



HAL
open science

Évaluation et comparaison de séries de précipitations historiques dans des sous-bassins versants de la Meuse et de la Moselle, 1871-2004

Claire Delus, Benjamin Grelier, Didier Francois, Gilles Drogue, Jean-Philippe Vidal, Laurie Caillouet, Alexandre Devers, Eric Sauquet, Claire Lauvernet

► To cite this version:

Claire Delus, Benjamin Grelier, Didier Francois, Gilles Drogue, Jean-Philippe Vidal, et al.. Évaluation et comparaison de séries de précipitations historiques dans des sous-bassins versants de la Meuse et de la Moselle, 1871-2004. *Climatologie*, 2019, 16, pp.52-71. 10.4267/climatologie.1378 . hal-02946283

HAL Id: hal-02946283

<https://hal.science/hal-02946283>

Submitted on 23 Oct 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.

EVALUATION ET COMPARAISON DE SERIES DE PRECIPITATION HISTORIQUES DANS DES SOUS BASSINS VERSANTS DE LA MEUSE ET DE LA MOSELLE, 1871-2004

Claire DELUS¹, Benjamin GRELIER¹, Didier FRANÇOIS¹, Gilles DROGUE¹, Jean-Philippe VIDAL², Laurie CAILLOUET³, Alexandre DEVERS², Eric SAUQUET², Claire LAUVERNET²

¹Loterr (Centre de Recherche en Géographie EA 7304), Université de Lorraine, Campus Saulcy Metz, île du Saulcy, 57000 METZ (claire.delus@univ-lorraine.fr, +33 3 72 74 83 61)

²Irstea, UR RiverLy, centre de Lyon-Villeurbanne, 69625 Villeurbanne

³Compagnie Nationale du Rhône, CNR, 2 rue André Bonin 69004 Lyon

Résumé

La compréhension de l'évolution actuelle du climat et des risques naturels qui lui sont associés passe par une meilleure connaissance de la variabilité climatique passée. Des méthodes de reconstruction existent mais leurs validités sont difficiles à établir notamment en l'absence de valeurs de référence sur les périodes anciennes. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur les extrêmes hydrologiques de la Moselle (RECRET) pour lequel des reconstitutions de longues séries climatiques (précipitations et températures) ont été réalisées. Pour permettre une évaluation relative de ces séries, nous proposons de comparer les séries de précipitations mensuelles à des reconstructions climatiques issues de différents travaux. La comparaison repose sur cinq méthodes : RECRET (Delus *et al.* 2018), une méthode fondée sur le Gradient Régional de Pression (Grelier *et al.* 2017), SCOPE Climate (Caillouet *et al.* 2019), FYRE Daily (Devers *et al.* 2019) et SAFRAN (Vidal *et al.* 2010). L'étude se concentre sur la cohérence entre les estimations de précipitations issues de ces différentes méthodes. Les séries RECRET et FYRE Daily présentent des résultats convergents et proches de SAFRAN.

Mots-clés : climat passé, précipitations, reconstruction climatique, sous-bassins de la Meuse et de la Moselle

Abstract

EVALUATION AND COMPARISON OF HISTORICAL PRECIPITATION SERIES IN MEUSE AND MOSELLE SUB-BASINS, 1871-2004

Historical climate knowledge has become a big issue to better understand climate change and natural hazards. Climate reconstruction methods can be used however their performance are difficult to establish. This paper is part of an ongoing research project on floods and droughts in the Moselle basin (RECRET) for which reconstitution of long precipitation and temperature series were performed. A comparison with other climate reconstructions is carried out to allow a relative assessment of these series. The comparison is based on five methods: RECRET (Delus *et al.* 2018), a method based on the regional pressure gradient (Grelier *et al.* 2017), SCOPE Climate (Caillouet *et al.* 2019), FYRE Daily (Devers *et al.* 2019) and SAFRAN (Vidal *et al.* 2010). The paper focus on the consistency between precipitation series from the different methods. RECRET and FYRE Daily are quite similar and closed to SAFRAN.

Keywords: past climate, precipitations, climate reconstruction, Meuse and Moselle sub-basins

Introduction

L'étude de la variabilité des climats passés constitue un enjeu majeur, qu'il s'agisse de positionner le changement climatique dans le long terme ou encore d'améliorer la connaissance des épisodes extrêmes dans le cadre de la prévention des risques naturels. La connaissance du climat passé peut s'appuyer sur des observations météorologiques, mais ces dernières sont généralement limitées avant le milieu du 19^{ème} siècle et rarement homogènes (Wijngaard 2003, Jones 1984, Burt *et al.* 1998, Burt 2009, Burt *et al.* 2015, Wilby *et al.* 2016). Ainsi, si les premières mesures sont disponibles dès le 18^{ème} siècle en France, celles-ci remontent rarement au-delà du 19^{ème} et ce n'est réellement qu'à la fin de ce siècle que le réseau d'observations se développe (Delus *et al.* 2018). La faible densité du réseau de mesure rend donc difficile une estimation des précipitations à une échelle régionale ou locale. Les changements dans les méthodes d'instrumentation ainsi que le fréquent déplacement des postes météorologiques compliquent par ailleurs l'établissement de longues séries continues et de bonne qualité (De Jongh *et al.* 2006, Jones *et al.* 2006) et les travaux qui portent sur la constitution de séries pluviométriques homogénéisées démarrent en général après le milieu du 19^{ème} siècle (Jones 1984, Burt *et al.* 1998, Burt 2009, Burt *et al.* 2015, Noone *et al.* 2016, Wilby *et al.* 2016, Delus *et al.* 2018). La figure 1 présente à titre d'exemple l'évolution temporelle du nombre de séries mensuelles homogénéisées par Météo France et mises à disposition sur la Publitheque¹ pour la France métropolitaine entre 1872 et 1962. Le nombre de séries est assez faible avant 1950 (moins de 500) et décroît considérablement avant 1900 (155 en 1889 et 12 en 1881).

Pour pallier ce manque de données historiques et permettre une analyse des climats passés à haute résolution spatiale (< 10 km) et temporelle (mensuelle ou journalière), des reconstructions climatiques sont réalisées. Ces méthodes de reconstructions reposent sur des observations météorologiques, pour la période récente, ou sur des données proxy si l'on souhaite remonter au-delà de la période instrumentale. Parmi ces méthodes, la dendrochronologie constitue une source très importante qui permet des reconstructions de précipitations séculaires, voire millénales (Büntgen *et al.* 2015). Des reconstructions de précipitations saisonnières ou annuelles à partir de la dendrochronologie ont par exemple été réalisées par Griggs *et al.* (2014) pour Chypre, par Touchan *et al.* (1999) pour le sud de la Jordanie, par Touchan *et al.* (2005) en région méditerranéenne, par Wilson *et al.* (2005) en Bavière ou encore en Angleterre par Wilson *et al.* (2013). Les reconstructions climatiques peuvent également s'appuyer sur des sources documentaires ou sur une combinaison de données instrumentales et proxy. Ainsi, Pauling *et al.* (2006) proposent des reconstructions de précipitations saisonnières en Europe depuis 1500 à partir de dendrochronologie, de carottes de glace, de coraux et de spéléothèmes. Rodrigo *et al.* (1999) reconstruisent des précipitations annuelles sur 500 ans dans le sud de l'Espagne à partir de sources documentaires. Zhang *et al.* (2013) établissent des séries de précipitations saisonnières de 1860 à 1897 à Pékin à partir de journaux intimes. Casty *et al.* (2005) reconstruisent des séries de précipitations et températures mensuelles spatialisées depuis 1500 pour la région alpine européenne à partir de régressions multiples entre observations et sources documentaires. Diodato (2007) propose pour le sud de l'Italie des reconstructions des anomalies dans les précipitations depuis le 17^{ème} siècle à partir d'archives documentaires et d'observations aux postes. Dobrovolny *et al.* (2015) établissent également, pour la République Tchèque, des reconstructions de précipitations saisonnières et annuelles sur cinq siècles à partir de sources documentaires et de séries de précipitations observées.

D'une manière générale, la qualité et l'échelle spatio-temporelle des reconstructions climatiques vont dépendre des données utilisées. Ainsi, les reconstructions réalisées à partir de sources documentaires ou de dendrochronologie sont en général très ponctuelles et imprécises.

¹ <https://publitheque.meteo.fr>

Le cadre de cette recherche, dont l'objectif est d'étudier les précipitations à hautes résolutions spatiales et temporelles, fixe les reconstructions climatiques à la période instrumentale. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur les extrêmes hydrologiques de la Moselle (RECRET) pour lequel des grilles de précipitations et températures spatialisées ont été réalisées à l'échelle mensuelle depuis 1860 (Delus *et al.* 2018). Ces séries climatiques historiques seront utilisées en donnée d'entrée d'un modèle pluie-débit afin de réaliser des simulations de débits historiques.

Dans cet article, nous proposons de comparer des séries de précipitations mensuelles de bassins versants issues de différentes méthodes de reconstruction climatique. L'objectif est de vérifier la cohérence des fluctuations et d'apporter une évaluation relative de la qualité des séries climatiques historiques.

1. Matériel et méthodes

Dans le cadre d'une recherche sur les crues et étiages historiques de la Moselle (projet RECRET), des reconstitutions de longues séries climatiques mensuelles ont été réalisées sur la période 1860-2004 (Delus *et al.* 2018). Nous proposons une évaluation relative de cette climatologie, que nous appellerons RECRET, en la comparant à des reconstructions climatiques.

1.1. Présentation de la zone d'étude

La comparaison des séries climatiques porte sur quatre sous-bassins de la Meuse et de la Moselle (figure 2) : la Meurthe à Malzéville, la Moselle à Epinal et Hauconcourt ainsi que la Meuse à Saint-Mihiel. Les principales caractéristiques de ces bassins sont présentées dans le tableau 1.

La Moselle, qui constitue le cadre de l'étude RECRET, est analysée aux stations d'Epinal et d'Hauconcourt, dont les bassins versants s'étendent respectivement sur 1217 et 9387 km². Ce choix se justifie par la présence du massif des Vosges sur lequel on observe un fort gradient pluviométrique², comme en témoignent les précipitations moyennes annuelles de la Moselle à Epinal qui dépassent les 1600 mm par an sur la période 1971-2003. Il apparaît donc intéressant d'évaluer plus particulièrement les estimations de la pluviométrie sur ce secteur amont. La Meurthe, affluent de rive droite de la Moselle, sera étudiée à Malzéville où le bassin versant est de 2960 km². Le choix de ce sous-bassin est lié à la disponibilité de données hydrométriques historiques à la station de Malzéville qui pourront être utilisées ultérieurement pour valider les reconstitutions hydro-climatologiques. Enfin, la Meuse à Saint-Mihiel a été retenue car la méthode qui repose sur le Gradient Régional de Pression a été initialement développée sur ce bassin versant (Grelier *et al.* 2017).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des quatre bassins versants étudiés
Main characteristics of the four studied basins

² 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 (1971-2000)

Bassin versant		Surface du bassin versant (km ²)	Altitude moyenne (m)	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)	Précipitations annuelles (mm) (1971-2003)	Lame d'eau annuelle écoulée (mm) (1971-2003)	Déficit d'écoulement (mm) (1971-2003)
Bassin versant de la Moselle	Moselle à Épinal	1217	651	326	1342	1628	994	634
	Moselle à Hauconcourt	9387	357	156	1342	981	450	531
	Meurthe à Malzéville	2960	375	192	1299	1009	429	580
Bassin versant de la Meuse	Meuse à Saint-Mihiel	2540	349	221	507	950	380	570

1.2. Séries climatiques comparées

Les séries climatiques comparées sont des précipitations moyennes mensuelles de bassins versants. La comparaison porte sur cinq méthodes de reconstitutions ou de reconstructions climatiques (tableau 2) dont l'étendue et la résolution spatiales sont suffisantes pour permettre un calcul à l'échelle des bassins versants étudiés. La qualité de ces séries n'est pas constante dans le temps dans la mesure où les observations sur lesquelles elles se fondent sont peu nombreuses au début du 20^{ème} siècle.

Tableau 2. Méthodes de reconstructions climatiques utilisées dans le cadre de l'exercice de comparaison et d'évaluation des précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants étudiés

Climatic reconstruction methods used for the comparison and assessment of mean monthly precipitation of the four studied basins

Méthode	Donnée d'entrée	Résolution temporelle	Résolution spatiale de la grille	Source
RECRET	Observations <i>in situ</i>	Reconstitutions <u>mensuelles</u>	1 km	Delus <i>et al.</i> 2018
GRP	Gradient Régional de Pression (réanalyses + proxy)	Reconstructions <u>mensuelles</u>	Bassin versant	Grelier <i>et al.</i> 2017
SCOPE Climate	Réanalyse atmosphérique + SAFRAN	Reconstructions ensemblistes <u>journalières</u>	8 km	Caillouet <i>et al.</i> 2019
FYRE Daily	SCOPE Climate + Observations <i>in situ</i>	Reconstructions ensemblistes <u>journalières</u>	8 km	Devers <i>et al.</i> 2019
SAFRAN	Réanalyse atmosphérique + Observations <i>in situ</i>	Variables météorologiques <u>horaires</u>	8 km	Vidal <i>et al.</i> 2010

1.2.1. La série RECRET

Cette série repose sur des données observées aux postes qui ont été spatialisées sur une grille de 1 km de résolution et dont l'étendue spatiale est présentée sur la figure 2. La base de données des observations climatologiques est le fruit d'un travail de collecte dans les archives et les

bases de données existantes. Elle comporte des observations de précipitations mensuelles qui sont utilisées pour réaliser des grilles de précipitations spatialisées. Les sources des archives climatiques collectées ainsi que les caractéristiques de la base de données sont présentées dans Delus *et al.* (2018), de même que la méthode de spatialisation. Celle-ci repose sur une interpolation et un gradient altitudinal recalculé pour chaque mois en fonction du réseau disponible. Ces grilles permettent un calcul des précipitations moyennes mensuelles par bassin versant de janvier 1860 à décembre 2004. Avant cette date la densité du réseau est insuffisante pour une spatialisation de qualité.

1.2.2. La méthode du Gradient Régional de Pression (GRP)

La série que nous appellerons ici GRP repose sur une reconstruction des précipitations mensuelles de bassin sur la période 1659-2017, sur la base de la circulation atmosphérique de large échelle (Grelier *et al.* 2017). La méthode, inspirée des travaux de Kastendeuch (2007) repose sur l'établissement d'une relation statistique (régression linéaire multiple) à l'échelle mensuelle entre les champs de pression atmosphérique et d'altitude (prédicteurs) et les précipitations moyennes de bassin versant (prédictees). Les liens statistiques définis à partir de données d'observation de la période 1970-2011 (réanalyses NCEP/NCAR, Kalnay *et al.* 1996) sont ensuite « rétopolés » sur la période passée, en utilisant comme prédicteurs de la circulation atmosphérique passée une reconstruction des champs de pression (Luterbacher *et al.* 2002 : régression statistique à partir de données proxy, et données NCAR Sea Level Pressures de Trenberth et Paolino, 1980). Appliquée initialement au bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel, la méthode a été déployée dans le cadre de ce travail d'inter-comparaison sur les bassins versants de la Moselle à Hauconcourt et Epinal, et de la Meurthe à Malzéville.

1.2.3. La reconstruction SCOPE Climate

SCOPE Climate propose à l'échelle de la France des reconstructions de précipitations journalières sur une grille de 8 km depuis 1871, à partir d'informations sur la circulation atmosphérique (Caillouet *et al.* 2019). C'est le résultat d'une méthode de descente d'échelle statistique appliquant le principe d'analogie et permettant de passer d'une description de la circulation atmosphérique synoptique fournie par la réanalyse globale 20CR (Compo *et al.* 2011), à celle du climat à une échelle locale. En outre, il s'agit d'une reconstruction ensembliste dont la dispersion reflète l'incertitude sur les champs de précipitations conditionnellement à une situation synoptique donnée. Pour ce travail de comparaison, les précipitations moyennes ont été calculées par bassin versant en prenant la moyenne des reconstructions.

1.2.4. La reconstruction FYRE Daily

FYRE Daily s'inscrit dans la continuité de SCOPE Climate et fournit à l'échelle de la France métropolitaine des précipitations sur une grille de 8 km depuis 1871. Cette méthode assimile des observations journalières historiques au sol aux reconstructions SCOPE Climate par une méthode d'assimilation de données basée sur l'étape d'analyse d'un filtre de Kalman d'ensemble (Devers *et al.* 2019). La méthode FYRE fournissant un ensemble de même taille que SCOPE Climate, les séries de précipitations moyennes mensuelles ont été calculées sur la même base.

1.2.5. La réanalyse SAFRAN

La réanalyse de surface SAFRAN est disponible sur une grille de 8 km (figure 2) sur la France métropolitaine depuis fin 1958 (Vidal *et al.* 2010). Elle s'appuie sur toutes les observations

disponibles dans la base de données Météo France à partir de cette date, qui sont interpolées en utilisant une réanalyse. Les moyennes spatiales sont estimées en fonction d'une pondération des valeurs par leur contribution au bassin versant. Cette pluviométrie pourrait constituer la série de référence pour la période récente, néanmoins des biais ont été identifiés sur les bassins de la Meurthe (biais humide, surestimation de SAFRAN) et de la Moselle amont (biais sec, sous-estimation de SAFRAN) (Drogue *et al.* 2012). La pluviométrie SAFRAN est retenue comme série de référence de la période 1959-2004 pour le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel. Pour les autres bassins versants il faudra tenir compte des différents biais connus.

1.3. Intercomparaison et choix de la période d'étude

La figure 3 permet de visualiser la disponibilité temporelle des données issues de chaque méthode. La comparaison portera sur la période 1871-2004 qui constitue la période commune aux différentes reconstructions, à l'exception de SAFRAN qui ne concerne que la période récente (1959-2004).

2. Résultats

2.1. Comparaison des régimes pluviométriques

Le tableau 3 et la figure 4 présentent les précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les différentes séries comparées sur la période 1959-2004. Les cinq séries présentent des régimes de précipitations relativement comparables en termes de fluctuation saisonnière. Dans le détail, les séries RECRET et FYRE Daily sont quasiment identiques (écarts absolus entre les précipitations moyennes mensuelles inférieurs à 2 mm) à l'exception du bassin versant de la Moselle à Epinal pour lequel des écarts plus importants sont observés (jusqu'à 10 mm pour le mois de décembre). Sur le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel, les séries RECRET et FYRE Daily reconstituent très bien la pluviométrie SAFRAN (écarts absolus inférieurs à 3 mm par mois). Sur les bassins versants de la Meurthe à Malzéville et de la Moselle à Epinal, SAFRAN aboutit à des valeurs de précipitations moyennes respectivement plus élevées et plus faibles que les données RECRET et FYRE Daily. GRP et SCOPE Climate présentent des précipitations en général supérieures à celles obtenues par RECRET et FYRE Daily, à l'exception de la Moselle à Epinal pour laquelle FYRE Daily présente des valeurs plus élevées.

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1959-2004) (en mm/mois et mm/an)

Mean monthly precipitation of the four basins for the five compared methods (1959-2004) (in mm/month and mm/year)

La Moselle à Epinal	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	158	128	126	107	119	112	105	110	108	132	157	169	1532
GRP	148	119	122	102	120	112	107	105	105	141	162	179	1521
SCOPE Climate	152	126	135	112	118	116	108	105	106	135	156	165	1535
FYRE Daily	166	133	134	114	123	115	107	111	114	137	166	179	1599
SAFRAN	148	122	122	106	120	115	104	110	108	128	153	164	1501

La Moselle à Hauconcourt	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	88	74	76	69	84	82	74	78	76	83	93	98	974
GRP	91	77	79	69	86	80	81	82	78	97	106	117	1042
SCOPE Climate	96	78	85	73	82	84	79	77	75	91	98	103	1022
FYRE Daily	89	74	77	69	83	80	73	77	76	84	94	100	977
SAFRAN	93	77	78	70	84	81	75	79	77	86	97	103	1001

La Meurthe à Malzéville	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	86	74	76	72	89	88	77	80	78	84	94	97	995
GRP	98	83	84	74	95	87	84	86	83	104	116	125	1121
SCOPE Climate	103	85	92	79	88	90	84	82	80	98	106	111	1099
FYRE Daily	87	74	76	72	89	86	75	78	77	84	94	97	990
SAFRAN	104	87	87	78	95	91	81	87	85	95	109	115	1112

La Meuse à Saint-Mihiel	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	91	75	74	65	76	73	68	73	75	82	91	100	943
GRP	84	73	75	62	77	71	74	74	72	92	94	110	959
SCOPE Climate	92	75	79	68	76	76	70	69	69	86	92	98	949
FYRE Daily	91	75	74	65	76	72	67	71	74	82	90	100	936
SAFRAN	88	72	73	65	77	74	69	74	75	82	89	98	935

Les précipitations moyennes mensuelles de bassin versant, recalculées sur la période 1871-2004, sont présentées dans le tableau 4 et sur la figure 5. Les régimes de précipitations reproduits par RECRET et FYRE Daily sont également similaires sur cette période. Les écarts les plus importants concernent le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel, où ils atteignent régulièrement 5 mm par mois, ce qui se traduit par une différence de 40 mm dans la pluviométrie moyenne annuelle. Les courbes des régimes issues des séries GRP et SCOPE Climate présentent des fluctuations plus singulières et sont généralement supérieures à celles de RECRET et de FYRE Daily. Les écarts mensuels peuvent atteindre plus de 30 mm entre les séries (un écart de 36 mm entre les précipitations moyennes mensuelles RECRET et GRP est observé pour la Meurthe à Malzéville au mois de décembre).

Tableau 4 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1871-2004) (en mm/mois et mm/an)

Mean monthly precipitation of the four basins for the five compared methods (1871-2004) (in mm/month and mm/year)

La Moselle à Epinal	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	138	119	118	105	110	119	116	113	113	132	146	153	1483
GRP	138	119	120	99	120	117	125	115	102	148	156	176	1533
SCOPE Climate	141	127	133	120	118	118	117	115	111	139	150	159	1549
FYRE Daily	139	120	118	106	110	118	114	111	112	133	147	152	1479

La Moselle à Hauconcourt	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	77	69	69	67	75	84	81	79	77	83	87	88	936

GRP	85	77	78	66	86	84	94	93	75	100	102	115	1055
SCOPE Climate	89	80	84	78	83	86	87	84	78	93	95	100	1036
FYRE Daily	78	69	69	67	74	82	78	76	75	83	86	87	924

La Meurthe à Malzéville	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	77	70	70	70	79	90	86	82	80	84	88	87	963
GRP	92	83	83	72	95	91	99	98	81	108	112	123	1135
SCOPE Climate	95	86	91	84	89	92	92	89	84	99	103	107	1112
FYRE Daily	79	72	72	72	79	89	84	81	79	85	89	89	968

La Meuse à Saint-Mihiel	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
RECRET	77	66	65	61	69	77	73	72	72	82	85	88	887
GRP	77	73	74	61	77	74	87	81	70	95	89	108	968
SCOPE Climate	85	75	78	73	77	79	78	76	72	86	89	95	964
FYRE Daily	75	65	63	60	66	72	68	68	67	78	81	84	847

2.2. Comparaison des séries de précipitations annuelles et mensuelles

Les séries de précipitations annuelles issues de chacune des méthodes sont présentées en figure 6. Les années historiquement humides, telles que 1910, ou remarquablement sèches, telles que 1874, 1949 et surtout 1921, ressortent bien sur l'ensemble des chroniques. Sur la période récente (1959-2004), les séries RECRET et FYRE Daily sont très similaires à SAFRAN sur les bassins versants de la Moselle à Hauconcourt et de la Meuse à Saint-Mihiel. Pour la Moselle à Epinal et la Meurthe à Malzéville, les précipitations RECRET et FYRE Daily sont respectivement supérieures et inférieures à celles de SAFRAN, ce qui est cohérent avec les biais de la pluviométrie SAFRAN indiqués précédemment (cf. 1.2.5). Sur l'ensemble de la période 1871-2004, les séries GRP et SCOPE Climate produisent en général une pluviométrie supérieure à RECRET et FYRE Daily.

Les séries obtenues s'organisent en effet en deux groupes, quel que soit le bassin versant considéré : d'une part les précipitations produites par les méthodes GRP et SCOPE Climate, qui présentent des fluctuations relativement similaires et dont les valeurs sont généralement supérieures à celles des autres séries ; d'autre part les précipitations issues de RECRET et de FYRE Daily, qui présentent des valeurs proches et des fluctuations analogues. Les courbes de fréquences cumulées (figure 7) confirment une organisation en deux groupes, ce qui est particulièrement nette sur la Moselle à Hauconcourt et sur la Meurthe à Malzéville. Les courbes fréquentielles mettent également en évidence un écart plus important entre les précipitations annuelles RECRET et FYRE Daily sur le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel.

La cohérence des précipitations au pas de temps mensuel est appréhendée par des corrélations entre les différentes séries comparées. La matrice des corrélations (figure 8) confirme la proximité entre les précipitations RECRET et FYRE Daily (coefficients de corrélation supérieurs à 0,97 pour l'ensemble des bassins versants sur la période 1871-2004). Sur la période 1959-2004, les coefficients sont supérieurs à 0,99 entre RECRET et SAFRAN et entre FYRE Daily et SAFRAN. Les coefficients de corrélations calculés entre GRP et SAFRAN ou SCOPE Climate et SAFRAN présentent par contre des valeurs plus faibles.

En l'absence de série de référence sur la période 1871-2004, ce travail de comparaison ne peut aboutir à une validation effective des séries de précipitations. On retient néanmoins la bonne cohérence entre les précipitations obtenues par les méthodes RECRET et FYRE Daily, ainsi

qu'une très bonne corrélation de ces deux séries avec les données SAFRAN sur la période 1959-2004. Ces résultats permettent une validation relative des séries RECRET et FYRE Daily qui sont comparées plus en détail dans la partie suivante.

2.3. Comparaison des séries RECRET et FYRE Daily

La figure 9 confirme visuellement la proximité et l'absence de biais notable entre les précipitations annuelles RECRET et FYRE Daily. Les corrélations RECRET vs. SAFRAN (figure 9b) ainsi que FYRE Daily vs. SAFRAN (figure 9c) sont très fortes sur la Moselle à Hauconcourt et la Meuse à Saint-Mihiel. Sur le bassin de la Meurthe à Malzéville, les séries RECRET et FYRE Daily présentent une sous-estimation des précipitations annuelles vis-à-vis des données SAFRAN alors que sur le bassin de la Moselle à Epinal la tendance est à la surestimation. Ces résultats sont cohérents avec les biais de la pluviométrie SAFRAN annoncés en partie 1.2.5. En effet, les valeurs de précipitations moyennes annuelles calculées à partir de SAFRAN pour la période 1971-2003 (période pour laquelle on dispose de séries de débits) donnent une moyenne de 1118 mm de précipitations par an sur le bassin versant de la Meurthe à Malzéville. Avec une lame d'eau écoulée de 430 mm, le déficit d'écoulement sur ce bassin serait de 680 mm, ce qui paraît élevé par rapport aux autres études menées au niveau régional (Drogue *et al.* 2012), qui indiquent plutôt des valeurs de précipitations de l'ordre de 1000 mm sur ce bassin versant. Pour la Moselle à Epinal, la pluviométrie SAFRAN donne 1502 mm de précipitations moyennes annuelles, soit un déficit d'écoulement de 500 mm.

La figure 10 présente en mois particuliers les écarts absolus entre les séries RECRET et FYRE Daily, de janvier 1871 à décembre 2004. Pour trois bassins versants (Moselle à Hauconcourt, Meurthe à Malzéville et Meuse à Saint-Mihiel), 90 % des mois ont un écart inférieur à 10 mm (le seuil de 10 mm correspond pour ces bassins à une erreur d'environ 10 %, ce qui peut entrer dans la gamme d'erreur de la météologie³). Sur le bassin versant de la Moselle à Epinal, les écarts absolus sont plus importants, ce qui s'explique en partie par des précipitations plus abondantes sur ce secteur (environ 1600 mm de précipitations annuelles contre moins de 1000 mm pour les autres). Les mois de décembre 1882, 1919 et 1944 présentent néanmoins des écarts absolus considérables, respectivement de 146, 134 et 99 mm.

Les écarts entre les deux séries sont par ailleurs sensiblement plus importants entre les années 1914 et 1945, soit entre les deux guerres mondiales. L'écart le plus fort concerne le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel (l'écart entre les précipitations moyennes annuelles RECRET et FYRE Daily est inférieur à 10 mm sur la période 1959-2004 - respectivement 943 et 936 mm - mais supérieur à 100 mm sur la période 1914-1945 - 896 mm et 792 mm). Des coefficients de corrélation entre les séries RECRET et FYRE Daily ont été calculés sur des périodes glissantes de 30 ans, afin d'appréhender la stabilité de la relation entre ces deux séries sur l'ensemble de la période étudiée. La figure 11 montre des coefficients de corrélation qui augmentent en début de période avant de diminuer dès que les périodes de calcul intègrent les années comprises entre 1914 et 1945. La figure 12 présente la variation temporelle du réseau de mesure utilisé dans le calcul des précipitations moyennes de bassin versant. On observe une diminution très nette du réseau météorologique à partir de 1914, puis une remontée progressive après 1948. Savouret *et al.* (2011) montrent en effet que le réseau de pluviomètres a baissé de plus de 80 % entre 1913 et 1914 sur les bassins versants de la Meuse et de la Moselle. Or, la précision des estimations pluviométriques dépend notamment de la densité du réseau de mesure (Lobligeois 2014). Les écarts plus importants entre RECRET et FYRE Daily sur cette période

³ <http://ccrom.meteo.fr/ccrom/IMG/pdf/note42-3.pdf>

sont liés à la diminution du réseau pluviométrique qui augmente le risque d'erreurs dans l'estimation des précipitations moyennes de bassin versant.

3. Discussion

Les méthodes GRP et SCOPE Climate reposent sur des réanalyses atmosphériques différentes (cf. 1.2), mais qui utilisent des variables communes, notamment la pression au niveau de la mer (SLP), ce qui peut expliquer une certaine similitude entre ces deux séries. Les précipitations estimées à partir de ces deux méthodes sont généralement les plus élevées. Les méthodes RECRET et FYRE Daily aboutissent à des résultats très analogues à la pluviométrie SAFRAN sur la période 1959-2004 pour les bassins de la Moselle à Hauconcourt et de la Meuse à Saint-Mihiel. Les biais signalés de la pluviométrie SAFRAN dans certaines parties de la zone étudiée ne permettent pas de l'utiliser comme série de référence sur les deux autres bassins versants.

On peut néanmoins souligner la cohérence globale des résultats, puisque le postulat d'un biais humide sur le bassin versant de la Meuse se retrouve à la fois dans la comparaison entre SAFRAN et RECRET (figure 9b) et dans la comparaison entre SAFRAN et FYRE Daily (figure 9c) et inversement pour le biais sec sur la Moselle amont. Dans l'ensemble, les séries RECRET, FYRE Daily et SAFRAN sont très proches et convergentes, ce qui s'explique notamment par le fait que ces trois méthodes reposent intégralement (pour RECRET) ou en partie (FYRE Daily et SAFRAN) sur des données mesurées aux postes.

Cette cohérence d'ensemble est néanmoins fragile et variable au cours du temps, comme en témoigne la corrélation entre les séries RECRET et FYRE Daily qui n'est pas stable sur la période 1871-2004 (figure 11). La proximité entre les séries augmente en début de période, corrélativement à la densification du réseau de mesure à la fin du 19^{ème} siècle. La diminution du nombre de postes pluviométriques, à partir de 1914, se traduit par un écart plus important entre les précipitations RECRET et FYRE Daily jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. A partir de 1950, les séries deviennent très proches car la densification du réseau d'observations réduit les erreurs dans les estimations pluviométriques. L'amélioration de la qualité des estimations dans le temps, en lien avec l'augmentation de la densité des observations, a été démontrée par Vidal *et al.* (2010) pour la pluviométrie SAFRAN. Ces auteurs ont également testé l'impact de la densité du réseau de mesure sur l'estimation de la pluviométrie SAFRAN. Ils montrent que l'estimation de la pluie est d'autant plus sensible à la densité du réseau dans les zones où SAFRAN présente initialement des biais. Les écarts les plus importants entre RECRET et FYRE Daily concernent ici le bassin versant de la Moselle à Epinal, pour lequel les précipitations moyennes sont en effet particulièrement difficiles à estimer en raison d'un gradient d'origine orographique très important.

L'absence d'une série de référence ne permet pas d'assigner plus de fiabilité à RECRET ou à FYRE Daily. Néanmoins, on peut faire l'hypothèse que les données FYRE Daily, qui combinent observations et SCOPE Climate, pourraient fournir de meilleures reconstructions que RECRET durant les périodes caractérisées par une faible densité du réseau de mesures, puisqu'elles ne sont pas uniquement tributaires des observations. Bien que la similitude entre les séries RECRET et FYRE Daily ne soit pas stable au cours de la période d'étude, les précipitations moyennes de bassin versant produites par ces deux méthodes restent dans l'ensemble relativement proches. L'évaluation relative des séries de précipitations proposée dans le cadre de ce travail de comparaison permet donc de mettre en évidence la cohérence des séries RECRET et FYRE Daily, aboutissant à une validation relative de ces séries.

Ces longues séries pluviométriques mensuelles peuvent notamment être utilisées pour reconstituer les sécheresses météorologiques. Celles-ci se caractérisent par un déficit pluviométrique et peuvent être appréhendées à partir d'indices simples, qui reposent sur des valeurs mensuelles, tels que l'indice de sécheresse normalisé SPI (Standardized Precipitation Index). Delus *et al.* (2018) ont ainsi reconstitué les épisodes secs qui ont touché le bassin versant de la Moselle entre 1860 et 2004 à partir de la pluviométrie RECRET. Si les valeurs de précipitations estimées ne peuvent être validées, la réalité de ces épisodes exceptionnellement secs peut être vérifiée par des recherches historiques dans la mesure où ces événements, qui ont des impacts sur les sociétés, sont généralement bien documentés. Ces séries de précipitations mensuelles peuvent également être utilisées en données d'entrée d'un modèle pluie-débit pour reconstituer des séries de débits historiques. Le calage s'effectue sur la période pour laquelle on dispose de mesures hydrométriques et la validation des débits reconstitués est réalisée à partir d'archives hydrométriques. François *et al.* (2019) ont réalisé un travail de reconstitution des étiages de la Moselle depuis 1871 à partir de la série RECRET.

La démarche de comparaison présentée ici peut conduire à l'utilisation de plusieurs séries climatiques en données d'entrée des modèles hydrologiques, afin d'intégrer une partie de l'incertitude liée aux estimations pluviométriques. De nombreux travaux ont porté sur l'impact des erreurs d'estimation des précipitations de bassins versants dans l'incertitude des simulations de débit. Andréassian *et al.* (2001) montrent par exemple que les performances de certains modèles peuvent rester bonnes même avec des estimations de pluie moyenne imparfaites. Les modèles pluie-débit ont la faculté de compenser une donnée d'entrée erronée lorsqu'ils intègrent un processus de calage (Lobligeois 2014), mais ils seront performants pour de mauvaises raisons. Un modèle à base physique ne compensera par contre pas les erreurs d'estimation. De plus, la compensation par le calage reste limitée et dépend de la densité du réseau disponible et de son organisation spatiale. Dans le cadre des reconstructions climatiques présentées ici, ces paramètres ne sont pas constants dans le temps. Les performances de la modélisation seront certainement réduites pendant les périodes pour lesquelles le réseau de mesure est très dégradé, soit entre 1914 et 1945, d'où l'intérêt d'un forçage du modèle à partir de plusieurs scénarios pluviométriques.

Une autre source d'incertitude concerne directement les erreurs de mesures ou de retranscription des données. On peut ainsi s'interroger sur l'origine des écarts de précipitations entre RECRET et FYRE Daily qui sont considérables sur le bassin de la Moselle à Epinal pour trois mois en particulier (figure 10) : décembre 1882 (371 mm pour RECRET et 225 mm pour FYRE Daily, soit un écart de 146 mm), décembre 1919 (468 mm pour RECRET et 334 mm pour FYRE Daily, soit un écart de 134 mm) et décembre 1944 (125 mm pour RECRET et 224 mm pour FYRE Daily, soit un écart de 99 mm). Il s'agirait d'évaluer si ces valeurs sont probantes, par exemple à partir d'un protocole de contrôle de la qualité des données tel que celui proposé par Vicente-Serrano *et al.* (2010). Ces auteurs réalisent une évaluation des valeurs extrêmes en les comparant aux valeurs voisines, afin de déterminer s'il s'agit de données aberrantes ou si, au contraire, elles sont bien associées à des épisodes de précipitations extrêmes. Ainsi, si l'on s'intéresse au mois de décembre 1882, on constate que d'après les Annales du Bureau Central Météorologique de France, la station du Ballon de Servance située à 1216 m a enregistré 764 mm de précipitations, soit un cumul mensuel tout à fait exceptionnel dont on ne peut déterminer la fiabilité (sur la période 1882-1930, la moyenne du mois de décembre est de 210 mm pour cette station). Cet épisode s'est traduit par une crue très importante sur la Moselle à Epinal (Zumstein *et al.* 1985). Les trois mois pour lesquels les écarts entre RECRET et FYRE Daily sont les plus importants correspondent d'ailleurs toujours à des crues majeures de la Moselle (figure 13). Les précipitations devaient donc revêtir un caractère

exceptionnel. Une analyse et une reconstitution spécifique de la genèse de ces épisodes hydrologiques exceptionnels permettraient peut-être d'apporter des éléments d'évaluation supplémentaires sur la validité de ces cumuls pluviométriques. Une telle démarche ne peut être envisagée qu'avec des données de précipitations journalières à partir desquelles les hydrogrammes de crue de ces épisodes pourraient être reconstruits et comparés aux archives hydrométriques. La méthode FYRE Daily présente l'avantage, contrairement à la série RECRET, d'être déjà disponible à l'échelle journalière. Il sera donc intéressant d'estimer les données pluviométriques RECRET au pas de temps journalier pour poursuivre ce travail de comparaison à l'échelle des épisodes.

Conclusion

Ce travail d'inter-comparaison a permis une évaluation relative de la qualité des séries de précipitations reconstruites. Les méthodes comparées s'organisent en deux groupes : GRP et SCOPE Climate, aux séries relativement comparables et à la pluviométrie généralement supérieure aux autres séries ; RECRET et FYRE Daily aux fluctuations cohérentes et aux valeurs proches de SAFRAN pour la période récente. Les données GRP et SCOPE Climate sont exclusivement fondées sur des réanalyses atmosphériques (pseudo-observations) alors que les méthodes RECRET et FYRE Daily intègrent des observations aux postes. Les séries de précipitations issues de RECRET et FYRE Daily sont donc plus proches des observations et produisent une pluviométrie convergente et cohérente avec les valeurs régionales d'écoulement. Cependant, leur qualité varie au cours du temps, corrélativement à la densité du réseau disponible pour estimer la pluie moyenne de bassin versant. Ces séries climatiques seront utilisées pour alimenter un modèle pluie-débit afin de simuler des chroniques de débits historiques. Dans ce contexte, pouvoir disposer de plusieurs séries historiques présente un réel intérêt car plusieurs pluviométries pourront être utilisées en données d'entrée de la modélisation ce qui permettra d'intégrer les incertitudes des reconstructions climatiques. La vérification de la validité des séries de débits simulés sur la période récente et à partir d'archives hydrométriques ponctuelles pour les périodes plus anciennes, devra permettre d'évaluer les performances de cette chaîne de reconstitution hydro-climatique.

Bibliographie

ANCTIL F., LAUZON N., ANDRÉASSIAN V., OUDIN L. and PERRIN C., 2006, Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization, *Journal of Hydrology*, 328: 717–725, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.01.016.

ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., USARTSANCHEZ I. and LAVABRE J., 2001, Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250: 206–223, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00437-1.

BÜNTGEN U., TRNKA M., KRUSIC P., KYNCL T., KYNCL J., LUTERBACHER J., ZORITA E., LJUNGQVIST F., AUER I., KONTER O., SCHNEIDER L., TEGEL W., STEPANEK P., BRÖNNIMANN S., HELLMANN L., NIEVERGELT D. et ESPER J., 2015, Tree-Ring Amplification of the Early-19th Century Summer Cooling in Central Europe, *Journal of Climate*, 28(13), doi: 10.1175/JCLI-D-14-00673.1

BURT T.P., 2009, Homogenising the rainfall record at Durham for the 1870s, *Hydrological Sciences Journal*, 54:1, 199-209, doi: 10.1623/hysj.54.1.199

BURT T.P., ADAMSON J.K. and LANE A.M.J., 1998, Long-term rainfall and streamflow records for north central England: putting the Environmental Change Network site at Moor House, Upper Teesdale, in context, *Hydrological Sciences Journal*, 43:5, 775-787, doi: 10.1080/02626669809492172

BURT T.P., JONES P.D. and HOWDEN N.J.K., 2015, An analysis of rainfall across the British Isles in the 1870s, *International Journal of Climatology*, 35: 2934-2947, doi: 10.1002/joc.4184

CAILLOUET L., VIDAL J.-P., SAUQUET E., GRAFF B. and 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

CASTY C., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. et BÖHM R., 2005, Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500, *International Journal of Climatology*, 25, doi: 10.1002/joc.1216

COMPO G.P., WHITAKER J.S., SARDESHMUKH P.D., MATSUI N., ALLAN R.J., YIN X., GLEASON B.E., VOSE R.S., RUTLEDGE G., BESSEMOULIN P., BRÖNNIMANN S., BRUNET M., CROUTHAMEL R.I., GRANT A.N., GROISMAN P.Y., JONES P.D., KRUK M., KRUGER A.C., MARSHALL G.J., MAUGERI M., MOK H.Y., NORDLI Ø., ROSS T.F., TRIGO R.M., WANG X.L., WOODRUFF S.D. and WORLEY S.J., 2011, The Twentieth Century Reanalysis Project, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 1-28. doi: 10.1002/qj.776.

DE JONGH I.L.M., VERHOEST N.E.C. and DE TROCH F.P., 2006, *International Journal of Climatology*, 26: 2023-2039, doi: 10.1002/joc.1352

DELUS C., FRANÇOIS D., OLLIVE V. et GILLE E., 2018, Reconstitution des sécheresses dans le bassin versant de la Moselle depuis le milieu du 19^{ème} siècle, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 70 :85-98

DEVERS A., VIDAL J.-P., LAUVERNET C., GRAFF B. and 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.

DIODATO N., 2007, Climatic fluctuations in southern Italy since the 17th century: reconstruction with precipitation records at Benevento, *Climate Change*, 80 :411-431, doi: 10.1007/s10584-006-9119-1

DOBROVOLNÝ P., BRÁZDIL R., TRNKA M., KOTYZAD O. and VALÁŠEKE 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., FRANÇOIS D. et PLASSE J., 2012, Détermination des écoulements et des phases hydrologiques (DEPHy phase 1). Rapport final, 52 p. + annexes.

FRANCOIS 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*.

GRIGGS C., PEARSON C., MANNINGA S.W. and LORENTZENA B., 2014, A 250-year annual precipitation reconstruction and drought assessment for Cyprus from *Pinus brutia* Ten. tree-rings, *International Journal of Climatology*, 34 :2702-2714. doi: 10.1002/joc.3869

GRELIER B., DROGUE G., PIROTON M., ARCHAMBEAU P. et GERNEZ E., 2017, Peut-on estimer l'effet du changement climatique sur l'écoulement à l'exutoire d'un bassin sans modèle pluie-débit ? Un test de la méthode de transfert climat-écoulement par régression dans le bassin transnational de la Meuse, *Climatologie*, 14 :48-81, doi: 10.4267/climatologie.1232

HAYLOCK M.R., HOFSTRA N., KLEIN TANK A.M.G., KLOK E.J., JONES P.D. and NEW M., 2008, A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation, *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi: 10.1029/2008JD10201.

JONES P.D., 1984, Riverflow reconstruction from precipitation data, *International Journal of Climatology*, 4: 171-186.

JONES P.D., LISTER D.H., WILBY R.L. and KOSTOPOULOU E., 2006, *International Journal of Climatology*, 26: 219-231, doi: 10.1002/joc.1252

KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS R., JENNE R. and JOSEPH D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 437-472, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

KASTENDEUCH P., 2007, Pressure gradient force, atmospheric circulation and climate in western Europe (1899-2002), *International Journal of Climatology*, 27: 2055-2067, doi: 10.1002/joc.1504

LOBLIGEIS F., 2014, *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français*. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech, 244 p.

LUTERBACHER J., XOPLAKI E., DIETRICH D., RICKLI R., JACOBET J., BECK C., GYALISTRAS D., SCHMUTZ C. and WANNERET H., 2002, Reconstruction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500, *Climate Dynamics*, 18: 545-561, doi: 10.1007/s00382-001-0196-6

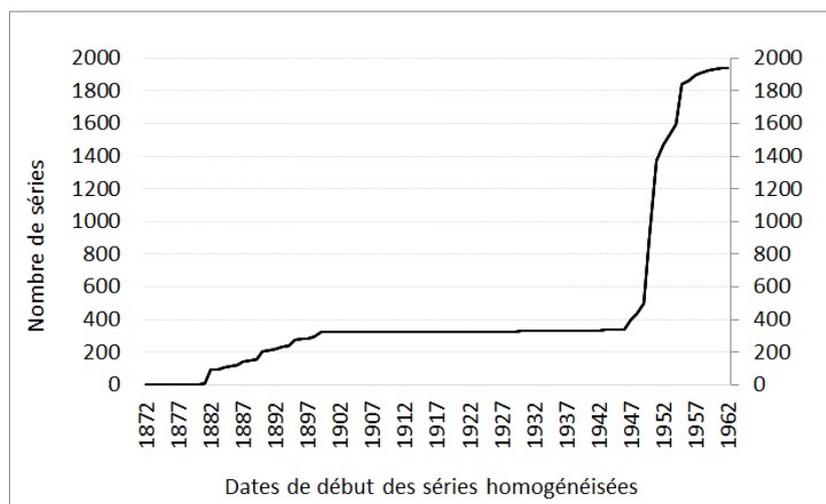
NOONE S., MURPHY C., COLL J., MATTHEWS T., MULLAN D., WILBY R.L. and WALSH S., 2016, Homogenization and analysis of an expanded long-term monthly rainfall network for the Island of Ireland (1850-2010), *International Journal of Climatology*, 36: 2837-2853, doi: 10.1002/joc.4522

PAULING A., LUTERBACHER J., CASTY C. and 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

- RODRIGO F.S., ESTEBAN-PARRA M.J., POZO-VÁZQUEZ D. and CASTRO-DÍEZ Y., 1999, A 500 years precipitation record in southern Spain, *International Journal of Climatology*, 19(11):1233-1253.
- SAVOURET E., AMAT J.P., CANTAT O. ET FILIPPUCCI P., 2011, Au temps météorologique de la grande guerre. Approche séquentielle des périodes contraignantes dans les tranchées sur le front de la Marne et de la Meuse, 1914-1918, *Climatologie*, p. 59-77. <https://doi.org/10.4267/climatologie.276>
- TOUCHAN R., MEKO D. and HUGHES M.K., 1999, A 396-Year reconstruction of precipitation in Southern Jordan, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(1), doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb05451.x
- TOUCHAN R., XOPLAKI E., FUNKHOUSER G., LUTERBACHER J., HUGHES M.K., ERKAN N., AKKEMIK Ü. and STEPHAN J., 2005, Reconstructions of spring/summer precipitation for the Eastern Mediterranean from tree-ring widths and its connection to large-scale atmospheric circulation, *Climate Dynamics*, 25: 75–98, doi: 10.1007/s00382-005-0016-5
- TRENBERTH K. and PAOLINO D., 1980, The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure data set: trends, errors and discontinuities, *Monthly Weather Review*, 108: 855-872, doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<0855:TNHSLP>2.0.CO;2
- VICENTE-SERRANO S.M., BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J.I., GARCIA-VERA M.A and STEPANEK P., 2010, A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity, *International Journal of Climatology*, 30: 1146-1163, doi: 10.1002/joc.1850.
- VIDAL J.-P., MARTIN E., FRANCHISTÉGUY L., BAILLON M. and 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.
- WIJNGAARD J.B., KLEIN TANK A.M.G. and KÖNNEN G.P., 2003, *International Journal of Climatology*, 23: 679–692, doi: 10.1002/joc.906
- WILBY R.L., NOONE S., MURPHY C., MATTHEWS T., HARRIGAN S. and BRODERICK C., 2016, An evaluation of persistent meteorological drought using a homogeneous Ireland precipitation network, *International Journal of Climatology*, 36: 2854-2865, doi: 10.1002/joc.4523
- WILSON R.J.S., LUCKMAN B.H. and ESPER J., 2005, A 500 year dendroclimatic reconstruction of spring–summer precipitation from the lower Bavarian Forest region, Germany, *International Journal of Climatology*, 25:611–630, doi: 10.1002/joc.1150
- WILSON R., MILES D., LOADER N.J., MELVIN T., CUNNINGHAM L., COOPER R. and BRIFF K., 2013, A millennial long March–July precipitation reconstruction for southern-central England, *Climate Dynamics*, 40(3-4): 997-1017, doi: 10.1007/s00382-012-1318-z
- ZHANG X-Z., GE Q-S., FANG X-Q., ZHENG J-Y. and 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

ZUMSTEIN J.F., GILLE E., ABELE J., ANGAUD M. et MARTIN C, 1985, Analyse critique des longues séries de hauteurs de crue aux échelles d'Epinal, Toul et Metz sur la Moselle et de Malzéville sur la Meurthe. Validation des séries brutes, établissement des séries homogènes et reconstitution de séries de débits, *Mosella*, 15.

Figure 1 : Evolution temporelle du nombre de séries de précipitations mensuelles homogénéisées par Météo France, d'après les données de la Publithèque⁴ (1872-1962)
Temporal evolution of the number of monthly precipitation series homogenised by Meteo France and available on the Publithèque (1872-1962)



⁴ <https://publithèque.meteo.fr>

Figure 2. Localisation des quatre bassins versants de l'étude (La Moselle à Epinal et Hauconcourt, La Meurthe à Malzéville et la Meuse à Saint-Mihiel) et points de grille RECRET (1 km) et SAFRAN (8 km). Les points de grille SCOPE Climate et FYRE Daily sont identiques à SAFRAN

Location of the four studied basins (Moselle at Epinal and Hauconcourt, Meurthe at Malzéville and Meuse at Saint-Mihiel) and grid points for RECRET (1 km) and SAFRAN (8 km). For SCOPE Climate and FYRE Daily the grid points are identical to SAFRAN

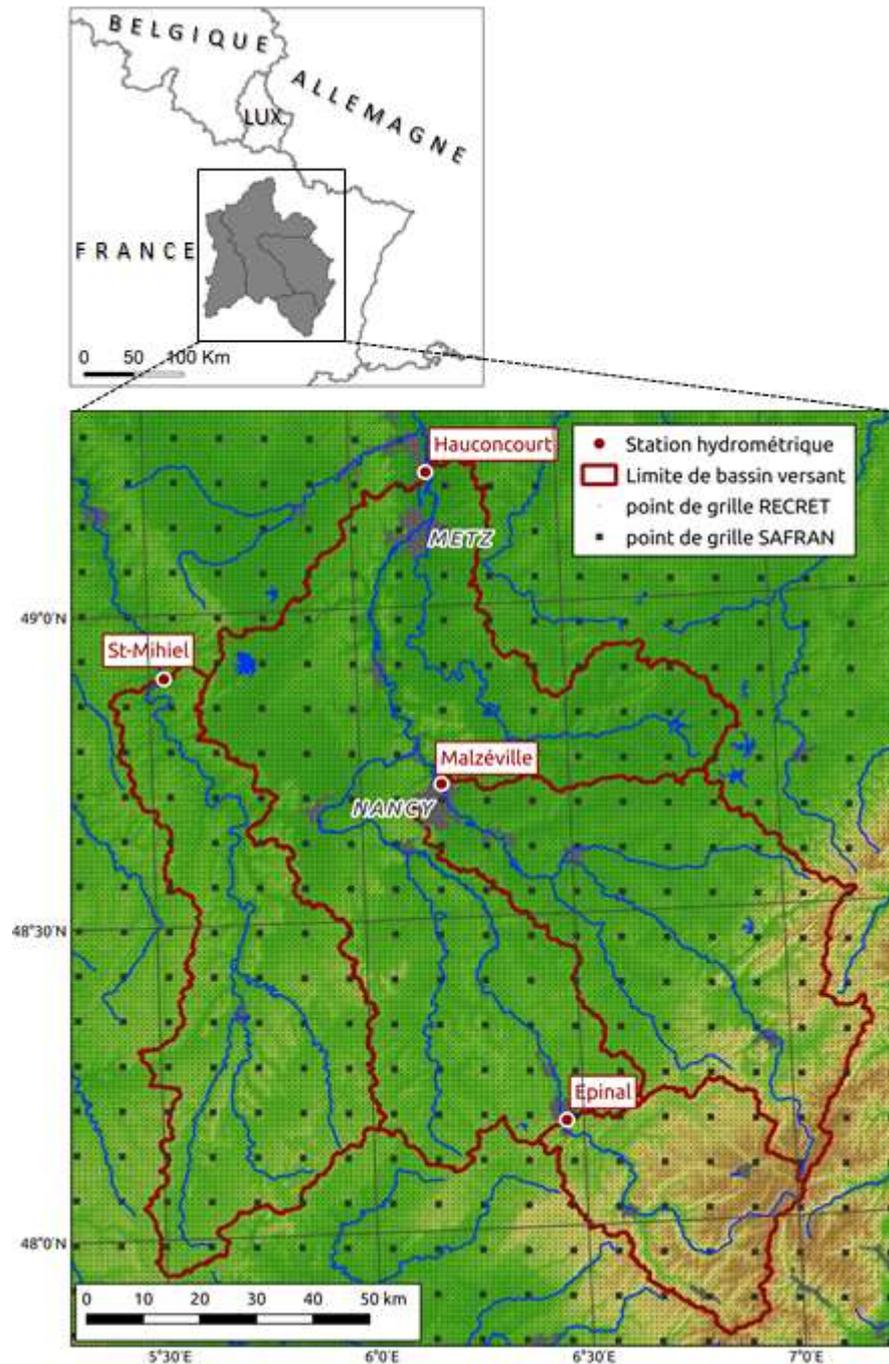


Figure 3 : Etendue temporelle des cinq méthodes de reconstruction climatique
Temporal extent of the five climate reconstruction methods

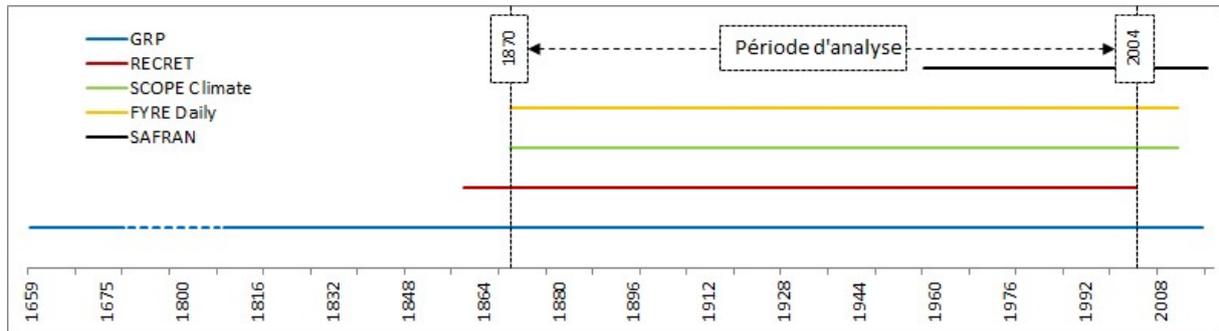


Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1959-2004) – De gauche à droite : Moselle à Epinal, Moselle à Hauconcourt, Meurthe à Malzéville, Meuse à Saint-Mihiel
Mean monthly precipitations of the four basins for the five compared methods (1959-2004) – From left to right: Moselle at Epinal, Moselle at Hauconcourt, Meurthe at Malzéville, Meuse at Saint-Mihiel

Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1959-2004) – De gauche à droite : Moselle à Epinal, Moselle à Hauconcourt, Meurthe à Malzéville, Meuse à Saint-Mihiel
Mean monthly precipitations of the four basins for the five compared methods (1959-2004) – From left to right: Moselle at Epinal, Moselle at Hauconcourt, Meurthe at Malzéville, Meuse at Saint-Mihiel

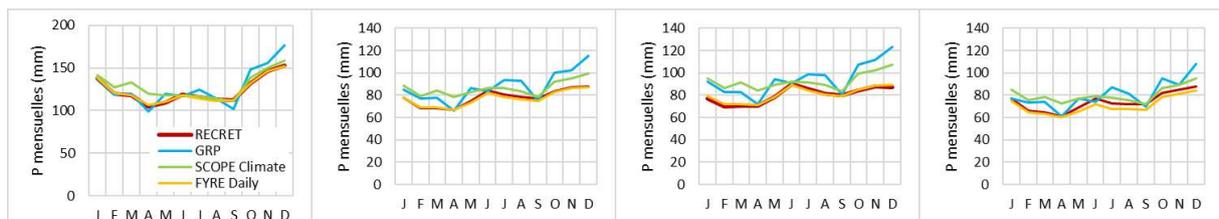


Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1871-2004) – De gauche à droite : Moselle à Epinal, Moselle à Hauconcourt, Meurthe à Malzéville, Meuse à Saint-Mihiel
Mean monthly precipitations of the four basins for the five compared methods (1871-2004) – From left to right: Moselle at Epinal, Moselle at Hauconcourt, Meurthe at Malzéville, Meuse at Saint-Mihiel

Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles des quatre bassins versants pour les cinq méthodes comparées (1871-2004) – De gauche à droite : Moselle à Epinal, Moselle à Hauconcourt, Meurthe à Malzéville, Meuse à Saint-Mihiel
Mean monthly precipitations of the four basins for the five compared methods (1871-2004) – From left to right: Moselle at Epinal, Moselle at Hauconcourt, Meurthe at Malzéville, Meuse at Saint-Mihiel

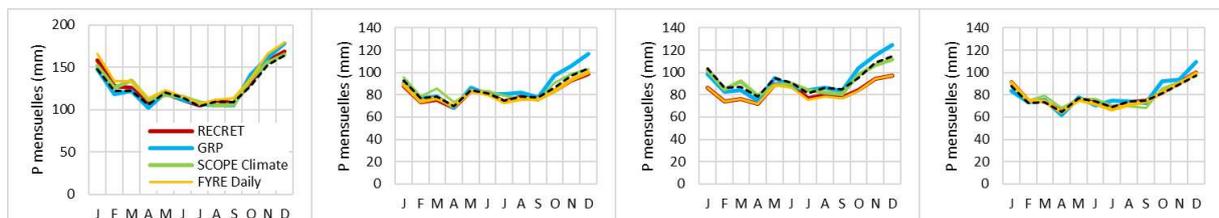


Figure 6. Comparaison des séries de précipitations totales annuelles issues des cinq différentes méthodes pour les quatre bassins de l'étude sur la période 1871-2004
Comparison of total annual precipitation series from the five different reconstruction methods for the four studied basins over the 1871-2004 period

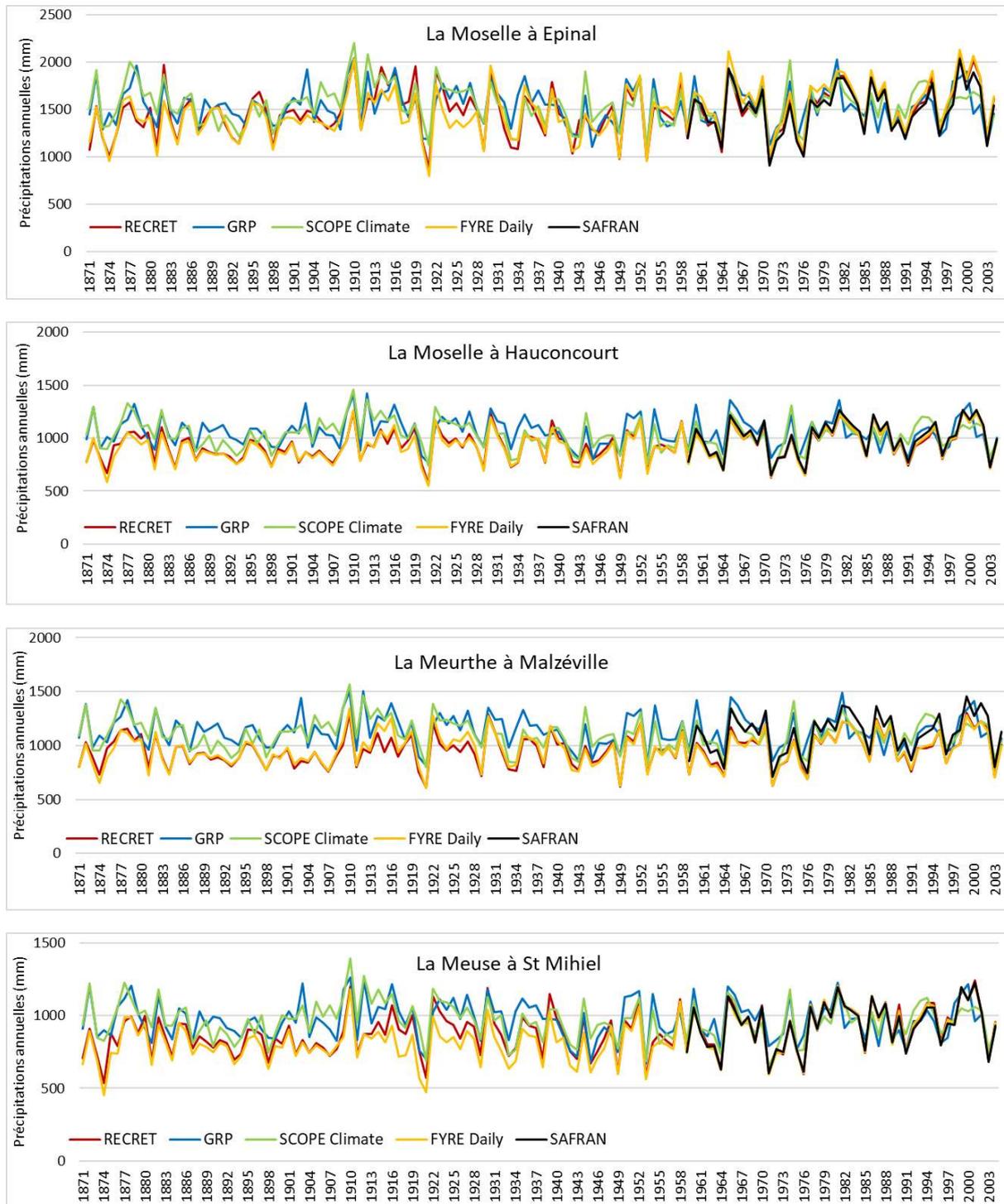


Figure 7. Courbes des fréquences cumulées des précipitations totales annuelles issues des cinq différentes méthodes pour les quatre bassins de l'étude sur la période 1871-2004
Cumulative curves of total annual precipitation from the five different reconstruction methods for the four studied basins over the 1871-2004 period

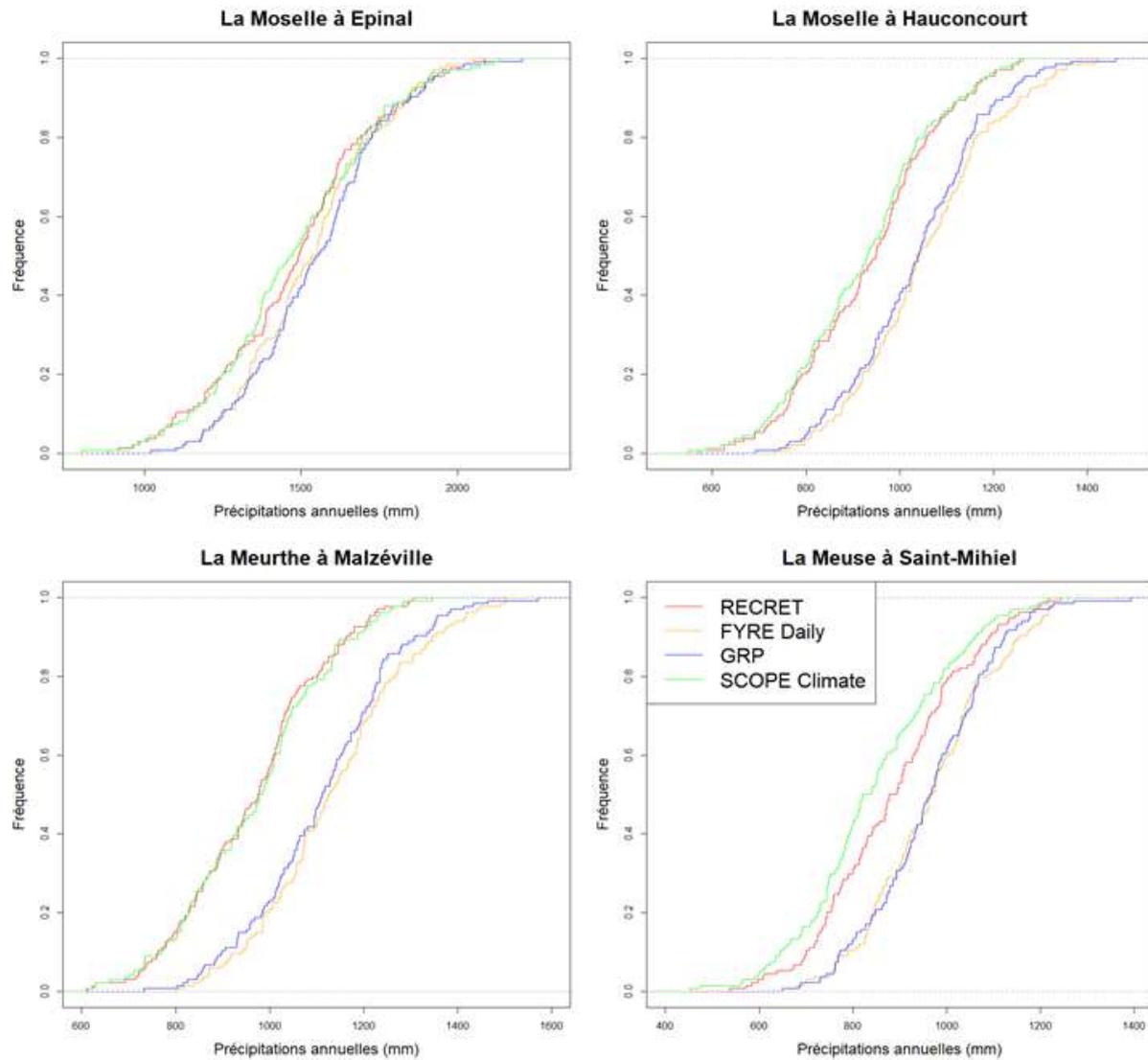


Figure 8 : Matrice des corrélations entre les précipitations mensuelles des différentes méthodes comparées (1871-2004 à gauche et 1959-2004 à droite) – a) La Moselle à Epinal b) La Moselle à Hauconcourt c) La Meurthe à Malzéville d) La Meuse à Saint-Mihiel
Correlation matrix between monthly precipitation from the different reconstruction (1871-2004 to the left and 1959-2004 to the right) – a) Moselle at Epinal b) Moselle at Hauconcourt c) Meurthe at Malzéville d) Meuse at Saint-Mihiel

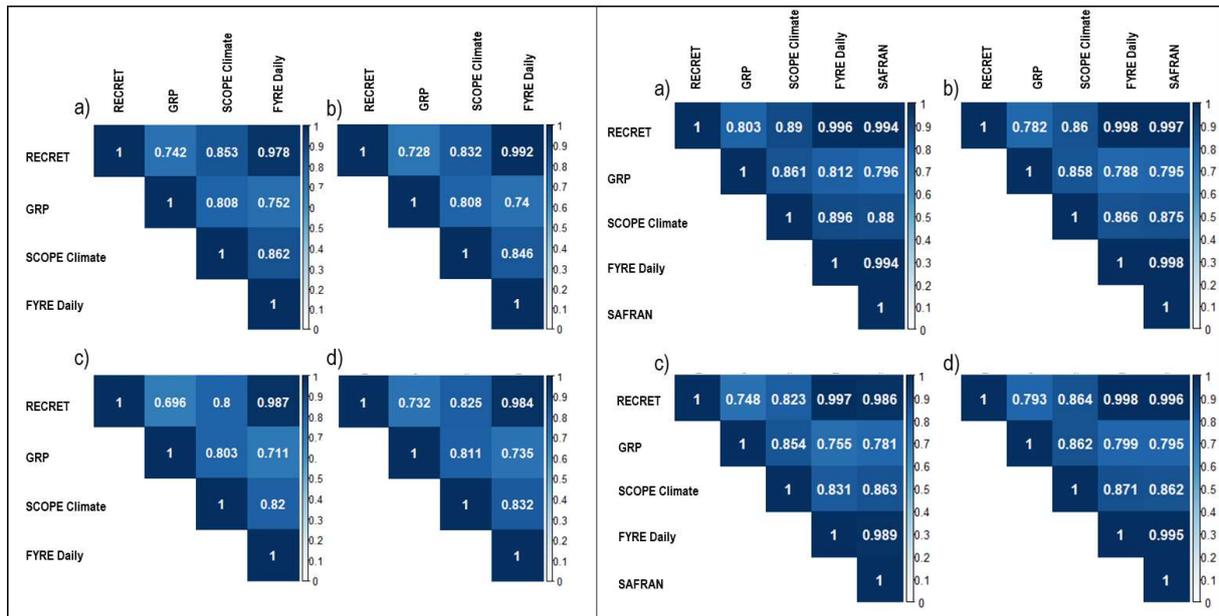


Figure 9 : Corrélations linéaires entre les précipitations totales annuelles : a) RECRET vs. FYRE Daily (1871-2004) b) RECRET vs. SAFRAN (1959-2004), c) FYRE Daily vs SAFRAN (1959-2004)
Linear correlations between total annual precipitation: a) RECRET vs. FYRE Daily (1871-2004) b) RECRET vs. SAFRAN (1959-2004), c) FYRE Daily vs SAFRAN (1959-2004)

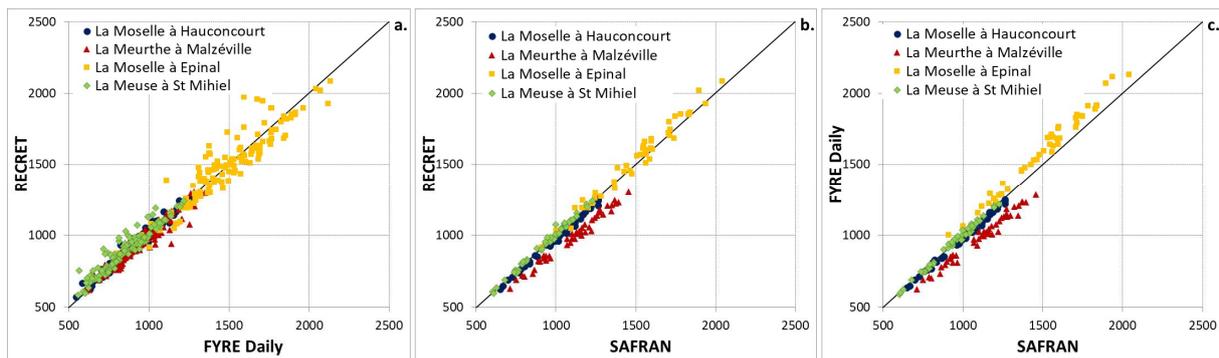


Figure 10 : Écarts mensuels absolus (en mm) entre RECRET et FYRE Daily calculés sur la période 1871-2004 (le rail jaune correspond à un écart absolu inférieur à 10 mm)

Absolute monthly difference (in mm) between RECRET and FYRE Daily over the period 1870-2004 (the yellow line shows a difference lower than 10 mm)

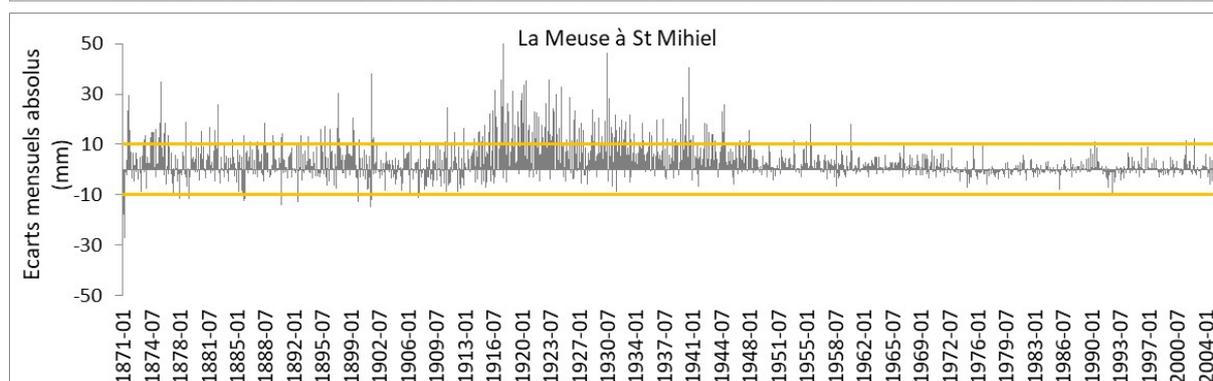
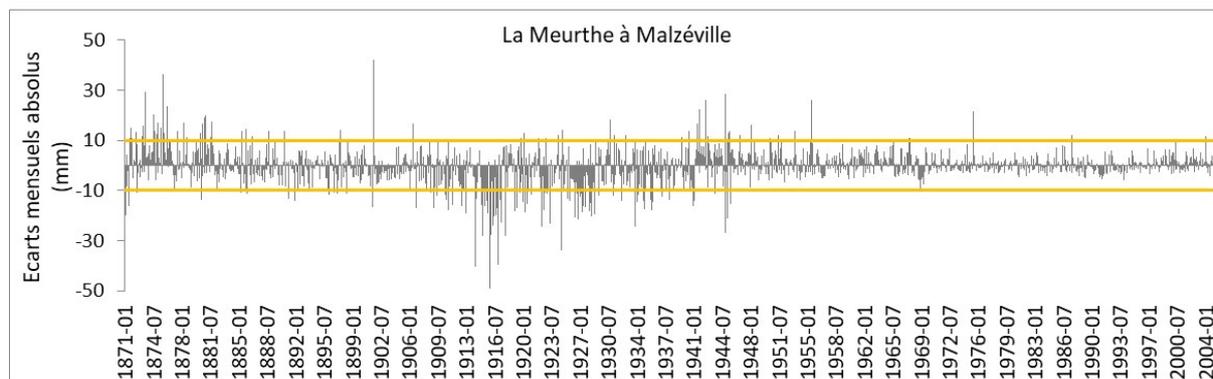
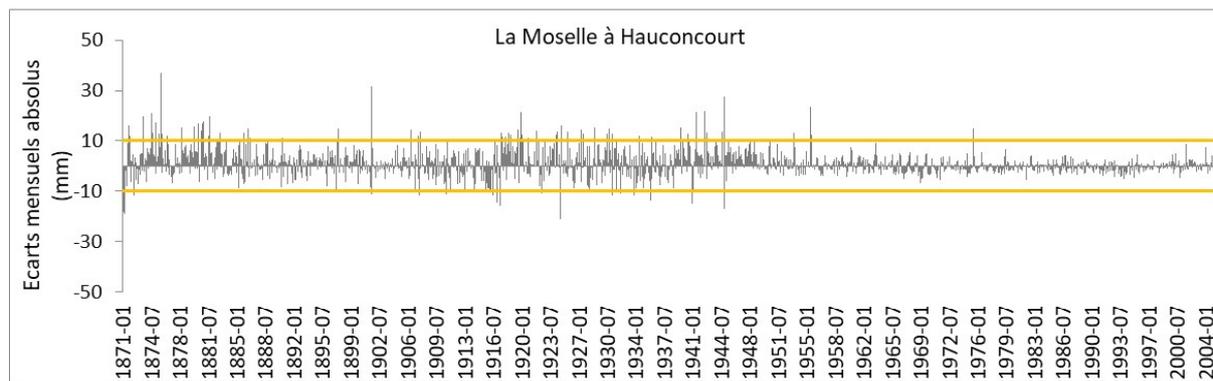
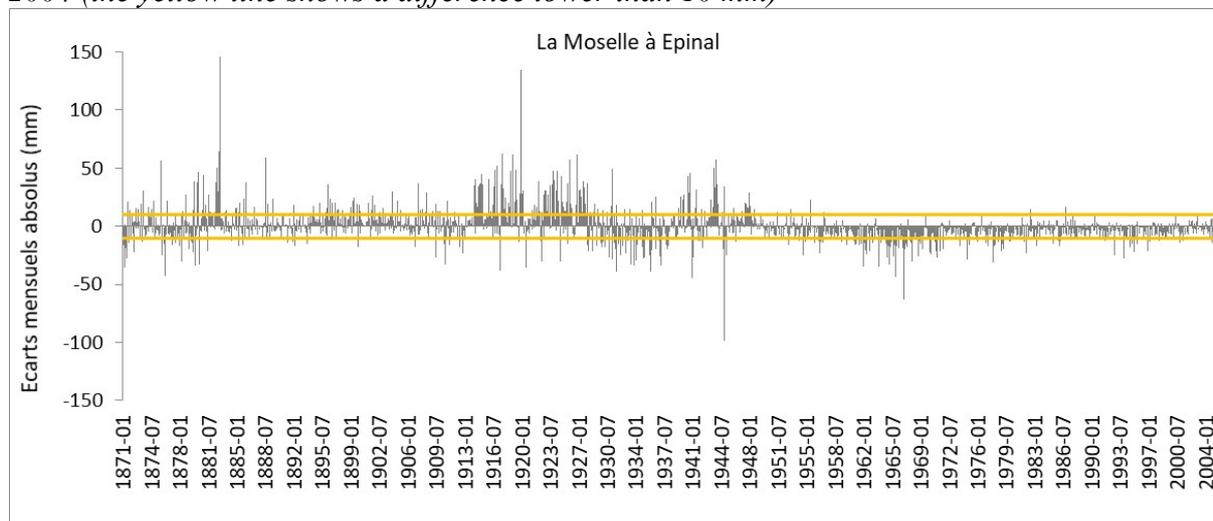


Figure 11 : Coefficients de corrélation glissants (périodes de 30 ans) entre les précipitations mensuelles de bassin versant issues des méthodes RECRET et FYRE Daily (1871-2004)
Sliding correlation coefficients (30-year periods) between monthly basin precipitations from RECRET and FYRE Daily (1871-2004)

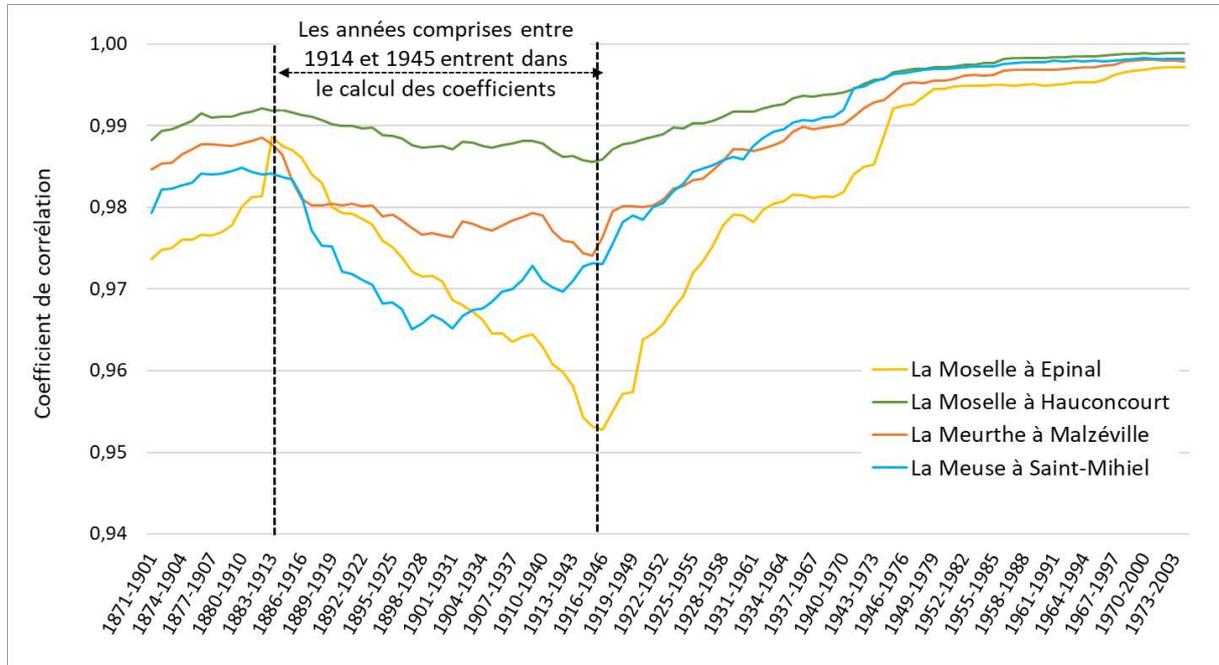


Figure 12 : Evolution temporelle du nombre de postes pluviométriques participant au calcul des précipitations moyennes de bassin versant pour les méthodes RECRET et FYRE Daily sur la période 1871-2004
Temporal evolution of the number of rainfall stations involved in calculating the average basins precipitation for RECRET and FYRE Daily methods over the period 1871-2004

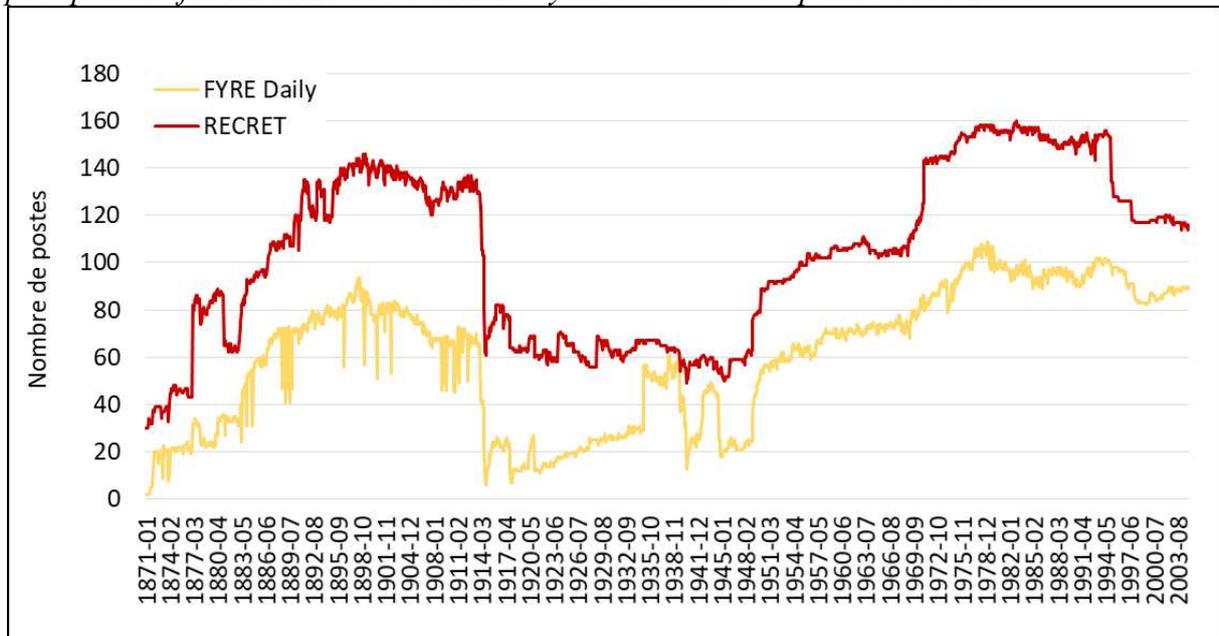
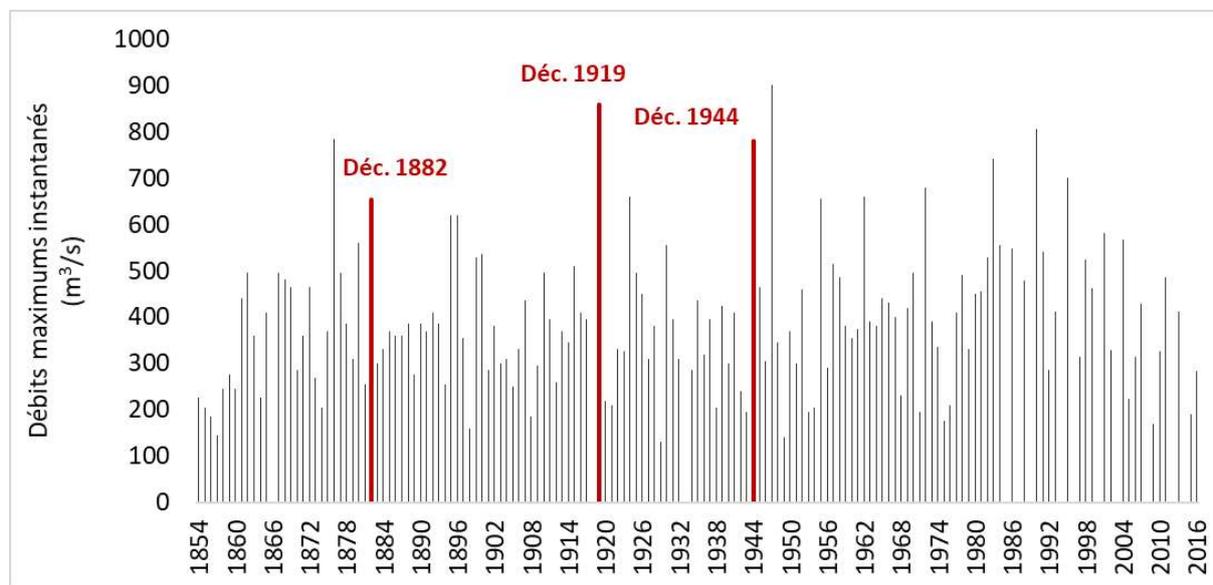


Figure 13. Les crues de la Moselle à Epinal de 1854 à 2015 (d'après les données de Zumstein et al. 1985 et de la Banque hydro⁵) – Les trois crues identifiées en rouge correspondent aux mois pour lesquels les écarts de précipitations entre les séries RECRET et FYRE Daily sont les plus importants

Floods of the Moselle at Epinal (from Zumstein et al. 1985 and Banque hydro³) - The three floods identified in red are months for which differences between RECRET and FYRE Daily precipitations are the most important



⁵ <http://hydro.eaufrance.fr/>