson, N McIntyre et H.S Wheater. 2011. « Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications ». *Global NEST Journal*. En ligne. vol 13 no (3),p 193-214. <http://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/193-214_778_Pechlivanidis_13-3.pdf >. Consulté le 5 aout 2015

Perrin Charles, Claude Michel, et Vazken Andreassian. 2003. «Improvement of a parsimonious model for streamflow». Journal of hydrology. En ligne. Vol 279, issue 1-4, p 275-289. < http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7>. Consulté le 29 septembre 2015

Rojas-Serna, Claudia, Michel, Claude, Perrin, Charles et Andreassian Vazken. 2006. « *Ungauges catchment : how to make the most of a few streamflow measurements?* ». LARGE SAMPLE BASIN EXPERIMENTS FOR HYDROLOGICAL MODEL PARAMETERIZATION. En ligne, vol 307, p 230-236 < http://iahs.info/uploads/dms/13616.23-230-236-43-ROJAS-SERNA.pdf> Consulté le 6 novembre 2015

Razavi Tara et Paulin Coulibaly. 2013. «, Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods». *Journal of Hydrologic Engineering*. En ligne. Vol 18 issue 8 p 958–975. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690 > Consulté le 4 juillet 2015

Reichl J. P. C., A.W. Western, N McIntyre et. F.H.S Chiew. 2009. « Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow ». *Water Resources Research*. En ligne Vol 45, issue 10 W10423,. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008WR007248/full> Consulté le 30 juin 2015

Rhynsburger Dierk. 1973. « Analytic Delineation of Thiessen Polygons* ». *Geographical Analysis*. En ligne, vol. 5, no 2, p. 133-144. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1538-4632.1973.tb01003.x/abstract > Consulté le 5 novembre 2015

Samuel Joe, Paulin Coulibaly et Robert Metcalfe. 2011. « Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: Comparison of regionalization methods ». *Journal of Hydrologic Engineering*. En ligne. Vol 16 issue 5, p 447–459. < http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000338 > Consulté le 14 juillet 2015

Schreider, S. Yu, A.J. Jakeman, J Gallant, et W.S. Merritt. 2002. «Prediction of monthly discharge in ungauged catchments under agricultural land use in the Upper Poing basin, northern Thailand» Mathematics and computers in simulation. En ligne. Vol 59, issue 1, p 19-33. < http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4754(01)00390-1 >. Consulté le 8 juin 2015

Sherman L.K., (1932), «Stream flow from rainfall by the unit-graph method». *Engineering News Record.*En ligne. Vol 108, p 501-505. <http://geomorphometry.org/content/streamflow-rainfall-unit-graph-method> Consulté le 15 septembre 2016

Singh V.P. 1995. *Computer models of watershed hydrology*. 2e edition. Colorado: Water Resources Publications, LLC,p1130

Singh, V.P and D.K Frevert. 2004. «Watershed Modeling» In *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. (Philadelphia, Pennsylvania, June 23-26, 2003.) pp. 1-37. ASCE

Singh, V.P. et D.A Woolhiser. 2002. «Mathematical modeling of watershed hydrology» *Journal of Hydrologic Engineering*. En ligne. Vol 7 issue4, p 270–292. < http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270) > Consulté le 5 juin 2015

Sivapalan, M., K Takeuchi, S.W Franks, V.K Gupta, H Karambiri, V Lakshmi, X Liang, J.J. McDonnell, E.M Mendiondo, P.E O'Connell, T Oki, J.W Pomeroy, D. Schertzer, S Uhlenbrook et E. Zehe. 2003. « IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences» Hydrological Sciences Journal. En ligne. Vol 48 issue 6, p 857-880. < http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.48.6.857.51421 > Consulté le 26 mai 2015

USDA-SCS (1972). SCS Natural Engineering Handbook, section 4, Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall (pp. 1-24). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.

Velazquez Juan Alberto, Magali Troin et Daniel Caya. 2015. «Hydrological Modeling of the Tampaon River in the Context of Climate Change». *TECNOLOGIA Y CIENCIAS DEL AGUA.* En ligne. Vol 6 issue 5, p17-30. < http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n5/v6n5a2.pdf > Consulté le 26 octobre 2015

Viviroli Daniel, Heidi Mittelbach, Joachim Gurtz et Rolf Weingartner. 2009. «Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland-Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results». *Jounal of hydrology.* En ligne. Vol 377 issu1, p 208-225. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.022>. Consulté le 24 juin 2015

Wagener, T. et H. S. Wheater. 2006. « Parameter estimation and regionalisation for continuous rainfall-runoff models including uncertainty ». Journal of Hydrology. En ligne. Vol 320 issue 1,p132–154. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.015> Consulté le 15 mai 2015

Wagener Thorsten, Murugesu Sivapalan, Peter Troch et Ross Woods. 2007. «Catchment classification and Hydrologic Similarity». *Geography Compass*. En ligne, vol 1 issue 4, p901-931. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x/full > Consulté le 22 mai 2015

Wheater H.S., A.J Jakeman, K.J Beven, M.B. Beck et M.J McAleer.1993. «Progress and directions in rainfall-runoff modelling». Modelling change in environmental systems, New York, pp. 101-132.

Wheater, H.S. 2002. « Progress in and prospects for fluvial flood modelling». *PhilosophicalTransactions of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences.* En ligne Vol 360 issue 1796, p1409-1431. < http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/360/1796/1409 > Consulté le 8 juillet 2016

Zhang, Y., et F. H. S Chiew. 2009. «Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments» *Water Resources Research*. En ligne.Vol 45 issue 7, W07412, < http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007504 > Consulté le 12 juillet 2015