



**HAL**  
open science

# Reconstitutions de séries de précipitations journalières dans le bassin versant de la Moselle

Hajar El Khalfi

► **To cite this version:**

Hajar El Khalfi. Reconstitutions de séries de précipitations journalières dans le bassin versant de la Moselle. Géographie. 2020. hal-02990115

**HAL Id: hal-02990115**

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02990115v1>

Submitted on 5 Nov 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Hajar EL KHALFI



Année 2019-2020  
Master STPE spécialité ERGA  
Rapport de stage 2<sup>ème</sup> année

# Reconstitutions de séries de précipitations journalières dans le bassin versant de la Moselle

Mots-clés : pluies journalières, reconstitutions, spatialisation, désagrégation

Stage réalisé du 03/02/2020 au 03/07/2020

dans le centre de recherche en géographie LOTERR

sous la direction de : Mme Claire DELUS

Mémoire soutenu le 16/06/2020 devant le jury composé de

M. Gilles DROGUE, président du jury  
Mme Claire DELUS  
M. Didier FRANCOIS



# Remerciements

---

La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à ma tutrice de stage et ma tutrice universitaire, Mme Claire DELUS, pour l'orientation, la confiance, le soutien qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Didier François, ingénieur de recherche au LOTERR pour sa disponibilité et ses conseils. Je suis reconnaissante pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de l'expérience enrichissante qu'il m'a permise, sachant répondre à mes questions ; sans oublier son encadrement et sa participation au cheminement de ce travail.

Je remercie chaleureusement mon collègue Eric Bonnot qui a eu l'amabilité de répondre à mes questions et de fournir les explications nécessaires.

Mes sincères remerciements s'adressent aux doctorants du laboratoire LOTERR à l'UFR SHS-Metz pour leur disponibilité et leurs incontestables conseils et contributions dans la réalisation de ce modeste travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont rendu possible la réalisation de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

# Sommaire

---

Remerciements .....	b
Liste des tableaux .....	d
Liste des figures .....	e
Liste des annexes .....	f
Présentation du LOTERR .....	g
Introduction .....	1
Chapitre I : Contexte de l'étude et état de l'art .....	2
I.1) Contexte de l'étude et état de l'art .....	2
I.1.1) Contexte du stage .....	2
I.1.2) Les reconstructions hydroclimatologiques .....	3
I.2) Présentation de la zone d'étude .....	5
I.2.1) Présentation générale du bassin versant de la Moselle .....	5
I.2.2) Contexte climatique du bassin versant de la Moselle .....	8
I.2.3) Présentation des bassins tests .....	9
Chapitre II : Matériels et méthodes .....	10
II.1) Constitution d'une base de données de précipitations journalières historiques .....	10
II.1.1) Les données de la Publiothèque (Météo France) .....	10
II.1.2) Les données du service météorologique allemand .....	11
II.1.3) Les données du service météorologique luxembourgeois .....	11
II.1.4) Les données de la base KNMI .....	11
II.1.5) Les données du LOTERR .....	11
II.1.6) Organisation de la base de données des précipitations journalières .....	11
II.2) L'estimation des pluies moyennes de bassin versant à l'échelle journalière .....	12
II.2.1) La pluviométrie SAFRAN .....	12
II.2.2) Méthode de spatialisation des précipitations à partir de la méthode Valery (2010) ...	12
II.2.3) Méthode de désagrégation des précipitations mensuelles .....	13
Chapitre III : Résultats .....	17
III.1) Présentation de la base de données des précipitations journalières .....	17
III.1.1) La base de données journalières historiques .....	17
III.1.2) Réseau pluviométrique et période de référence utilisés .....	18
III.2) Précipitations moyennes journalières des bassins versants estimées à partir de la méthode de spatialisation des pluies journalières .....	19
III.2.1) Paramétrisation de la méthode de spatialisation .....	19
III.2.2) Comparaison des pluies moyennes de bassin versant issues des différentes méthodes .....	20
III.3) Précipitations moyennes journalières des bassins versants estimées à partir de la désagrégation des précipitations mensuelles .....	22
III.3.1) Pluie journalière estimée à partir des 28 postes .....	23
III.3.2) Pluie estimée à partir d'un réseau dégradé .....	25
Chapitre IV : Discussions .....	26
Conclusion .....	29
Liste des références bibliographiques .....	30

## Liste des tableaux

---

Tableau I : Principales caractéristiques des huit bassins versants étudiés .....	10
Tableau II : Précipitations moyennes annuelles et lame d'eau écoulée (1971-2003) .....	20
Tableau III : Précipitations moyennes annuelles et déficits d'écoulement (1971-2003).....	23
Tableau IV : RMSE entre P SAFRAN et P VALERY et entre P SAFRAN et P désagrégée .....	24

## Liste des figures

---

Figure 1 : Organigramme du laboratoire LOTERR ( <a href="http://www.loterr.univ-lorraine.fr">www.loterr.univ-lorraine.fr</a> ).....	g
Figure 2 : Types de données utilisées dans le projet RECRET et période temporelle associée .....	2
Figure 3 : Relief et hydrographie du bassin versant de la Moselle (Lebaut et Gille, 2018).....	6
Figure 4 : a) Régime hydrologique de la Moselle à Hagondange (1960-2020) Source : Banque Hydro ; b) Diagramme ombro-thermique à la station de Metz-Frescaty (1971-2000) Source : Infoclimat .....	7
Figure 5: Lame d'eau écoulée dans le bassin versant de la Moselle (Lebaut et Gille, 2018) .....	7
Figure 6 : Précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de la Moselle (Partie française) (1971-2005) .....	8
Figure 7 : Localisation des huit bassins versants de l'étude.....	9
Figure 8 : Exemple de grille de répartition de la pluie tombée le 8 décembre 1976 par rapport à la pluviométrie du mois de décembre 1976 .....	16
Figure 9 : Schéma explicatif de la méthode de désagrégation des précipitations mensuelles aux précipitations journalières .....	16
Figure 10 : Nombre de postes pluviométriques par jour .....	17
Figure 11 : Localisation des postes pluviométriques disponibles dans la base de données et source associée .....	18
Figure 12 : Localisation des 28 postes pluviométriques de la base de données du LOTERR utilisés dans cette étude .....	19
Figure 13 : Précipitations annuelles de bassin versant issues de SAFRAN et de la spatialisation des précipitations journalières et mensuelles (1971-2003) a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt.....	21
Figure 14 : Corrélations entre les précipitations mensuelles de bassin versant issues de P VALERY m. et P VALERY j. a) la Moselle à Hauconcourt ; b) la Moselotte à Vagney .....	22
Figure 15 : Corrélations entre les lames d'eau moyennes annuelles .....	23
Figure 16 : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée à l'échelle journalière a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt.....	24
Figure 17 : Courbes de distribution de P SAFRAN et P désagrégée pour un réseau dégradé, à l'échelle journalière : a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt.....	25
Figure 18 : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée estimée pour un réseau dégradé, à l'échelle journalière sur : a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt.....	26

# Liste des annexes

---

Annexe A : Formations lithologiques dans le bassin de la Moselle

Annexe B : Paramétrage topographique à partir d'un modèle numérique d'élévation

Annexe C : Pluies moyennes estimées à partir de la méthode de VALERY (2010)

Annexe D : Précipitations moyennes annuelles

Annexe E : Cumuls Mensuels de P VALERY journalière vs. P VALERY mensuelles

Annexe F : Corrélations entre P SAFRAN et P VALERY à l'échelle journalière

Annexe G : Critères de Nash et Valeurs d'écarts

Annexe H : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée à l'échelle journalière

Annexe I : Courbes de distribution de P SAFRAN et de P désagrégée journalières estimées à partir de 25-20-15-10-5-3 ou 1 poste

Annexe J : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée journalières estimées à partir de 25-20-15-10-5-3 ou 1 poste

Annexe K : Crue d'avril 1983

Annexe L : Sécheresse d'août 2003



# Présentation du LOTERR

LOTERR est une unité de recherche en géographie et centre de production scientifique au service à la fois de la recherche universitaire et des acteurs de terrain. Le laboratoire LOTERR regroupe une trentaine d'enseignants-chercheurs, des ingénieurs et personnels de recherche et de formation et de chercheurs associés. Sa mission consiste à étudier les territoires dans leurs différentes dimensions : le cadre naturel, les caractéristiques paysagères et patrimoniales, la perception et l'identité des territoires. Son objectif est ainsi de fournir les bases de réflexion indispensables à toute opération d'aménagement ; qu'il s'agisse de l'implantation de nouvelles infrastructures, de la reconversion d'espaces modelés par d'anciennes activités, ou de nouvelles formes d'aménagement inspirées par le concept de développement durable.

Le LOTERR travaille sur trois axes de recherche (fig.1) : Eaux et milieux, Transitions paysagères et territoriales, et Transitions, acteurs et aménagement. Le travail réalisé lors de ce stage s'inscrit dans le premier axe « Eaux et milieux » dont les thèmes de recherche traitent le cycle de l'eau et ses interactions avec les milieux géographiques. Les travaux de cet axe consistent à développer les thématiques en relation avec les conséquences hydrologiques et sociétales du changement climatique, le transport et les bilans sédimentaires, et les risques hydriques.

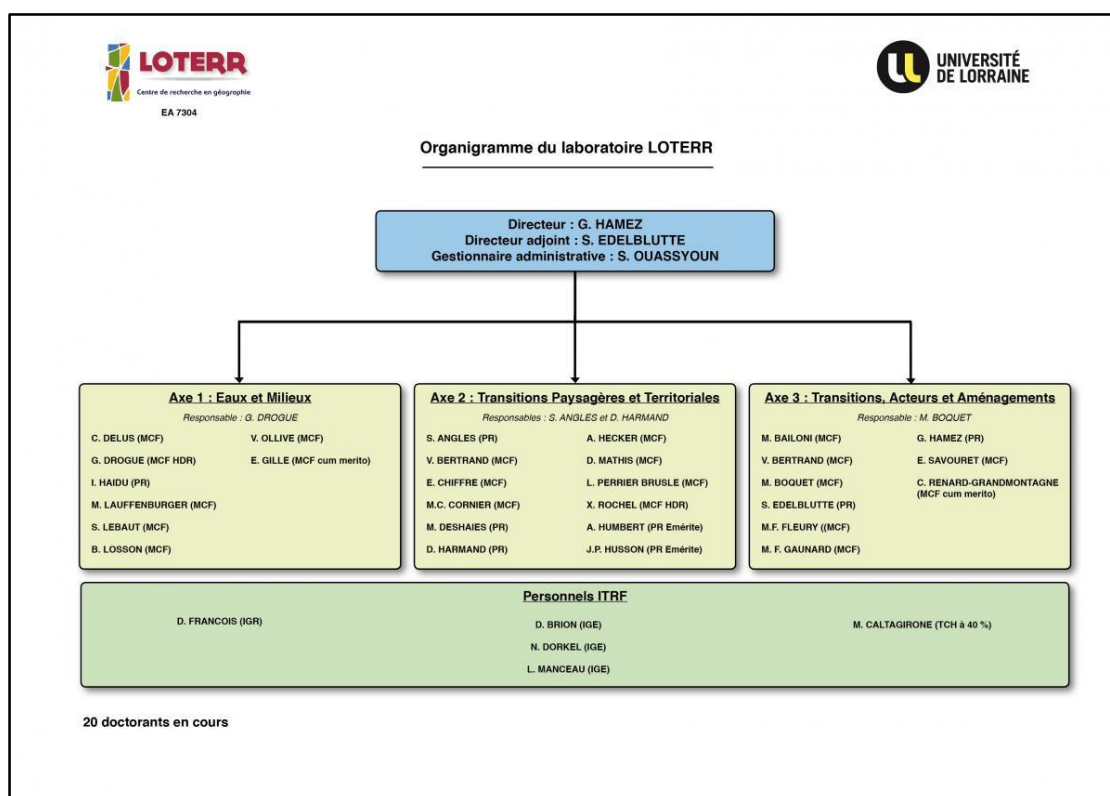


Figure 1 : Organigramme du laboratoire LOTERR ([www.loterr.univ-lorraine.fr](http://www.loterr.univ-lorraine.fr))

## Introduction

L'étude des extrêmes hydrologiques (crues et étiages) constitue un enjeu socio-environnemental majeur dans le cadre de la gestion de la ressource en eau et des risques qui lui sont associés (inondations et sécheresses). Or, le manque de profondeur historique des données représente l'une des grandes difficultés liées à l'analyse de ces épisodes extrêmes. Ainsi, le bassin versant de la Moselle ne fait pas exception à la règle et les chroniques de débits ne dépassent pas une cinquantaine d'années. Par contre, on dispose d'informations historiques qui permettent d'envisager un travail de reconstitution des épisodes passés. La valorisation de ces informations historiques paraît nécessaire dans la mesure où elles sont utiles aux gestionnaires puisqu'elles contribuent à une meilleure connaissance des événements extrêmes et participent au développement d'une culture du risque (Lang et al., 1998) grâce à leurs vertus pédagogiques (Cœur et al., 1999).

La problématique qui se pose donc concerne les différentes méthodes utilisées pour exploiter l'information historique dans la reconstitution des événements extrêmes, ainsi que la qualité des reconstitutions climatiques et hydroclimatologiques réalisées à partir des données historiques.

L'objectif de ce travail est de réaliser ainsi des reconstitutions des séries de précipitations à l'échelle journalière à partir des observations climatiques disponibles. Il servira par la suite à reconstruire les débits historiques permettant de réaliser un inventaire des événements hydrologiques extrêmes.

Afin d'atteindre ces objectifs, le présent document est composé de quatre parties ; la première partie aborde le contexte de l'étude et l'état d'art, la deuxième partie présente les matériels et méthodes utilisés pour l'estimation des précipitations, la troisième partie traite les résultats obtenus à partir des méthodes utilisées pour finir avec la quatrième partie destinée aux discussions et perspectives pour la suite du travail à mener. À la fin de ce rapport, une synthèse des résultats obtenus est établie.

# Chapitre I : Contexte de l'étude et état de l'art

## I.1) Contexte de l'étude et état de l'art

### I.1.1) Contexte du stage

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet de recherche RECRET (REconstitution des CRues et ETiages historiques dans le bassin versant de la Moselle) qui vise à établir l'inventaire des événements hydrologiques remarquables (crues et étiages) dans le bassin versant de la Moselle au cours des derniers siècles. Ce projet consiste à établir une chronologie des événements à partir d'archives instrumentales, documentaires et sédimentaires (fig.2). Il s'agit d'un projet pluridisciplinaire impliquant des géographes, historiens du climat, géochimistes. Un des objectifs de ce projet est de reconstituer à l'aide d'un modèle hydrologique pluie-débit des séries de débits à partir des données climatiques (précipitations et températures) qui présentent des chroniques plus anciennes (Volet 1 sur la figure 2). Les observations climatiques sont en effet disponibles en continu dès la fin du 18<sup>ème</sup> siècle et sont généralement consignées dans des documents papiers qui peuvent être consultés au sein de différents services d'archives. L'évaluation de la qualité des simulations sera proposée en se basant sur la capacité du modèle à reproduire les crues et étiages récents réellement mesurés, mais aussi à partir des sources documentaires et des archives sédimentaires collectées dans le cadre des volets 2 et 3 de l'étude.

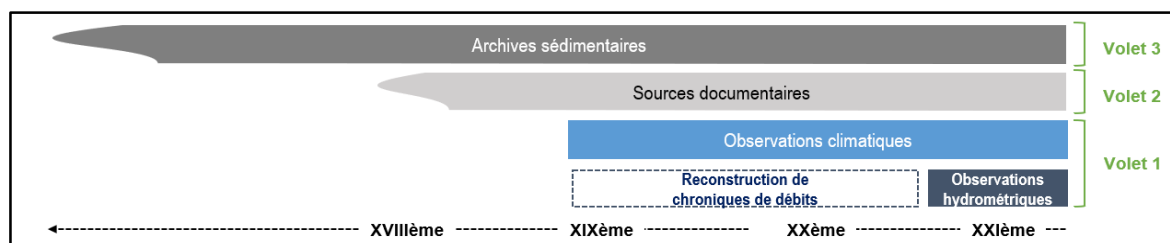


Figure 2 : Types de données utilisées dans le projet RECRET et période temporelle associée

L'objectif principal de ce stage est de reconstituer des séries de précipitations historiques à l'échelle journalière à partir des observations climatiques disponibles depuis le début de la période instrumentale. Ce travail servira par la suite à reconstruire des débits journaliers et s'inscrit ainsi dans le cadre du volet 1 du projet RECRET. Un premier travail réalisé par le LOTERR a permis de reconstituer des séries climatiques historiques (précipitations et températures) à l'échelle mensuelle. Cette première phase du projet a permis d'obtenir une base de données mensuelles qui contient au total 969 postes pluviométriques à partir desquels des grilles de précipitations spatialisées ont pu être réalisées. La méthode de spatialisation repose sur une interpolation et un gradient altitudinal recalculé pour chaque mois en fonction du réseau disponible. Des grilles de précipitations et températures spatialisées d'1 km sur 1 km ont été

réalisées pour chaque mois particulier, de janvier 1860 à décembre 2004. Ces grilles permettent le calcul de précipitations moyennes à l'échelle du bassin versant de la Moselle française (Delus et al., 2018). Pour permettre une évaluation relative de ces séries, les précipitations mensuelles ont été comparées à des reconstructions climatiques issues de différents travaux. Les précipitations issues de RECRET sont proches des observations et produisent une pluviométrie convergente avec celle issue d'autres travaux, et cohérente avec les valeurs régionales d'écoulement (Delus et al., 2019). Ces séries climatiques ont été utilisées pour reconstituer les débits mensuels et les épisodes de sécheresse qui ont touché le bassin versant de la Moselle depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle (Delus et al., 2018 ; François et al., 2019). L'échelle mensuelle n'est cependant ni suffisamment précise pour décrire tous les aspects liés aux étiages (François et al., 2019) ni adaptée à l'étude des crues. Le passage à l'échelle journalière paraît essentiel pour l'établissement de la base de données climatologiques et la modélisation. L'objectif de ce stage est de descendre à l'échelle journalière et réaliser une reconstruction climatique, et à termes hydroclimatologique.

### **I.1.2) Les reconstructions hydroclimatologiques**

Une des difficultés liées à l'analyse et à la connaissance des épisodes extrêmes (crues et étiages) réside dans le manque de profondeur historique des données. En France, les stations de mesures des débits des cours d'eau qui fonctionnent avant 1960 sont rares et l'essentiel du réseau a été mis en place dans les années 1970 (Lebecherel et al., 2015). L'identification et la caractérisation des événements extrêmes passés doit donc se baser sur la reconstruction de données hydroclimatologiques.

#### **I.1.2.a) Les reconstitutions climatiques**

Les données hydroclimatiques actuellement disponibles ne combinent pas une répartition spatiale et une longueur de disponibilité suffisantes (Caillouet, 2016). Ainsi, des reconstitutions climatiques sont réalisées pour pallier au manque de données historiques et permettre une analyse des climats passés à haute résolution spatiale (< 10 km) et temporelle (mensuelle ou journalière). Les méthodes de reconstructions reposent sur des observations climatologiques, pour la période récente, ou sur des données proxy si l'on souhaite remonter au-delà de la période instrumentale. Elles peuvent également s'appuyer sur des sources documentaires ou sur une combinaison de données instrumentales et proxy (Delus et al., 2019). A partir de ces méthodes, plusieurs travaux ont établi des reconstructions de précipitations et de températures dans différents pays et sur différentes échelles temporelles (Rodrigo et al., 1999 ; Pauling et al., 2006 ; Zhang et al., 2013 ; Dobrovolny et al., 2015 ; etc.).

Parmi les reconstitutions climatiques journalières, on peut citer la reconstruction SCOPE Climate (Spatially COherent Probabilistic Extension method) qui propose à l'échelle de la France des reconstitutions de précipitations journalières sur une grille de 8 km sur la période 1871-2012, à partir d'informations sur la circulation atmosphérique. La méthode SCOPE produit un ensemble de 25 chroniques météorologiques spatialement homogènes de précipitations, température et évapotranspiration (Caillouet, 2016 ; Caillouet et al., 2019). En s'appuyant sur les reconstitutions climatiques ensemblistes SCOPE Climate, la réanalyse météorologique journalière FYRE Climate (French hYdrometeorological Reanalysis Climate) a été appliquée sur la période 1871-2012. Elle est composée de 25 membres sur une grille de 8 km couvrant l'ensemble de la France. Cette réanalyse utilise des observations de précipitations et de température, discontinues en temps et en espace sur la période, adoptées aux reconstitutions SCOPE Climate par une méthode d'assimilation de données basée sur l'étape d'analyse d'un filtre de Kalman d'ensemble. Cette méthode est réalisée aux pas de temps journalier et annuel pour capter à la fois la variabilité d'un jour sur l'autre et les variations multi-décennales (Devers et al., 2019). On peut également citer le travail d'étude de variabilité hydroclimatique sur le bassin de la Durance qui a consisté en la reconstitution de séries climatiques à partir de données climatiques de grande échelle, combinées à des informations plus régionales, par une méthode appelée ANATEM (Kuentz, 2013 ; Kuentz et al., 2014).

#### **I.1.2.b) Reconstitutions hydroclimatologiques**

La reconstitution de longues séries de débits historiques permet d'étudier les évènements extrêmes historiques, d'analyser l'évolution de leur fréquence et de les repositionner dans une perspective historique. Les reconstitutions hydroclimatologiques peuvent être réalisées par approche pluie-débit ou par approche débit-débit.

Des séries de débits historiques peuvent en effet être obtenues à partir de reconstitutions climatiques utilisées en données d'entrée de modèles hydrologiques. La validation des débits reconstruits est généralement réalisée à partir de données locales ponctuellement disponibles. Les travaux cités dans la partie I.1.2.a ont ainsi permis d'établir des séries de débits historiques à partir des reconstitutions climatiques. A titre d'exemple, des chroniques de débits journaliers intitulées SCOPE Hydro ont été obtenues à partir des séries de SCOPE Climate utilisées comme forçage d'un modèle hydrologique sur un large échantillon de plus de 600 bassins versants français (Caouillet, 2016). La réanalyse hydrologique journalière FYRE Hydro utilise également les reconstitutions climatiques de la méthode FYRE Climate en entrée d'un modèle hydrologique conceptuel pour reconstruire des chroniques de débits ensemblistes depuis 1871 sur 661 bassins versants (Devers, 2019).

Pour ce qui est de la reconstitution des débits par approche simulative débit-débit, elle consiste à transférer directement l'information hydrologique disponible dans le voisinage d'un site à estimer en partant du postulat que le comportement hydrologique du bassin qu'il définit en amont de ce site est similaire à celui de ses voisins. Cela suppose également que la réponse hydrologique des bassins donneurs aux précipitations est similaire à celle du bassin receveur. Au pas de temps journalier, cette hypothèse est réaliste tant que les bassins sont géographiquement proches et de taille similaire (Droque et al., 2016 ; François et al., 2019).

## **I.2) Présentation de la zone d'étude**

### **I.2.1) Présentation générale du bassin versant de la Moselle**

La Moselle est une rivière du nord-est de la France, du Luxembourg et de l'ouest de l'Allemagne. D'une longueur totale de 560 km, elle est le principal affluent du Rhin confluant à Coblenche en Allemagne. Elle s'inscrit dans un bassin versant d'une superficie de 28 000 km<sup>2</sup> (fig.3) dont 11 400 km<sup>2</sup> en France (hors Sarre et Nied). Le cours français de la Moselle représente un linéaire de 300 km. La Moselle prend sa source dans les Vosges à Bussang (731 m), sur les flancs ouest du Ballon d'Alsace (1 247 m), et quitte le territoire français à Apach, à la frontière franco-germano-luxembourgeoise, à une altitude de 145 m (MEDDTL, 2011). Parmi ses affluents principaux, on trouve la Moselotte, le Madon, la Meurthe, l'Orne et la Seille.

#### **I.2.1.a) Relief**

Entre les Vosges et la frontière, le réseau hydrographique de la Moselle draine essentiellement le relief de cuesta du Plateau Lorrain. La pente de la Moselle, qui est supérieure à 1% dans le secteur de sa source et n'est plus que de 0,03 % à l'aval (fig.3). Les pentes des autres cours d'eau évoluent approximativement de la même manière. Le relief de l'amont du bassin s'inscrit dans le massif des Vosges qui culmine à 1424 m au Grand Ballon. Il est orienté nord-sud ; cette disposition le place perpendiculairement aux arrivées et perturbations océaniques conférant un gradient orographique très fort. Les aspects du climat du bassin versant sont détaillés dans la partie I.2.2.

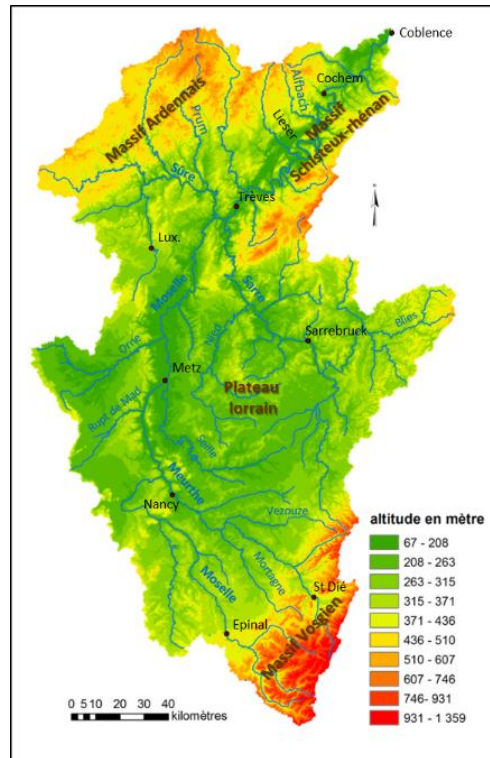


Figure 3 : Relief et hydrographie du bassin versant de la Moselle (Lebaut et Gille, 2018)

### I.2.1.b) Géologie

La carte géologique du bassin versant de la Moselle présentée dans l'annexe A met en évidence une grande variété de formations dans le bassin de la Moselle. A l'amont du bassin versant, les roches cristallines qui se trouvent dans les Hautes Vosges, sont granitiques, alors qu'en aval du bassin versant, les schistes concernent le massif schisteux rhénan. Les roches cristallines, les roches sédimentaires primaires dont le schiste est la composante dominante, et les schistes permien des montagnes de moyenne altitude sont des formations peu perméables, qui favorisent un écoulement direct en surface (CIPMS, 1998). Le bassin versant s'inscrit également dans des terrains perméables, notamment les calcaires des cuestas et les Grès Vosgiens et d'Ardenne qui constituent des réservoirs souterrains importants.

### I.2.1.c) Hydroclimatologie

Le régime hydrologique du bassin versant de la Moselle est de type pluvial – océanique (fig.4). Ce sont essentiellement les pluies qui sont à l'origine des écoulements (Voir partie I.2.2) de hautes eaux. Les basses eaux sont liées à une hausse des températures qui génèrent une augmentation des prélèvements évapotranspiratoires. Les hautes eaux couvrent l'ensemble de la saison froide et le maximum moyen mensuel est atteint en février, alors que la période des basses eaux caractérise la saison chaude et le minimum moyen mensuel se situe en août. La Moselle est caractérisée ainsi par un régime saisonnier fort irrégulier qui connaît des

modifications importantes dépendant des années et liées à la variabilité des précipitations (Frécaut, 1973).

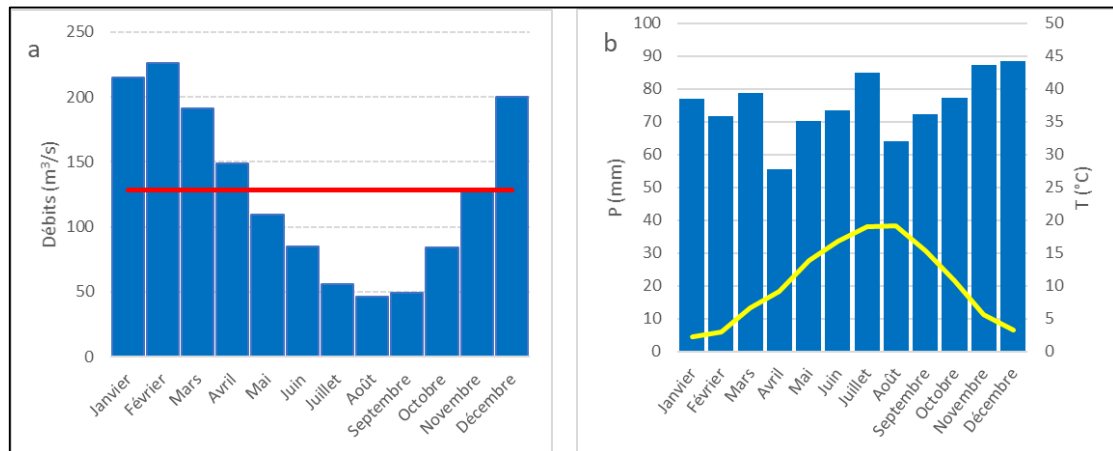


Figure 4 : a) Régime hydrologique de la Moselle à Hagondange (1960-2020) Source : Banque Hydro ; b) Diagramme ombro-thermique à la station de Metz-Frescaty (1971-2000) Source : Infoclimat

Le régime d'écoulement de la Moselle présente un caractère irrégulier spatialement (fig.5). Cette grande variabilité des écoulements dans le bassin versant est liée à l'importante variabilité spatiale de la pluie.

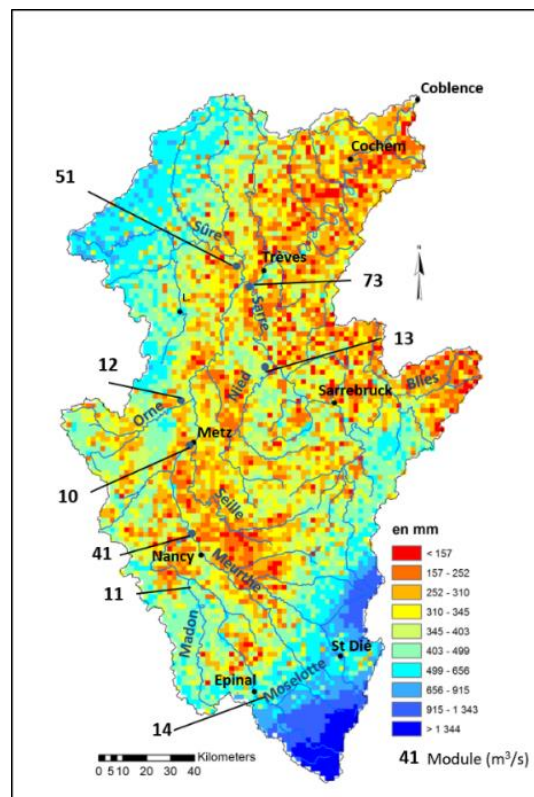
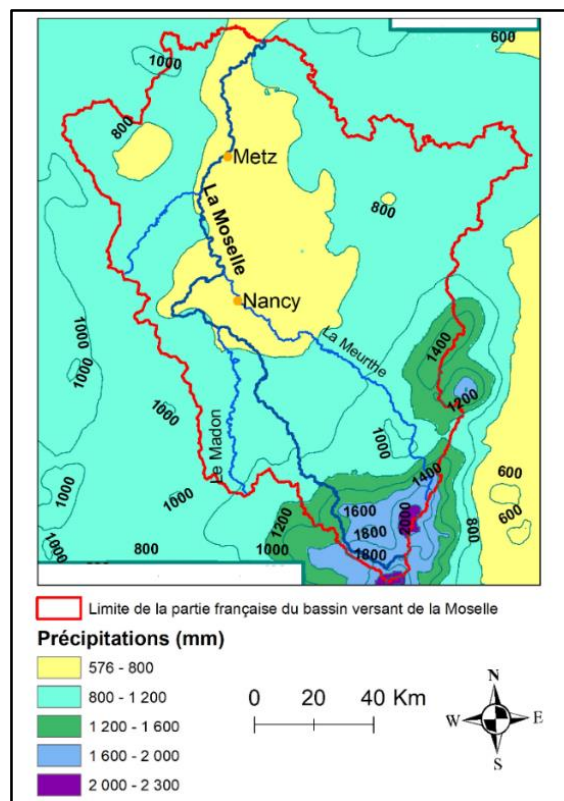


Figure 5: Lame d'eau écoulée dans le bassin versant de la Moselle (Lebaut et Gille, 2018)



### **I.2.2) Contexte climatique du bassin versant de la Moselle**

Le montant des précipitations sur le bassin total est égal à 903 mm (Lebaut, 2018) mais cette valeur moyenne masque d'importantes disparités spatiales. Dans le haut-bassin de la Moselle, sur les versants ouest des Vosges, les précipitations dépassent les 2000 mm (fig.6). On observe sur le massif des Vosges un fort gradient pluviométrique ; par exemple on passe, sur une distance d'un peu moins de 50 km, de 1080 mm à la station de Golbey (330 m d'altitude), à 1764 mm à Gerardmer (675 m) et plus de 2000 mm sur les sommets des Hautes-Vosges pour la période allant de 1971 à 2000 (Delus et al.,2019). En effet, la position des Vosges, première barrière au flux d'air occidental prédominant de l'océan, implique des différences dans les distributions spatiales et temporelles des précipitations (Minárová et al., 2017a). Ainsi, le fort gradient pluviométrique rend la spatialisation des précipitations particulièrement délicate sur le massif vosgien. Les précipitations seront d'autant plus difficiles à spatialiser dans un contexte historique pour lequel le nombre de poste peut être très limité.



*Figure 6 : Précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de la Moselle (Partie française) (1971-2005)*

Les fluctuations pluviométriques et thermiques sont entraînées par l'irrégularité du climat océanique liée à l'instabilité des types de temps. « L'étude des types de temps et de leur durée effective revêt ainsi le plus grand intérêt en climatologie océanique. Les types de temps perturbés d'origine maritime dominent en toutes saisons, mais leur durée moyenne est brève

(2,6 jours), tout comme celle des types de temps anticycloniques (2,5 jours) ». Les « types de temps à crues » et leur stabilité peu fréquente sont à l'origine d'épisodes pluvieux en saison froide et ainsi de séries d'averses génératrices de crues généralisées. Les types de temps anticycloniques continentaux sont responsables en saison froide des « grands hivers » caractérisés par des vagues de froid. La relative stabilité de ces types de temps entraînent lors de « grands étés » des déficits pluviométriques importants et une forte évapotranspiration (Frécaut, 1973).

### **I.2.3) Présentation des bassins tests**

La vérification de la validité des précipitations journalières reconstruites sera réalisée à partir des pluies moyennes journalières de bassins versants. Notre travail porte sur huit sous-bassins de la Moselle (fig.7) : la Moselle à Fresse-sur-Moselle, à Epinal et Hauconcourt, la Meurthe à Fraize et Malzéville, la Moselotte à Vagney, le Colon à Xaronval ainsi que le Madon à Pulligny. Les principales caractéristiques de ces bassins sont présentées dans le tableau I. L'objectif est ainsi de disposer de bassins versants de tailles différentes et situés dans des contextes hydroclimatologiques variés afin d'évaluer la validité de la méthode dans des contextes différents. La sélection de petits sous-bassins situés à l'amont du bassin versant de la Moselle se justifie aussi par un intérêt particulier accordé au massif des Vosges. Il apparaît intéressant d'évaluer plus particulièrement les estimations de la pluviométrie sur ce secteur amont.

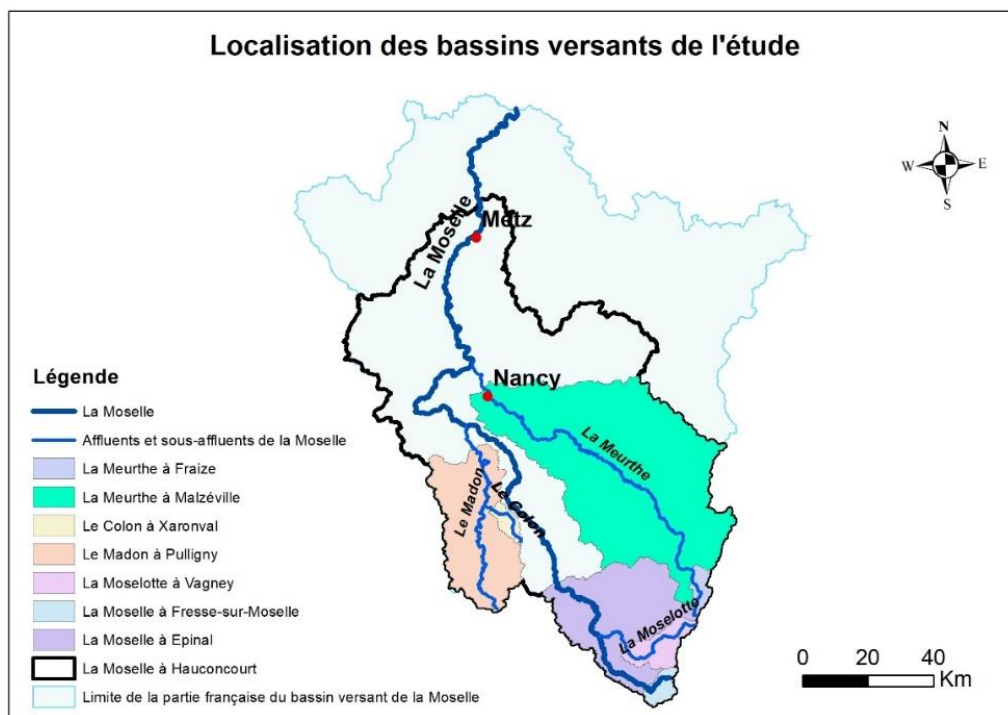


Figure 7 : Localisation des huit bassins versants de l'étude

Tableau I : Principales caractéristiques des huit bassins versants étudiés

Station hydrométrique	Code	Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Altitude moyenne (m)	Module (m <sup>3</sup> /s)	Lame d'eau écoulée (mm)
La Moselle à Fresse-sur-Moselle	A4020610	71	835	3.2	1432
La Moselotte à Vagney	A4140202	184	826	8.19	1409
La Moselle à Épinal	A4250640	1217	651	37.7	980
Le Colon à Xaronval	A5303010	62.1	332	0.721	367
Le Madon à Pulligny	A5431010	943	333	10.3	346
La Meurthe à Fraize	A6001010	67	897	1.96	923
La Meurthe à Malzéville	A6941020	2960	375	40.3	431
La Moselle à Hauconcourt	A7930610	9387	357	129	435

## Chapitre II : Matériels et méthodes

Dans ce chapitre, nous allons présenter la base de données de précipitations journalières historiques constituée à partir des archives climatiques, les méthodes d'estimation des pluies moyennes de bassins versants tests sur la période récente, puis sur la période historique. L'estimation est réalisée, pour la période récente, à partir des données de précipitations journalières pour réaliser des grilles de précipitations issues des méthodes de spatialisation et de désagrégation des pluies. En effet, la méthode de désagrégation ne sera testée que sur la période récente pour valider sa solidité.

### II.1) Constitution d'une base de données de précipitations journalières historiques

Un inventaire des observations pluviométriques disponibles à l'échelle journalière sur la zone d'étude a été réalisé. La collecte des données a porté sur les départements suivants : Ardennes, Haute-Marne, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Vosges, et Haute-Saône. Les données disponibles pour la partie allemande et luxembourgeoise du bassin versant de la Moselle et alentours ont également été recueillies. Les observations climatiques qui ont été utilisées proviennent de différentes sources présentées ci-dessous.

#### II.1.1) Les données de la Publiothèque (Météo France)

Météo-France a mis en place un portail internet, la Publiothèque, qui recense notamment toutes les données climatologiques de base, actuelles et anciennes (données d'observation in situ) disponibles pour la France. La Publiothèque permet de télécharger un grand nombre de paramètres atmosphériques et d'indices. Le portail permet l'accès aux séries homogénéisées et aux données brutes de l'ensemble des postes Météo-France. Il permet aussi d'accéder à un

service cartographique de recherche de l'ensemble des postes de mesures de Météo France et à des métadonnées (Chaix et Szerb, 2019). Au total, 172 postes pluviométriques ont été utilisés dans le cadre de cette étude. La série la plus ancienne débute en 1841 à la station de Metz les Recollets.

### **II.1.2) Les données du service météorologique allemand**

Le service météorologique allemand « Wetter und Klima » (<http://www.dwd.de>) fournit des services météorologiques et climatologiques. Il met à disposition en téléchargement libre les données des stations climatologiques allemandes. Au total, 234 postes pluviométriques ont été utilisés. La série la plus ancienne démarre en 1876, à la station de Karlsruhe dans le Bade Wurtemberg.

### **II.1.3) Les données du service météorologique luxembourgeois**

Le service météorologique luxembourgeois nous a fourni les données de 44 postes pluviométriques. La série la plus ancienne démarre en 1854 à la station de Luxembourg-Ville.

### **II.1.4) Les données de la base KNMI**

KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>) est une application Web pour l'analyse statistique des données climatiques qui met également à disposition des séries climatiques. Les données de 11 stations ont été utilisées, les enregistrements de la station la plus ancienne qui est celle de Vouziers débutent en 1890.

### **II.1.5) Les données du LOTERR**

Le laboratoire de géographie LOTERR dispose des données de certaines stations pluviométriques, sur la période allant de 1971 à 2003. Certaines séries complètent les données manquantes des stations extraites d'autres sources. Pour notre base de données, 28 postes pluviométriques ont été utilisés.

### **II.1.6) Organisation de la base de données des précipitations journalières**

Certaines séries sont temporellement discontinues et leurs données sont manquantes sur de longues périodes. De plus, aucune information sur les données manquantes n'est mentionnée. L'extraction des données de ces séries est donc longue et compliquée. Ainsi, pour faciliter l'extraction des séries de précipitations, des programmes sur Matlab ont été réalisés.

Les données ont été introduites dans une base de données rassemblant le nom de la station, ses coordonnées géographiques, son altitude, la source, la date du début et de la fin des données et les données de précipitations disponibles. Cette base de données est constituée d'un fichier global qui rassemble toutes les pluies, des fichiers individuels appelés par nom du poste pluviométrique pour chaque station et des fichiers contenant des métadonnées.

## **II.2) L'estimation des pluies moyennes de bassin versant à l'échelle journalière**

Dans cette partie, l'estimation des pluies moyennes de bassin versant sera réalisée à partir des pluies spatialisées issues des données SAFRAN, d'une méthode de spatialisation par interpolation appliquée aux données des postes pluviométriques de la base de données journalières, et d'une méthode de désagrégation des précipitations mensuelles.

### **II.2.1) La pluviométrie SAFRAN**

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface du sol. Le système SAFRAN a été initialement mis en place pour fournir des données atmosphériques aux modèles de prévision dans les zones montagneuses (Durand et al., 1993, 1999), puis étendu ensuite à l'ensemble du territoire français (Quintana-Segui et al., 2008 ; Vidal et al., 2010). SAFRAN calcule au sein de 608 zones climatologiquement homogènes en France des profils verticaux de température, d'humidité, de vitesse du vent, de couverture nuageuse toutes les 6 heures et de précipitations tous les jours. Toutes les variables analysées sont ensuite interpolées au pas de temps horaire et le rayonnement solaire est calculé en utilisant les profils de température, d'humidité et de couverture nuageuse. Finalement, les variables atmosphériques sont projetées sur une grille régulière de 8 km en coordonnées Lambert II étendu (Caillouet, 2016). La réanalyse Safran est disponible à partir du 1<sup>er</sup> août 1958 et est mise à jour annuellement. Dans le cadre de cette étude, les variables utilisées sont les précipitations totales journalières. A partir de cette grille, un calcul des précipitations moyennes journalières par bassin versant est réalisé. La pluviométrie SAFRAN constituera la pluie de référence pour notre travail.

### **II.2.2) Méthode de spatialisation des précipitations à partir de la méthode Valery (2010)**

Pour bien estimer les précipitations en tout point des bassins versants, nous avons opté pour une méthode de spatialisation des pluies journalières. La méthode utilisée provient des travaux de Valery (2010). La pluie en point cible est calculée de la manière suivante :

$$P_C(j) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} w_{Vi \rightarrow C} \times [P_{vi}(j) \times \exp[\beta_{altitude} \times (Z_C - Z_{vi})]]}{\sum_{i=1}^{N_p} w_{Vi \rightarrow C}} \quad \text{Équation 2.1}$$

Où  $P_C(j)$  est la précipitation estimée au point cible (mm),  $P_{vi}(j)$  est la précipitation mesurée au  $i^{\text{ème}}$  voisin le plus proche de C (mm),  $w_{Vi \rightarrow C}$  est le poids accordé à la station  $V_i$  (donnée par

l'Eq. 2.2),  $Z_C$  et  $Z_{Vi}$  sont les altitudes respectives de  $C$  et  $Vi$  (m) et  $\beta_{\text{altitude}}$  est le facteur de correction altitudinale de précipitation (m-1).

$$w_{cvi} = \frac{1}{(d_{cvi})^\alpha} = \frac{1}{(\sqrt{(x_C - x_{Vi})^2 + (y_C - y_{Vi})^2})^\alpha} \quad \text{Équation 2.2}$$

Où  $d_{cvi}$  est la distance euclidienne horizontale entre la cible  $C$  et la station  $Vi$  et  $\alpha$  ( $\geq 0$ ) est un paramètre donnant plus ou moins de poids aux stations les plus proches (plus  $\alpha$  est grand, plus les stations les plus proches de la cible auront un poids important par rapport aux plus éloignées). Nous verrons par la suite comment  $\alpha$  sera fixé pour chaque réseau de mesures.

Notre méthode diffère un peu, car nous n'utilisons pas uniquement des altitudes brutes mais plutôt des indices topographiques comme ceux élaborés pour la méthode AURELHY ou PLUVIA (Benichou et Le Breton, 1987 ; François et Humbert, 2000). À partir d'un MNT (SRTM 75 m reprojété en Lambert 93), on extrait des altitudes moyennes centrées ou excentrées par rapport à un site cible (annexe B).

Pour ce qui est de l'estimation des paramètres, une régression linéaire entre le log de la pluie journalière et chaque variable topographique est réalisée pour chaque jour. Si celle-ci est significative, le gradient est appliqué ( $\beta$  de l'équation 2.1). Pour chaque maille du MNT les variables topographiques ont été préalablement calculées. Les jours où il ne pleut pas ou quand le coefficient de régression n'est pas significatif, la valeur de  $\beta$  est égale à 0. Par validation croisée, on peut estimer les valeurs optimales de  $\alpha$  (équation 2.2) et  $N_p$  (équation 2-1).

Dans le cadre d'une précédente étude (PRESAGES), le laboratoire LOTERR avait mis au point une méthode d'estimation des pluies moyennes journalières de bassins versant à partir de 28 postes répartis dans le bassin Rhin-Meuse. C'est cette base de données que nous avons utilisée dans un premier temps pour la spatialisation des précipitations journalières. La densité des postes est très faible mais les données sont complètes et concernent la période 1971-2003. A partir de cette base, des grilles spatialisées ont été réalisées et permettent ainsi un calcul des pluies moyennes de bassin versant, qui représentent l'information qui sera utilisée par la suite dans la modélisation.

Cette méthode est similaire à la méthode de spatialisation qui a été utilisée pour les grilles mensuelles, sauf qu'elle se base sur des données mensuelles de précipitations (Delus et al., 2018).

### **II.2.3) Méthode de désagrégation des précipitations mensuelles**

L'estimation des pluies moyennes journalières de bassin versant exige suffisamment d'observations pluviométriques à l'échelle journalière. Or, sur la période historique, le réseau

de stations est beaucoup moins dense que pour les périodes récentes. On a par ailleurs pu constater que le nombre de stations fournissant des relevés mensuels était beaucoup plus important qu'à l'échelle journalière. La densité réduite du réseau au pas de temps journalier surtout pour les postes les plus anciens impacte ainsi la qualité de la spatialisation appliquée directement aux données journalières. Ainsi, plutôt qu'une spatialisation des pluies, nous proposons d'estimer les pluies journalières à partir de la désagrégation des données mensuelles, beaucoup plus nombreuses.

Plusieurs études (Biaou, 2000 ; Drogue et al.,2005 ; Cretat et al.,2011. Zhang, 2012 ; Thober et al.,2014 ...) utilisent des modèles de désagrégation pour résoudre les problèmes de passage de grandes échelles (spatiales et temporelles) aux plus petites. Les modèles de désagrégation ne sont pas des modèles exacts et fournissent des valeurs approximatives (Stedinger and Vogel, 1984 ; Koutsoyiannis 1992). On peut distinguer des modèles linéaires de désagrégation basés sur les calculs statistiques simples et des modèles plus complexes qui proposent des méthodes de désagrégation assez fine, jusqu'aux événements pluvieux en faisant appel à des calculs mathématiques approfondies (Biaou, 2000).

Plusieurs techniques de désagrégation des sorties de modèles du climat ont été mises au point par les hydro-climatologues et les climatologues travaillant à petite échelle. Parmi ces techniques, on trouve « la désagrégation statistique fondée sur des relations statistiques entre des variables statiques et dynamiques de l'atmosphère et la climatologie locale d'une région donnée, et la désagrégation dynamique fondée sur une stratégie de modèles emboîtés, les modèles de climat de grande échelle fournissant les conditions aux limites à des modèles méso-échelles » (Drogue et al.,2005).

En ce qui concerne les précipitations, il existe différentes méthodes pour la désagrégation de ces données, par exemple la technique introduite par Valencia et Schaake en 1973 et utilisée par Tao et Delleur en 1976 pour désagréger les pluies annuelles en pluies mensuelles. On peut citer également la méthode de désagrégation temporelle stochastique de champs de précipitations mensuels aux champs quotidiens en utilisant des fonctions de distribution stationnaires qui décrivent la répartition des précipitations sur plusieurs échelles temporelles (par exemple à l'échelle hebdomadaire). En outre, la méthode prend en considération l'intensité et la covariance spatiale des précipitations dans la procédure de désagrégation, mais ne nécessite aucune hypothèse sur la relation temporelle et l'isotropie spatiale des champs de précipitations (Thober et al.,2014).

Dans le cadre de notre travail, une méthode expérimentale est proposée pour le passage des données de précipitations mensuelles aux précipitations journalières. Nous proposons

d'utiliser les grilles de précipitations mensuelles, déjà disponibles de 1871 à 2018, pour en déduire des grilles journalières à partir de la répartition des pluies dans le mois. Ce choix provient du constat qu'on dispose davantage de données météorologiques historiques mensuelles que journalières ; la spatialisation des pluies sur la période historique à partir des données journalières ne serait pas envisageable avec très peu de postes. De plus, les grilles mensuelles présentent des résultats convergents et cohérents avec les valeurs d'écoulement, elles se basent sur un nombre important de postes, et paraissent donc fiables. On souhaite donc valoriser cette spatialisation relativement précise des précipitations mensuelles pour réaliser des grilles journalières. La méthode proposée est testée sur le même réseau pluviométrique que pour la spatialisation journalière (les 28 postes du LOTERR) et sur la période récente allant de 1971 à 2003 afin de tester la validité de la démarche et vérifier l'impact d'un réseau dégradé sur l'estimation des pluies moyennes de bassin versant.

Notre méthode consiste à calculer la proportion de la pluie journalière par rapport au cumul mensuel pour chacun des 28 postes. Les données de répartition de la pluie dans le mois sont ensuite interpolées par la méthode inverse distance dans laquelle pour un site à estimer on utilise la distance avec les postes du voisinage. La formulation mathématique est la suivante :

$$PR_C(j) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} w_{Vi \rightarrow c} \times [PR_{Vi}(j)]}{\sum_{i=1}^{N_p} w_{Vi \rightarrow c}} \quad \text{Équation 2.3}$$

Où  $PR_C(j)$  est la proportion de la pluie journalière estimée au point cible (mm),  $PR_{Vi}(j)$  est la proportion de la pluie journalière par rapport au cumul mensuel calculée au  $i^{\text{ème}}$  voisin le plus proche de C (mm),  $w_{Vi \rightarrow c}$  est le poids accordé à la station  $V_i$  (donnée par l'Eq. 2.2).

Cette interpolation permet de réaliser pour chaque jour des grilles de répartition de la pluie dans le mois (fig.8).



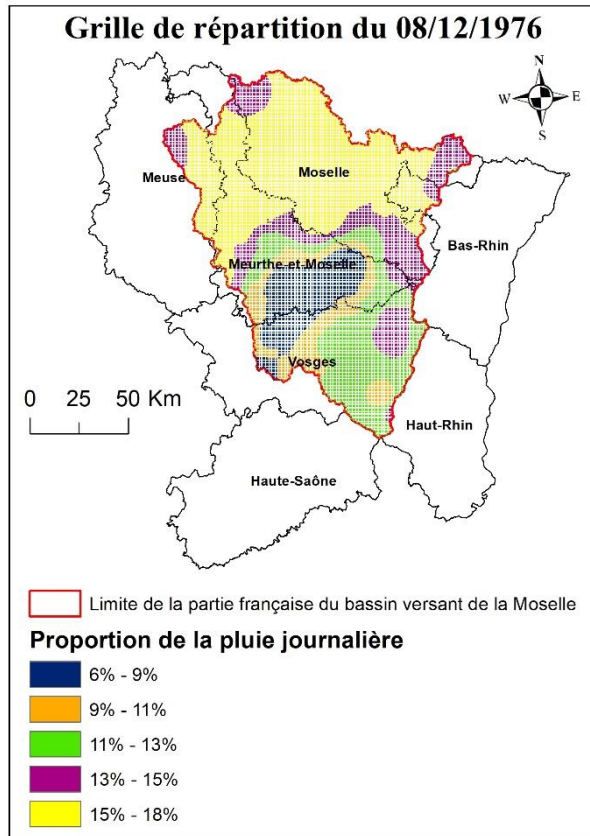


Figure 8 : Exemple de grille de répartition de la pluie tombée le 8 décembre 1976 par rapport à la pluviométrie du mois de décembre 1976

Les grilles de répartition de la pluie sont ensuite multipliées par les grilles mensuelles de même taille pour obtenir au final des grilles journalières de précipitations et par la suite les pluies moyennes journalières des huit bassins versants (fig. 9).

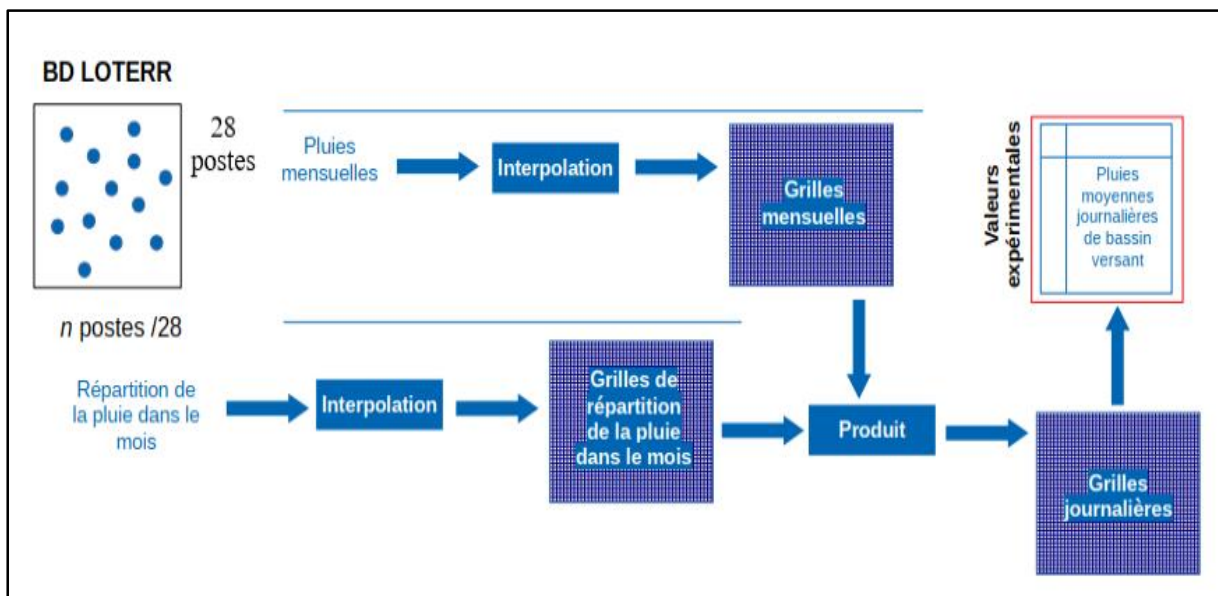


Figure 9 : Schéma explicatif de la méthode de désagrégation des précipitations mensuelles aux précipitations journalières

## Chapitre III : Résultats

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter la base de données climatique historique pour aborder ensuite l'estimation des pluies moyennes de bassin versant par les séries SAFRAN, la méthode de spatialisation et la méthode de désagrégation des précipitations mensuelles aux précipitations journalières. Nous allons également réaliser des comparaisons entre les données issues des différentes méthodes.

### III.1) Présentation de la base de données des précipitations journalières

#### III.1.1) La base de données journalières historiques

L'ensemble des observations pluviométriques inventoriées a été introduit dans une base de données qui contient au total 489 postes pluviométriques (fig.11), soit deux fois moins que le réseau disponible en mensuel. La station la plus ancienne est celle de Metz les Recollets, dont les enregistrements débutent en 1841. La plus longue chronique de précipitations est celle de Karlsruhe, qui fonctionne en continu depuis 1876 jusqu'en 2008. La Figure 10 montre une augmentation de la densité du réseau de mesures à partir du début du 20e siècle, avec toutefois une diminution des observations pendant la période des deux guerres mondiales.

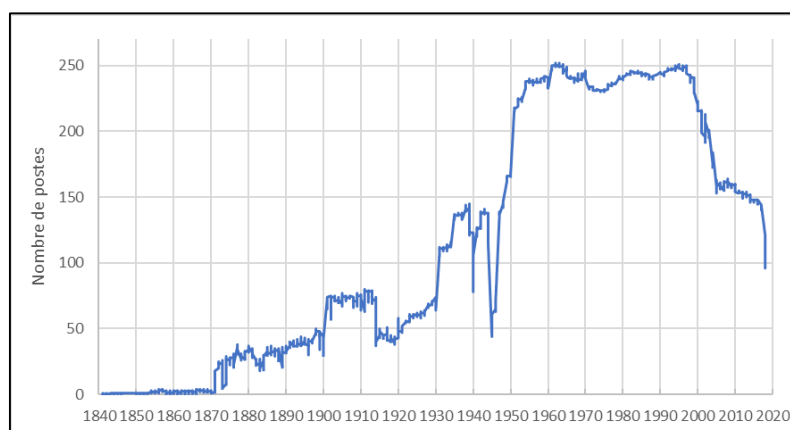


Figure 10 : Nombre de postes pluviométriques par jour

Chaque station a été localisée à partir des informations disponibles (fig.11), en général le nom de la station et les coordonnées géographiques. La précision de l'emplacement de chaque poste dépend des métadonnées disponibles. Les précipitations journalières de cette base de données n'ont pas été critiquées car cela nécessiterait d'avoir de longues séries de référence (Delus et al, 2018).

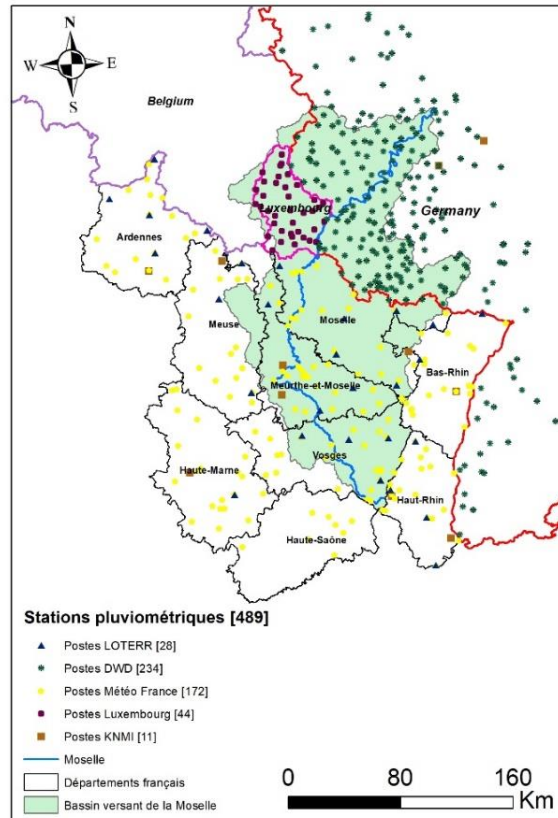


Figure 11 : Localisation des postes pluviométriques disponibles dans la base de données et source associée

Cette base de données sera utilisée ultérieurement pour établir des grilles de précipitations sur la période historique afin d'estimer des pluies moyennes de bassin versant. Pour le moment, l'objectif est d'évaluer la validité des méthodes d'estimation de pluie journalière qui seront appliquées à cette base de données historiques.

### III.1.2) Réseau pluviométrique et période de référence utilisés

L'ensemble des méthodes testées dans le cadre de ce travail repose sur le même réseau pluviométrique, l'objectif étant de ne pas introduire de biais dans les pluies moyennes qui serait lié à une modification du réseau. Nous utilisons ainsi les données provenant des 28 postes de la base de données du LOTERR. Ces stations ont l'avantage de disposer de chroniques complètes sur la période 1971-2003 et sont localisées sur la figure 12. Les méthodes sont testées sur cette période sans lacune (1971-2003) et pourront être comparées à la pluviométrie SAFRAN. Il s'agit donc :

- De la pluviométrie journalière issue des données de précipitations journalières spatialisées à partir de la méthode proposée par Valery (2010), que nous appellerons : « P VALERY j. » ;

- De la pluviométrie mensuelle issue des données de précipitations mensuelles spatialisées à partir de la méthode proposée par Valery (2010), que nous appellerons : « P VALERY m. » ;

- De la pluviométrie journalière issue de la désagrégation des pluies mensuelles, que nous appellerons « P désagrégée ».

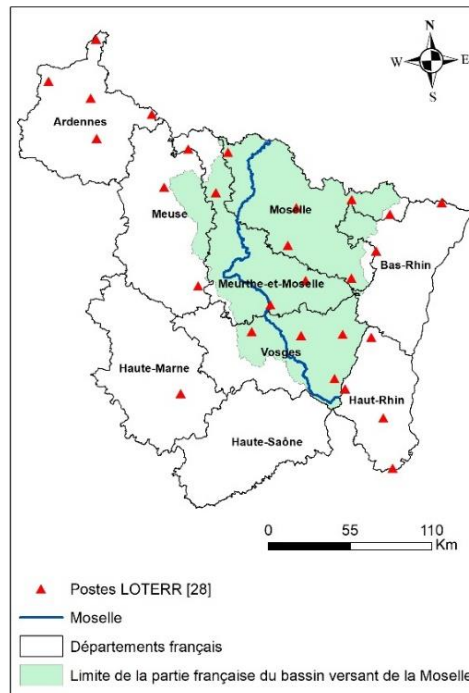


Figure 12 : Localisation des 28 postes pluviométriques de la base de données du LOTERR utilisés dans cette étude

### III.2) Précipitations moyennes journalières des bassins versants estimées à partir de la méthode de spatialisation des pluies journalières

L'estimation de la pluie moyenne journalière des bassins versants a été, dans un premier temps, réalisée à partir de la spatialisation des données journalières. S'il s'agit de la démarche de la plus intuitive, la spatialisation journalière présente des difficultés.

#### III.2.1) Paramétrisation de la méthode de spatialisation

La méthode de spatialisation s'appuie sur deux paramètres, exposant de la distance  $\alpha$  et nombre de voisins  $N_p$ , dont l'impact sur l'estimation des pluies moyennes journalières a été testé (annexe C). On constate que les bassins vosgiens sont les plus sensibles à la variation de ces paramètres. En effet, on dispose de trop peu de stations dans le massif et un voisinage englobant des stations du Plateau Lorrain entraîne une sous-estimation de la pluviométrie moyenne. Dans tous les cas, même avec les paramètres qui favorisent les stations les plus proches, nous montrons plus loin que la pluviométrie reste sous-estimée dans le bassin amont

de la Moselle et nécessiterait un réseau pluviométrique plus dense dans les parties les plus arrosées des Vosges. Les valeurs retenues des paramètres sont  $\alpha=2$  et  $N_p=4$  (choix médian).

### **III.2.2) Comparaison des pluies moyennes de bassin versant issues des différentes méthodes**

La pluie spatialisée à partir des données de précipitations journalières a été comparée à la pluviométrie SAFRAN et à celle issue de la spatialisation des données mensuelles, pour laquelle on ne dispose donc que de données à l'échelle mensuelle. L'évaluation des pluies moyennes estimées à partir des différentes méthodes peut s'appuyer sur le bilan annuel de l'eau et la vraisemblance des valeurs de déficit d'écoulement déduites de la pluviométrie.

La comparaison entre les séries de précipitations moyennes annuelles (tableau II) et les séries de précipitations annuelles (fig. 13 et annexe D) montre que :

- Les trois méthodes présentent des résultats proches et vraisemblables (déficit d'écoulement entre 537 mm et 582 mm) pour les bassins du Colon à Xaronval, du Madon à Pulligny et de la Moselle à Hauconcourt ;

- Pour les bassins des Hautes Vosges, à savoir la Moselle à Fresse-sur-Moselle, la Moselotte à Vagney et la Moselle à Epinal, les méthodes sous-estiment la pluviométrie et le déficit d'écoulement et présentent des fluctuations plus singulières.

- Sur le bassin de la Meurthe à Malzéville, la pluviométrie SAFRAN est supérieure aux autres méthodes. Les séries de SAFRAN présentent en effet des biais humides sur les bassins de la Meurthe (surestimation) et des biais secs sur la Moselle amont (sous-estimation) (Droque et al., 2012).

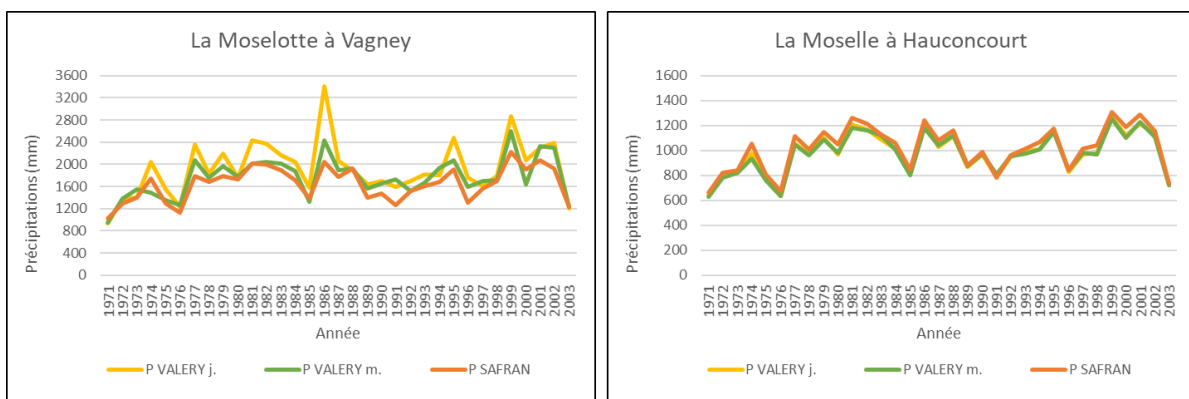
*Tableau II : Précipitations moyennes annuelles et lame d'eau écoulée (1971-2003)*

*Les valeurs en italique représentent les déficits d'écoulements calculés à partir des précipitations moyennes annuelles.*

<b>Bassin versant</b>	<i>P SAFRAN (mm)</i>	<i>P Valery j. (mm)</i>	<i>P Valery m. (mm)</i>	<i>Lame d'eau écoulée (mm)</i>
Moselle à Fresse-sur-Moselle	1565 (122)	1756 (313)	1703 (260)	1443
Moselotte à Vagney	1650 (244)	1921 (515)	1768 (362)	1406
Moselle à Epinal	1501 (506)	1443 (448)	1407 (412)	995
Colon à Xaronval	950 (582)	906 (538)	928 (560)	368
Madon à Pulligny	922 (571)	923 (572)	938 (587)	351
Meurthe à Fraize	1669 (670)	1720 (721)	1910 (911)	999
Meurthe à Malzéville	1101 (689)	1012 (580)	1007 (575)	412
Moselle à Hauconcourt	1019 (580)	981 (542)	976 (537)	439

La méthode de spatialisation fondée sur les pluies journalières spatialisées « P Valery j » présente, en moyenne, des résultats plus cohérents en terme de déficit d'écoulement que les valeurs issues de SAFRAN dans les Hautes Vosges, même si les précipitations restent sous-estimées sur la Moselle à Fresse. La méthode de spatialisation à partir des données mensuelles « P Valery m » surestime fortement la lame d'eau précipitée annuelle moyenne dans le bassin de la Meurthe à Fraize, le déficit d'écoulement déduit étant égal à 911 mm ce qui est trop loin de valeurs de la réalité, mais semble cohérente sur les autres bassins.

La figure 13.b présente les séries pluviométriques annuelles de la Moselle à Hauconcourt, assez proches quelle que soit la méthode considérée, et celles de la Moselotte à Vagney (fig.13.a), plus disparates. On constate également sur cette figure que pour l'année 1986, les pluies journalières spatialisées surestiment fortement la valeur du cumul annuel pour les bassins du massif vosgien. Cette valeur extrême peut s'expliquer par une donnée douteuse dans l'un des postes utilisé pour la méthode de spatialisation. On constate également pour le bassin de la Moselotte, et c'est le cas d'une manière générale sur les bassins des Hautes Vosges (annexe D), des écarts importants entre les pluies spatialisées à partir des données journalières et les pluies spatialisées à partir des données mensuelles.



*Figure 13 : Précipitations annuelles de bassin versant issues de SAFRAN et de la spatialisation des précipitations journalières et mensuelles (1971-2003) a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt*

La corrélation entre les précipitations mensuelles issues de ces deux méthodes (annexe E) confirme ce constat. Des écarts très importants s'affichent entre les pluies obtenues à partir de la spatialisation des pluies journalières et celles issues de la spatialisation des données mensuelles pour les bassins des Hautes Vosges (exemple pour la Moselotte, fig.14.b). Or, ces deux pluviométries reposent sur la même méthode et sur le même réseau de stations ; la seule différence c'est l'échelle des données spatialisées. Pour ce qui est des autres bassins, les écarts

sont moins importants et les résultats sont à peu près analogues (exemple pour la Moselle à Hauconcourt, fig.14.a).

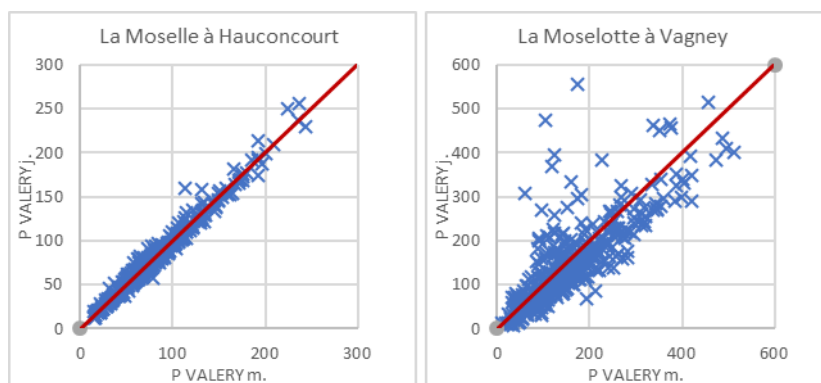


Figure 14 : Corrélations entre les précipitations mensuelles de bassin versant issues de  $P$  VALERY m. et  $P$  VALERY j. a) la Moselle à Hauconcourt ; b) la Moselotte à Vagney

A l'échelle journalière, les corrélations entre les pluies issues de SAFRAN et la pluie spatialisée à partir des données journalières (annexe F) sont bonnes pour les bassins versants du Colon à Xaronval, du Madon à Pulligny, de la Moselle à Hauconcourt et de la Meurthe à Malzéville ; le coefficient de corrélation linéaire est supérieur à 0,75. Pour les bassins situés dans les Hautes Vosges, les précipitations spatialisées présentent des valeurs parfois très éloignées de SAFRAN et des coefficients de corrélation faibles.

D'après ces comparaisons à différentes échelles temporelles, il s'avère que la spatialisation à partir des données journalières et pour un réseau pluviométrique limité n'est pas satisfaisante et présente des résultats douteux pour certains bassins. Cette difficulté à spatialiser des pluies journalières à partir d'un réseau restreint justifie, dans une perspective d'application à des données historiques, la recherche d'une autre méthode pour l'estimation des pluies moyennes de bassins versants.

### III.3) Précipitations moyennes journalières des bassins versants estimées à partir de la désagrégation des précipitations mensuelles

Dans cette partie, nous allons présenter les pluies moyennes journalières de bassin versant issues de la méthode de désagrégation des pluies mensuelles. Cette pluviométrie repose donc sur le produit des grilles de précipitations mensuelles spatialisées et des grilles de la répartition des pluies dans le mois, issues des données journalières. Les grilles de répartition de la pluie dans le mois sont réalisées dans un premier temps à partir des 28 postes, puis à partir d'un réseau dégradé (25-20-15-10-5-3 ou 1 postes). Malgré l'existence de biais connus, les pluies moyennes issues de SAFRAN sont utilisées comme pluie de référence pour comparer et valider la méthode de désagrégation.

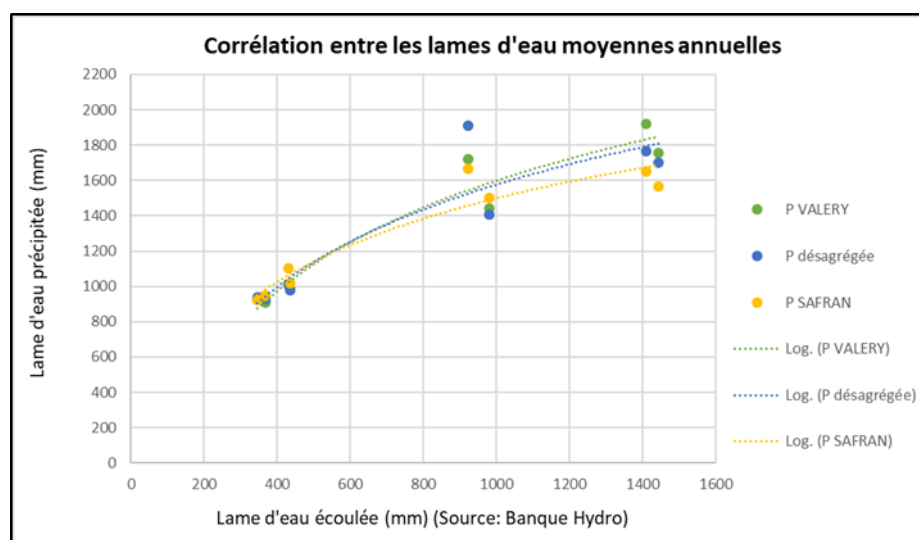
### III.3.1) Pluie journalière estimée à partir des 28 postes

Les précipitations moyennes annuelles estimées par la méthode de désagrégation et à partir des 28 postes pluviométriques sont présentées dans le tableau III. La figure 15 résume le tableau III et présente la corrélation des lames d'eau moyennes annuelles précipitées avec les lames d'eau moyennes écoulées pour vérifier la vraisemblance de nos résultats.

*Tableau III : Précipitations moyennes annuelles et déficits d'écoulement (1971-2003)*

*Les valeurs en italique représentent les déficits d'écoulements calculés à partir des précipitations moyennes annuelles.*

Bassin versant	<i>P SAFRAN (mm)</i>	<i>P Valery j. (mm)</i>	<i>P désagrégée</i>	<i>Lame d'eau écoulée (mm)</i>
Moselle à Fresse-sur-Moselle	1565 (122)	1756 (313)	1703 (260)	1443
Moselotte à Vagney	1650 (244)	1921 (515)	1768 (362)	1406
Moselle à Epinal	1501 (506)	1443 (448)	1407 (412)	995
Colon à Xaronval	950 (582)	906 (538)	928 (560)	368
Madon à Pulligny	922 (571)	923 (572)	937 (586)	351
Meurthe à Fraize	1669 (670)	1720 (721)	1910 (911)	999
Meurthe à Malzéville	1101 (689)	1012 (580)	1007 (575)	412
Moselle à Hauconcourt	1019 (580)	981 (542)	976 (537)	439



*Figure 15 : Corrélation entre les lames d'eau moyennes annuelles*

A l'échelle interannuelle, comme pour les autres méthodes, la désagrégation sous-estime la pluviométrie dans les Vosges et surestime fortement la pluviométrie et le déficit d'écoulement pour la Meurthe à Fraize.

Pour vérifier la validité de la méthode de désagrégation, une comparaison est établie avec SAFRAN et avec les pluies spatialisées à partir des données journalières (les pluies spatialisées à partir des données mensuelles étant utilisées dans le calcul des pluies désagrégées elles ne sont pas utilisées dans la comparaison). Les valeurs de Nash arithmétique et l'écart



entre les cumuls annuels sont présentées dans l'annexe G. Le critère de Nash est calculé à partir des données des pluies moyennes journalières. On constate d'après le tableau présenté dans l'annexe G que les valeurs de Nash les plus faibles entre « P désagrégée » et « P VALERY j » et entre « P désagrégée » et « P SAFRAN » et les écarts les plus élevés sont enregistrés dans le secteur amont de la Moselle, alors que les valeurs de Nash entre la pluie désagrégée et « P SAFRAN » et « P VALERY j » sont assez élevés pour le secteur aval de la Moselle (supérieurs à 85%).

La corrélation entre « P SAFRAN » et « P désagrégée » est réalisée également à l'échelle journalière (fig.16). Les pluies journalières désagrégées sont proches des pluies de SAFRAN et présentent des coefficients de corrélation élevés (supérieurs à 0.75) pour tous les bassins versants, mais une dispersion plus importante sur les bassins des Hautes Vosges.

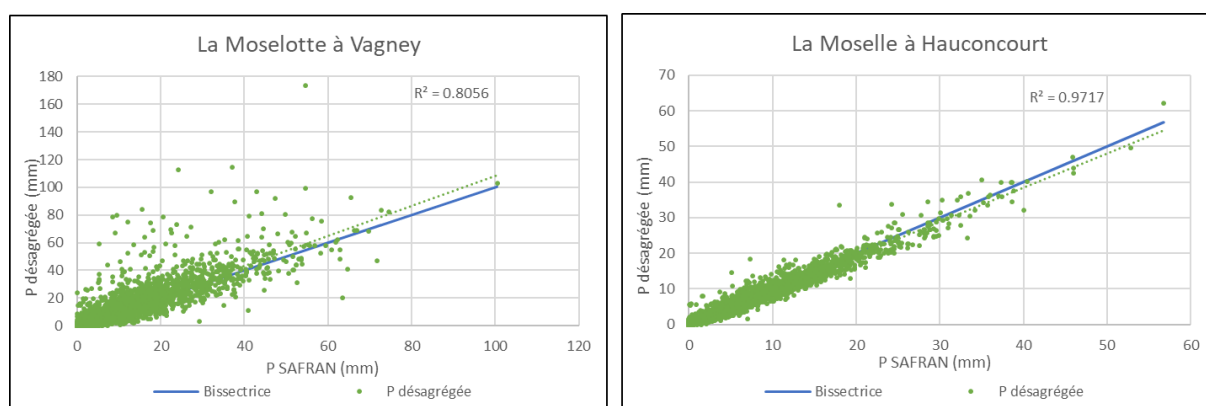


Figure 16 : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée à l'échelle journalière a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt

Les graphiques de corrélation présentés dans la figure 16 et l'annexe H montrent de meilleurs résultats que ceux issus de la corrélation entre « P VALERY j » et « P SAFRAN ». Ce constat est confirmé par les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) présentées dans le tableau IV.

Tableau IV : RMSE entre P SAFRAN et P VALERY et entre P SAFRAN et P désagrégée

BASSIN VERSANT	RMSE P SAFRAN / P VALERY	RMSE P SAFRAN / P désagrégée
Moselle à Fresse-sur-Moselle	10.83	4.39
Moselotte à Vagney	13.59	4.34
Moselle à Epinal	6.02	2.44
Colon à Xaronval	2.30	1.82
Madon à Pulligny	1.82	1.51
Meurthe à Fraize	6.49	4.25
Meurthe à Malzéville	1.14	1.18
Moselle à Hauconcourt	1.21	1.32

D'après les résultats du tableau IV, les pluies désagrégées sont plus proches de SAFRAN que celles issues de la spatialisation. On conclut qu'en désagrégant la pluie mensuelle, on aboutit à de meilleures estimations de pluies journalières qu'avec la pluie journalière spatialisée.

Dans une perspective de transposition de la méthode à la période historique, il est intéressant d'évaluer l'impact d'un réseau plus réduit sur l'estimation des pluies journalières de bassin versant.

### III.3.2) Pluie estimée à partir d'un réseau dégradé

Pour vérifier l'impact du réseau sur la qualité de l'estimation des pluies journalières, le réseau de 28 postes a été dégradé et la pluie calculée à partir de 25, 20, 15, 10, 5, 3 et 1 poste. Pour ces différents scénarios, le choix des postes à prendre en considération est établi au hasard pour 10 échantillons différents.

Les courbes de distribution et les graphiques de corrélation entre les pluies moyennes journalières désagrégées estimées à partir de 25, 20, 15, 10, 5, 3 ou 1 poste et les pluies SAFRAN, au pas de temps journalier, sont présentés en annexes I et J. Ces courbes et graphiques représentent la moyenne des 10 échantillons pris pour chaque scénario.

Pour les petits bassins versants, les résultats obtenus montrent que la dégradation du nombre de postes a un impact modéré sur la dispersion du nuage de points. La diminution du nombre de postes semble toutefois faire baisser la pluie journalière. Pour les bassins versants de grande taille, les pluies estimées à partir d'un nombre élevé de postes présentent des courbes de distribution (fig.17) proches de P SAFRAN et des coefficients de corrélation élevés (fig.18). La qualité des estimations diminue ainsi avec un réseau réduit, à l'exception de la Moselotte (fig.18.a).

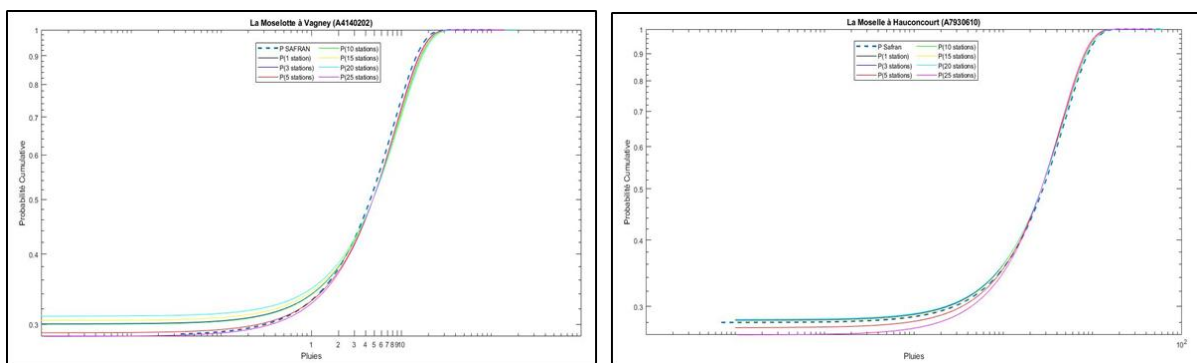


Figure 17 : Courbes de distribution de P SAFRAN et P désagrégée pour un réseau dégradé, à l'échelle journalière : a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt

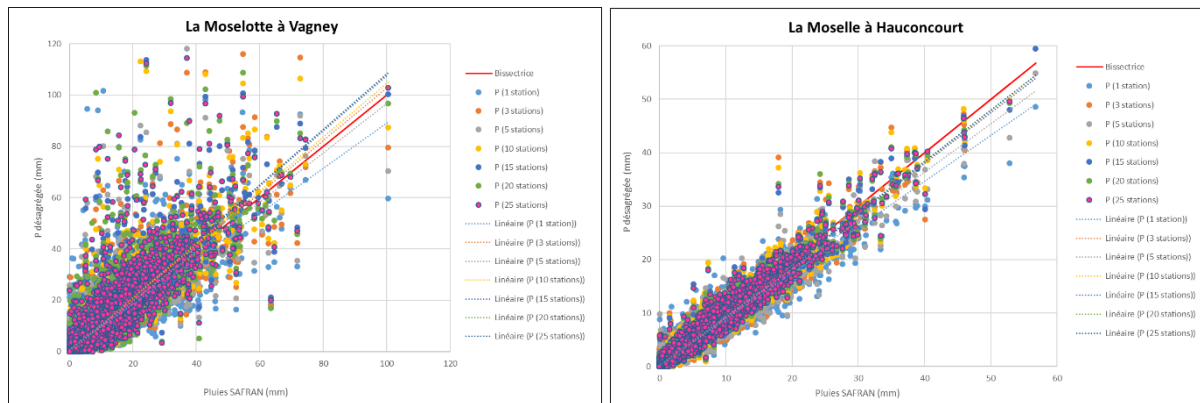


Figure 18 : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée estimée pour un réseau dégradé, à l'échelle journalière sur : a) la Moselotte à Vagney ; b) la Moselle à Hauconcourt

Les courbes de distribution et les courbes de corrélation à l'échelle journalière ne permettent pas de vérifier clairement l'impact de la dégradation du réseau sur l'estimation des pluies moyennes. Nous proposons de descendre à l'échelle des événements. Ainsi, on a choisi de vérifier cet impact pour deux événements : l'évènement de la crue d'avril 1983 et l'évènement de la sécheresse du mois d'août 2003. Les figures présentées en annexes K et L illustrent l'influence du nombre de postes sur l'estimation des pluies moyennes et donc sur la représentation des événements de crues ou de sécheresse.

D'une manière générale, les estimations sont bonnes pour la représentation de la crue d'avril 1983, on enregistre un écart de 5 mm entre les différents scénarios présentés pour un épisode de 30 mm dans le bassin de la Moselle à Hauconcourt. Quel que soit le scénario, les pluies ne sont pas très éloignées de P SAFRAN. En ce qui concerne la sécheresse d'août 2003, la pluviométrie issue des différents scénarios est proche de SAFRAN sur la Moselle à Hauconcourt mais elle est contrastée sur la Moselle à Fresse-sur-Moselle.

Il serait ainsi intéressant de déterminer dans quelle mesure les scénarios pluviométriques génèrent des différences dans les débits simulés et vérifier la sensibilité du modèle pluie-débit aux écarts entre les différents scénarios.

## Chapitre IV : Discussions

Ce travail met en évidence la difficulté à estimer les pluies moyennes journalières sur la zone d'étude. En effet, quelle que soit la pluviométrie considérée, certaines valeurs de déficit d'écoulement paraissent peu probantes. L'évaluation des méthodes est également difficile car on ne dispose pas de pluviométrie de référence sur la période récente. Les données SAFRAN, fournies par Météo France, sont elles-mêmes biaisées sur le massif des Vosges, soulignant toute

la difficulté à estimer les précipitations sur la zone étudiée. Aussi, l'estimation des pluies moyennes journalières de bassin versant sera encore plus délicate pour la période historique pour laquelle la densité du réseau diminue par rapport aux périodes récentes.

C'est justement dans cette perspective de transposition de la méthode à une période historique, pour laquelle le réseau peut être très limité, que la spatialisation des pluies a été réalisée à partir d'un faible nombre de stations (28 postes pour 76 700 km<sup>2</sup>). En effet, la base de données journalières historique contient peu de données pour certaines périodes ; à titre d'exemple le nombre de postes pour les années 1870-1900 est en moyenne de 32 postes par jour.

Le réseau pluviométrique utilisé au départ était donc très limité, que ça soit pour élaborer les grilles journalières mais aussi pour les grilles mensuelles utilisées pour la désagrégation des pluies. L'objectif était de ne pas introduire de biais dans l'analyse des résultats, qui serait lié à un changement dans le réseau utilisé. Les grilles mensuelles RECRET, qui seront utilisées pour estimer la pluie journalière sur la période historique, sont fondées sur un réseau beaucoup plus dense et un nombre élevé de postes pluviométriques. On peut donc s'attendre à une meilleure estimation des pluies journalières à partir des grilles mensuelles RECRET, par comparaison à celles utilisées ici et basées sur 28 postes seulement.

Le nombre réduit des postes pluviométriques sur la période historique, et la complexité de la spatialisation à partir des données journalières, justifient au final le recours à une méthode de désagrégation qui se fonde sur une spatialisation des précipitations mensuelles dont la fiabilité a été vérifiée (Delus et al., 2019). L'incertitude de cette méthode concerne la validité des grilles de répartition de la pluie dans le mois. Des analyses statistiques sur nos grilles de répartition de la pluie dans le mois montrent que les cas où il ne pleut nulle part ne représentent que 17% des cas. La méthode risque par ailleurs de sous-estimer le nombre de jours où il ne pleut pas ; une petite comparaison du nombre de jours sans pluie entre « P désagrégée » et « P VALERY j » montre que la méthode de désagrégation présente un nombre plus faible de jours sans pluie par rapport à la méthode de spatialisation journalière ; l'écart moyen entre les deux méthodes est de 1510 jours (sur 12 053 au total). Cette grande différence est expliquée par l'interpolation du pourcentage de pluie tombée dans le mois, et s'il pleut à un poste, on répartit de la pluie bien au-delà par interpolation spatiale. Cette sous-estimation peut poser problème dans le cadre de la reconstitution des événements extrêmes d'étiages. D'autre part, la répartition de la pluie dans le mois n'est pas seulement dépendante du nombre de stations et de leur répartition spatiale, mais aussi du type de temps. Dans le cas des types de temps de perturbation, la méthode de désagrégation devrait reposer sur des grilles de répartition de la

pluie assez fiables puisque ce type de temps entraîne des pluies généralisées et synchrones. Le problème se pose par contre pour des types de temps de convection ou d'orage qui sont responsables de précipitations localisées. Pour bien estimer les pluies moyennes dans ce cas par la méthode de désagrégation, on aura besoin d'un réseau pluviométrique important et dense pour bien capter la dispersion de la pluie. Il serait ainsi intéressant de tenir compte du type de temps et du nombre de postes pour déterminer la fiabilité de la pluie estimée à partir de la méthode de désagrégation.

L'objectif de ce stage était de réaliser des reconstitutions climatiques qui seront utilisées en entrée d'un modèle hydrologique pluie-débit pour obtenir par la suite des reconstitutions hydroclimatologiques. Ces reconstitutions de débits pourront permettre de vérifier la validité des résultats de notre méthode dans la mesure où les débits simulés à partir des séries climatiques seront cohérents avec les hauteurs d'eau observées. Il convient d'ailleurs de souligner que l'une des perspectives de ce travail est de réaliser des reconstitutions des crues à l'aval du bassin versant de la Moselle (Toul ou Hauconcourt) et non pas sur les Hautes Vosges, pour lesquelles on ne dispose pour aucune des méthodes utilisées des résultats très fiables.

Il s'agit désormais de tester plus en détail la méthode de désagrégation des données mensuelles pour estimer les précipitations journalières, d'autant plus que les résultats sont encourageants et a priori meilleurs que ceux obtenus avec la méthode de spatialisation des données journalières. Des tests supplémentaires devront être appliqués et l'analyse des résultats affinée afin de vérifier la validité de la méthode. D'autres méthodes de validation pourraient être testées, notamment une comparaison au point de la grille à la pluie du poste le plus proche pour chaque jour. Une carte de corrélation aux points de grille entre les pluies estimées à partir de la méthode de désagrégation et la pluie SAFRAN pourrait également être établie pour présenter la répartition spatiale des coefficients de corrélation. On peut également améliorer la qualité des différentes comparaisons traitées dans le troisième chapitre, par exemple les courbes de distribution des pluies estimées à partir de 25-20-15-10-5-3 ou 1 poste. Pour ces différentes échelles, les courbes de distribution sont représentées par la moyenne des dix échantillons qui ont été pris au hasard pour chaque scénario de nombre de poste. Or, un rail aurait pu être pris plutôt qu'une valeur moyenne afin de présenter des résultats plus représentatifs de l'impact de l'échantillonnage du réseau dégradé sur l'estimation des pluies. Il serait également intéressant de réaliser des comparaisons à différentes échelles avec les pluies journalières moyennes de bassin versant estimées par d'autres reconstitutions (SCOPE Climate et FYRE Daily).

## Conclusion

Ce travail avait pour objectif principal d'établir une base de données climatiques historique journalière et de tester une méthode d'estimation des pluies moyennes journalières applicable à ces données.

Au terme de cette étude, la base de données des précipitations journalières historique a été constituée à partir des archives climatiques. De plus, des méthodes d'estimation des pluies journalières moyennes de bassins versants tests ont été développées et comparées. Ces méthodes reposent sur l'utilisation des données de précipitations journalières pour réaliser des grilles de précipitations issues des méthodes de spatialisation, ou sur des données mensuelles désagrégées à partir de la répartition de la pluie dans le mois. La vérification de la validité des précipitations journalières reconstruites a été réalisée à partir des pluies moyennes journalières de huit sous-bassins versants et par comparaison avec la pluviométrie SAFRAN.

Les résultats obtenus montrent que les méthodes d'estimation des pluies moyennes présentent des résultats similaires et semblables pour les bassins versants du Colon à Xaronval, du Madon à Pulligny et de la Moselle à Hauconcourt pour différentes échelles temporelles. En ce qui concerne les bassins des Hautes Vosges, les méthodes sous-estiment la pluviométrie et le déficit d'écoulement et présentent des fluctuations. Les pluies de SAFRAN, considérées comme pluies de référence, présentent également des biais, humides sur les bassins de la Meurthe (surestimation), et secs sur les bassins de la Moselle à Fresse-sur-Moselle, de la Moselotte à Vagney et de la Moselle à Epinal.

Ce travail montre que la spatialisation à partir des données de précipitations journalières est délicate, surtout avec un réseau pluviométrique limité. L'estimation des pluies journalières issue de la méthode de désagrégation des pluies mensuelles présente au final de meilleurs résultats et des coefficients de corrélation avec les pluies SAFRAN supérieurs à ceux obtenus par une spatialisation des données journalières. Cette méthode présente encore des incertitudes et des limites qu'il s'agira de définir plus précisément en améliorant notamment la prise en compte de différents facteurs dans les grilles de répartition de la pluie dans le mois. Une réalisation plus large des tests d'échantillonnage à différentes échelles temporelles devra être menée pour valider la méthode et vérifier l'impact d'un réseau réduit sur la qualité des estimations des pluies moyennes journalières de bassins versants.

## Liste des références bibliographiques

- Benichou P. et Le Breton O. (1987). Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7e série, n° 19
- Biaou A. (2000). *Désagrégation Spatio-temporelle des variables issues des Modèles de Circulation Général*. Mémoire du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, Ecole des Mines de Paris et Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Caillouet L. (2016). *Reconstruction hydrométéorologique des étiages historiques en France entre 1871 et 2012*. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. ffNNT : 2016GREAU011ff.fftel-01508490ff
- Caillouet L., Vidal J.-P., Sauquet E., Graff B. et Soubeyroux J.-M. (2019). SCOPE Climate: A 142-year daily high-resolution ensemble meteorological reconstruction dataset over France. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 241-260, doi: 10.5194/essd-11-241-2019
- Chaix C. et Szerb P. (2019). Recensement et analyse des principaux services climatiques en Europe et en France utiles aux gestionnaires d'espaces naturels protégés. LIFE17 CCA/FR/000089 - LIFE #CC #NATURADAPT.
- CIPMS : Commissions Internationales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre (1998). Protection contre les inondations dans les bassins de la Moselle et de la Sarre - Etat des lieux-. Cœur D., Lang M., Naulet R., Burnet R. et Strazzeri D. (1999). Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes, *Ingénierie-EAT*, n° spécial Risques naturels, Cemagref Editions, Antony.
- Cretat J., Pohl B. et Richard Y. (2011). Les modèles climatiques régionaux : outils de décomposition des échelles spatio-temporelles. Dixièmes Rencontres de Théo Quant Besançon, 23-25 février 2011. <http://thema.univ-fcomte.fr/>
- Delus C., François D. et Gille E. (2017). Droughts and low flows in the Mosel river catchment since the middle of the 19th century. Colloque "Adaptation and Resilience to Droughts: Historical Perspectives in Europe and beyond", Strasbourg, 1-2 juin 2017.
- Delus C., François D., Ollive V. et Gille E. (2018). Reconstitution des sécheresses dans le bassin versant de la Moselle depuis le milieu du 19ème siècle. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 70, 85-98
- Delus C., Grelier B., François D., Drogue G., Vidal J.-P., Caillouet L., Devers A., Sauquet E., et Lauvernet C. (2019). Évaluation et comparaison de séries de précipitations historiques dans des sous-bassins versants de la Meuse et de la Moselle, 1871-2004. *Climatologie*, vol. 16

- Devers A. (2019). *Vers une réanalyse hydrométéorologique à l'échelle de la France sur les 150 dernières années par assimilation de données dans des reconstructions ensemblistes*. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes. Français. ffNNT : 2019GREAU029ff. fftel-02506254ff
- Devers A., Vidal J.-P., Lauvernet C., Graff B. et Vannier O. (2019). A framework for high resolution meteorological surface reanalysis through offline data assimilation in an ensemble of downscaled reconstructions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, doi: 10.1002/qj.3663
- Dobrovolný P., Brázdil R., Trnka M., Kotyzad O. et Valáške H. (2015). Precipitation reconstruction for the Czech Lands, AD 1501–2010. *International Journal of Climatology*, 35, 1-14, doi: 10.1002/joc.3957
- Drogue G., Ben Khediri W., François D. et Plasse J. (2016). Détermination des Ecoulements et des Phases Hydrologiques (DEPHY). Rapport de synthèse, 35 p. + annexes.
- Drogue G., François D. et Plasse J. (2012). Détermination des écoulements et des phases hydrologiques (DEPHY phase 1). Rapport final, 52 p. + annexes.
- Drogue G., Hoffmann L., Matgen P., et Pfister L. (2005). Désagrégation dynamique et statistique de sorties de modèles de climat : application a un bassin versant de méso-échelle au Luxembourg. Journées de Climatologie – Dijon 17-19 mars 2005 : Le changement climatique.
- Durand Y., Brun E., Merindol L., Guyomarch G., Lesaffre B. et Martin E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, 18:65–71.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Méridol L. et Martin E. (1999). A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 45(151):469–484.
- François D. et Humbert J. (2000). Quantification spatiale des précipitations. Applications au Nord-Est de la France. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1-2).
- François D., Delus C., Drogue G., Lebaut S. et Gille E. (2019). Reconstitution des étiages de la Moselle depuis 1871. Colloque 'Sécheresses, étiages et déficits en eau', Paris, 11-13 décembre 2019
- Frécaut R. (1973). La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en milieu tempéré océanique. *La Houille Blanche / No 4-1973*
- Koutsoyiannis D. (1992). A nonlinear desaggregation model with a reduced parameter set for simulation of hydrologic series. *Water Resour. Res.*, 28(12) :3175-3191



- Kuentz A. (2013). *Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance, Recherches historiques et reconstitutions*. Thèse de doctorat. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Paris.
- Kuentz A., Mathevet T., Coeur D., Perret C., Gailhard J., Guérin L., Gash Y., et Andréassian V. (2014). Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance. *La Houille Blanche-Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, pp.57-63. [ff10.1051/lhb/2014039](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039)[ff](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039ff). [ffhal-01128611](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039ff)[ff](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039ff)
- Lang C. (2007). *Étiages et tarisements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français*. Thèse de doctorat. Université de Metz, 2007. Français. [fftel-00534656](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039)[ff](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039)
- Lang M., Coeur D., Lallement C. et Naulet R. (1998). Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation : application au bassin du Guiers, *Ingénieries - E A T*, IRSTEA édition 1998, p. 3 - p. 13
- Lebaut S. et Gille E. (2018). Quelques facteurs et grandeurs caractéristiques des écoulements dans le bassin versant de la Moselle. Séminaire " Crues et sécheresses dans le bassin versant de la Moselle", Metz, 23 novembre 2018.
- Lebecherel L., Andreassian V., Augeard B., Sauquet E. et Catalogne C. (2015). Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? Comprendre pour agir, Onema.28 pages.
- MEEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011). L'évaluation préliminaire des risques d'inondation 2011, Bassin Rhin. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Minárová J., Müller M. et Clappier A. (2017a). Seasonality of mean and heavy precipitation in the area of the Vosges Mountains: dependence on the selection criterion. *International Journal of Climatology* 37(5): 2654–2666. DOI: [10.1002/joc.4871](https://doi.org/10.1002/joc.4871).
- Pauling A., Luterbacher J., Casty C. et Wanner H. (2006). Five hundred years of gridded high resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics*, 26, 387-405, doi: [10.1007/s00382-005-0090-8](https://doi.org/10.1007/s00382-005-0090-8)
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L. et Morel S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:92–107

- Rodrigo F. S., Esteban-Parra M. J., Pozo-Vázquez D. et Castro-Díez Y. (1999). A 500 years precipitation record in southern Spain. *International Journal of Climatology*, 19(11),1233-1253
- Stedinger J.R. et Vogel R.M. (1984). Disaggregation procedures for generating serially correlated flow vectors. *Water Resour. Res.*, 20(1) : 47-56
- Tao P. C. et Delleur J. W. (1976). Multistation, Multiyear Synthesis of Hydrologic Time Series by Disaggregation. *Water Resour. Res.*, 12(6): 1303-1312
- Thober S., Mai J., Zink M. et Samaniego L. (2014). Stochastic temporal disaggregation of monthly precipitation for regional gridded data sets. *Water Resour. Res.*, 50, 8714–8735, doi:10.1002/2014WR015930
- Valencia R.D. et Schaake J.-C. Jr. (1973). Dissaggregation processes inn Stochastic Hydrology, *Water Ressour. Res.*, 9(4), 580-585
- Valéry A. (2010). *Modélisation précipitations-débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), CEMAGREF (Antony).
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. et Soubeyroux J.-M. (2010). A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644
- Zhang X-C. (2012). Verifying a temporal disaggregation method for generating daily precipitation of potentially non-stationary climate change for site-specific impact assessment. *International journal of climatology*, Int. J. Climatol. 33: 326–342 (2013)
- Zhang X-Z., Ge Q-S., Fang X-Q., Zhenga J-Y. et Feic J. (2013). Precipitation variations in Beijing during 1860–1897 AD revealed by daily weather records from the Weng Tong-He Diary. *International Journal of Climatology*, 33, 568-576, doi: 10.1002/joc.3448

### **Références web**

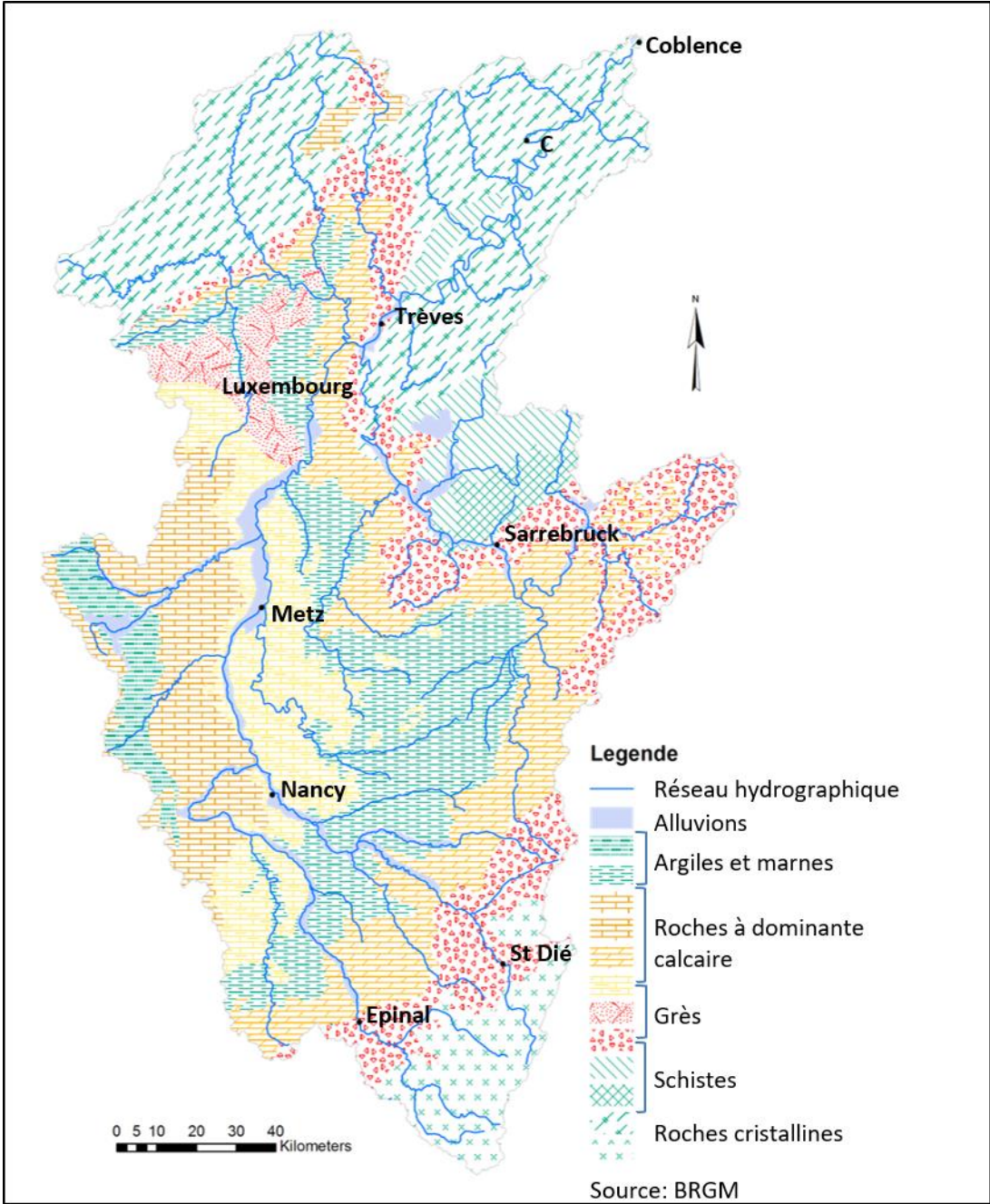
[www.diva-gis.org](http://www.diva-gis.org)

[www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)

[www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)

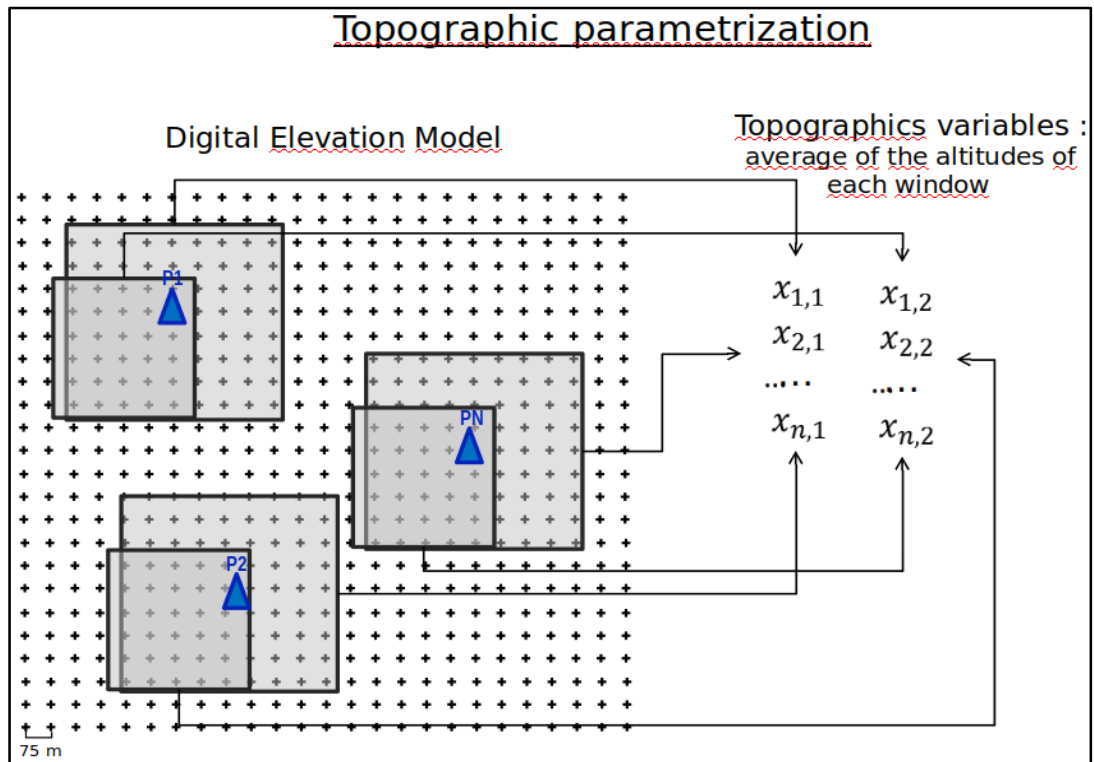
[www.loterr.univ-lorraine.fr](http://www.loterr.univ-lorraine.fr)

# Annexe A : Formations lithologiques dans le bassin de la Moselle



Source : Lebaut et Gille, 2018

## Annexe B : Paramétrage topographique à partir d'un modèle numérique d'élévation



Source : Delus et al., 2017

Les fenêtres ont une taille de 12, 24, 48, 96 et 192 mailles (soit de  $12 \times 75\text{ m} = 0,9\text{ km}^2$  à  $192 \times 75\text{ m} = 14,4\text{ km}^2$ ).

## Annexe C : Pluies moyennes estimées à partir de la méthode de VALERY (2010)

Pour vérifier l'impact des valeurs des paramètres  $\alpha$  et  $N_p$  sur les précipitations moyennes de bassin versant, des estimations ont été réalisées avec des jeux de paramètres différents présentés dans le tableau a.

*Tableau a : Choix des paramètres  $\alpha$  et  $N_p$*

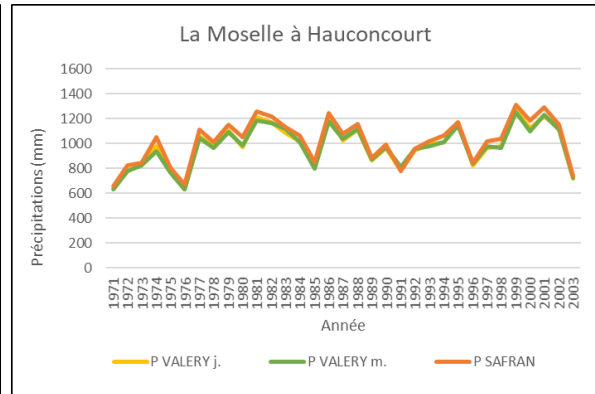
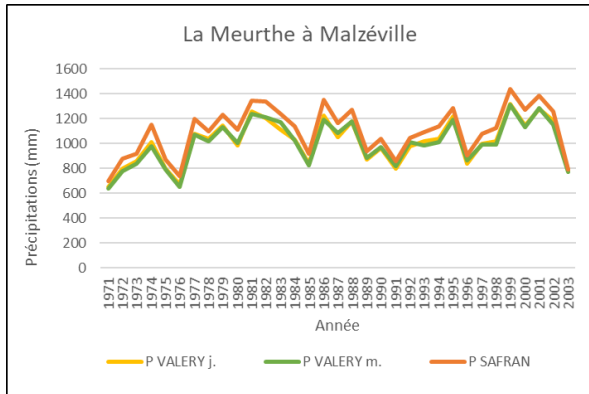
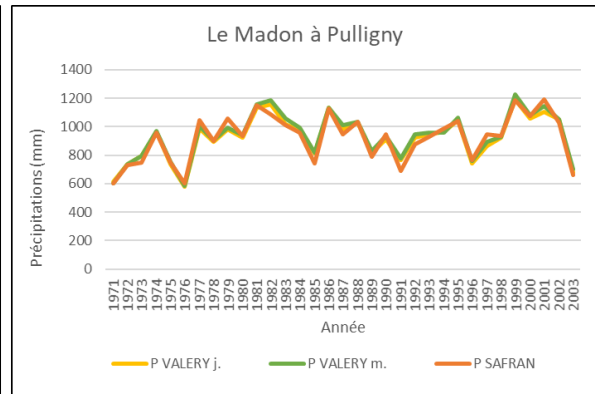
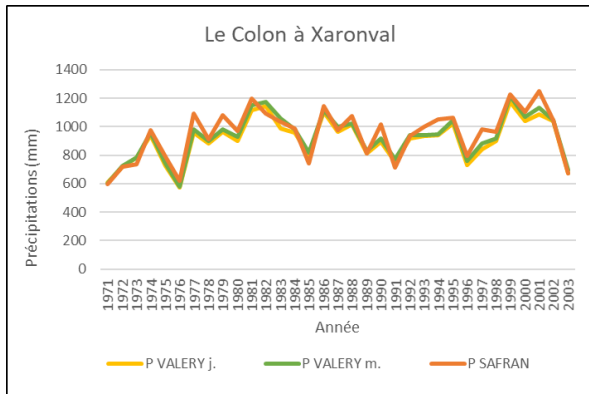
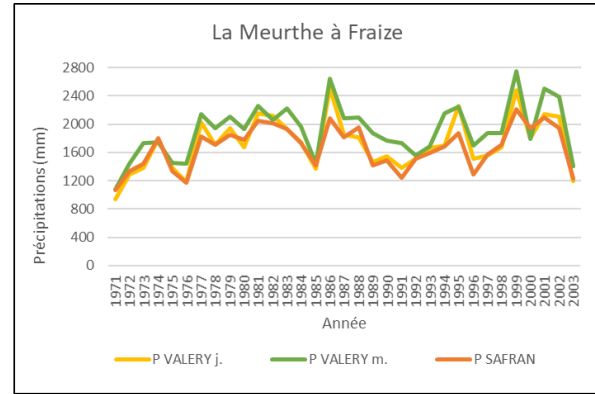
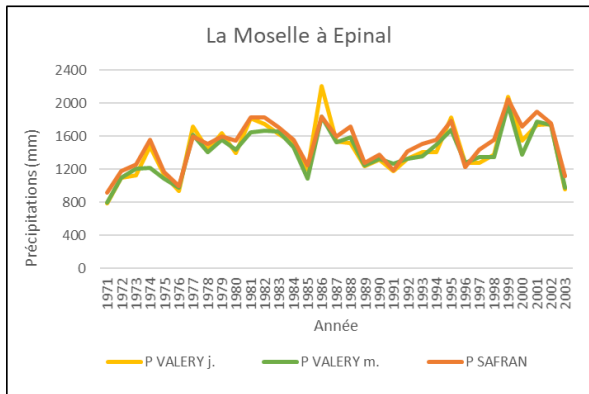
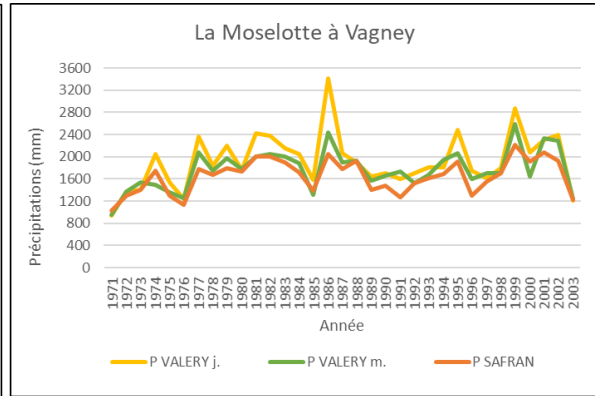
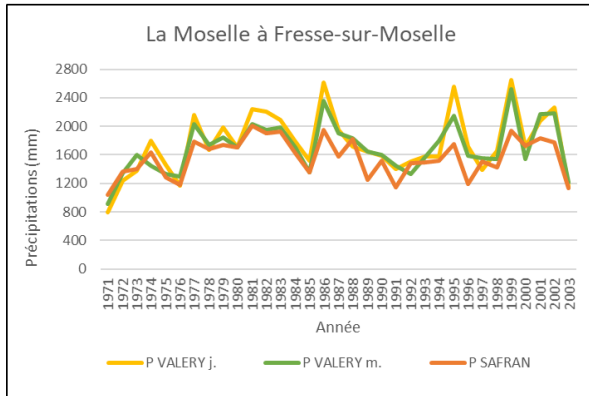
Nombre de voisins $N_p$	Exposant de la distance $\alpha$	Conséquences
8	1	Prise en compte de stations éloignées qui ont un poids relativement important
4	2	Choix médian
2	3	Prise en compte des stations proches qui ont un poids très important.

Pour les 8 bassins versants retenus, si on ne tient compte que des cumuls annuels, la variation des paramètres pour ces 3 paires, a des impacts modérés (tableau b).

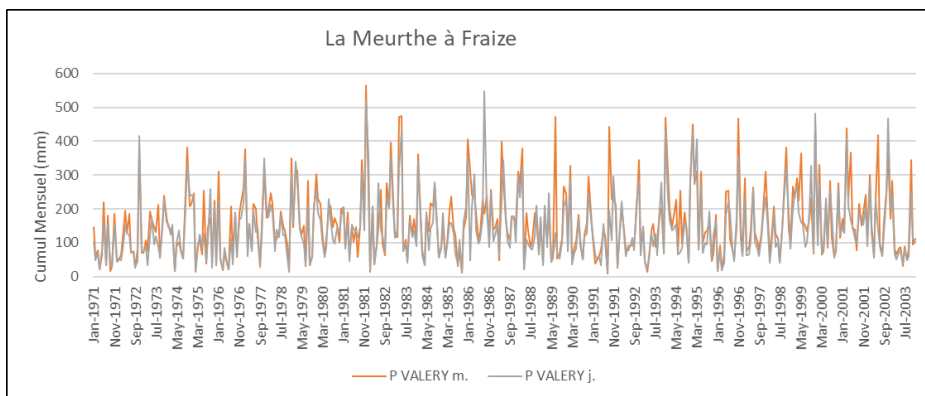
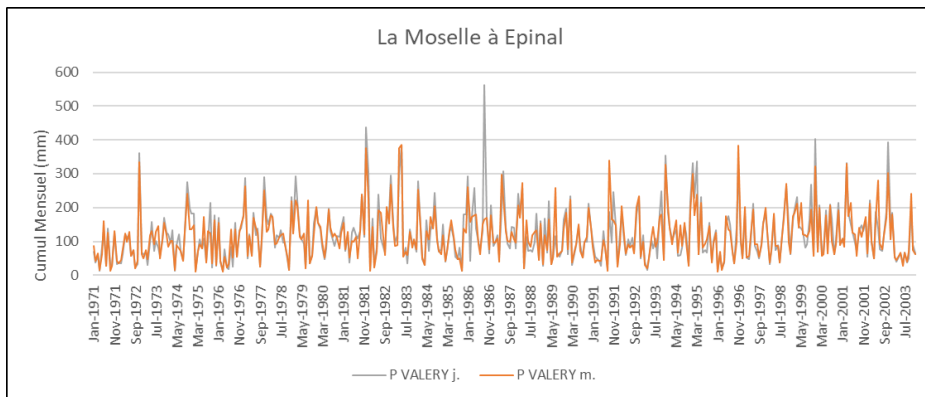
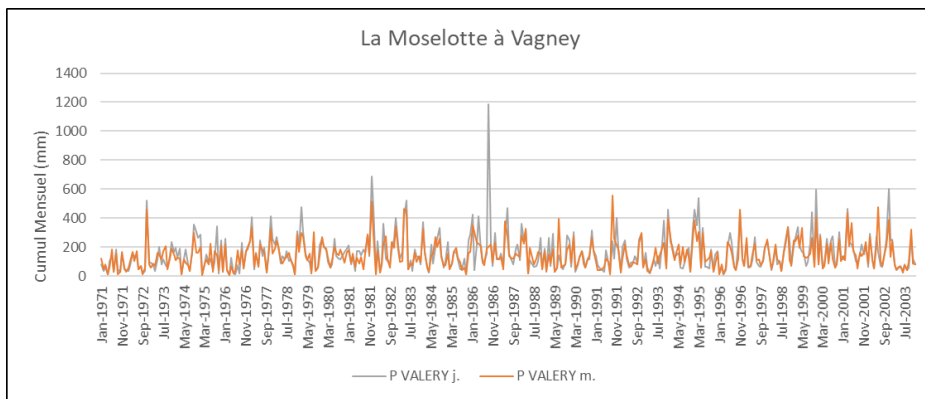
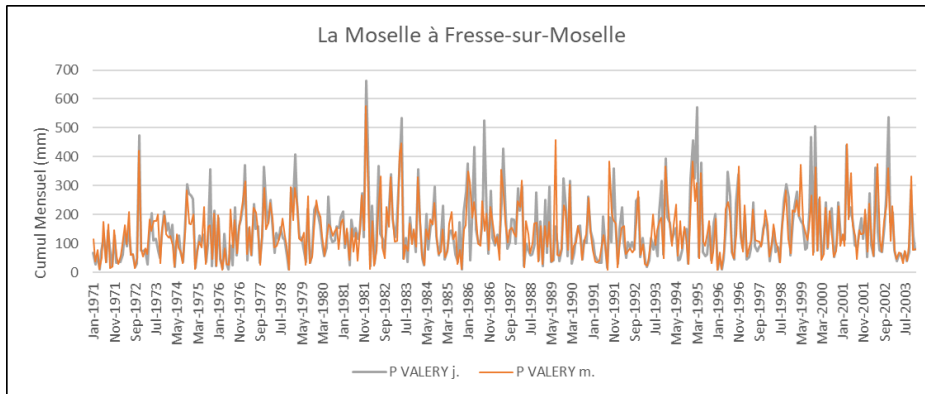
*Tableau b : Cumuls annuels moyens pour les différentes valeurs de  $\alpha$  et  $N_p$*

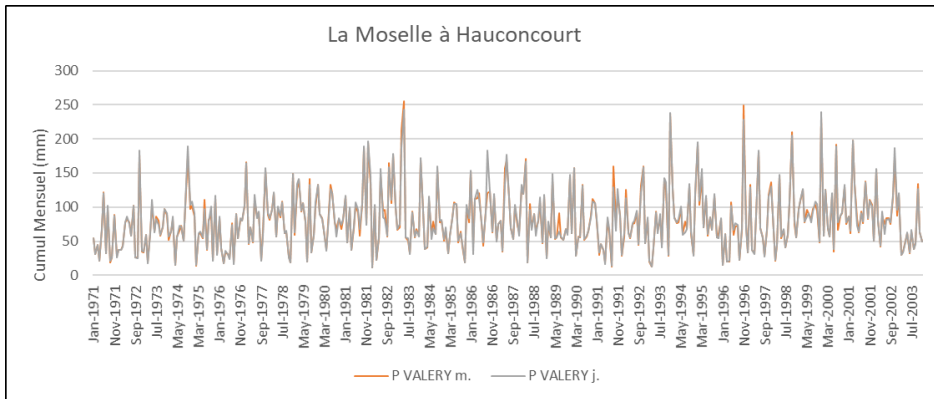
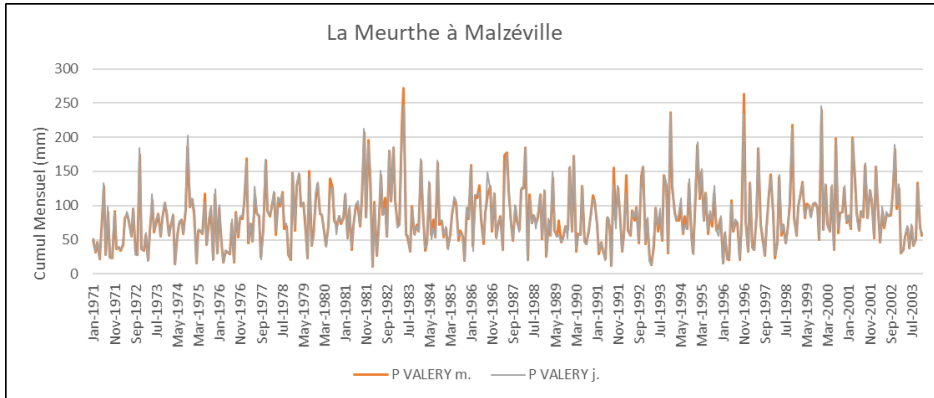
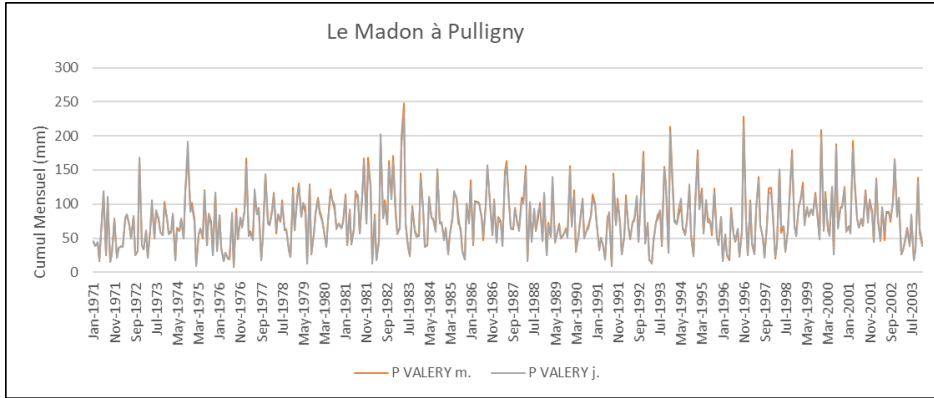
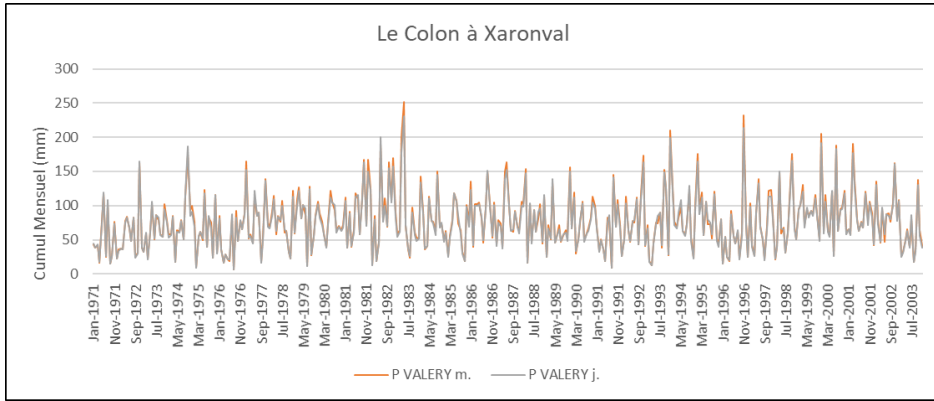
		A	1	2	3	Ecart max
		$N_p$	8	4	2	
Bassins versants	La Moselle à Fresse-sur-Moselle		1733	1756	1776	1.36%
	La Moselotte à Vagney		1919	1921	1919	0.10%
	La Moselle à Épinal		1463	1443	1438	1.34%
	Le Colon à Xaronval		897	906	916	1.07%
	Le Madon à Pulligny		909	923	929	1.51%
	La Meurthe à Fraize		1730	1720	1724	0.63%
	La Meurthe à Malzéville		1015	1012	1015	0.33%
	La Moselle à Hauconcourt		990	981	979	0.91%

## Annexe D : Précipitations moyennes annuelles



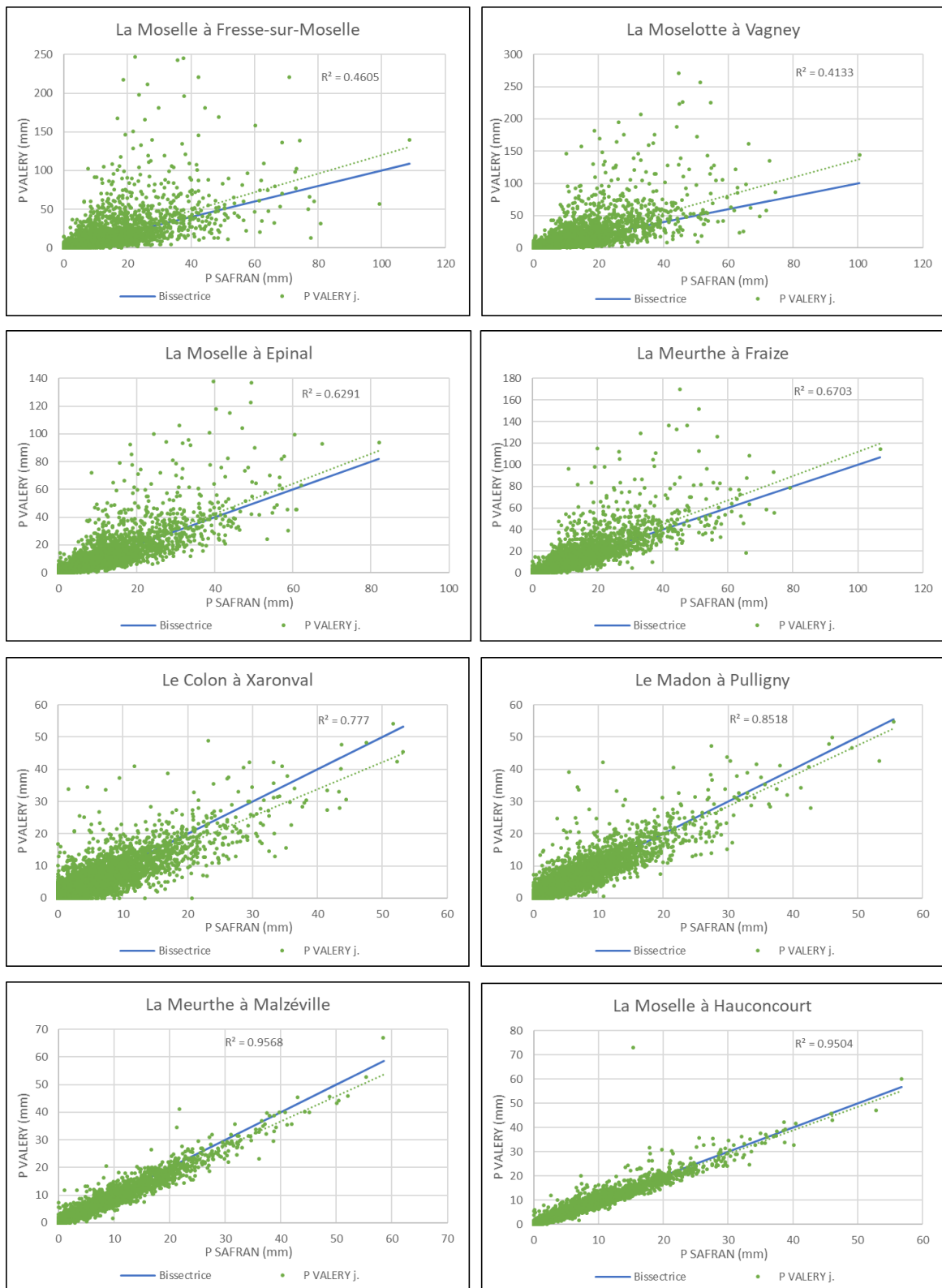
# Annexe E : Cumuls Mensuels de P VALERY journalière vs. P VALERY mensuelles





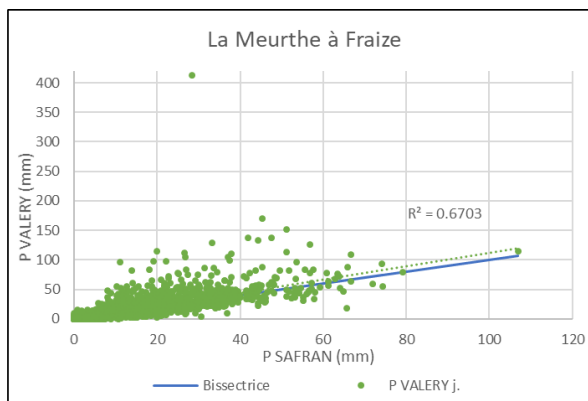
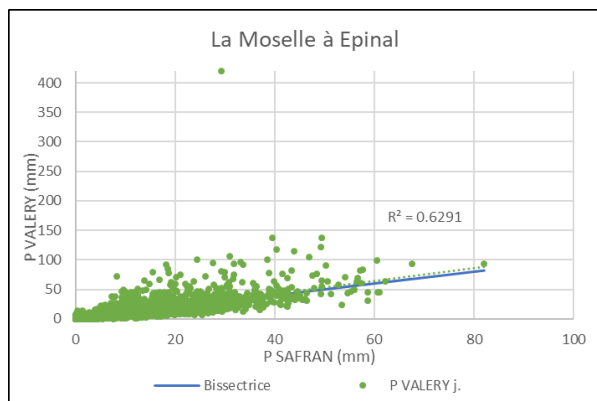
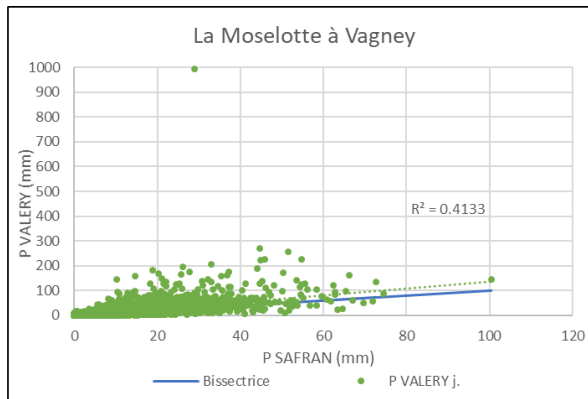
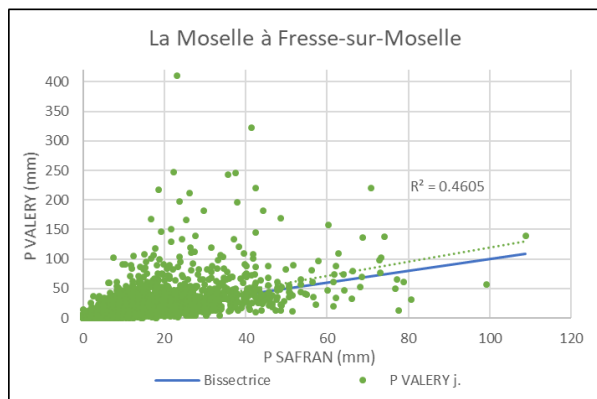


## Annexe F : Corrélations entre P SAFRAN et P VALERY à l'échelle journalière



Les figures qui concernent les bassins de la Moselle à Fresse-sur-Moselle, de la Moselotte à Vagney, de la Moselle à Epinal, et de la Meurthe à Fraize contiennent un point aberrant.

Ainsi pour plus de lisibilité, on a agrandi l'échelle de l'axe des ordonnées. Les courbes de corrélation entre P SAFRAN et P VALERY avec les valeurs aberrantes sont présentées dans les figures ci-dessous. Ces valeurs sont probablement responsables de la surestimation du cumul annuel pour l'année 1986 par la méthode P VALERY j.

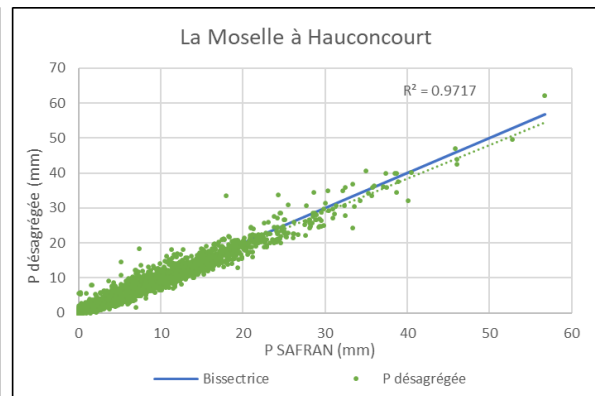
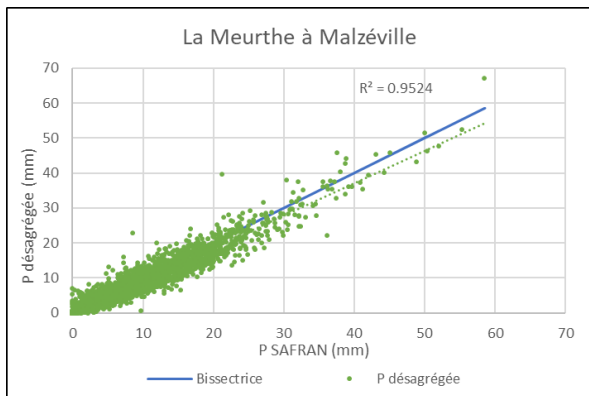
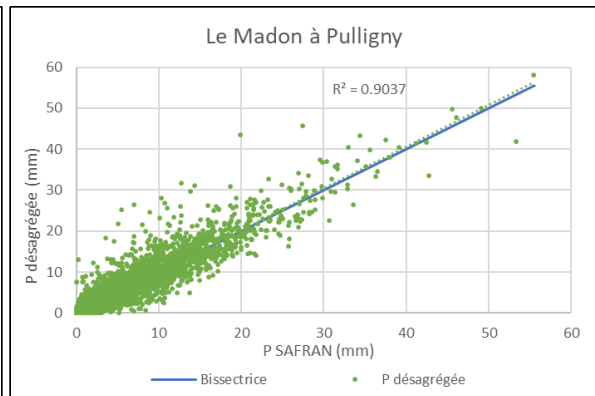
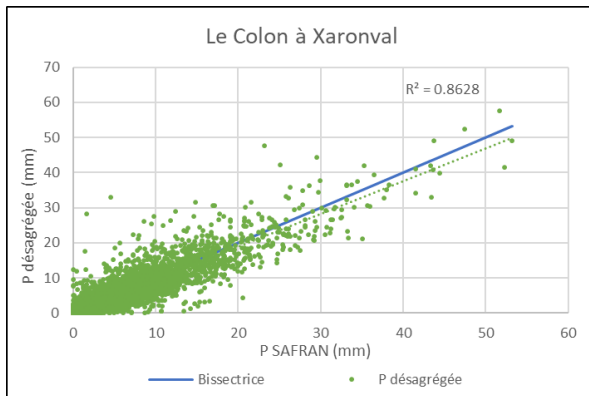
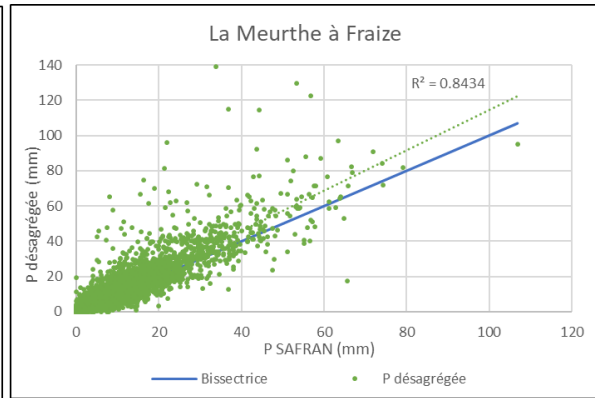
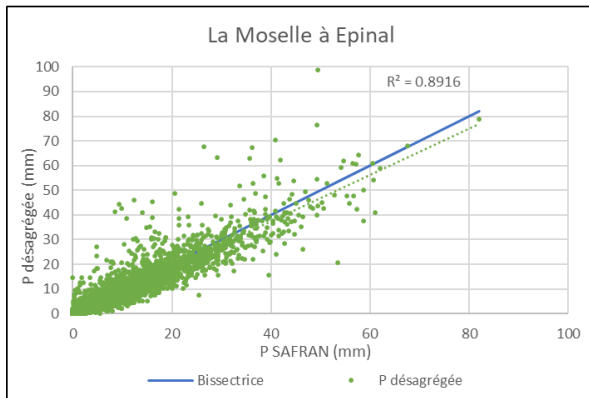
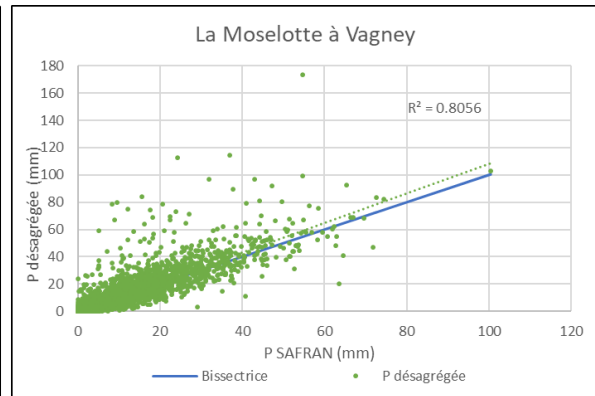
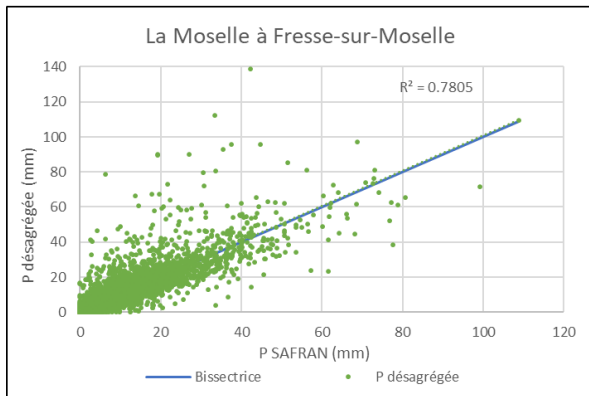


## Annexe G : Critères de Nash et valeurs d'écart

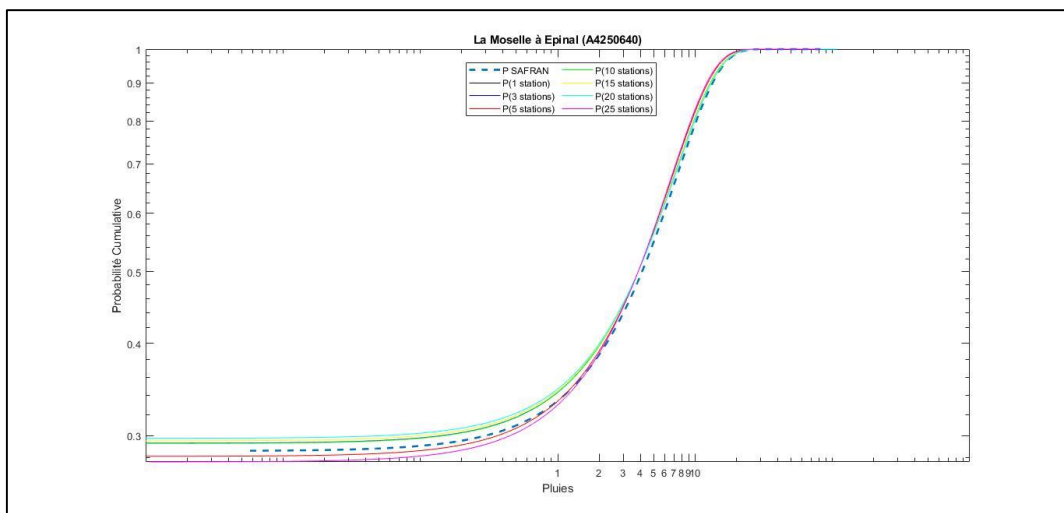
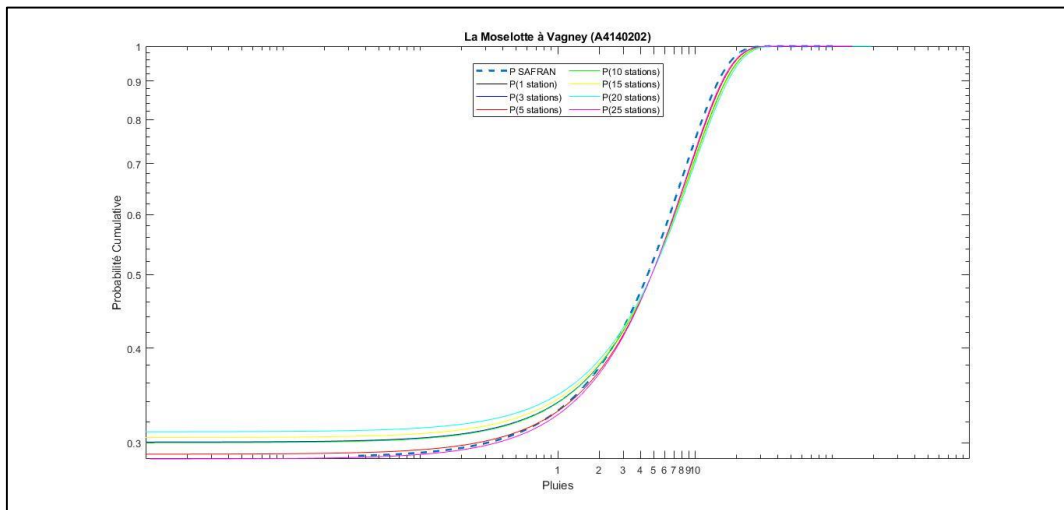
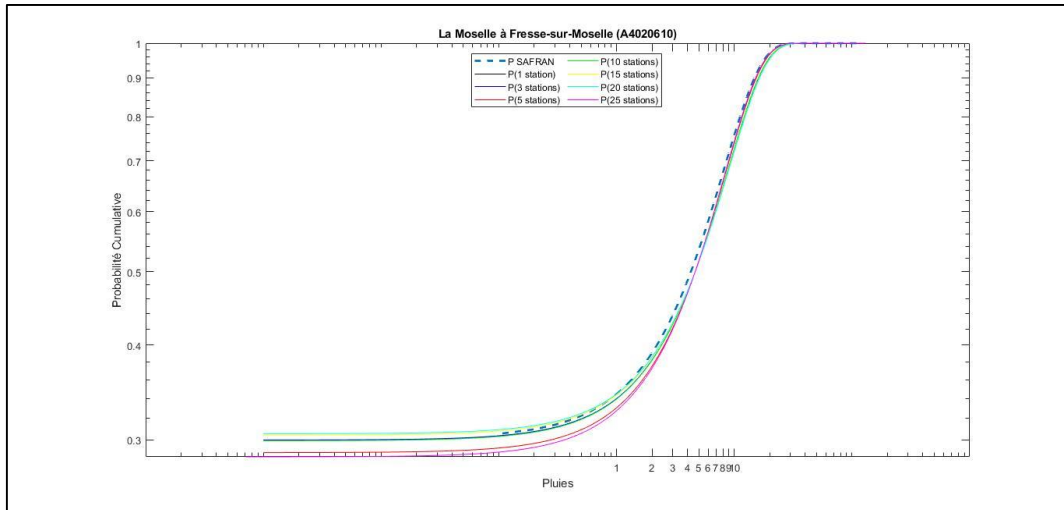
Le critère de Nash arithmétique (Lang C., 2007) est calculé entre les données journalières et l'écart moyen est obtenu à partir de la différence entre les précipitations annuelles moyennes sur la période 1971-2003.

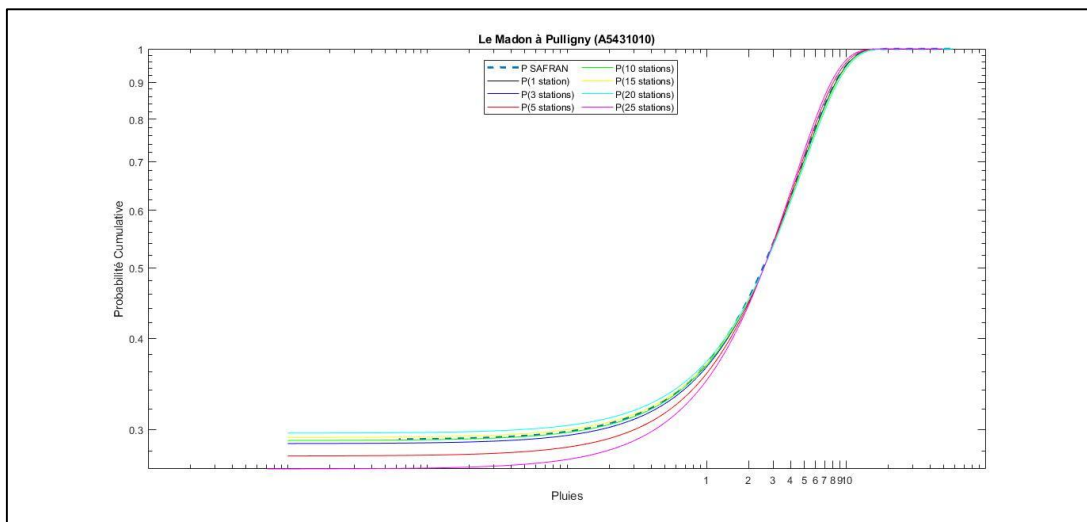
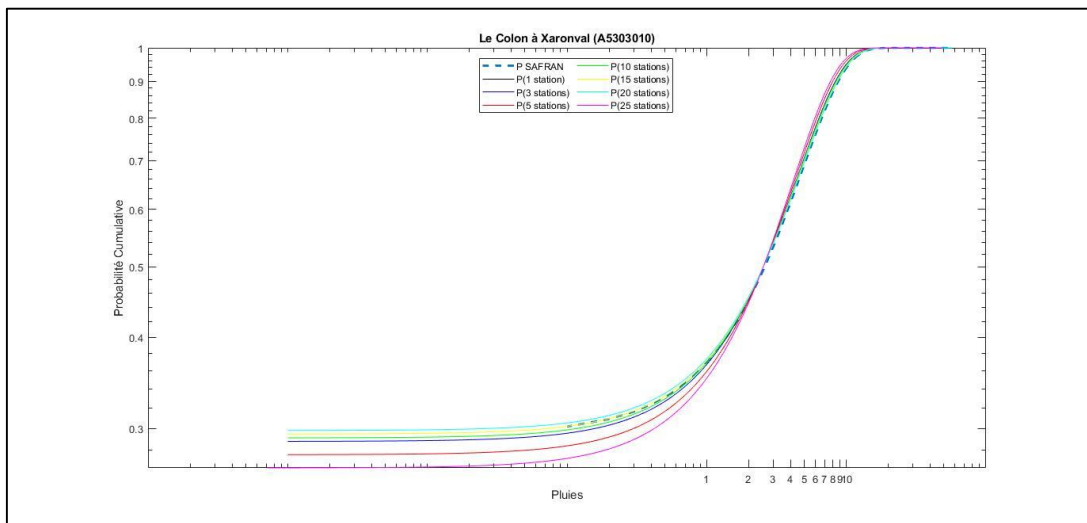
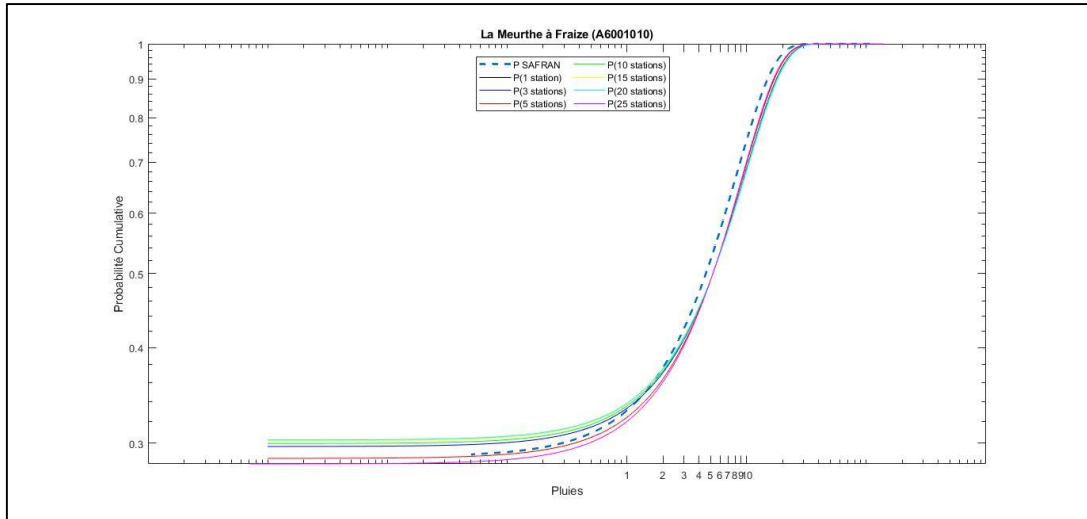
Bassin versant	P VALERY j. vs. P désagrégée		P SAFRAN vs. P désagrégée	
	Nash	Ecart	Nash	Ecart
Moselle à Fresse-sur-Moselle	0.47	3.14%	0.71	8.79%
Moselotte à Vagney	0.38	8.65%	0.71	7.17%
Moselle à Epinal	0.62	2.61%	0.89	6.29%
Colon à Xaronval	0.86	2.31%	0.86	2.40%
Madon à Pulligny	0.86	1.59%	0.89	1.71%
Meurthe à Fraize	0.63	9.97%	0.73	14.47%
Meurthe à Malzéville	0.98	0.44%	0.95	8.48%
Moselle à Hauconcourt	0.94	0.52%	0.92	4.22%

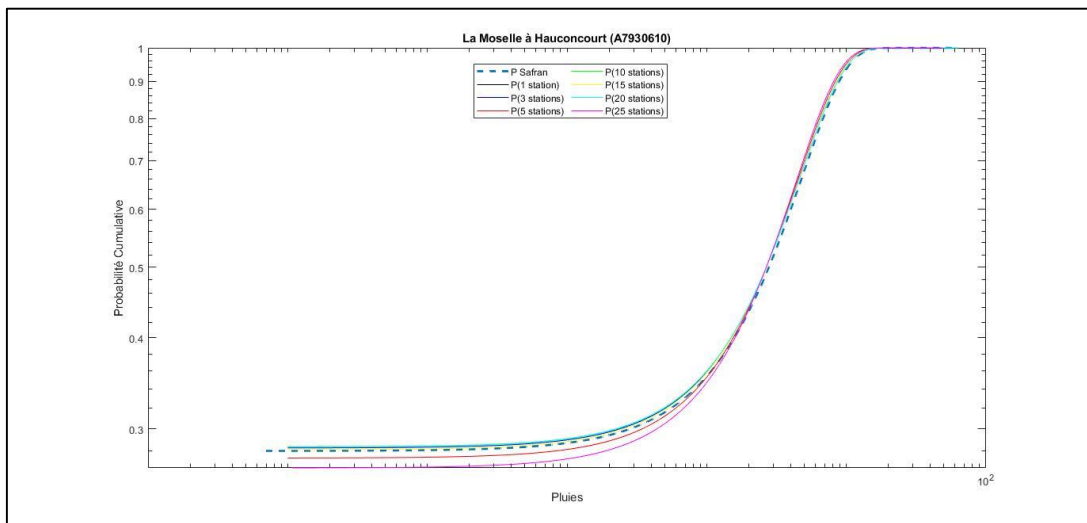
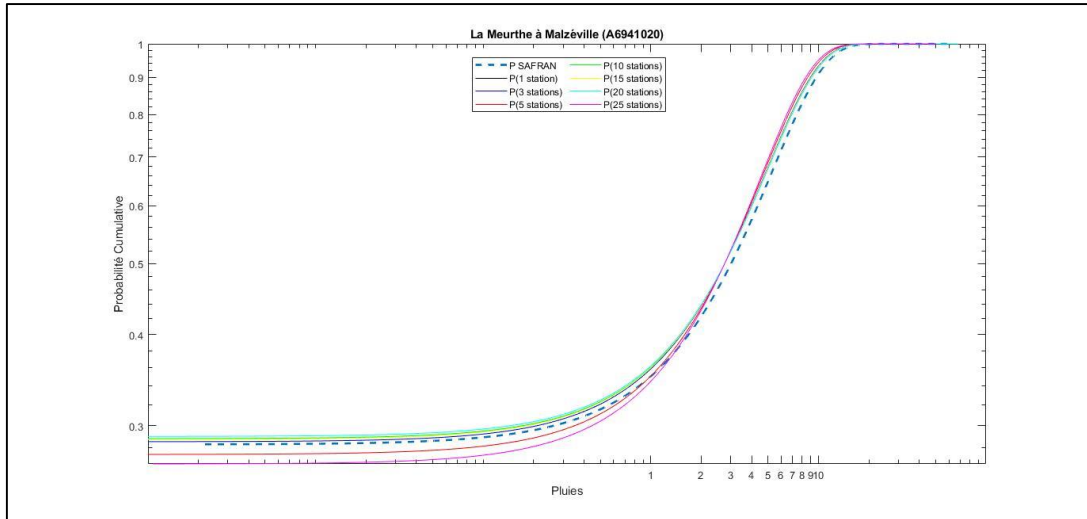
# Annexe H : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée à l'échelle journalière



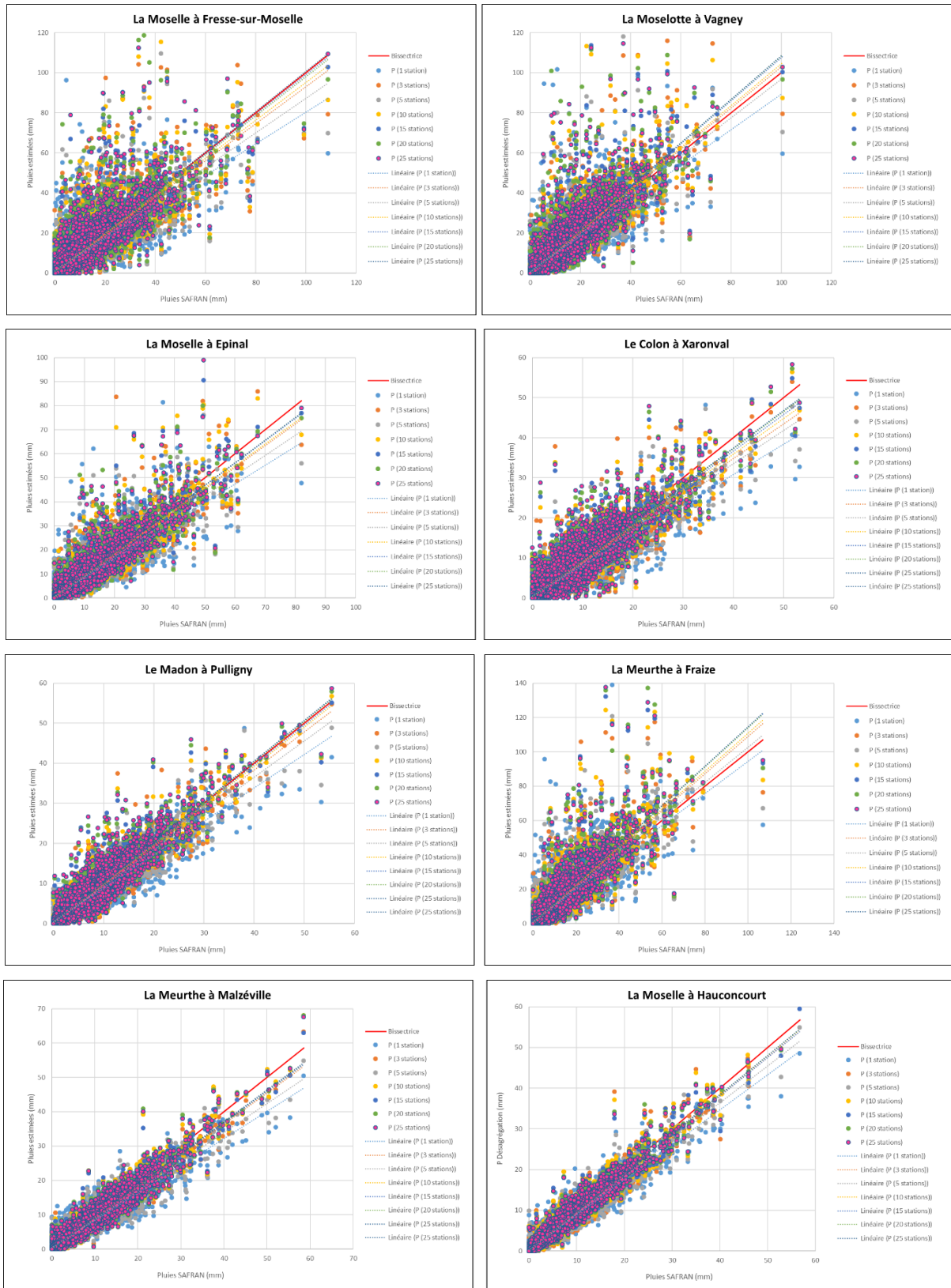
# Annexe I : Courbes de distribution de P SAFRAN et de P désagrégée journalières estimées à partir de 25-20-15-10-5-3 ou 1 poste





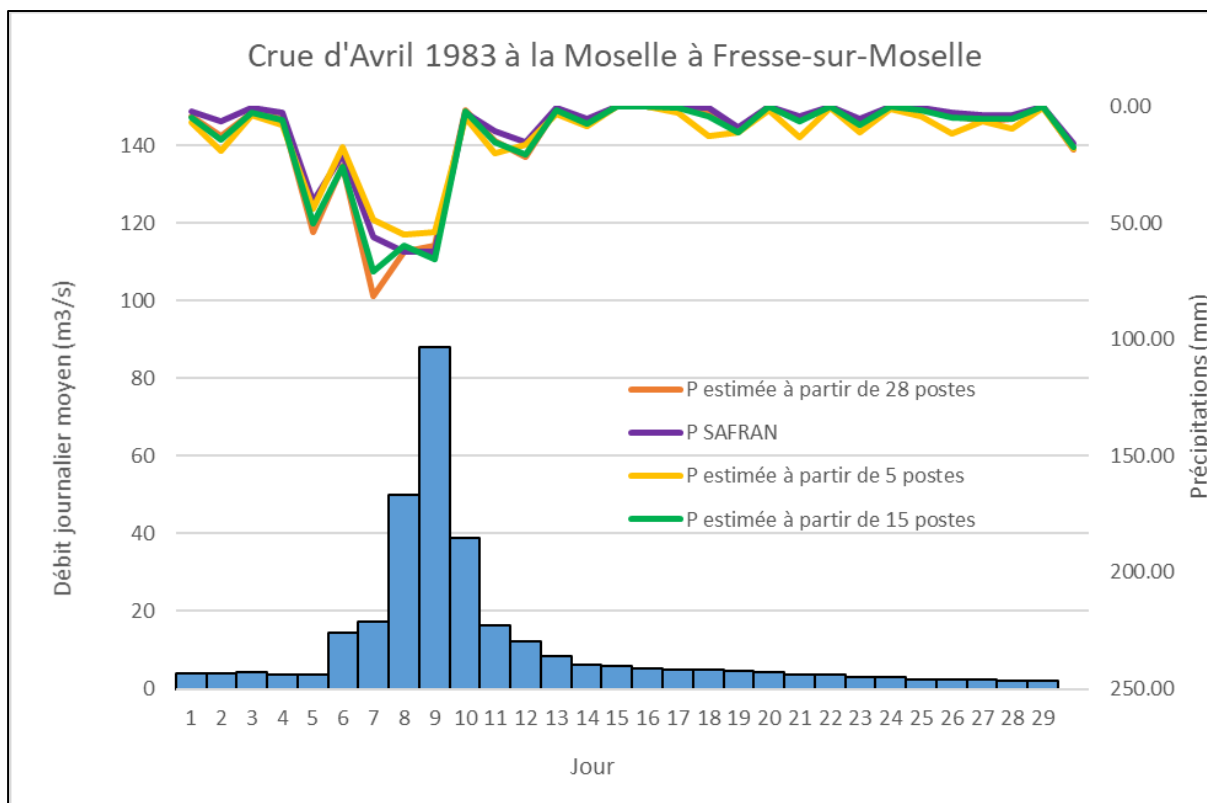
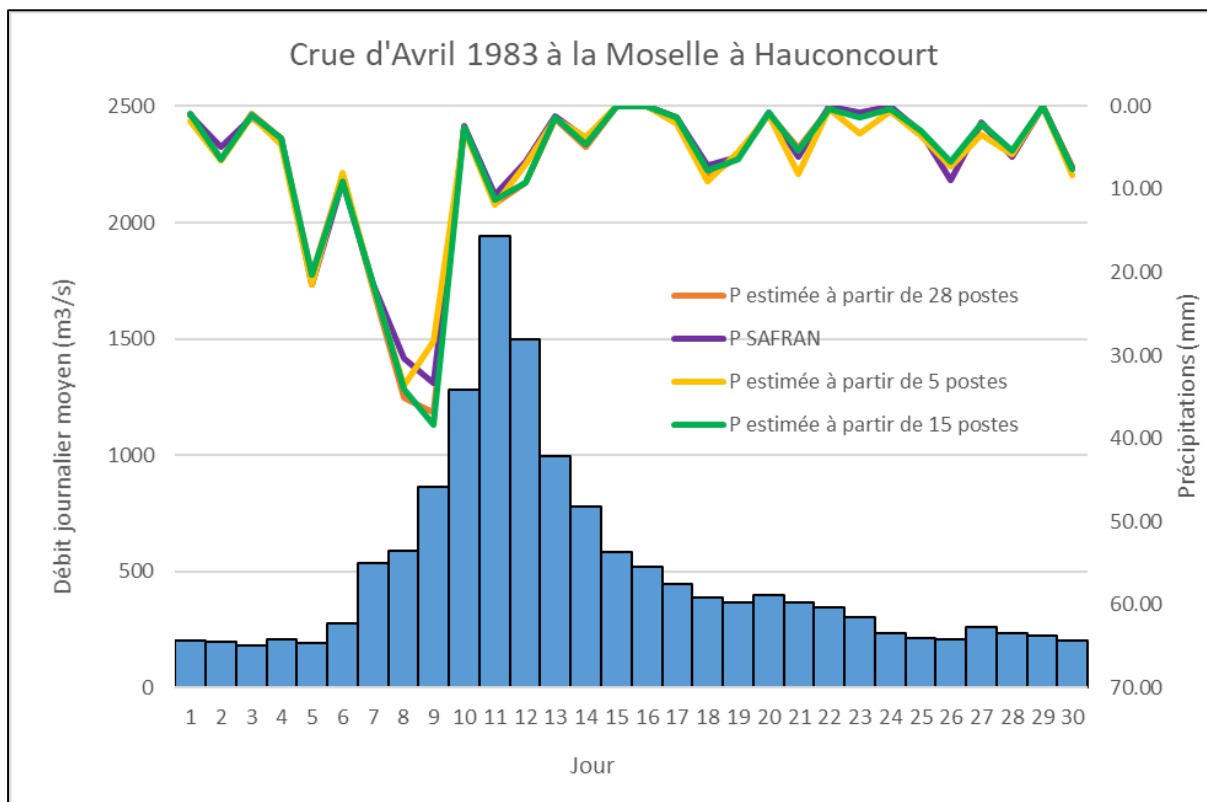


# Annexe J : Corrélations entre P SAFRAN et P désagrégée journalières estimées à partir de 25-20-15-10-5-3 ou 1 poste

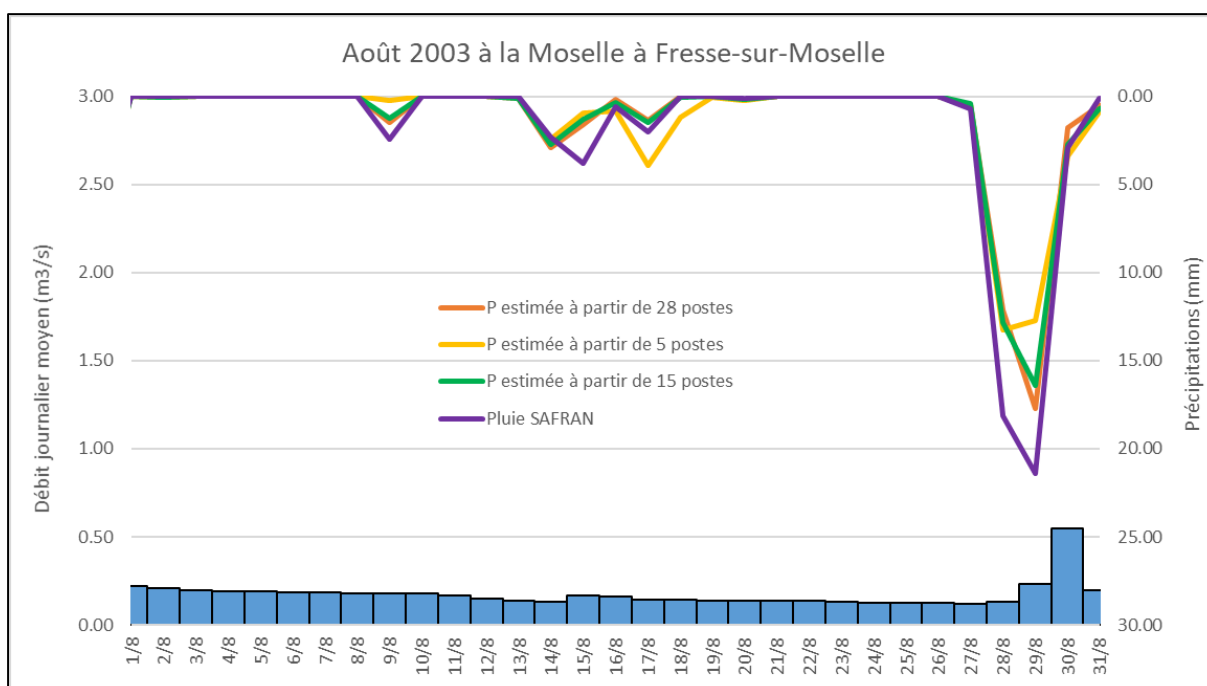
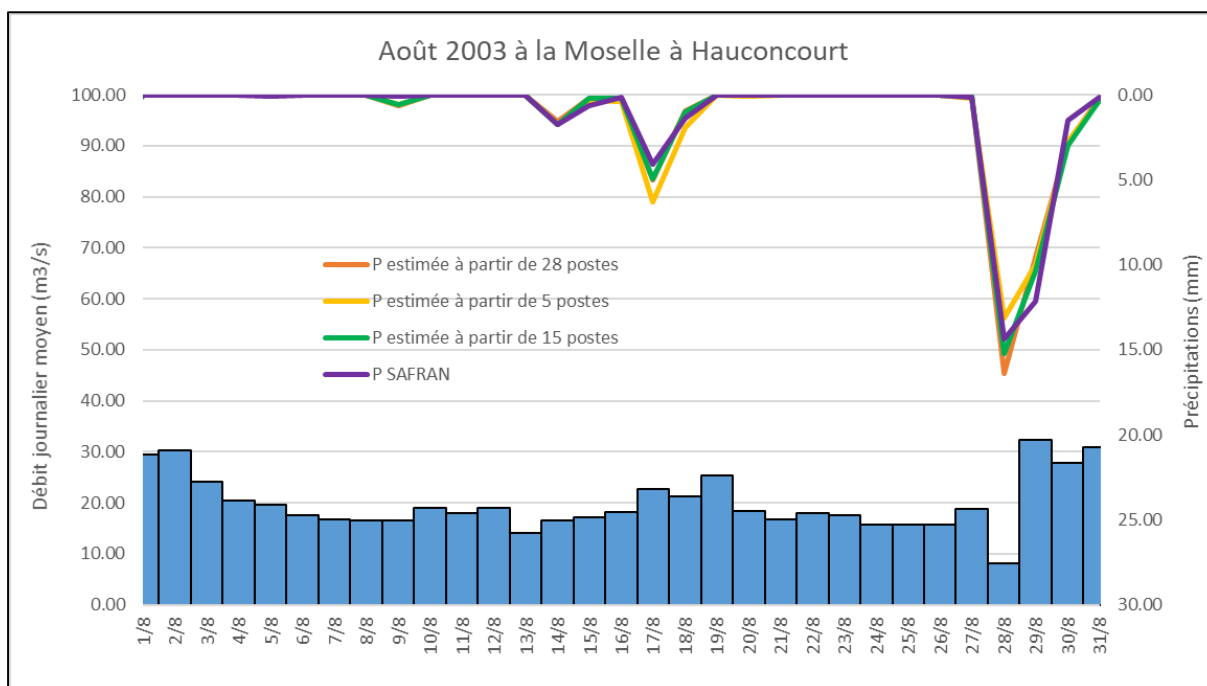




## Annexe K : Crue d'avril 1983



## Annexe L : Sécheresse d'août 2003



## Résumé

Ce travail vise à reconstruire des séries de précipitations journalières dans le bassin versant de la Moselle à partir des observations journalières historiques des archives climatiques. Ces observations sont regroupées dans une base de données journalières historique dont les données seront utilisées dans l'estimation des pluies journalières moyennes de bassin versant. Cette estimation est réalisée à partir des méthodes de spatialisation des données journalières et de désagrégation des données mensuelles. En comparant ces méthodes aux séries SAFRAN, les pluies moyennes calculées à partir des trois méthodes présentent des résultats analogues pour les bassins situés en aval de la Moselle et des fluctuations singulières pour les bassins situés dans les Hautes Vosges. Or, la méthode de désagrégation présente de meilleurs résultats que la méthode de spatialisation à partir des données journalières en les comparant aux séries SAFRAN considérées comme pluies de référence sur la période récente, même si elles présentent des biais dans la zone étudiée. La validité de la méthode de désagrégation doit encore être vérifiée et testée à d'autres échelles et par comparaison avec différentes séries de reconstitutions climatiques.

**Mots clés :** pluies journalières, reconstitutions, spatialisation, désagrégation

## Abstract

This work aims to reconstruct daily rainfall series in the Moselle watershed from historical daily observations in climate archives. These observations are compiled in a historical daily database whose data will be used in the estimation of average daily rainfall in the watershed. This estimation is carried out using the methods of spatialization of daily data and disaggregation of monthly data. By comparing these methods with the SAFRAN series, the average rainfall calculated from the three methods presents similar results for basins located downstream of the Moselle and singular fluctuations for basins located in the High Vosges. However, the disaggregation method presents better results than the spatialization method based on daily data by comparing them with the SAFRAN series considered as reference rainfall over the recent period, even if they present biases in the study area. The validity of the disaggregation method still needs to be verified and tested at other scales and by comparison with different climate reconstruction series.

**Keywords:** daily rainfall, reconstitutions, spatialization, disaggregation