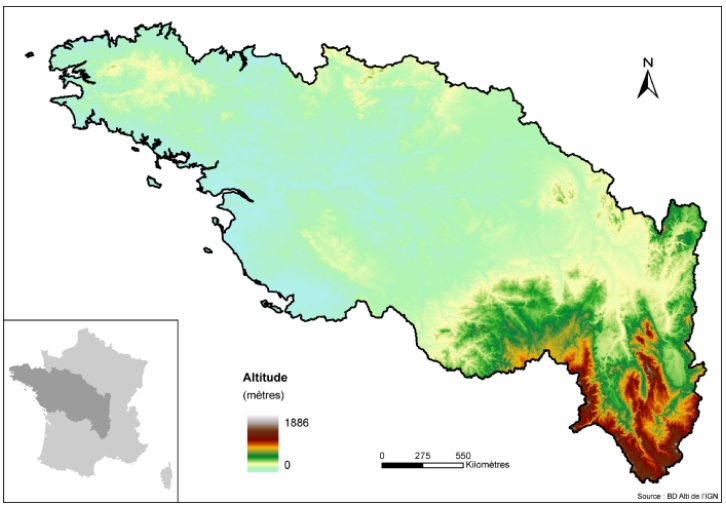
UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Mémoire Master 1 TMEC

Vincent BONNARD

Méthodologie pour la cartographie et le paramétrage du modèle hydrologique GR4J sur 28 bassins versants en France pour la période 1961-2014



Relief du bassin versant de Loire-Bretagne

Année 2014-2015

Directeur de mémoire : **RICHARD Yves**

Tuteur pédagogique : **BRULEBOIS Etienne**

Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, UMR6282
Biogéosciences, 6 Boulevard Gabriel, 21 000 Dijon.

« Le changement climatique remet en cause le postulat traditionnel selon lequel l'expérience acquise dans le passé en matière d'hydrologie est un appui utile pour faire face aux conditions futures. »

Document technique VI du GIEC « Le changement climatique et l'eau », Juin 2008

Résumé

Le but de cette étude est d'identifier et de quantifier les incertitudes du modèle hydrologique GR4J face au changement climatique. Pour cela 28 bassins versants ont été sélectionnés et cartographiés pour définir les stations météorologiques (stations Météo-France) présentes dans leurs périmètres respectifs. La méthode de délimitation des bassins versant se déroule en plusieurs étapes successives et est présentée avec l'utilisation du logiciel Arcgis©. Il est possible en comparant les surfaces que le résultat obtenu ne concorde pas avec la réalité, une méthode alternative permet d'obtenir les coordonnées réelles du BV grâce à la base de données hydrologique du laboratoire IRSTEA. Le but étant de fixer un périmètre pour chaque bassin versant et d'identifier les stations météorologiques présentes à l'intérieur afin d'en tirer les chroniques de précipitations, d'ETP et de débits pour la période choisie (1961-2014) afin d'effectuer des simulations sur un modèle hydrologique. Les résultats obtenus sont la cartographie des bassins versant, la méthode de délimitation du périmètre en cas d'échec à la cartographie et la méthodologie de paramétrage de GR4J.

Abstract

The aim of this study is to identify and quantify the uncertainties about climate change of the hydrological model GR4J. Twenty eight watersheds have been selected and mapped to know which meteorological stations are present on this area (Meteo-France stations). Delimitation methods for watershed takes place in several successive stages and is presented with Arcgis©. It is possible that surfaces obtained does not suit to the reality, in this case it is also possible to use an other method with the IRSTEA hydrological database to obtain coordinates for watersheds. The aim is to fix a perimeter for each watershed to identify meteorological stations inside to extract precipitations, ETP and flows chronicles for the period from 1961 to 2014 in order to carry out simulations on a hydrological model. Results shows watersheds mapped, methods in case of failure and methods for setting GR4J.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire de Master 1 a été possible grâce à l'aide de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser ma gratitude à mon directeur de mémoire, Yves Richard, pour m'avoir accepté pour ce stage de 2 mois au sein du Centre de Recherche en Climatologie à l'Université de Bourgogne, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils et cours qui alimentent ma réflexion depuis maintenant 4 ans.

J'aimerai également remercier Etienne Brulebois sans qui la réalisation de ce mémoire aurait été impossible, sa disponibilité, ses connaissances techniques et sa pédagogie m'ont permis de mener à bien ce projet et d'en apprendre plus en matière d'hydrologie ainsi que sur les techniques et usages de la modélisation.

J'exprime ma reconnaissance envers mes professeurs de l'Université de Bourgogne pour leurs enseignements m'ayant apporté un support intellectuel et technique suffisant pour la réalisation de ce mémoire.

Mes pensées vont aussi à tous les membres du CRC qui m'ont bien accueilli et permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions et surtout dans une bonne ambiance.

Mes derniers remerciements vont à mon père Bernard Bonnard, enseignant-chercheur à l'Institut de Mathématiques de Bourgogne qui m'a toujours épaulé dans mes études et à tous mes amis et camarades pour leur soutien sans faille.

Mots clefs : changement climatique, bassin versants, hydrologie, calibration, France, Modèle hydrologique, GR4J

Résumé 2

Remerciements 3

Table des matières 4

Liste des illustrations 6

Liste des abréviations 8

Introduction 9

Partie 1 : Mise en contexte et présentation du sujet d'étude 11

1.1. Les ruptures en termes de températures en France au XXème siècle 11

1.2. L'impact du changement climatique à travers différents scénarios sur la ressource en eau en France 12

1.3. Les changements observés sur les précipitations, l'ETP et les débits fluviaux 12

Partie 2 : Données et méthodes 14

2.1. Sites d'étude 14

2.1.1 Les bassins versants retenus et les critères de sélection 14

2.2. Méthode d'analyse 17

2.2.1. Disponibilité des données et logiciels utilisés 17

2.2.2. Méthodologie de cartographie des bassins versants 17

2.2.3. Méthodologie en cas d'échec de la délimitation 22

2.2.4. Mise en forme des données sous le logiciel R (Précipitations, ETP, débits) 24

2.3. Les impacts visibles du changement climatique à travers un modèle hydrologique 25

2.3.1. Définition d'un modèle hydrologique

2.3.2. Les différentes sources d'incertitudes dans la modélisation 25

2.3.3. Présentation des différents types de modèles hydrologiques existants 27
2.3.4. Le choix du modèle GR4J 28

Partie 3 : Résultats **30**

3.1. Cartographie des bassins versants 30

3.2. Exemple de paramétrage du modèle GR4J sous le logiciel R 35
3.2.1. Le calage et les critères d'ajustement du modèle (Fonction objectif) *35*
3.2.2. Le package Hydromad pour R *36*
3.2.3. Le critères de Nash et Sutcliffe et la méthode de Nelder-Mead *37*

Conclusion **39**

Bibliographie 41

Webographie 43

Annexes 44

Liste des illustrations

Figures

Figure 1 : *Moyennes annuelles des températures maximales quotidienne sur le XXème siècle (données homogénéisées)*

Figure 2 : *Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique*

Figure 3 : *Bassin versant de la Moselle*

Figure 4 : *Exemple de MNT, ici la représentation en relief du Gard*

Figure 5 : *Direction des flux sous ArcGis, Exemple pour le bassin de Briançon*

Figure 6 : *Exemple du traitement «accumulation des flux sous Arcgis*

Figure 7 : *Exemple de délimitation de bassins versants, réalisation sous ArcGis. »*

Figure 8 : *Bassin versant de L'Ellé-a-Arzano*

Figure 9 : *Extrait de chroniques d'ETP pour un bassin versant*

Figure 10 : *Agrégation des chroniques de débits, d'ETP et de précipitations réalisé sous le logiciel R Studio*

Figure 11 : *Schématisation des modèles hydrologiques*

Figure 12 : *Schéma du modèle GR4J*

Figure 13 : *Exemple des écarts entre le débit observé et le débit simulé sur un bassin versant pour un modèle hydrologique sur l'année 2003 »*

Figure 14 : *Résumé de la méthode de calibrage / contrôle*

Figure 15 : *Fonctionnement schématisé du package Hydromad*

Figure 16 : *Paramètres utilisés pour le paramétrage du SMA et du réservoir de routage sous le logiciel R Studio*

Figure 17 : Rappel des critères de Nash et Sutcliffe

Figure 18 : *Les paramètres de Nelder et Mead et de Nash et Sutcliffe renseignés pour la calibration du modèle GR4J sous R Studio*

Cartes

Carte 1 : *Carte des erreurs de représentation du BV L'Elle-a-Arzano*

Carte 2 : *Carte des 28 bassins versants retenus*

Carte 3 : La Moselle-à-Épinal (*Replacement des exutoires)*

Carte 4 : La Moselle-à-Épinal *(Dessiner le bassin versant)*

Carte 5 : La Moselle-à-Épinal (*Quadrillage du Bassin versant pour la capture des coordonnées.)*

Carte 6 : *Carte des 28 bassins versants maillés.*

Tableaux

Tableau 1 : *Bornes des paramètres estimées par Perrin et al. (2003)*

Annexes

Annexe 1 : *Fiche complete du basin versant Moselle-A-Epinal*
Annexe 2 : *Tableau récapitulatif des bassins versants retenus pour cette etude*
Annexe 3 : *Récapitulatif de la méthode pour la cartographie des BV*
Annexe 4 : *Capture d'écran des bassins versants "maillés" avec leurs coordonnées (Lambert II étendu)*
Annexe 5 : *Carte des débits moyens annuels réalisés pour le projet Explore 2070*
Annexe 6 : *Détail des paramètres « gr4j » et « gr4jrouting »*
Annexe 7 : *Histogramme des surfaces pour les 28 bassins versants*

Liste des abréviations

BD ALTI : Base de données référentielle sur le relief de la France

BD CARTHAGE : Base de donnée des cours d'eau simulés pour la France

BD TOPO : Base de Données Topographie, modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures sous forme vectorielle avec une précision métrique.

BV : Bassin Versant

CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

ETP : Evapo-Transpiration Potentielle

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat

GR4J : Modèle du Génie Rural à 4 Paramètres Journalier.

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MCG : Modèle de Circulation Générale

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NS : Critère de Nash et Sutcliff

P : Précipitation

Q : Débit

RCP : Representative Concentration Pathways

SIG : Système d'Information Géographique

SMA : Soil Moisture Accounting

Introduction

Le changement climatique influe sur le cycle hydrologique et soulève des questions autour de la gestion de la ressource en eau. Les différents rapports du GIEC mettent en lumière les différentes évolutions liées au changement climatique sur la ressource en eau *(GIEC, 2014)*.

Un exemple d'utilisation des modèles hydrologique est de donner des prévisions qui se rapprocheront au plus près des observations futures, la modification du cycle hydrologique sous l'effet de la « machine » climatique peut alors altérer les modèles prévisionnels . Les modèles hydrologiques servent également d'outils dans l'étude des variations climatiques grâce au test statistique d'homogénéité des séries. *(Lubes-Niel et al., 1998)*

Dans cette étude nous avons utilisé le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journaliers), modèle hydrologique journalier (Initialisé au CEMAGREF au début des années 1980) qualifié de robuste par sa simplicité de paramétrage. Les données de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et de débit de la période 1961-2014 ont été utilisées pour calibrer le modèle GR4J sur 28 bassins versants sélectionnés en fonction de différents critères. Le but était de prendre des bassins versants peu impactés par des phénomènes externes à la variabilité climatique. Ces phénomènes externes peuvent prendre plusieurs formes : les actions anthropiques tel que le drainage pour l'irrigation, présence de barrages et d'infrastructures pour la production d'électricité modifiant les débits en exemple et les phénomènes naturels dus aux infiltrations et aux écoulements souterrains pouvant former un réseau karstique en fonction de la nature des roches. Le but étant de faire une comparaison entre les débits observés et simulés sur la même période pour voir si le modèle ne montre pas de biais.

Le projet s'inscrit autour de 2 questions principales :

Comment réaliser la cartographie des bassins versants pour en tirer les chroniques de précipitations et d'ETP ? Quelle méthodologie appliquer ? Comment traiter les données ?

Comment calibrer le modèle GR4J sur un bassin versant ? Quels sont les paramétrages possibles du modèle pour effectuer des simulations ?

Ce projet se déroule en 2 étapes, la première question sera abordée dans ce dossier à l'issu d'un premier stage, un second permettra de répondre à la deuxième problématique et détaillera les résultats obtenus.

Dans une première partie nous mettrons en contexte cette étude sur le changement climatique et les évolutions des températures sur le XXème siècle en France et le lien étroit avec les modifications du cycle hydrologique.

La méthodologie à appliquer est étudiée dans une deuxième partie, en commençant par la justification du choix des bassins versants retenus pour cette étude. La cartographie des données a été réalisée afin de recueillir les chroniques d'ETP et de précipitations pour les régions concernées. La méthodologie pour la délimitation des bassins versant avec les outils SIG sera présentée étape par étape.

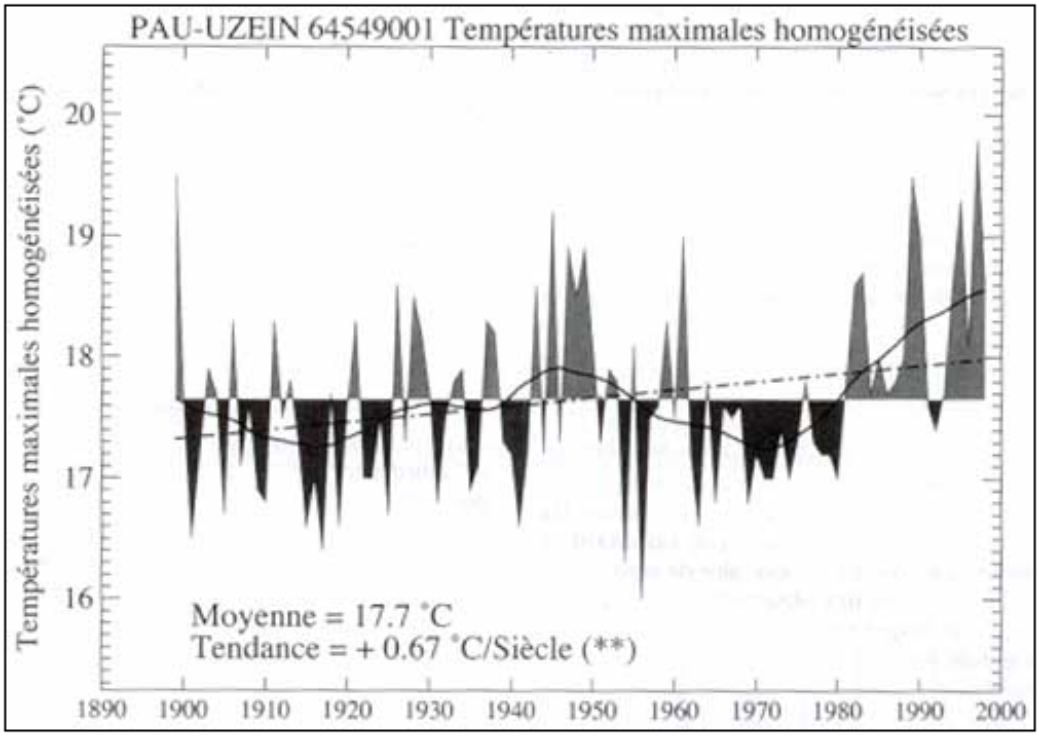
Une fois les bassins versants délimités il est possible d'extraire les chroniques météorologiques pour chacun d'entre eux, ces données doivent être mis en forme sous le logiciel R Studio©. La dernière partie de la méthodologie sera consacrée à la présentation des modèles hydrologiques et plus particulièrement GR4J (Génie Rural à 4 Paramètres Journalier).

La dernière partie aborde les résultats obtenus par cartographie des données. Les paramètres utilisés pour la calibration du modèle seront présentés. Ils seront mis en œuvre dans un second travail (Lucile Hammou, MSE).

Partie 1 : Mise en contexte et présentation du sujet d'étude

1.1. Les ruptures en termes de températures en France au XXème siècle

Cette étude repose sur les faits avérés d'évolution climatique sur le XXème siècle. *L'accroissement sur un siècle des températures moyennes en France est important (de 0,7 °C à plus de 1°C). Celui des températures minimales se distingue de celui des températures maximales par son amplitude, sa répartition géographique et sa répartition saisonnière. […] » (Moisselin J-M et al, Aout 2002)*



« Figure 1 : Moyennes annuelles des températures maximales quotidienne sur le XXème siècle (données homogénéisées)[2] »

Les températures tendent à augmenter sur le siècle *(Figure 1)*. Il y a une tendance plus forte à la hausse des moyennes annuelles de température sur la fin du XXème siècle. Le réchauffement global avec les moyennes homogénéisées serait rapporté à près de 0,7°C pour les températures moyennes. On parle de rupture de températures lorsqu'elles évoluent soudainement, et non progressivement sur une période observée.

[2] Source : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb12/05_rechauffement.htm

1.2. L'impact du changement climatique à travers différents scénarios sur la ressource en eau en France

Les différents scénarios présentés par les modèles de circulation générale (MCG) soumis à des hypothèses d'émissions de GES tendent à montrer des évolutions des températures de surface plus marquées en été qu'en hiver et une évolution des précipitations. *(Moss Richard et al., 2010)* Ces évolutions entrainent un accroissement des risques hydrologiques concernant la ressource en eau, la connaissance de ces risques permet une meilleur gestion des ressources et de limiter les risques indirects liés aux populations et à l'environnement (pollution, risque de crue et de sécheresses) Ces impacts climatiques répercutés sur le cycle hydrologique ont pu être observés grâce à des modèles appliqués à divers bassins versants.

1.3. Les changements observés sur l'ETP, les précipitations et les débits fluviaux

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau pouvant être évaporée par la végétation et les sols sous un climat donné. Elle est exprimée en hauteur d'eau. C'est un concept introduit par Thornwaite en1948, l'ETP dépend essentiellement des facteurs météorologiques. L'évapotranspiration potentielle répond à l'augmentation des températures et modifie alors la demande atmosphérique en eau. Cette action se répercute également à l'échelle des précipitations *(d'Orgeval T., décembre 2006)*

Les précipitations ont été impactées par ces évolutions climatique. Le rapport du GIEC fait état d'une augmentation des précipitations aux latitudes hautes et moyennes de l'hémisphère nord comprissent entre 5 et 10% sur le XXème siècle avec un indice de confiance compris entre 90 et 99%. Concernant la France, on note un accroissement de 0,5 à 1% pour chaque décennie pour le cumul annuel des précipitations sur le XXème siècle avec des disparités de répartitions entre le Nord et le Sud (moins marquées au sud) *(Moisselin J-M. et al, Aout 2002)*

Ces estimations concordent avec les résultats du GIEC *(Houghton et al., 2001)*

« La fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou la partie des précipitations totales imputables à de fortes pluies augmentera de manière très probable dans la plupart des régions au cours du XXIème siècle […] » (Moisselin J-M. et al, Aout 2002)

Le débit en hydrologie se définit comme un volume d'eau atteint par un cours d'eau sur une période donnée (volume/unité de temps). La modification des pluies et de l'ETP engendre des situations critiques au niveau hydrologique avec des étiages accentués et la baisse des niveaux d'eau souterraine. L'enjeu de la modélisation hydrologique est de connaître les répercussions climatiques et ainsi mettre en place des programmes de gestion des eaux adaptés aux régions et aux ressources.

Concernant les débits, le programme Explore 2070 mis en place par le Ministère de l'écologie en 2012 a montré une baisse probable des débits à l'échelle nationale à l'horizon 2070. Les estimations vont de – 15% à -40% pour 2065 par rapport à la période de référence choisie 1961-1990. La baisse des débits pourrait également être plus importantes dans certaines régions *(Annexe 5).*

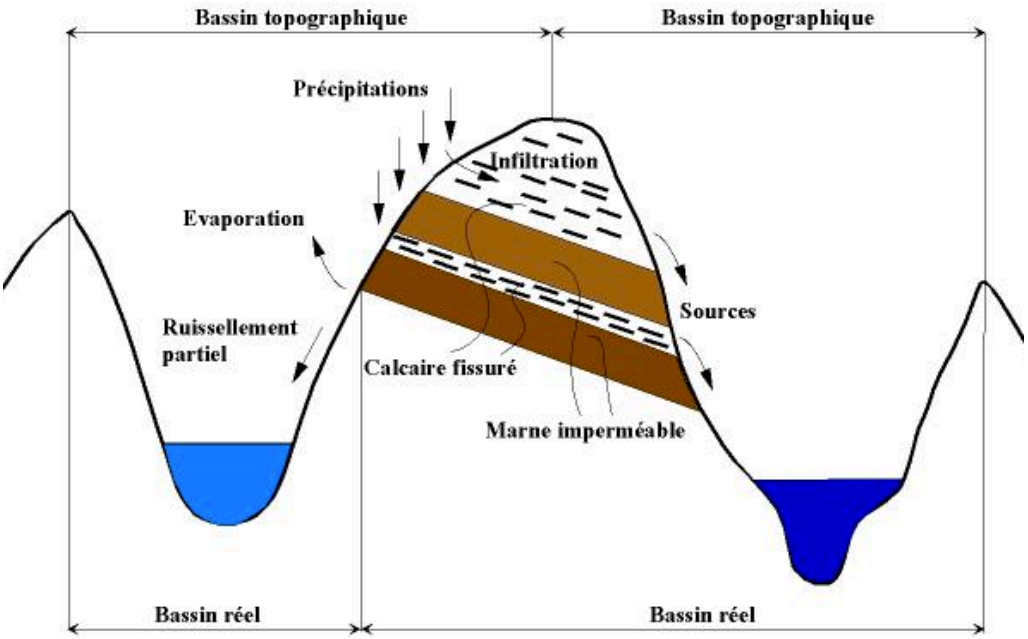
Partie 2 : Données et méthodes

2.1. Sites d'étude

2.1.1 Les bassins versants retenus et les critères de sélection

Un bassin versant est l'unité hydrologique de référence, c'est une portion de territoire dont les eaux s'écoulent en direction d'un exutoire qui peut prendre la forme d'un cours d'eau, d'un lac ou d'un océan. La délimitation de ce bassin versant peut être faite par les limites naturelles à savoir les lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux. Dans ces bassins versants s'écoulent les eaux tombant sur ce territoire (Pluie, neige…) mais également les éléments dissous ou en suspension tel que les sédiments ou les pollutions. Par conséquent, c'est une surface hydrologique dans laquelle les eaux présentes s'écoulent vers un même point ou sont évaporées.

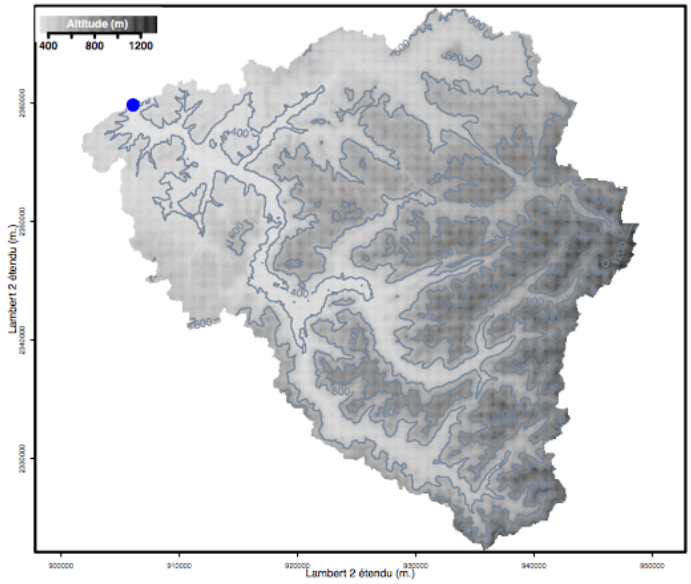
La topographie n'est pas toujours suffisante pour définir un bassin versant, il faut prendre en compte les sols (perméables ou non) et les écoulements souterrains *(Figure 2)*, dans ce cas on parle de bassin versant réel pour les distinguer des bassins versants topographique ne prenant en compte que la surface du bassin versant.



« Figure 2 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche M., 1963) »

L'exutoire est un point primordial pour définir un bassin versant car il permet de définir la ligne de partage des eaux qui correspond généralement à la ligne de crête *(Figure 3).*

Il se peut qu'un bassin versant possède plusieurs exutoires, mais ces exceptions ne figurent pas parmi les bassins versants retenus.



« Figure 3 : Bassin versant de la Moselle à Épinal représenté grâce a son exutoire[3] »

[3] Source : http://webgr.irstea.fr/activites/base-de-donnees/ : Réalisation équipe IRSTEA (V. ANDREASSIAN et al.)

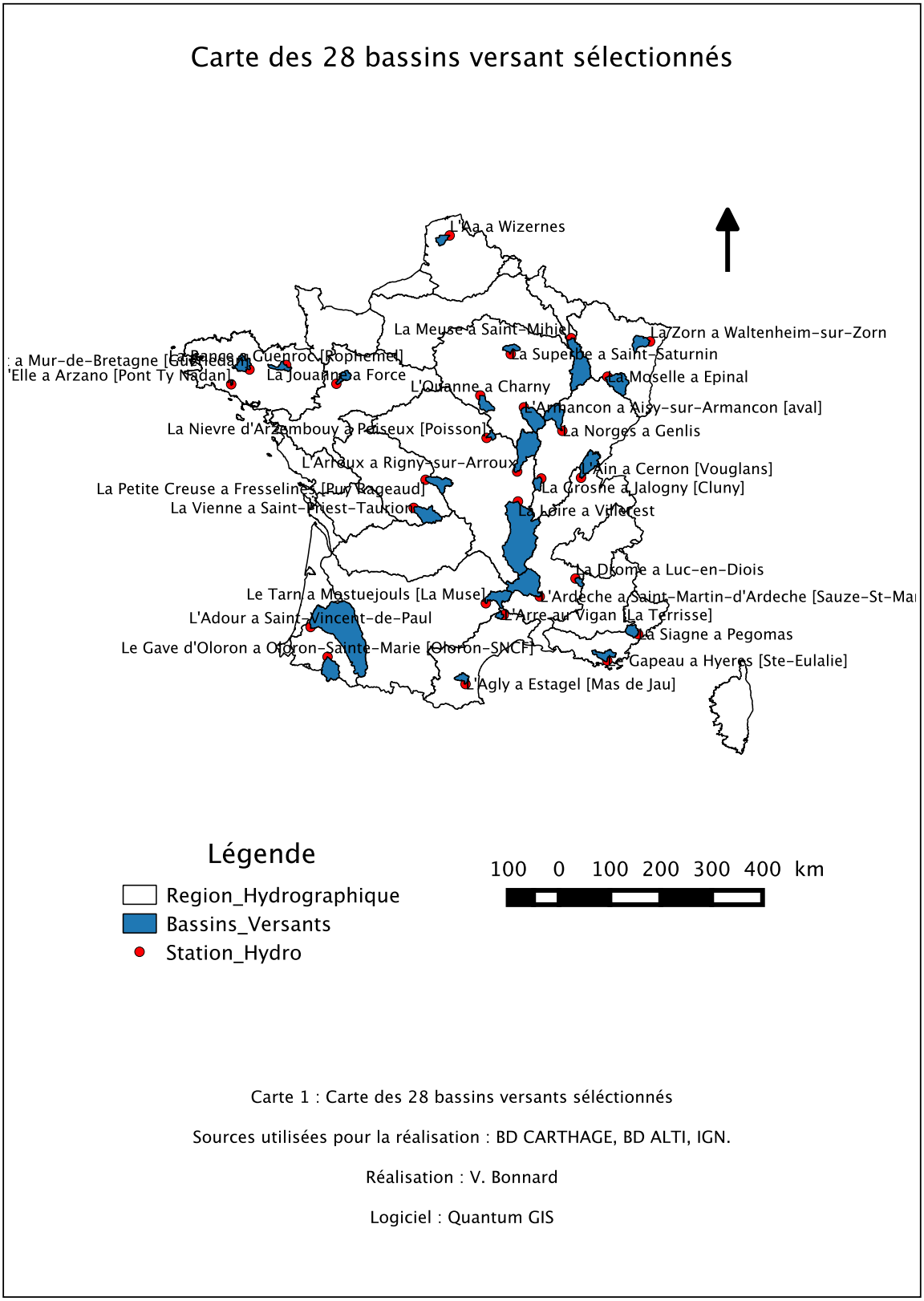
Le choix des bassins versant était crucial dans la réalisation de ce travail. Les choix se sont portés sur des bassins versants ne présentant pas d'influences anthropiques fortes, notamment liées a l'agriculture car l'eau drainée pouvait fausser les résultats de la calibration du modèle. Un autre critère important était d'éviter de prendre des bassins versants dans une région de type karstique, c'est à dire avec un fort drainage souterrain notamment en raison de la corrosion des roches. La raison est que l'eau infiltrée ne devait pas s'ajouter comme un paramètre du modèle ce qui aurait également impacté les résultats.

Les 28 bassins versants étudiés comportent une étendue de 15 à 150 km de long et possèdent des surfaces de 155 à 7 830 km^2 *(Annexe 7)*. L'objectif est de relever les stations présentent sur ces étendues pour en tirer les chroniques et de les moyenner pour en faire une série homogénéisée pour chaque bassin versant.

Le modèle GR4J est modèle global ou « non-distribué » c'est à dire qu'il considère un bassin versant comme une entité unique et homogène sans variabilité spatiale. Le choix de BV restreints est alors primordial pour limiter les effets dus à la topographie et à la nature des sols pour ne prendre en compte que les éléments climatiques. Deux bassins versants (La Loire à Montjean-sur-Loire et Le Rhône à Beaucaire) n'ont pas été traités car leurs surfaces étaient considérées comme trop importantes. La représentativité spatiale est trop variable à l'échelle d'un bassin versant comme le Rhône à Beaucaire ou la Loire à Montjean-sur-Loire, ils présentent des surfaces respectives de 95 590 Km2 et 109 930 Km2, le cycle hydrologique naturel de ces bassins versant est modifié par des habitats urbains influant sur les écoulements et donc sur les débits.

Si les surfaces retenues sont restreintes Sur le tableau en *Annexe 3* figure la liste des bassins versants traités. La *Carte 1* a été obtenue après traitements successifs présentés dans la partie méthodologie et résume l'ensemble des bassins versants sélectionnés.

« Carte 1 : Carte des 28 bassins versants sélectionnés »



Carte 1 : Carte des 28 bassins versants séléctionnés

Sources utilisées pour la réalisation : BD CARTHAGE, BD ALTI, IGN.

Réalisation : V. Bonnard

Logiciel : Quantum GIS

2.2. Méthode d'analyse :

2.2.1 Disponibilité des données et logiciels utilisés

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été la première donnée nécessaire pour la cartographie des bassins versants avec la méthode qui sera décrite dans ce dossier. Les logiciels Qgis© et Arcgis© ont été utilisés pour la réalisation de la cartographie. La résolution choisie du MNT était de 25 m pour travailler avec le plus de précision possible.

La BD TOPO de l'IGN au format raster a été utilisée pour obtenir les couches SIG sous format shapefile (shp). Les autres données couches SIG ont été réalisées grâce à la méthode qui sera décrite dans la partie *« b. Traitement des données ».*

Les données relatives à la calibration ont été commandées auprès de Météo-France à partir des données cartographiques réalisées. Il s'agit sur la période 1961-2014, de chroniques de précipitations journalières stationnelles et de chroniques d'ETP spatialisées. Ces données sont nécessaires pour parvenir à simuler les débits et les comparer aux débits réels et peuvent être obtenus à partir de la cartographie réalisée.

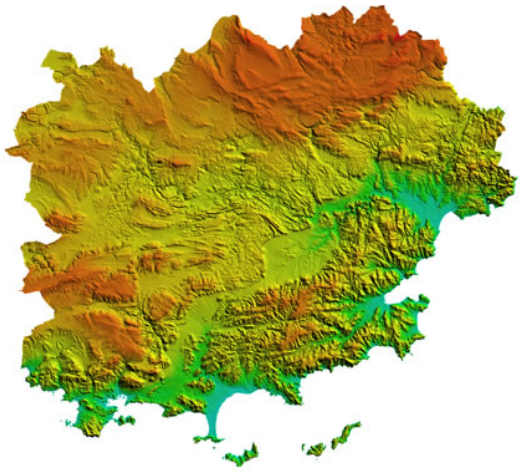
Une fois les données acquises, le paramétrage du modèle a été réalisé en 2 parties, la première consiste à formaliser les données pour un traitement uniforme et automatisé pour les 28 bassins versants retenus (2*.3.4. Mise en forme des données sous le logiciel R (Précipitations, ETP, débits)*). La seconde partie concernait le paramétrage du modèle avec une présentation succincte des différents critères utilisés, leur fonction et l'initialisation sous le logiciel R Studio©. (*3.2. Exemple de calibration du modèle GR4J sous le logiciel R).*

2.2.2. Méthodologie pour la cartographie des bassins versants

a. «Récupération des fichiers MNT relatifs aux départements

Le MNT ou Modèle Numérique de Terrain est une représentation en 3 dimensions d'une surface obtenues grâce aux données d'altitudes qui ne prend pas en compte les éléments physiques présents sur le terrain *(Figure 4)* On peut déterminer

différents MNT en fonction du maillage notamment, dans notre étude ceux utilisés étaient de type rectangulaire qui sont plus faciles à traiter que les MNT de formes quelconques ou hexagonal.



« Figure 4 : Exemple de MNT, ici la représentation en relief du Gard, Source : BD ALTI, IGN. »

b. Traitement des données

1) Création de mosaïque et incorporation des rasters dans la mosaïque pour traitement des données simultané (Rasters et images / Création et gestion d'une géodatabase raster, Mosaïques)

La création d'une mosaïque et l'incorporation des MNT au format raster sous ArcGis© permettent de positionner les rasters en fonction des coordonnées. Le géotraitement est appliqué sur la mosaïque entière et permet de ne pas répéter l'opération 28 fois.

2) Remplissage / Full Sink (Outil : Spatial Analyst)

L'utilisation de la fonction remplissage est définie de la manière suivante :

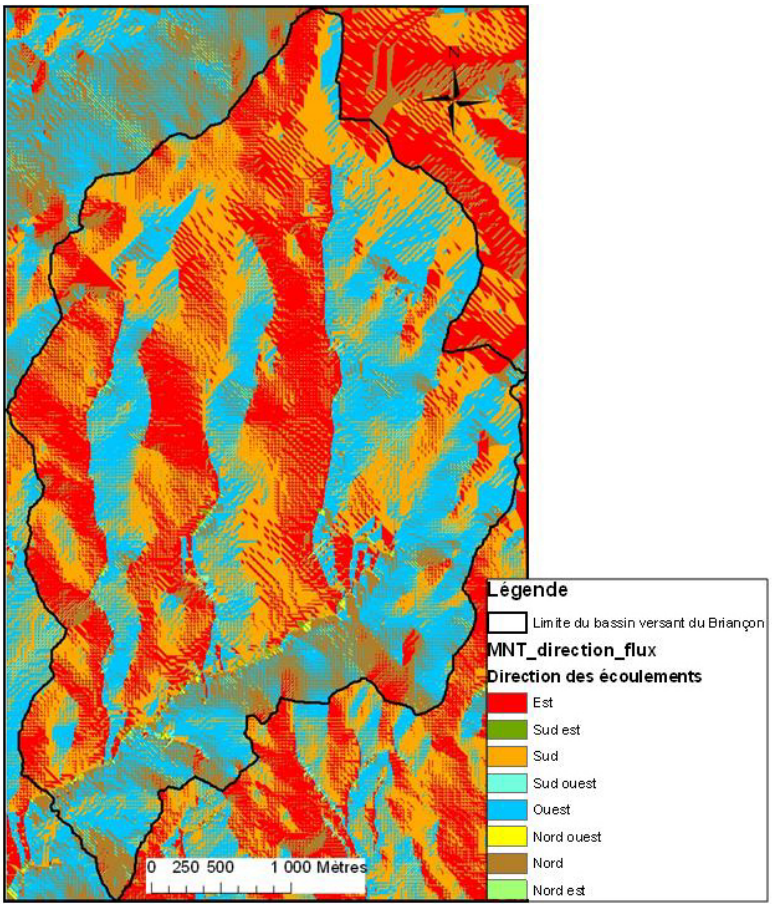
« Une cuvette est une cellule avec une direction de drainage indéfinie. Aucune des cellules qui l'entoure n'est plus basse. Le point d'écoulement est la cellule limite avec l'altitude la plus basse pour la surface de captation d'une cuvette. Si la cuvette est pleine d'eau, c'est le point d'écoulement.[4] *»*

[4] Source : http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000050000000

Par cette action les imperfections des données sont supprimées pour les traitements ultérieurs. Les reliefs sont simplifiés pour obtenir les points de remplissage (cuvette) et permettre au logiciel d'effectuer les opérations ultérieures de manière plus rapide.

3) Direction des flux / Flow direction (Spatial Analyst)

Il s'agit d'un algorithme permettant de connaître la direction des écoulements. Le résultat est visible et explicité sur la *Figure 5*, l'algorithme découpe le raster sous forme de grille et attribue à chaque cellule créée une valeur plus ou moins élevée (1 à 255) en fonction de son altitude. Ce traitement permet de visualiser avec une couleur pour chaque direction quel sera le « chemin » des eaux contenues dans cette surface.



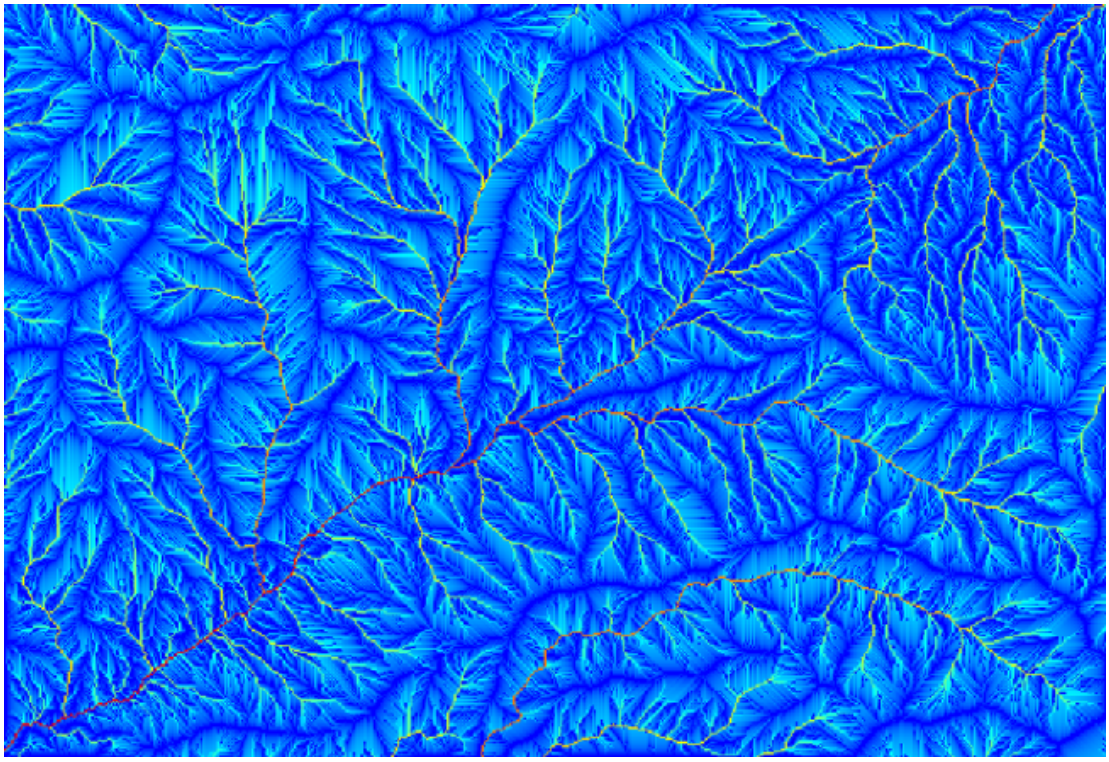
« Figure 5 : Direction des flux sous ArcGis, Exemple pour le bassin de Briançon[5]»

[5] Source : http://sig2011.esrifrance.fr/regaz_p.aspx

La *Figure 5* est une carte tirée après traitement « direction des flux » sous Arcgis, chaque couleur est associée à une direction.

4) Accumulation des flux / Flow Accumulation (Spatial Analyst)

Ce traitement permet d'obtenir un raster en sortie de flux cumulés relatifs à chaque cellule. Il est alors possible de voir la accumulation des eaux, les canaux d'écoulements correspondent aux zones ou les flux élevés sont concentrés. La *Figure 6* est un exemple de visualisation des canaux après avoir augmenté le contraste de l'image pour bien distinguer chaque affluent.



« Figure 6 : Exemple du traitement «accumulation des flux sous Arcgis[6]»

5) Replacement des points de captage à l'exutoire ou reclassification (Editeur)

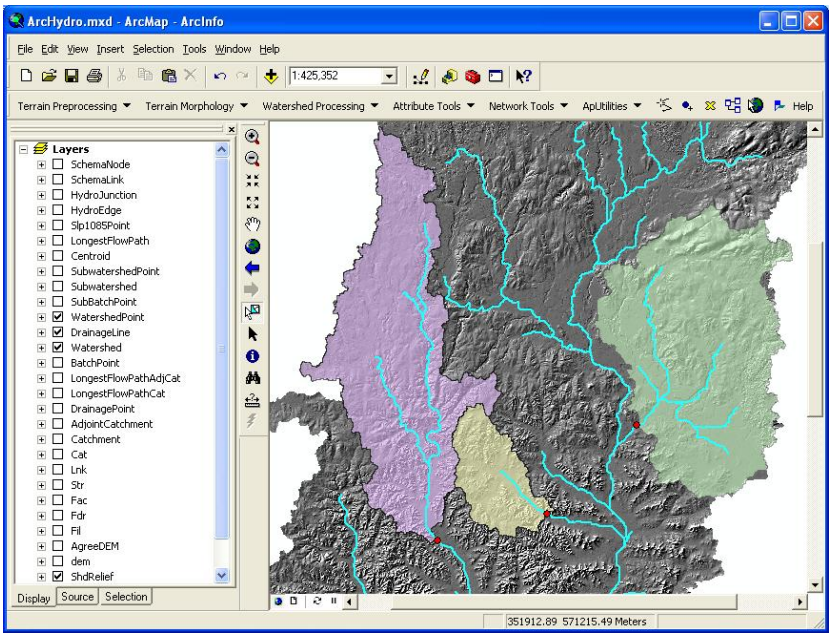
Il s'agit de replacer les stations hydrologiques retenues sur les bons affluents afin de dessiner les bassins versants. Les MNT traités « simulent » des écoulements d'après le relief mais ils sont parfois légèrement biaisés. Il faut donc nécessairement replacer les

[6] *Source : http://qgissextante.blogspot.fr/2012/11/some-hydrological-analysis.html*

stations hydrologiques pour qu'ils soient sur les cours d'eau « virtuels » dessinés par la BD CARTHAGE de l'IGN. Il est toutefois essentiel de les replacer sans les éloigner de leur point d'origine. La précision est d'autant plus importante si le traitement s'effectue sur un grand nombre de MNT en raison du temps de traitement pour dessiner les bassins versants. Il est toutefois possible de traiter ultérieurement et individuellement chaque bassin versant présentant des problèmes dans sa cartographie. La *Carte 3* résume cette étape.

6) Bassin versant / Watershed (Spatial Analyst)

L'étape finale des géotraitements sous ArcGis© pour la capture des bassins versants. *(Figure 7)*. Il peut être utile de comparer le découpage des bassins versants obtenu aux grandes régions hydrographiques de France pour voir si la délimitation est correcte.



« Figure 7 : Exemple de délimitation de bassins versants, réalisation sous ArcGis[7]. »

La région en noir correspond à une région hydrographique, les bassins versants dessinés représentés en violet jaune et vert. On constate quelques imperfections au niveau du bassin le plus à l'Est en comparaison avec la région hydrographique.

[7] Source : http://www.esri.com/industries/water_resources/business/watershed_management

Les erreurs de représentation doivent être identifiées avec précision grâce à l'étape suivante.

c. Comparer les surfaces données et obtenues (Raster vers Polygones)

Pour savoir si le bassin versant à été représenté de manière correcte il est nécessaire de comparer les surfaces. Pour arriver à ce résultat il faut ramener les entités obtenues sous forme de polygones simplifiés pour un calcul de la surface et ainsi pouvoir comparer les données relatives aux bassins versants préétablies avec celles obtenues (*Annexe 4*). Les coordonnées X, Y min et max seront ensuite utilisées pour délimiter les stations météorologiques présentes dans le quadrillage.

Il est nécessaire de fixer un pourcentage d'erreur entre la surface observée et celle obtenue pour en mesurer la fiabilité. Les imperfections mineures ne sont pas à prendre en compte car la cartographie permet uniquement de fixer les stations météorologiques présentes dans le périmètre obtenu *(Carte 5).* Il faut cependant extraire les bassins versants représentés avec une erreur = ou > à 10% de la surface et se référer à la base de données IRSTEA ou recommencer l'opération « *watershed* » après avoir replacé préalablement l'exutoire.

Les commandes des chroniques se font ensuite auprès de Météo-France. La sélection des données peut être effectuée de 3 manières :

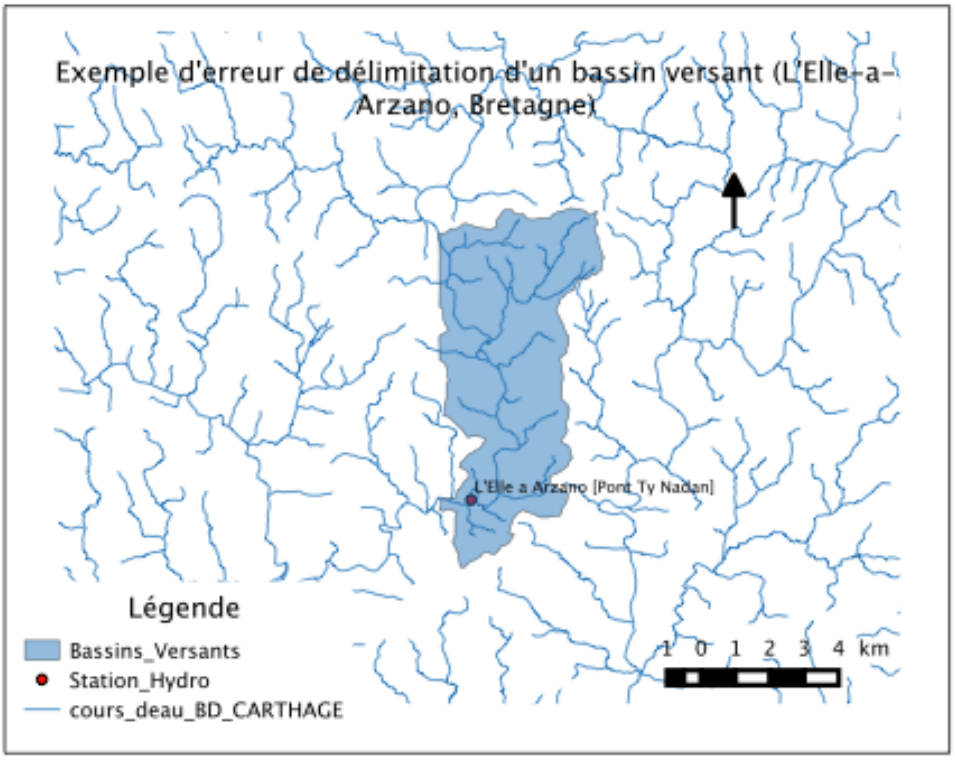
- *Sélection par bassin versant (Identifiés de l'amont vers l'aval)*
- *Sélection par département*
- *Sélection par coordonnées (Au format WGS 84 Degré minutes secondes)*

La sélection par département et par coordonnées a été retenue pour cette étude.

2.2.3. Méthodologie en cas d'échec de la délimitation

Il est possible qu'un ou plusieurs bassins versants lors du traitement soient mal délimités *(Carte 2)*. La surface théorique (Calculée par délimitation) ne correspond pas à la surface réelle. Il en résulte un problème cartographique mais la fonction première de la cartographie des bassins versants dans cette étude est la détermination des stations météorologiques présentent sur la surface de ces bassins.

« Carte 2 : Erreur de représentation pour l'Ellé-a-Arzano (pour identifier l'erreur comparer avec la Figure 8)»



C arte 2 : Exemple d'erreur de délimitation d'un bassin versant (L'Elle-a-Arzano)

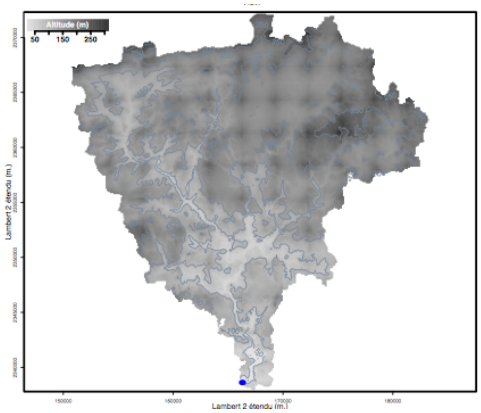
Source pour la réalisation : BD CARTHAGE, BD ALTI, IGN.

Réalisation : V. Bonnard

Logiciel : Quantum GIS

L'équipe du laboratoire Hydrologique IRSTEA a développé une base de données pour plus de 4000 bassins versants en France (*Figure 2 et Annexe 1)*.

La cartographie des bassins versants permet de quadriller un bassin manquant et d'en noter les coordonnées pour le délimiter dans l'espace *(Figure 8).*



« Figure 8 : Bassin versant de L'Ellé à Arzano / Source : laboratoire IRSTEA »

2.2.4. Mise en forme des données sous le logiciel R (Précipitations, ETP, débits)

Une fois les données recueillies il est nécessaire de les formaliser pour permettre une automatisation du traitement sur plusieurs fichiers (Un pour chaque bassin versant). Les données des différentes stations météorologiques pour un même périmètre sont moyennées de manière simple, il est cependant possible de pondérer les résultats. En effet certaines stations météorologiques sont redondantes en raison des périmètres pouvant se chevaucher. Les données de précipitations peuvent donc être pondérée pour ne pas avoir de surreprésentation de ces stations pour les simulations. Les données d'ETP sont spatialisées et ne requièrent pas d'ajustement au niveau des moyennes.

La présentation initiale (ici pour des chroniques d'ETP) des données envoyées par Météo-France *(Figure 9).*

```
19700101;4;46.625;.3;
19700101;4;46.75;.4;
19700101;4;46.875;.3;
19700101;4;47;.2;
19700101;4;47.125;.2;
19700101;4;47.25;.2;
```

«Figure 9 : Chroniques d'ETP envoyées par Météo-France »

Le logiciel R Studio a été utilisé pour ce travail, il s'agissait de la phase préalable pour la calibration du modèle GR4J à l'échelle des bassins versants.

```
1  "date";"Q";"E";"P"
2  "1";"1980-01-01";"1.55566874755683";"0.389865221872202";"0.118035667962321"
3  "2";"1980-01-02";"1.61707672443407";"0.37926464467338";"0.450724943399057"
4  "3";"1980-01-03";"1.57613807318258";"0.38050243589795";"8.16180144093138"
5  "4";"1980-01-04";"1.51473009630533";"0.196728235527897";"5.48589478125429"
```

« Figure 10 : Agrégation des chroniques de débits, d'ETP et de précipitations réalisé sous le logiciel R Studio »

L'agrégation des chroniques de débits, d'ETP et de précipitations *(Figure 10)* est nécessaire pour l'utilisation du package Hydromad *(3.2.2. Le package Hydromad pour R).*

L'utilité de cette mise en forme est de minimiser les erreurs de traitement mais surtout d'automatiser la démarche en initialisant le processus sous R. Cela permet de lancer le script une seule fois pour traiter la totalité des bassins versants plutôt que d'effectuer la même opérations 28 fois.

2.3. Les impacts visibles du changement climatique à travers un modèle hydrologique

2.3.1. Définition d'un modèle hydrologique

Au sens global un modèle est défini de la manière suivante :

D'après le dictionnaire Robert au sens scientifique : « *Représentation simplifiée d'un processus ou d'un système* ».

Pour la définition d'un modèle hydrologique :

« Représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévision de son exploitation etc…. En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle » (Roche, 1986).

« Le modèle est donc nécessairement réductionniste de la complexité naturelle. Il est une image de la réalité, modélisée par oublie de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées », (Roche, 1988.)

2.3.2. Les différentes sources d'incertitudes dans la modélisation

On distingue les incertitudes climatiques des incertitudes hydrologiques lors de la simulation des modèles hydrologiques.

Ces incertitudes ont plusieurs explications qui doivent être reliées les unes aux autres.

A l'échelle climatique :

- *Multiplicité des scénarios*
    - Différentes hypothèses sont réalisées par les scientifiques (Scénarios RCP 2.6 à 8.5) *(Moss et al 2010)*

- *Multiplicités des modèles de distribution et de circulation atmosphérique*
    - Ces paramètres clefs pour les modèles climatiques sont eux aussi incertains et remis en cause (*Covey et al., 2003*).

L'étude se porte sur une échelle régionale c'est à dire localisée, hors les modèles sont globaux, cela signifie qu'il y aura une désagrégation du modèle pour le ramener à l'échelle étudiée. Cette méthode se nomme « descente d'échelle » et peut être réalisée sous différentes approches (statistique ou dynamique).

Si on multiplie le nombre de ces paramètres entre eux on obtient un nombre de résultats tout aussi important. On minimise ces erreurs en les quantifiant grâce à des méthodes statistiques étudiant les paramètres de dispersion à la sortie pour chaque scénario.

A l'échelle hydrologique :

- *Plusieurs structures de modèles*
    - Différents rapports entre la relation pluie-débit

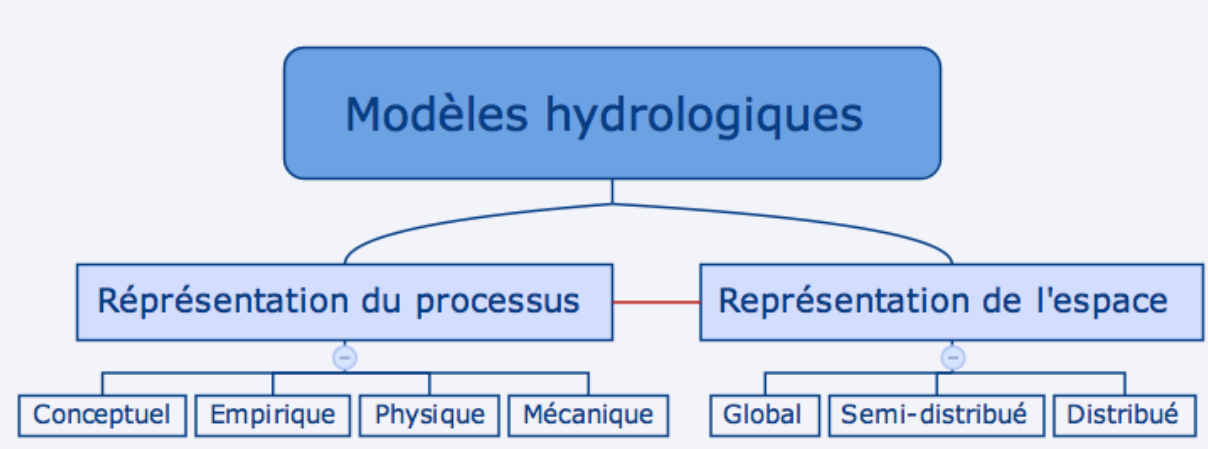
- *Plusieurs paramètres des modèles*
    - Pour les modèles conceptuels tel que GR4J on utilise des paramètres libres c'est à dire qui n'ont pas de grandeurs physiques ce qui est souvent la cause de sous-estimation.

- *Fiabilité des observations*
    - Les chroniques enregistrées par les stations météo dépendent des paramètres environnementaux de la station. On peut se questionner sur la qualité des chroniques ce qui entre également comme une incertitude des paramètres d'entrés du modèle.

La relation de la structure d'un modèle s'effectue grâce aux algorithme de traitement de la relation pluie-débit pour la simulation de données observables c'est à dire les débits. Des hypothèses ignorées ou mal paramétrées peuvent donc remettre en cause la validité du modèle. D'autre part, le paramétrage nécessite de réaliser un calage du modèle pour la calibration pour chaque bassin versant. Ce choix sera justifié dans la partie « *Le calage et les critères d'ajustement du modèle (Fonction objectif)* ».

2.3.3. Présentation des différents types de modèles hydrologiques existants

Il existe plusieurs types de modèles hydrologiques, les différents modèles se définissent par 2 concepts élémentaires en modélisation, le processus même du modèle et la manière dont l'espace est représenté ainsi que la représentations du temps. *(Figure 11)*.



« Figure 11 : Schématisation des modèles hydrologiques[8] »

Plusieurs classifications ont été réalisées, le but ici n'est pas de proposer un modèle de classification mais de les récapituler dans leur ensemble.

Le modèle GR4J est défini comme empirique :

Modèles empiriques : *« Les structures mathématiques basées sur leurs capacités à reproduire les variables observées (les débits), qui peuvent être définis comme des « modèles construits de façons itérative, pour lesquels le modélisateur n'accepte de complexification [...] que si l'augmentation du nombre de degrés de liberté rend le modèle plus performant. »*, Nash et Sutcliffe, 1970.

Ce qu'il faut comprendre dans un modèle empirique c'est la structure interne du modèle appelé « boite noire », son fonctionnement n'est pas relié à des propriétés spécifiques a la physique comme on peut le retrouver dans des relations linéaires d'autres modèles. L'interprétation est basée sur un calcul des incertitudes des prévisions qui ne

[8] Réalisation : V. Bonnard.

permettent pas une interprétation hydrologique mais d'ordre climatique avec les différents paramètres d'entrées (Pluies-débits-ETP).

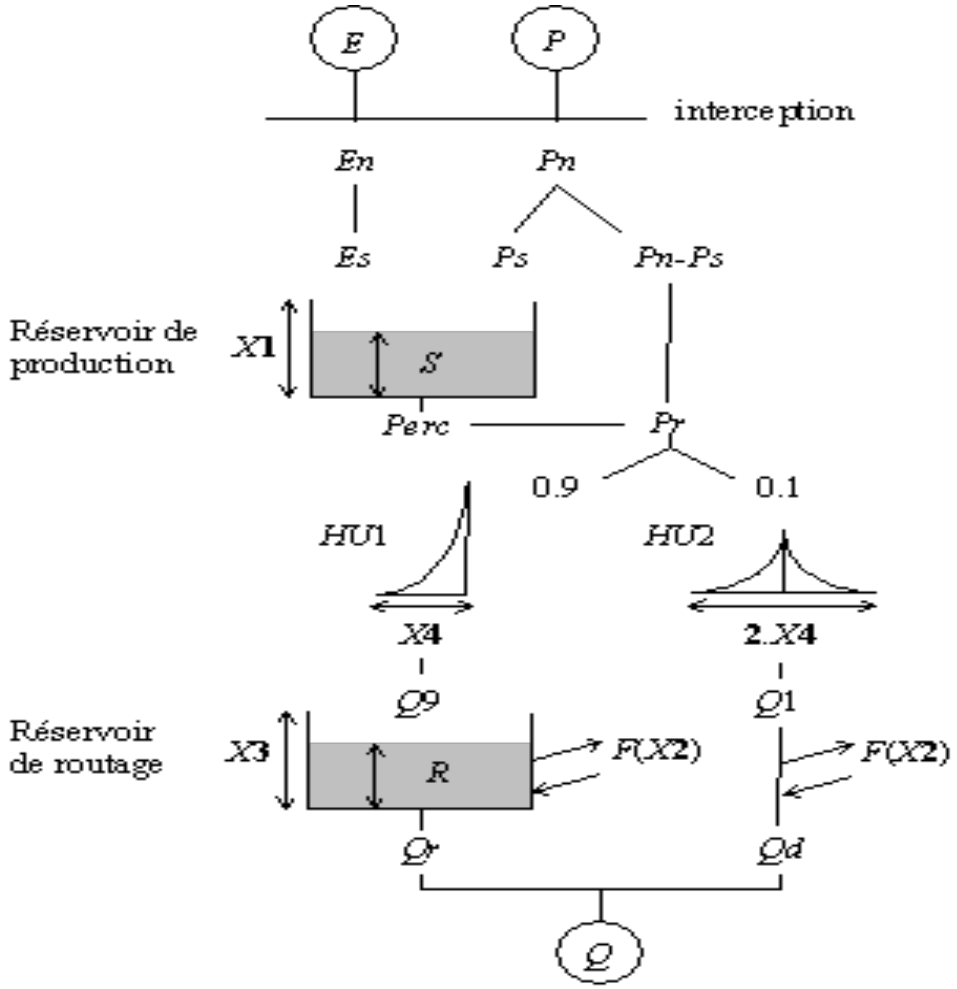
2.3.4. Le choix du modèle GR4J

Le modèle GR4J est un modèle empirique global. Ce modèle qualifié de robuste par sa simplicité de paramétrage a été utilisé pour réaliser des simulations pluie-débit à l'échelle des bassins versant. C'est un modèle dont la représentation spatiale est non distribuée (ou globale). Le bassin versant est représenté comme une entité spatiale unique, la variabilité spatiale est donc exclue pour ce modèle hydrologique. Il permet de transformer des séries climatiques à l'échelle d'un bassin versant (précipitations et ETP) et d'en simuler les débits. Les données d'entrées du modèle se font au pas de temps journalier. GR4J comme d'autres modèles hydrologiques se divise en 2 parties, la première la production qui permet de déterminer le bilan hydrologique du bassin versant grâce aux pluies nettes et aux quantités d'eau évapotranspirées. La seconde partie, le routage, répartie la quantité d'eau contribuant aux débits dans le temps pour chaque bassin versant. Ce modèle a été développé par le CEMAGREF au début des années 1980 notamment pour la gestion de la ressource en eau, puis amélioré au cours de différentes versions. La plus récente est celle développée par *Perrin et al.* (2003), c'est cette dernière version qui sera présentée ci-dessous.

Le modèle GR4J se compose de 2 parties et nécessite 4 paramètres pour transformer les séries d'ETP et de précipitations en séries de débits *(Figure 12)*.

Les 4 paramètres sont :

- **X1** : La capacité du réservoir de production (mm)
- **X2** : Le coefficient d'échanges souterrains (mm)
- **X3** : La capacité journalière du réservoir de routage (mm)
- **X4** : Le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).



« Figure 12 : Schéma du modèle GR4J[9] »

P désigne la hauteur de pluie en mm, E l'évapotranspiration potentielle (ETP). Il est donc possible de calibrer le modèle grâce aux données de pluies et d'évapotranspiration potentielle journalière pour chaque bassin versant.

Le premier réservoir est appelé réservoir de production, il permet de faire un bilan sur les précipitations observées à l'échelle du bassin versant. A partir des précipitations nettes *(« Partie de l'averse qui atteint le cours d'eau par ruissellement »*, Glossaire International d'Hydrologie, 1982) il est possible de définir le débit du bassin versant en prenant en compte l'eau évapotranspirée (Précipitations – ETP).

Le second réservoir est le réservoir de routage et permet de fragmenter dans le temps la quantité d'eau liée au débit grâce aux paramètres définis préalablement.

[9] Source : http://webgr.irstea.fr

Partie 3 : Résultats

3.1. Cartographie des bassins versants

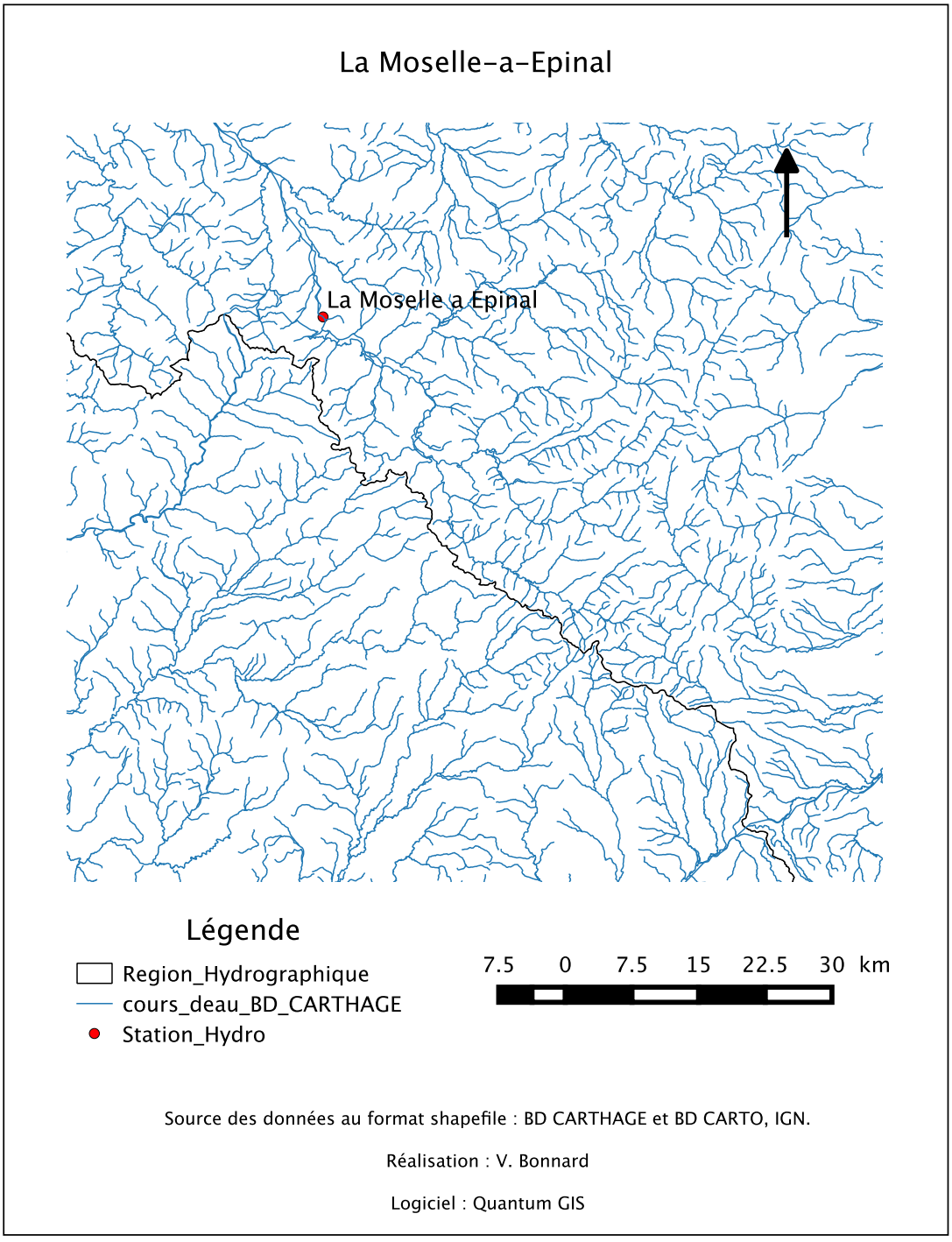
Dans cette partie figure une partie des traitements décrits dans la méthodologie. La *Carte 3* représente les affluents « virtuels » et la station hydrologique au point d'exutoire du bassin versant. Il faut replacer la station hydrologique avec précision sur le bon affluent pour une délimitation correcte du bassin versant.

Dessiner le contour des bassins versants constitue la seconde étape. La la *Carte 4* est obtenue grâce à la routine « Bassin versant » ou « Watershed » dans l'outil « Spatial Analyst ». Les contours des bassins versants sont dessinés grâce aux traitements appliqués précédemment et au replacement de l'exutoire sur le bon affluent.

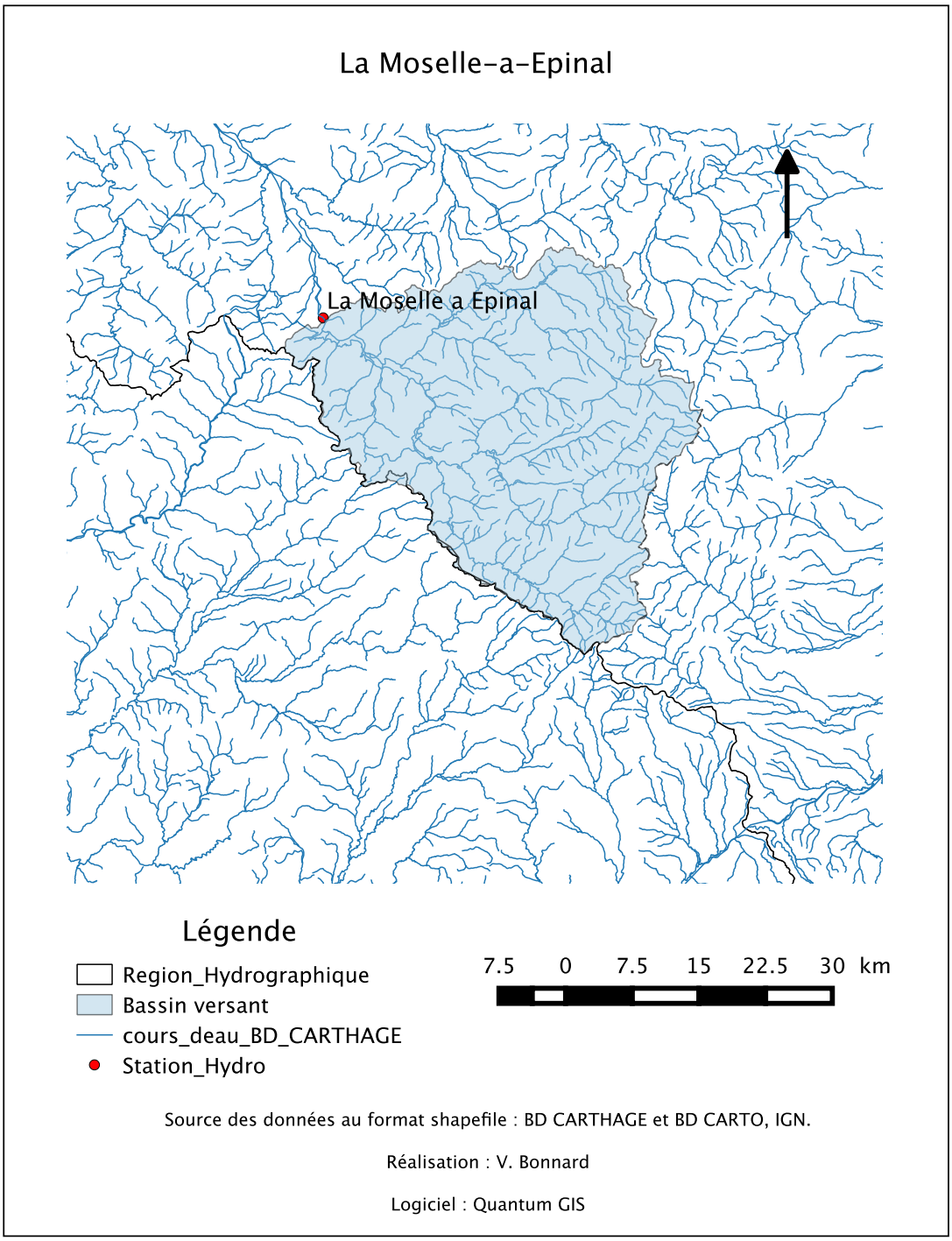
La *Carte 5* constitue l'étape 3 qui consiste à dessiner un quadrillage autour du bassin versant grâce à la fonction « Outils de recherche / Créer un polygone à partir de l'emprise d'une couche » sous QGIS. Cette action permet ensuite de relever les coordonnées dans la table attributaire de la couche obtenue pour lister les stations météorologiques présentes afin d'en tirer les chroniques de précipitations, d'ETP et de débits.

Les bassins dessinés et maillés sont représentés sur la *Carte 6.* Il s'agit du résultat final des traitements, les coordonnées de chaque maillage peuvent être consultées sur la table attributaire de la couche obtenue après l'étape « *6) Dessiner les bassins versants ».*

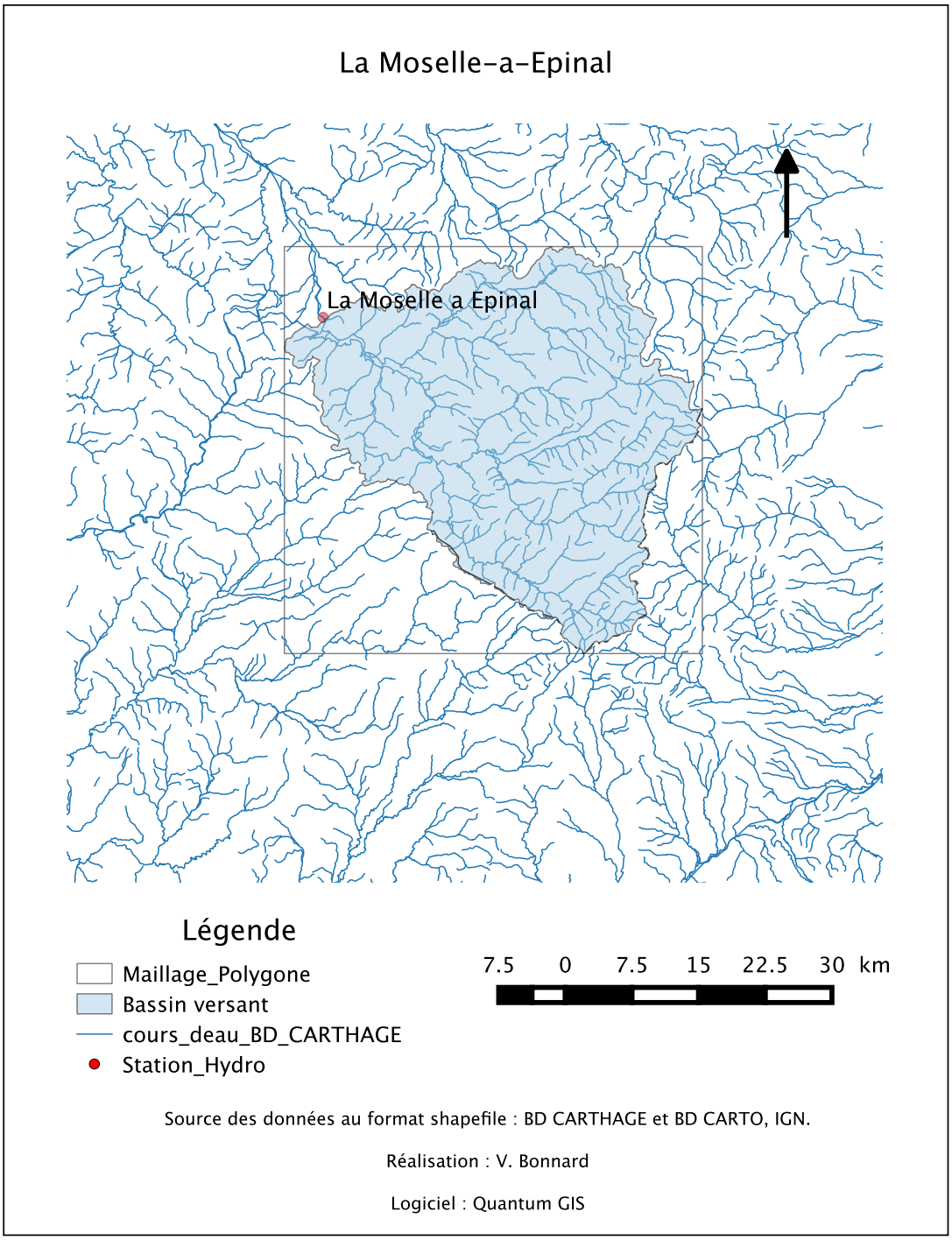
« Carte 3 : La Moselle-à-Épinal (Replacement des exutoires) »



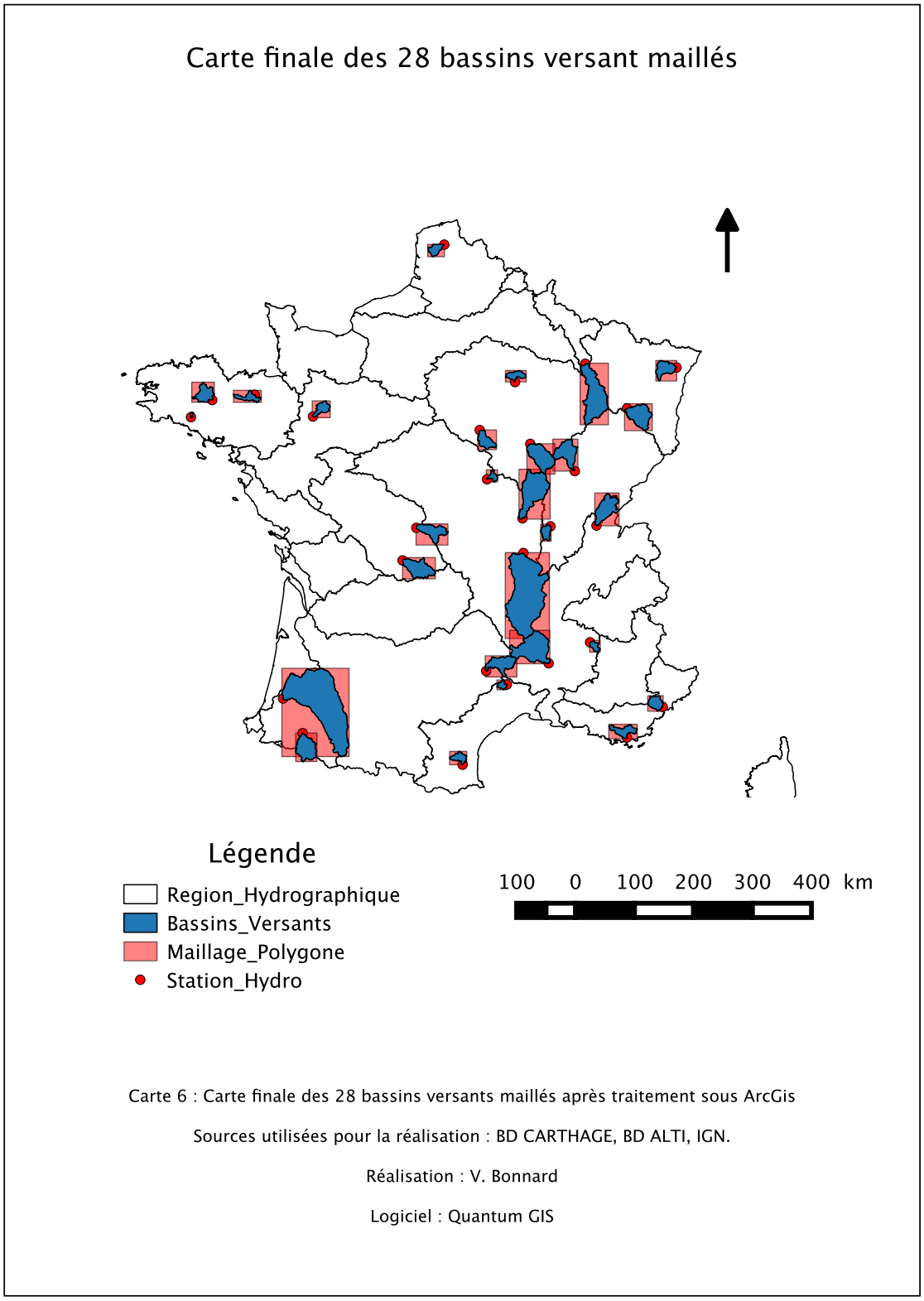
« Carte 4 : La Moselle-à-Épinal (Dessiner le bassin versant)»



« Carte 5 : La Moselle-à-Épinal (Quadrillage du Bassin versant pour la capture des coordonnées.) »



« Carte 6 : Carte des 28 bassins versants après traitement sous ArcGis »



Carte 6 : Carte finale des 28 bassins versants maillés après traitement sous ArcGis

Sources utilisées pour la réalisation : BD CARTHAGE, BD ALTI, IGN.

Réalisation : V. Bonnard

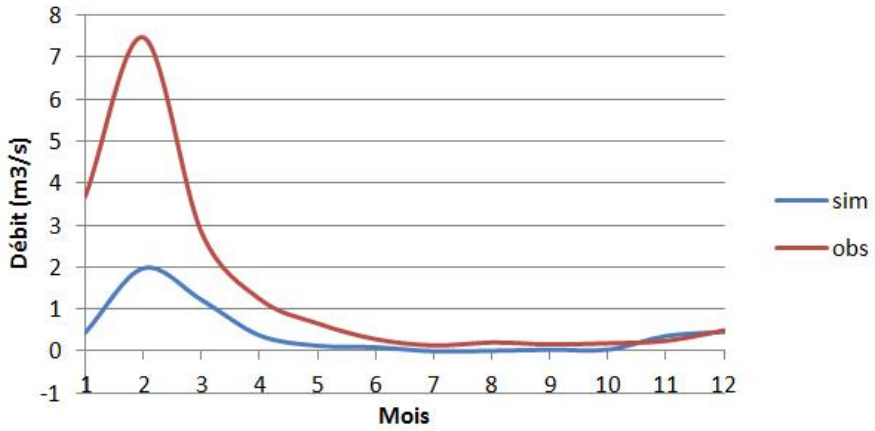
Logiciel : Quantum GIS

3.2. Exemple de paramétrage du modèle GR4J sous le logiciel R

3.2.1. Le calage et les critères d'ajustement du modèle (Fonction objectif)

Le calage est la phase où on initialise le modèle choisi grâce à un algorithme d'optimisation les paramètres initiaux *(Tableau 1)*. Celui ci peut être automatisé, semi-automatique ou manuel. La fonction automatique a été retenue pour cette étude afin de déterminer les paramètres en essayant une multitude de combinaison pour trouver les valeurs les plus appropriées pour la simulation des débits.

Le critère d'ajustement ou fonction objectif permet de savoir la pertinence du modèle en comparant les débits réels aux débits simulés (*Edijatno, 1987*). *(Illustration Figure 13)*



« Figure 13 : Exemple des écarts entre le débit observé et le débit simulé sur un bassin versant par un modèle hydrologique pour une année (Modèle SWAT)[10]»

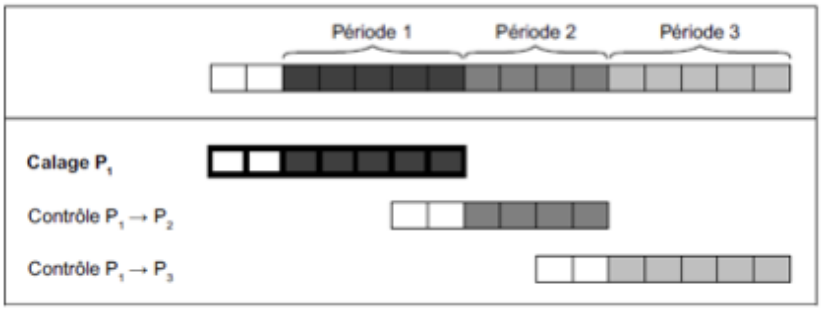
La liste des paramètres X1 à X4 représenté par Perrin et al. (*Tableau 1*) indique les indices minimum et maximum pour chaque indice.

Paramètre	Borne inf.	Borne sup.
X1 (mm)	100	1200
X2 (mm/jour)	-5	3
X3 (mm)	20	300
X4 (jour)	1,1	2,9

« Tableau 1 : Bornes des paramètres estimé par Perrin et al. (2003) »

[10] http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g05/calage-du-modele-swat

Les paramètres sont calibrés pour la période choisie divisée en plusieurs sous période, il s'agit de la phase de calibrage et de contrôle du modèle pour en tester la robustesse (*Figure 14*).



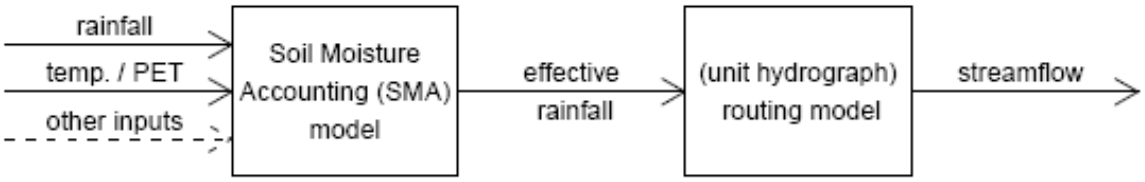
« Figure 14 : Résumé de la méthode de calibrage/ contrôle (Le Moine, 2008) »

Le calibrage est fait sur la première sous période puis on contrôle sur la période suivante. Plus le nombre de sous période est élevé plus il est possible de faire de contrôle. *(Nash et Sutcliffe, 1970)*

3.2.2. Le package Hydromad pour R

Hydromad est un package conçu pour le logiciel R *(Développé par Tony Jakeman & Barry Croke, Australian National University).*

Il est requis pour la calibration de GR4J. Il peut être décrit comme la structure du modèle (*Figure 15)*.



« Figure 15 : Fonctionnement schématisé du package Hydromad »

Les paramètres d'entrés sont les précipitations, l'ETP et les débits observés. Ces paramètres sont traités par un réservoir « d'humidité relative des sols » pour une estimation des pluies efficaces, autrement dit la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration. Un réservoir de routage estime ensuite les débits.

Ce package est essentiel pour initialiser le modèle GR4J, les paramètres pour ce modèle hydrologique sont les suivants :

```
36  mod0<- hydromad(ouanne, sma = "gr4j", routing= "gr4jrouting", warmup:365)
```

« Figure 16 : Paramètres utilisés pour le paramétrage du SMA et du réservoir de routage sous le logiciel R Studio»

Le choix de ces deux paramètres permet la simulation des pluies effectives. «gr4j » correspond au paramétrage du SMA, « gr4jrouting » au paramétrage du réservoir de routage *(Figure 16).* Le paramètre gr4j simule les écoulements au niveau du sol tandis que gr4jrouting simule les écoulements souterrains sur le bassin versant. Le détail des paramètres est récapitulé en *Annexe 6*.

Ce package peut être utilisé par d'autres modèles hydrologiques tel que IHACRES, CWI et CWD.

3.2.3. Le critères de Nash et Sutcliffe et la méthode de Nelder-Mead

Si les paramètres du modèle ne sont pas directement mesurables *(Tableau 1)* ils sont déterminés par la phase de calage. La fonction objectif est alors utilisée, elle se résume par un critère numérique calculant la différence entre les observations et les simulations. Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) est le plus couramment utilisé *(Figure 17)*. Un Nash nul signifie que la simulation équivaut au modèle de référence utilisé. Si le critère prend une valeur proche de 1, les simulations répondent bien aux observations.

$$\mathbf{NashQ} = 100\left[1 - \frac{\Sigma\left(Q_i^{obs} - Q_i^{cal}\right)^2}{\Sigma\left(\overline{Q_i^{obs}} - Q_i^{cal}\right)^2}\right]$$

$$\mathbf{Nash}\sqrt{\mathbf{Q}} = 100\left[1 - \frac{\Sigma\left(\sqrt{Q_i^{obs}} - \sqrt{Q_i^{cal}}\right)^2}{\Sigma\left(\sqrt{\overline{Q_i^{obs}}} - \sqrt{Q_i^{cal}}\right)^2}\right]$$

$$\mathbf{NashlogQ} = 100\left[1 - \frac{\Sigma\left(\log Q_i^{obs} - \log Q_i^{cal}\right)^2}{\Sigma\left(\overline{\log Q_i^{obs}} - \log Q_i^{cal}\right)^2}\right]$$

« Figure 17 : Rappel des critères de Nash et Sutcliffe, (Nash et Sutcliffe, 1970) »

Les différentes méthodes se justifient de la manière suivante :

- **Q** : Représentation sensible aux débits forts
- **$\sqrt{Q}$:** Représentation sensible aux débits faibles
- **Log(Q) :** Pour les débits moyens, traitement de manière égale des débits faibles et forts.

En exemple la racine carrée de Q permet de ne pas donner trop d'importances aux erreurs dues à des éléments de crue. Le critère de Nash au carré accorde plus d'importance aux observations de débits forts et le logarithme de Nash traite les débits faibles et forts de manière similaire. Ces différentes fonctions peuvent être utilisées en fonction des caractéristiques de chaque bassin versant . La déclinaison du critère de Nash peut être un élément de recherche pour définir si la variation de ces critères pour un même bassin à un impact important dans les résultats. *(Figure 18)*

```
data1fit<-fitByoptim(mod0, method = "Nelder-Mead", objective=hmadstat("r.squared"),
                     control=optim.control)
```

« Figure 18 : Les paramètres de Nelder et Mead et de Nash et Sutcliffe renseignés pour la calibration du modèle GR4J sous R Studio. »

La méthode « r.squared » du critère de Nash a été retenue pour ce bassin versant. (La séquence est à initialiser juste avant la simulation des débits sous le logiciel R).

Un 4ème et dernier paramètre doit être utilisé pour calibrer le modèle GR4J. La méthode se définit par un algorithme d'optimisation non-linéaire *(Nelder et Mead, 1965).* Cette méthode mathématique ne sera pas développée en détail, elle permet par un processus de recherche progressif à déterminer le minimum et le maximum de la fonction objective décrite précédemment.

Conclusion

Les enjeux globaux de la modélisation hydrologique concernent principalement la gestion de la ressource en eau. Pour utiliser ces modèles de manière efficace il est nécessaire d'utiliser une méthodologie rigoureuse pour préparer le traitement des données et ainsi minimiser les risques d'erreurs à la source c'est à dire dans la sélection des données.

La première partie de cette étude expose la méthodologie globale pour parvenir à la calibration de GR4J sur les 28 bassins versants sélectionnés, de la cartographie des données au paramétrage du modèle en passant par le traitement des données brutes. La cartographie permet de définir les données nécessaires à la calibration du modèle en fonction de différents paramètres. En cas d'échec de délimitation la base de donnée des bassins versant de l'IRSTEA permet d'obtenir les informations manquantes. Cette méthode alternative permet de palier les problèmes de délimitation des bassins versants lors de la cartographie.

Les chroniques des stations météorologiques obtenues à partir des coordonnées établies par la cartographie servent de données d'entrées du modèle. Les paramètres seront ensuite calibrés grâce à la mesure de l'incertitude calculé par le critère de Nash et Sutcliffe sous la méthode itérative de Nelder et Mead. Ces paramètres peuvent être initialisés uniquement grâce au package Hydromad et autre packages associés sous le logiciel R et R Studio.

Une fois le modèle paramétré il est possible de démontrer si les phénomènes de changements localisés pour les précipitations et l'ETP jouent un rôle crucial dans la modélisation à l'échelle des bassins versants.

Il est possible de s'interroger sur la représentativité spatiale des 28 bassins versants retenus, les grands bassins versant tel que le Rhône (à Beaucaire) et la Loire (à Montjean-Sur-Loire) ont été écartés pour cette étude, cependant il est possible que d'autres bassins versants soient soumis à des aléas n'étant pas liés au évolution du climat. Pour cela il faut prendre en compte les éléments propres aux BV (relief, zones agricoles, nature des sols) mais également d'une manière plus globale les influences climatiques en fonction de la localisation des bassins versant. De cette manière est

possible de présenter différentes classifications des BV et de nuancer les résultats obtenus.

Dans des études déjà parues les modèles pluie-débit ont montré des incertitudes, notamment en période d'étiage après un calage sur une période sèche pour faire des simulations sur une période humide. *(Brigode, 2010)* Les questions se portent alors sur la perspective d'amélioration des modèles en réduisant les incertitudes sur les périodes retenues en analysant les erreurs et ainsi améliorer la performance du modèle à l'échelle globale par traitement local.

La seconde partie de cette étude, réalisée dans un stage qui utilise les résultats du mien, qui a été bâti comme étant le prolongement de ce travail, exposera les résultats obtenus des simulations par rapport aux observations et permettra de déterminer si le modèle arrive à faire des estimations proches des observations. Dans le cas contraire les résultats permettront de quantifier les erreurs obtenues et de connaître le degré d'incertitude du modèle.

Bibliographie

AMAT J-P., DORIZE L. et al, « Eléments de géographie physique », Bréal, 2ème édition, 2008.

BOURQUI M., MATHEVET T., GAILHARD J., HENDRICKX F., « Hydrological validation of statistical downscaling method applied to climate model projections », IAHS-AISH publication, volume 344, 2011, p 32-38

BRIGODE P., « Modélisation hydrologique en contexte de changement climatique : Incertitudes liées aux paramètres de modèles conceptuels pluie-débit », Mémoire M2, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris et Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 2010

BRULEBOIS E., « Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne, Analyse du couplage entre une modélisation climatique régionale distribuée et une modélisation pluie-débit globale (GR4J) », Mémoire M2, Université de Bourgogne, 2013

CHAUVEAU M., CHAZOT S., PERRIN C. et al., « Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? », La Houille Blanche N°4, 2013, p 5 à 15

COVEY, C., K. M. ACHUTARAO, U. CUBASH, P. JONES, S. J. LAMBERT, M. E. MANN, T. J. PHILLIPS, *and* K. E. TAYLOR *(*2003*), «* An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project », Global Planet. Change, 37*(*1–2*), p* 103 - 133.

DE OLIVEIRA NASCIMENTO N., « Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant », ParisTech, Insitut des sciences et technologies, Thèse école nationale des ponts et chaussée

GERARD L., « Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage », Département Hydraulique et Mécanique des fluides, option eau et environnement, 2010, p 35

LEBLOIS E., « Evaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et Gicc-Rhône), Houille Blanche, 2002

LE LAY M., « Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche pour l'étude du cycle hydrologique au Bénin. Hydrology, Institut National Polytechnique de Grenoble, INPG 2006 :

https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/116912/filename/these_mat.pdf

LUBES-NIEL H. et al, « Variablité climatique et statisitques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques testst utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques »., Revue des sciences et de l'eau, Volume 11, Numéro 3, 1998, p 383-408

MAKHLOUF Z., « Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres », Thèse CEMAGREF, Université Paris Sud laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique Orsay, soutenue le 29 Novembre 1994.

MOISSELIN J-M. , SCHNEIDER M. et al. « Les changements climatiques en France au XXème siècle ; Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations, Météo-France », la Météorologie N°38 – aout 2012. : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36233/meteo_2002_38_45.pdf?sequence=1

MOISSELIN, J.-M., SCHEINDER, M., CANELLAS, C., 2002. Climate change over France during the 20th century; a study of long-term homogenized data of temperature and rainfall [WWW Document]. URL http://hdl.handle.net/2042/36233

MOSS RICHARD H., Jae A. EDMONDS, Kathy A. HIBBARD, MARTIN R. MANNING, STEVEN K. ROSE, DETLEF P. van VUUREN and others, "The next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment", *Nature*, 463 (2010), pp 747–756 <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>

ORGEVAL T., « Impact du changement climatique sur le cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest : Modélisation et incertitudes *»,* Thèse de doctorat, Sciences et vie de la terre, Paris VI, soutenue en décembre 2006.

PERRIN C., MICHEL C. and ANDREASSIAN V., « Improvement of a parsimonious model for streamflowsimulation, Journal Of Hydrology 279, p 275-289.

ROCHE M., « Dictionnaire français d'Hydrologie de surface », Edition MASSON, 1986.

ROSSI A., CASTEL T., RICHARD Y., AMIOTTE-SUCHET P., BRULEBOIS E., UBERTOSI M., Brayer J.-M., Doney C., Toussaint H., 2014 : Impact du changement climatique sur l'évolution de la ressource en eau en Bourgogne, France (1980-2100) ; Analyse des paramètres hydro-climatiques simulés à haute-résolution par un modèle climatique régional (WRF). *Ce congrès,* 6 p.

TRAORE V.B. et al, « Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GR2M on the Koulountou river basin, a tributary of the Gambia river. », American Journal of Environmental Protection, 2014, 36-44

Webographie

Evolution des températures moyennes annuelles au XXème siècle (Figure 1) : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb12/05_rechauffement.htm

La Moselle a Epinal (Figure 3) : http://webgr.irstea.fr/activites/base-de-donnees/

Carte de direction des flux, bassin de Briançon (Figure 5): http://sig2011.esrifrance.fr

Accumulation des flux (Figure 6): http://qgissextante.blogspot.fr/2012/11/some-hydrological-analysis.html

Exemple de délimitation de plusieurs bassins versants ESRI (Figure 7) : http://www.esri.com/industries/water_resources/business/watershed_management

Schéma et explications du modèle GR4J (Figure 11): http://webgr.irstea.fr

Observations et simulations des débits (Figure 12) : http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g05/calage-du-modele-swat

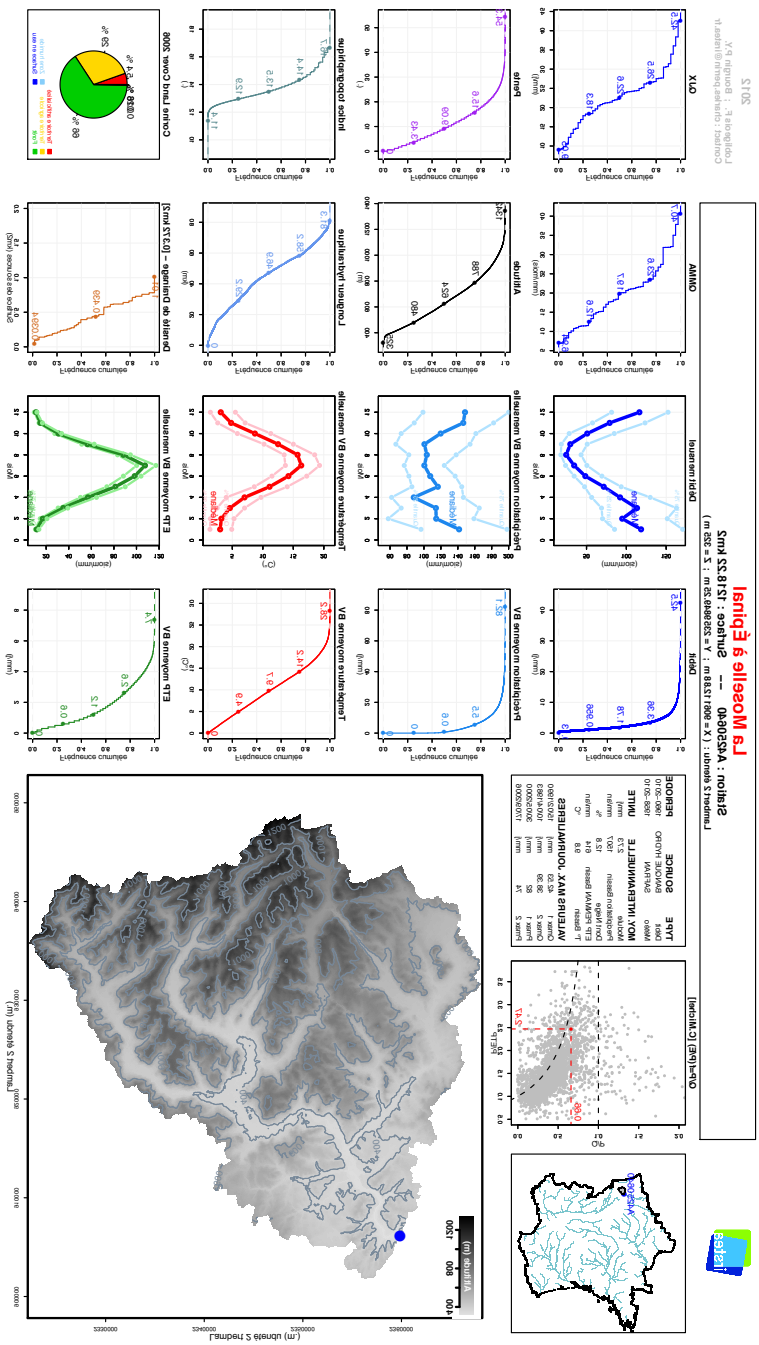
Rapport du GIEC 2013 : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf

Scénarios prévisionnels : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf

Informations package Hydromad : http://hydromad.catchment.org/

Annexes

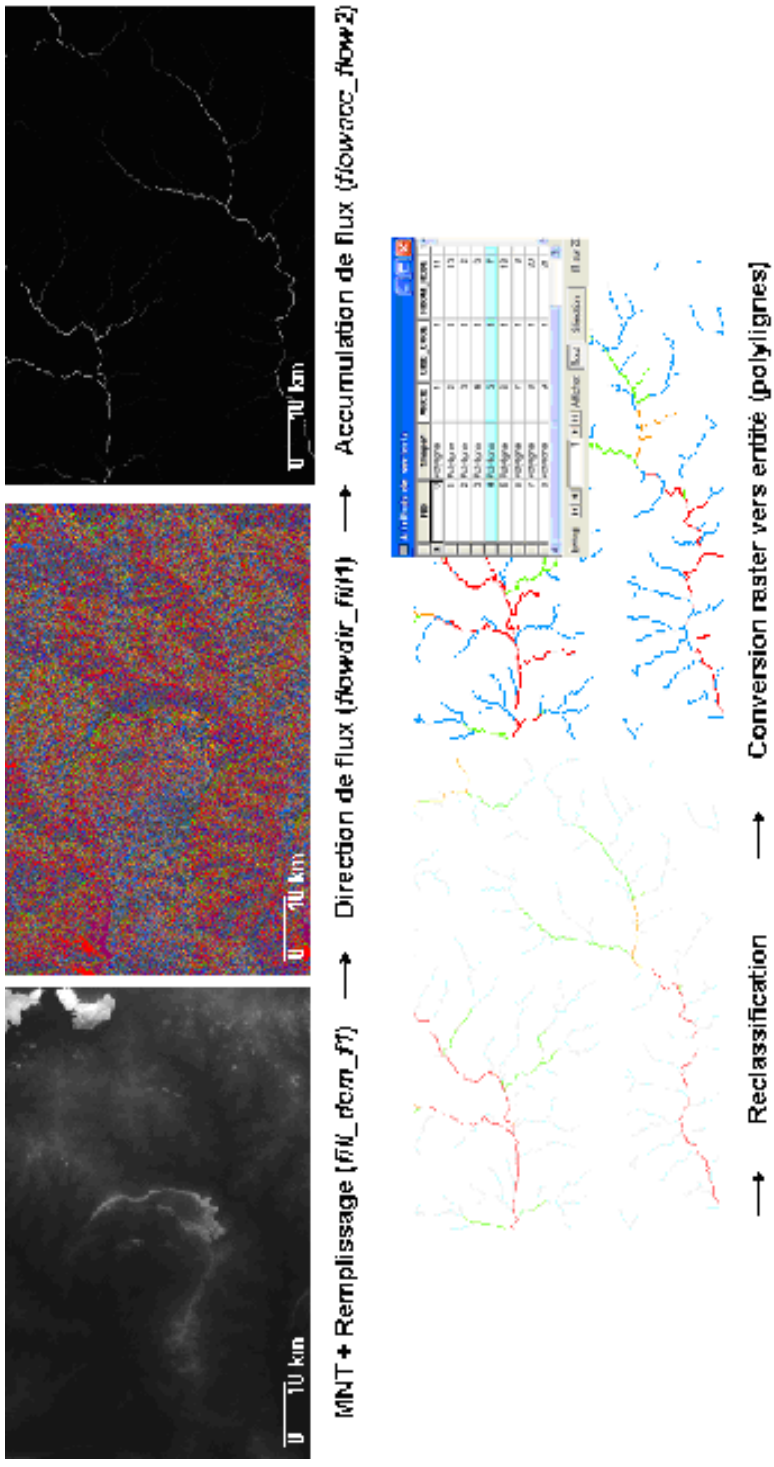
Annexe 1 : Fiche complete du basin versant Moselle-A-Epinal, équipe IRSTEA, realisation sous le logiciel R



Annexe 2 : Tableau récapitulatif des bassins versants retenus pour cette etude (En rouge les bassins versants écartés de l'étude)

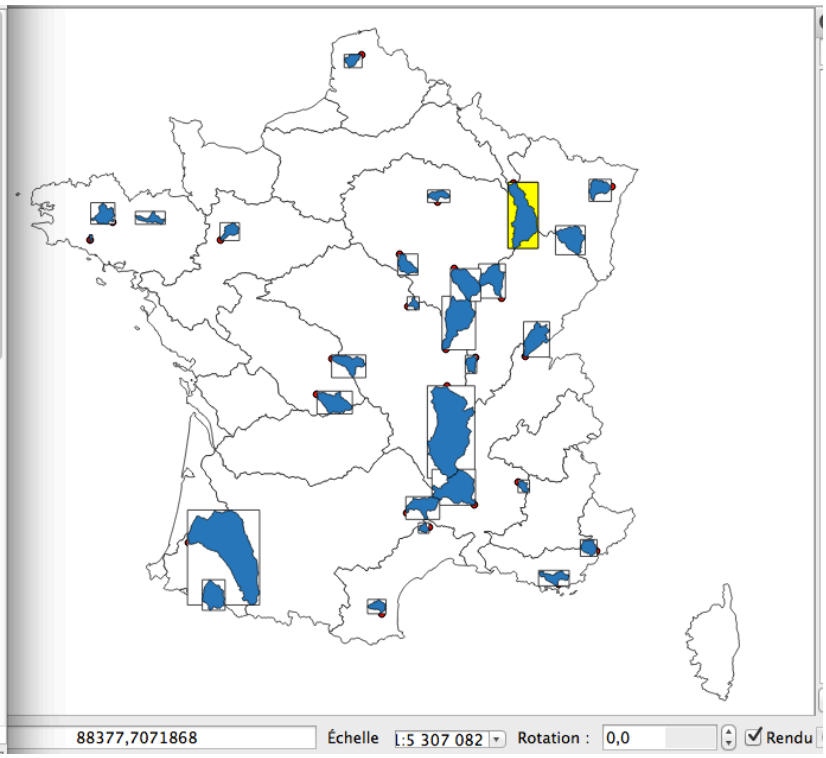
LbStationH
L'Ouanne a Charny
La Grosne a Jalogny [Cluny]
La Norges a Genlis
L'Arroux a Rigny-sur-Arroux
La Nievre d'Arzembouy a Poiseux [Poisson]
L'Armancon a Aisy-sur-Armancon [aval]
Le Rhone a Beaucaire
La Loire a Villerest
L'Aa a Wizernes
La Meuse a Saint-Mihiel
Le Gave d'Oloron a Oloron-Sainte-Marie [Oloron-SNCF]
La Loire a Montjean-sur-Loire
La Superbe a Saint-Saturnin
La Moselle a Epinal
La Zorn a Waltenheim-sur-Zorn
La Vienne a Saint-Priest-Taurion
La Petite Creuse a Fresselines [Puy Rageaud]
Le Tarn a Mostuejouls [La Muse]
La Jouanne a Force
L'Ain a Cernon [Vouglans]
La Drome a Luc-en-Diois
L'Ardeche a Saint-Martin-d'Ardeche [Sauze-St-Martin]
La Rance a Guenroc [Rophemel]
Le Blavet a Mur-de-Bretagne [Guerledan]
L'Elle a Arzano [Pont Ty Nadan]
La Siagne a Pegomas
Le Gapeau a Hyeres [Ste-Eulalie]
L'Agly a Estagel [Mas de Jau]
L'Arre au Vigan [La Terrisse]
L'Adour a Saint-Vincent-de-Paul

Annexe 3 : Récapitulatif de la méthode pour la cartographie des BV (Source :http://www.forumsig.org/forum.php)

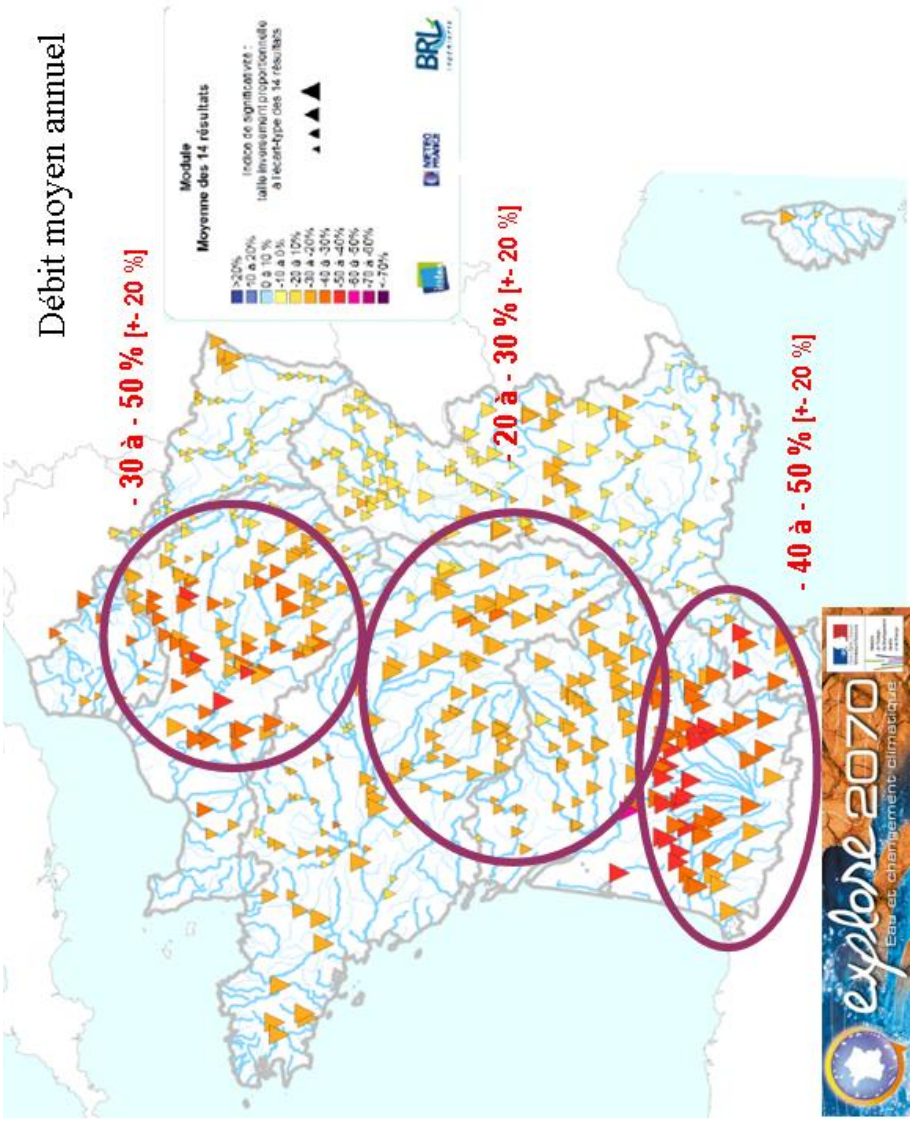


Annexe 4 : Capture d'écran des bassins versants "maillés" avec leurs coordonnées (Lambert II étendu)

	MINX	MINY	MAXX	MAXY
0	618764.56...	7047811.2...	646969.79...	7068648.4...
1	1028356.1...	6868586.2...	1028386.6...	6868616.6...
2	750950.70...	6847380.7...	750981.16...	6847411.2...
3	1005350.1...	6837000.2...	1040518.3...	6871773.4...
4	750367.40...	6835322.9...	785587.95...	6854955.4...
5	218518.91...	6801111.2...	256740.52...	6834990.5...
6	289040.52...	6800811.2...	336243.42...	6821223.4...
7	998281.16...	6783436.2...	998311.63...	6783466.6...
8	883348.69...	6777011.2...	883406.16...	6777042.9...
9	422663.05...	6775183.2...	453318.42...	6803416.1...
10	216279.67...	6773786.2...	221074.40...	6784248.4...
11	993806.16...	6771180.7...	993836.63...	6771211.2...
12	968875.70...	6768636.2...	968906.16...	6768666.6...
13	968925.70...	6766180.7...	968956.16...	6766211.2...
14	877191.22...	6762789.7...	925044.84...	6867199.2...
15	952262.41...	6752792.8...	999294.20...	6798592.3...
16	703212.90...	6720661.2...	735116.47...	6754111.3...
17	830993.91...	6684295.5...	873318.42...	6738523.4...
18	718139.81...	6665936.2...	737147.91...	6686598.4...
19	779475.70...	6640555.7...	779506.16...	6640586.2...
20	901817.54...	6591522.9...	942895.03...	6647249.1...
21	614575.70...	6577405.7...	614606.16...	6577436.2...
22	814756.16...	6567736.2...	814781.16...	6567761.2...
23	814731.16...	6567711.2...	814756.16...	6567736.2...
24	814700.70...	6567680.7...	814731.16...	6567711.2...
25	809865.98...	6565772.5...	827869.20...	6594174.2...
26	598800.77...	6558873.9...	652918.42...	6594693.4...
27	790706.16...	6536511.2...	790736.63...	6536541.6...
28	760225.70...	6511611.2...	760256.16...	6511641.6...



Annexe 5 : Carte des débits moyens annuels réalisés pour le projet Explore 2070



Annexe 6 : Détail des paramètres « gr4j » et « gr4jrouting », source : http://hydromad.catchment.org/man/gr4j.html

GR4J model (mode'le du GeÂ´nie Rural a' 4 parame'tres Journalier).

Usage

```
gr4j.sim(DATA, x1, etmult = 1, S_0 = 0.5,
  return_state = FALSE,transformed=FALSE)

gr4jrouting.sim(U, x2, x3, x4, R_0 = 0, split = 0.9,
                return_components = FALSE,
                epsilon = hydromad.getOption("sim.epsilon"),
                transformed=FALSE)
```

Arguments

`DATA`	time-series-like object with columns P (precipitation, mm) and E (potential evapo-transpiration, mm).
`U`	effective rainfall series.
`x1`	maximum capacity of the production store (mm).
`x2`	groundwater exchange coefficient (mm).
`x3`	one day ahead maximum capacity of the routing store (mm).
`x4`	time base of unit hydrograph UH1 (time steps).
`etmult`	Multiplier for the `E` input data.
`S_0`	Initial soil moisture level as fraction of `x1`.
`R_0`	Initial groundwater reservoir level as fraction of `x3`.
`split`	Fraction to go into quick flow routing, usually fixed at 0.9.
`return_state`	to return the series U, S (storage) and ET (evapotranspiration).
`return_components`	to return the series Xr, Xd and R (reservoir level).
`epsilon`	values smaller than this in the output will be set to zero.
`transformed`	transform parameters before use to improve identifiability. They can be untransformed using `gr4j.transformpar`

Annexe 7 : Histogramme des surfaces pour les 28 bassins versants (En km²)

