

RECONSTITUTION DES SÉCHERESSES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOSELLE DEPUIS LE MILIEU DU 19^{ÈME} SIÈCLE

Claire DELUS, Didier FRANCOIS, Vincent OLLIVE, Emmanuel GILLE

Résumé

Cet article propose une reconstitution des épisodes de sécheresses qui ont touché le bassin versant de la Moselle depuis le milieu du 19^e siècle. Ces épisodes, qui se traduisent par des étiages extrêmes, ne peuvent être étudiés à partir des débits car les enregistrements hydrométriques remontent rarement au-delà des années 1950. Nous proposons donc d'utiliser les relevés climatiques qui présentent des chroniques plus anciennes afin de reconstituer les sécheresses météorologiques. Un inventaire des archives climatiques a été réalisé afin de constituer une base de données climatologiques et de réaliser des grilles de précipitations spatialisées. Des longues chroniques de précipitations moyennes sur le bassin versant de la Moselle ont ainsi pu être reconstituées depuis 1860.

Mots clés

archives climatiques, sécheresse, spatialisation, Moselle

Abstract

In this paper we study hydrological droughts which affected the Mosel catchment since the middle of the 19th century. These events produce severe low flows and can hence be analyzed through river streamflow. Nevertheless, hydrometric data are rarely available before the 1950s. However, climate data records longer series and can hence be used to reconstruct long climate series. Based on the inventory of climate archive an historical climate database was built. Spatialization techniques are used to produce gridded precipitation data. These grids are used to reconstruct mean precipitations in the Mosel basin since 1860.

Keywords

climate archives, drought, spatialization, Mosel

I. INTRODUCTION

La connaissance des extrêmes climatiques et hydrologiques constitue un enjeu majeur dans le cadre de la gestion des risques naturels associés. Or, une des principales difficultés liées à l'étude des phénomènes extrêmes réside dans le manque de données sur le long terme. Nous proposons dans cette étude de reconstituer les épisodes de sécheresses qui se sont déroulés depuis le 19^e siècle dans le bassin versant de la Moselle.

Les sécheresses sont liées à une absence prolongée de précipitations et se caractérisent donc d'abord par un déficit pluviométrique par rapport à une normale. Ces sécheresses, que l'on peut qualifier de météorologiques, ont très souvent des répercussions sur la ressource en eau. Les sécheresses hydrologiques peuvent être étudiées à partir des

débits des cours d'eau car elles se traduisent par des étiages extrêmes. Or, les enregistrements hydrométriques remontent rarement avant les années 1950. Par contre, les relevés climatiques présentent des chroniques plus anciennes et peuvent être utilisés pour reconstituer ces épisodes secs.

Dans le cadre de cette étude, nous avons collecté des archives climatiques afin de construire une base de données climatologiques à l'échelle mensuelle. Ces données sont ensuite utilisées pour réaliser des grilles de précipitations issues d'une méthode de spatialisation. Des longues séries de précipitations moyennes sur le bassin versant de la Moselle (Figure 1) ont ainsi pu être reconstituées depuis 1860, soit sur près de 140 ans.

Un lien entre les sécheresses atmosphériques et les sécheresses hydrologiques peut être établi sur la

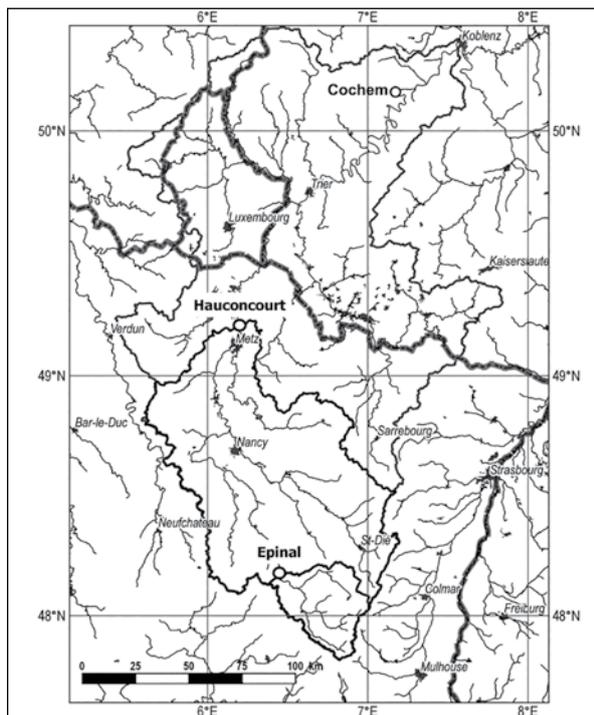


Figure 1. Localisation du bassin versant de la Moselle et limites du bassin versant à Koblenz, Hauconcourt et Épinal

période récente pour laquelle on dispose de mesures hydrométriques en continu. Pour les périodes plus anciennes, il faut s'appuyer sur des mesures hydrométriques ponctuelles mais aussi sur des archives documentaires.

II. LES MÉTHODES DE RECONSTITUTION DE LONGUES SÉRIES CLIMATIQUES OU HYDROLOGIQUES

L'utilisation de sources documentaires a montré son efficacité pour la reconstitution de l'histoire du climat en contribuant à l'accroissement des connaissances sur les relations entre les sociétés et leur environnement (Le Roy Ladurie, 1967 ; Alexandre, 1987 ; Garnier, 2010).

En ce qui concerne les cours d'eau, ils ont fait l'objet d'un intérêt soutenu d'abord par la réalisation d'inventaires historiques des crues en raison du risque qui leur est associé et de leur intérêt sociétal (par exemple Champion, 1863). Plus récemment, l'étude conjointe de séries hydrologiques instrumentales, documentaires et parfois d'archives sédimentaires (paléo-inondations) ont permis la reconstruction de séries hydrologiques longues (Barriendos *et al.*, 2003 ; Llasat *et al.*, 2005 ; Uribe Larrea *et al.*, 2003 ; Benito *et al.*, 2004). Plus récemment, Caillouet *et*

al. (2017) proposent de reconstituer des chroniques de débits d'étiage à partir d'une modélisation hydrologique pluie-débit alimentée par des longues séries climatiques reconstruites.

L'étude pluridisciplinaire des événements extrêmes a aussi permis un développement méthodologique permettant de coupler données météorologiques et modélisations climatiques.

Dans le bassin du Rhin supérieur, les étiages extrêmes du Rhin ont pu être documentés (Pfister *et al.*, 2006) tandis que des modélisations climatiques (précipitations et températures) ont été réalisées à partir de données phénologiques en Franche-Comté (Garnier *et al.*, 2011), ou dendrochronologiques dans le nord-est de la France et le sud-ouest de l'Allemagne, (Buntgen *et al.*, 2011). En Lorraine, où le climat et les cours d'eau comme la Moselle sont documentés par de nombreuses sources anciennes (Oly, 1885, Ferber, 2009 ; Litzemburger, 2015), des recherches associant données documentaires et instrumentales (par exemple les précipitations ou les sécheresses) sont possibles sur le temps long et à une résolution temporelle infra-annuelle.

III. LES ARCHIVES CLIMATIQUES

La météorologie scientifique remonte au 17^e siècle, avec l'apparition des premiers instruments de mesures tels que le baromètre et le thermomètre (<http://www.meteofrance.fr/nous-connaître/decouvrir-la-meteorologie/notre-histoire>). En France, les premiers réseaux de mesures sont mis en place au cours du 18^e siècle, notamment sous l'impulsion de la Société Royale de Médecine qui cherche à établir des liens entre les conditions météorologiques et certaines épidémies. Les Ingénieurs des ponts-et-chaussées installent également dès le 18^e siècle des pluviomètres à proximité de certaines voies navigables. Durant cette même période, les commissions hydrométriques recommandent la mise en place d'un réseau de mesures dans les grands bassins versants. Au milieu du 19^e siècle, un service d'observations météorologiques est également mis en place dans les Écoles normales primaires, mais c'est surtout à partir de 1878, date à laquelle est fondé le Bureau Central Météorologique, que le réseau de mesures se densifie. A ces réseaux organisés s'ajoutent aussi les très nombreuses observations relevées dans le cadre d'initiatives privées.

Les observations climatiques anciennes sont donc très nombreuses, généralement consignées dans des documents papiers que l'on peut consulter au sein de différents services d'archives : les archives de Météo France, la Bibliothèque nationale de France, les archives départementales, les fonds universitaires, etc.

A. Les observations climatiques anciennes dans l'est de la France

De nombreuses personnes ont participé aux observations climatiques dans l'est de la France (Raulin, 1881a et b), qu'il s'agisse de Professeurs, d'Abbés, de Médecins ou encore d'Ingénieurs. Les toutes premières observations sont faites à la fin du siècle : l'Ingénieur Meyer fils commence à établir une série de mesures pluviométriques à Mulhouse dès 1778, le Dr Keller réalise des observations pour la Société Royale de Médecine à partir de 1781 et l'Abbé Vautrin relève des mesures pluviométriques à Nancy à partir de 1799. Raulin publie en 1881 une synthèse de toutes ces observations pluviométriques faites dans l'est de la France entre la fin du 17^e et la fin du 18^e siècle (cf. III. B. 5). Ces données correspondent généralement à des moyennes mensuelles, trimestrielles et annuelles.

Les relevés climatiques ont en effet longtemps été notés à la main et les données les plus anciennes correspondent souvent à des moyennes mensuelles. Ainsi, les mesures faites pour la Société Royale de Médecine étaient rédigées par l'observateur à la fin de chaque mois et celui-ci était chargé de transmettre les moyennes mensuelles calculées selon un protocole établi.

B. Inventaire des observations climatiques et constitution d'une base de données climatique historique

Un inventaire des observations pluviométriques disponibles pour cette étude a été réalisé. Les recherches d'archives climatiques ont porté plus particulièrement sur les départements suivant : Nord, Ardennes, Haute-Marne, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Vosges, Territoire de Belfort et Haute-Saône. Les données disponibles pour la partie allemande et luxembourgeoise du bassin versant de la Moselle et alentour ont également été recueillies.

Ces données climatiques ont été collectées à l'échelle mensuelle dans la mesure où le pas de temps journalier aurait considérablement réduit la densité du réseau pour les postes les plus anciens, sans pour autant constituer un apport significatif pour la reconstitution des sécheresses. L'échelle mensuelle est en effet bien adaptée à l'analyse de ces épisodes dans la mesure où de nombreux indicateurs de sécheresse sont calculés à partir de données mensuelles (OMM, 2016).

Les observations climatiques qui ont été utilisées proviennent de différentes sources (Figure 2).

1. Les données des services météorologiques nationaux et des bases de données en ligne

Météo France a engagé depuis 2011 le projet « Accès aux archives du climat » qui est un programme de sauvetage de données climatologiques anciennes (Jourdain *et al.*, 2015). L'objectif de ce projet est de

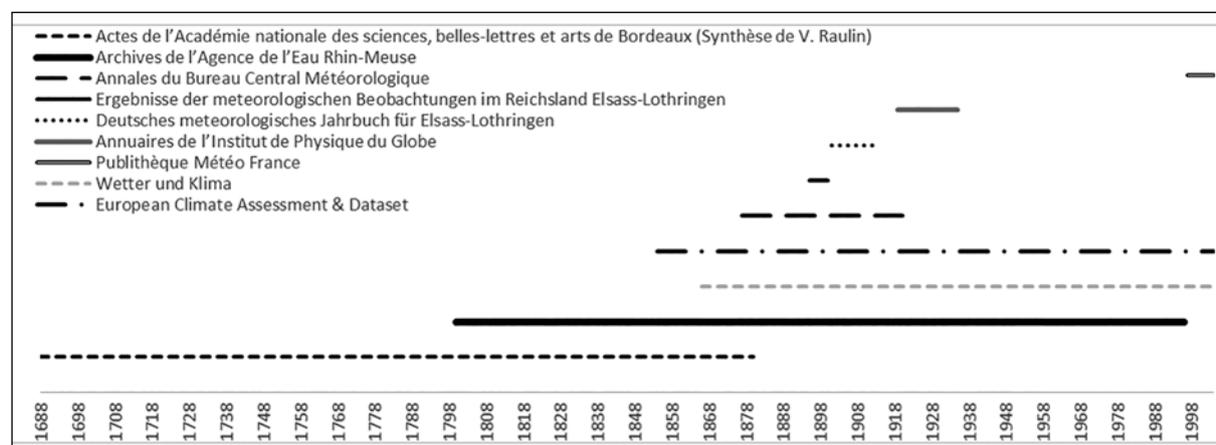


Figure 2. Sources des données climatologiques et périodes associées

rendre accessible au public les archives de Météo France, mais pour le moment peu de séries anciennes sont disponibles et ces données sont encore soumises à redevance. Pour ces raisons, seules les données de précipitations les plus récentes (après 1997) proviennent du portail de données publiques Météo France.

Le service météorologique allemand « Wetter und Klima » (<http://www.dwd.de>) met à disposition en téléchargement libre les données des stations climatologiques allemandes. Au total, 123 postes pluviométriques ont été utilisés. La série la plus ancienne démarre en 1866, à la station de Freudenstadt dans le Bade Wurtemberg.

Enfin, les données de la station de Luxembourg ont été récupérées sur le site Internet European Climate Assessment & Dataset (<http://www.ecad.eu>) qui met également à disposition des séries climatologiques. Les enregistrements de la station de Luxembourg débutent en janvier 1854.

2. La base de données climatologiques de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse

L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse dispose d'une base de données climatologiques mensuelle qui contient de longues séries historiques démarrant au début du 19^e siècle et maintenues à jour jusqu'en 1997. Au total, la base de données contient 440 postes pluviométriques. L'arrêt de la mise à jour de cette base de données explique qu'à partir de 1997 les séries ont dû être achetées auprès de Météo France.

3. Les Annales du Bureau Central Météorologique de France

Entre 1877 et 1920, le Bureau Central Météorologique publie des annales dans lesquelles sont rassemblées les pluies observées en France. Les données provenant de 263 stations ont été utilisées dans le cadre de notre étude.

4. Les annuaires de l'Institut de Physique du Globe et les archives allemandes

Les archives climatologiques allemandes contiennent également des synthèses des observations faites en Alsace-Lorraine entre 1895 et 1914. Il s'agit de volumes annuels, d'abord intitulés « Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen im Reichsland

Elsass-Lothringen » durant la période 1895-1900, puis remplacés par les « Deutsches meteorologische Jahrbuch für Elsass-Lothringen » de 1901 à 1914. L'Institut de Physique du Globe (IPG) de Strasbourg héritera ensuite de ce réseau de mesure. Il publiera dans des annuaires les observations météorologiques faites entre 1919 et 1935. Au total, 66 postes climatologiques de la base de données climatologiques proviennent de ces annuaires.

5. Les Actes de l'Académie nationale des sciences, belles-lettres et arts de Bordeaux

Les Actes de l'Académie nationale des sciences, belles-lettres et arts de Bordeaux, consultables en ligne sur la bibliothèque numérique Gallica de la Bibliothèque nationale de France, livrent deux synthèses des observations pluviométriques dans l'est de la France. Elles ont été réalisées par V. Raulin et concernent les périodes 1688-1870 puis 1871-1880 (Raulin, 1881a et b). Ces relevés climatologiques sont donc particulièrement intéressants car ils constituent les premières observations climatologiques faites dans la région. 130 postes de la base de données proviennent de cette source.

C. Propriétés de la base de données climatologiques historiques

L'ensemble des observations pluviométriques inventoriées a été introduit dans une base de données qui contient au total 969 postes pluviométriques (Figure 3). La station la plus ancienne est celle de Mulhouse, dont les enregistrements débutent en 1778. La plus longue chronique de précipitations est celle de Gondrexange, qui fonctionne en continu depuis 1855. La Figure 3 montre une augmentation de la densité du réseau de mesures à partir du milieu du 19^e siècle, avec toutefois une diminution des observations pendant la période des deux guerres mondiales et de l'entre-deux guerres. À partir de 1997, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse arrête la mise à jour de sa base de données et les stations proviennent de Météo France. Ces données étant soumises à redevance, un réseau de mesure d'environ 150 postes a été retenu, ce qui explique la diminution du nombre de stations à partir de 1998. Chaque station a été localisée à partir des informations historiques disponibles (Figure 4). L'indication des coordonnées géographiques constitue le cas de figure idéal mais lorsque cette information est absente, le poste a été localisé à partir d'autres informations

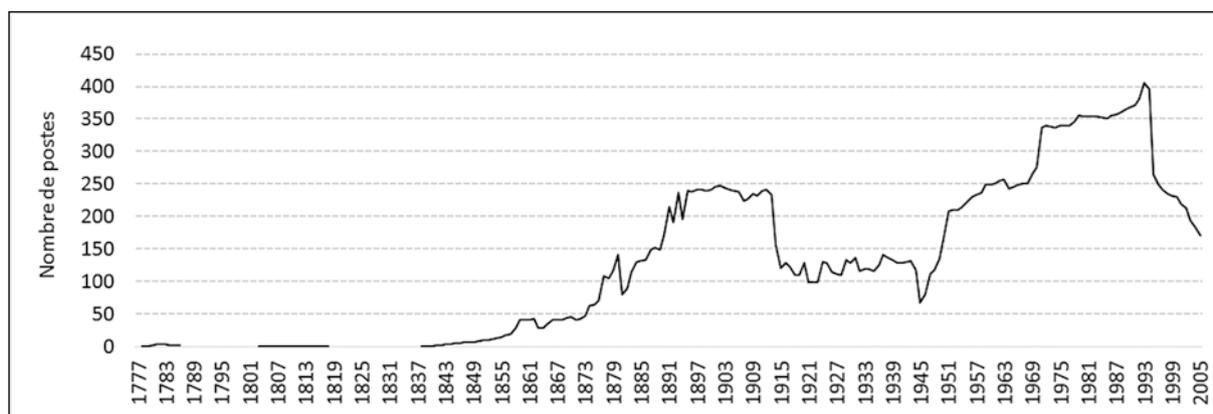


Figure 3. Nombre de postes pluviométriques par année

telles que le nom de la commune et l'altitude. La précision de l'emplacement de chaque station dépend donc des métadonnées historiques disponibles.

IV. RECONSTITUTION DE LONGUES SÉRIES DE PRÉCIPITATIONS MOYENNES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA MOSELLE

A. Qualité et critique de la donnée historique

Les conditions d'observations des données climatiques anciennes étant souvent difficiles à établir,

l'utilisation de ces données nécessite des précautions méthodologiques. Les chroniques peuvent en effet être affectées de biais liés à des changements d'instrumentation, d'observateur ou encore de localisation de poste.

De nombreux tests tels que la méthode classique du double cumul ont été développés afin de contrôler la validité des séries climatiques. Ces techniques n'ont toutefois pas été appliquées car elles nécessitent de longues séries de référence. Ces méthodes consistent en effet à comparer les séries à tester avec

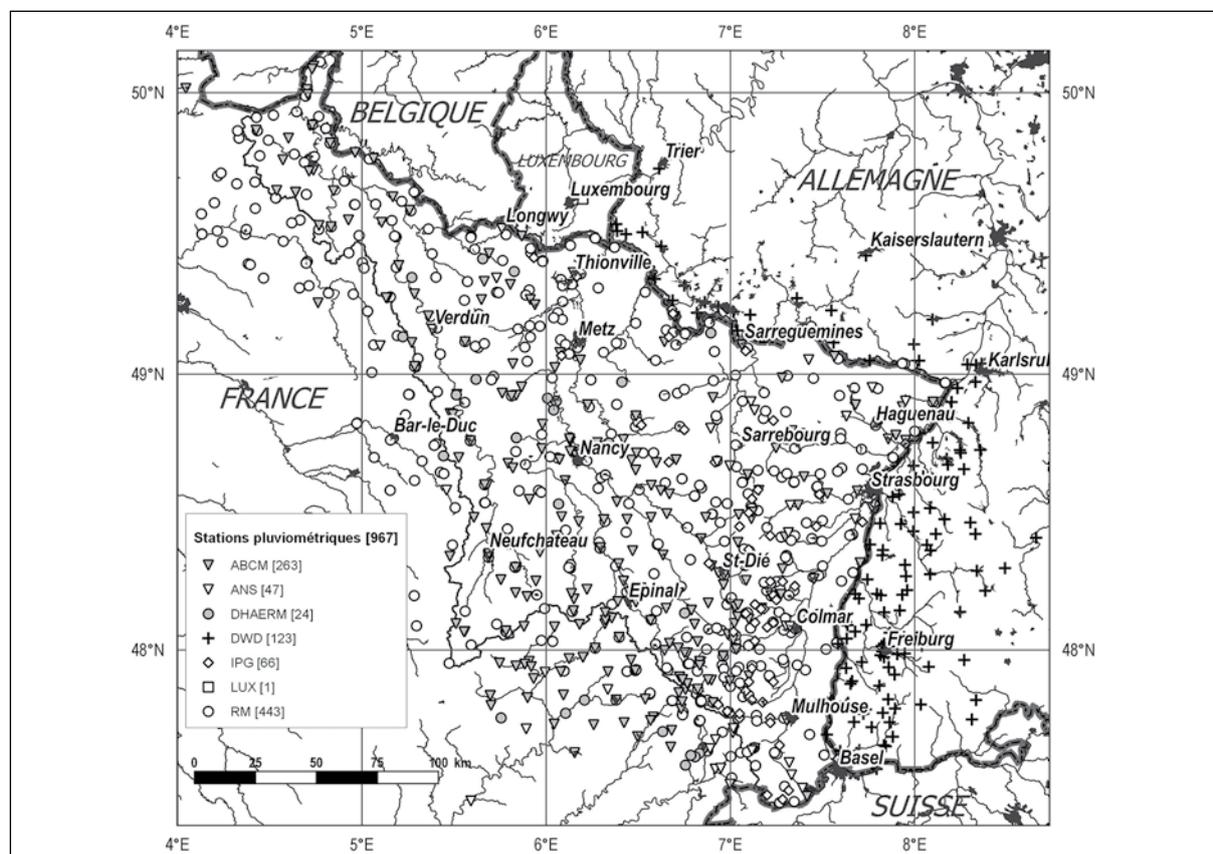


Figure 4. Localisation des postes pluviométriques disponibles dans la base de données et source associée

des séries climatiques dites « homogénéisées », c'est-à-dire dont les fluctuations sont uniquement causées par les variations climatiques (Aguilar *et al.*, 2003). Ces tests nécessiteraient par ailleurs de mettre bout à bout des séries relevées à différents postes mais proches géographiquement (Jourdain *et al.*, 2015) afin de reconstituer de longues chroniques. Or, cette procédure requiert des métadonnées historiques précises, afin de ne pas risquer d'introduire des biais dans les séries. L'instrumentation, l'observateur ou encore l'emplacement du poste ont, en effet, pu changer au cours du temps mais l'information est souvent insuffisante pour reconstituer l'historique de la station. Pour ces raisons, même lorsque plusieurs relevés climatiques concernent une même localité au cours du temps, chaque série fait l'objet d'un poste individualisé dans la base de données dès lors que la source des données change. Ce choix se justifie d'autant plus que l'objectif n'est pas de reconstituer de longues séries de précipitations au droit des postes, mais d'établir des grilles de précipitations qui permettront d'estimer des valeurs moyennes sur le bassin versant. Le contrôle des données constituant néanmoins une étape indispensable, celle-ci a été intégrée dans la méthode de spatialisation présentée ci-dessous.

B. Réalisation des grilles de précipitations

Le climat de la région étudiée subit l'influence du massif vosgien et la topographie a un impact important sur la répartition des précipitations. Nous avons donc utilisé des variables topographiques issues d'un Modèle Numérique de Terrain pour les spatialiser.

La spatialisation des données permet de valoriser toutes les chroniques disponibles dans la base de

données, même les séries discontinues ou très courtes. Les grilles de précipitations sont, en effet, recalculées pour chaque mois, en fonction du réseau de stations disponibles.

L'indice CR (Dubois, 2000) a été calculé afin d'évaluer la représentativité du réseau de mesure pour chaque année (Figure 5). Cet indice se fonde sur le découpage des polygones de Thiessen et sur la distance avec le plus proche voisin. Le réseau est jugé représentatif lorsque le coefficient s'approche de 1 ; les valeurs inférieures indiquent une forte densité de points, donc une bonne couverture spatiale, alors que les valeurs supérieures à 1 préjugent d'un réseau moins important et moins bien réparti spatialement. Les périodes pour lesquelles le coefficient n'a pas été calculé correspondent aux années pour lesquelles il n'y a qu'un seul poste disponible dans la base de données. Le coefficient de représentativité devient inférieur à 1 à partir de 1860, année pour laquelle on dispose de 16 postes pluviométriques. Il redevient supérieur entre 1863 et 1868 puis repasse sous 1. La spatialisation des précipitations a été appliquée à partir de l'année 1860, le réseau de mesure étant jugé insuffisant avant cette période.

Compte tenu du nombre important de grilles à réaliser (de janvier 1860 à décembre 2004, soit 1.740 grilles), il a fallu utiliser une méthode de spatialisation automatique qui ne requiert pas ou peu l'intervention d'un opérateur.

1. Méthode de spatialisation des précipitations

Notre expérience sur les méthodes de spatialisation des précipitations à différentes échelles de temps

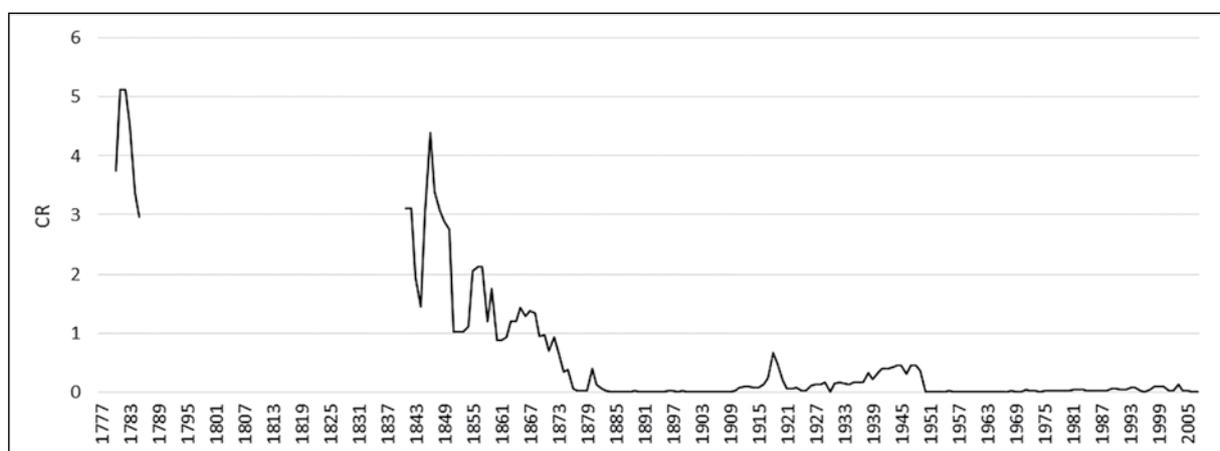


Figure 5. Coefficient de représentativité CR

(François & Humbert, 2000) et des travaux plus récents (Valéry, 2010, Drogue & François, 2014), nous ont amené à proposer la méthode développée ici.

Elle s'appuie sur une interpolation de type inverse distance (Arnaud & Emery, 2000) dans laquelle pour un site à estimer on utilise une différence d'altitude en plus de la distance avec les postes du voisinage. La formulation mathématique est la suivante :

où :

— $P(m)$ est la pluie mensuelle calculée au site à estimer,

— n , le nombre de stations voisines,

— w_k , le poids affecté à la station k en fonction de la distance d qui la sépare du site à estimer : $\frac{1}{d^\delta}$, δ

$$P(m) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n w_k} \times \sum_{k=1}^n w_k \times P_k(m) \times \exp[\beta(z - z_k)]$$

est un paramètre à caler,

— $P_k(m)$, la pluie mensuelle à la station k ,

— β , le gradient de la pluie en fonction de l'altitude,

— z , l'altitude retenue pour le site à estimer,

— z_k , l'altitude retenue pour la station k .

Nous savons que l'altitude « brute » d'une station pluviométrique ne correspond pas à la variable explicative la plus pertinente pour modéliser la répartition de la pluie dans une région montagneuse (François & Humbert, 2000). À partir d'un MNT on peut extraire d'autres variables topographiques bien corrélées avec les cumuls de précipitations. Pour ce travail, nous avons calculé la moyenne des altitudes contenues dans des fenêtres (François & Humbert, 2000) autour d'un maximum de postes pluviométriques situés dans notre zone d'étude. Pour chaque mois nous avons retenu la variable topographique qui se corrélait le mieux avec les cumuls pluviométriques.

Les paramètres n et δ ont été estimés grâce à une procédure de validation croisée et fixés respectivement à 12 et 0.5.

2. Contrôle des données

Comme indiqué précédemment (cf. III. A.), il n'y a pas eu de critique systématique des données par les méthodes classiques qui auraient nécessité des séries de référence. Afin d'éviter d'intégrer des

valeurs « erronées » dans la procédure de spatialisat-ion, nous avons filtré certaines données par un test simple : une comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs observées sur une période récente (période dont les données ont été critiquées et validées dans le cadre de la chaîne d'acquisition des données de Météo France), a permis de fixer un intervalle de confiance à 95 % (Figure 6). Pour la période ancienne si une pluie mesurée sort de cet intervalle, elle est corrigée en prenant la valeur de l'intervalle. Cette procédure a abouti à la correction de 7 % des données.

C. Estimation des précipitations moyennes sur le bassin versant de la Moselle

Des grilles 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.

Des précipitations moyennes ont ainsi été calculées pour le bassin versant de la Moselle à Hauconcourt et à Épinal. Hauconcourt contrôle en effet un bassin versant de 9387 km², soit une grande partie du bassin de la Moselle française. Épinal permet de s'intéresser plus particulièrement à la partie amont du bassin versant qui est située dans le massif des Vosges. À Épinal, le bassin versant de la Moselle représente 1217 km².

Cette procédure a donc permis de reconstituer des longues séries de précipitations moyennes sur la période 1860-2004 à ces deux échelles spatiales (Figure 7). Le test de Pettitt (1979) permet de définir un saut de moyenne en 1950, avec une série plus sèche de 1860 à 1949 (1324 mm en moyenne à Épinal et 888 mm à Hauconcourt) et plus humide de 1950 à 2004 (1473 mm à Épinal et 982 mm à Hauconcourt).

Ces séries de précipitations annuelles (Figure 7) permettent d'identifier les années les plus sèches (en année civile), en particulier l'année 1921. Les précipitations moyennes annuelles sur le bassin versant de la Moselle aux stations d'Épinal et d'Hauconcourt sont estimées respectivement à 866 et 559 mm pour cette année, contre 1380 et 924 mm en moyenne sur la période (1860-2004). Il s'agit de l'année la plus sèche de la série pour le bassin à Hauconcourt et de la deuxième année la plus sèche après 1862 (849 mm) à Épinal.

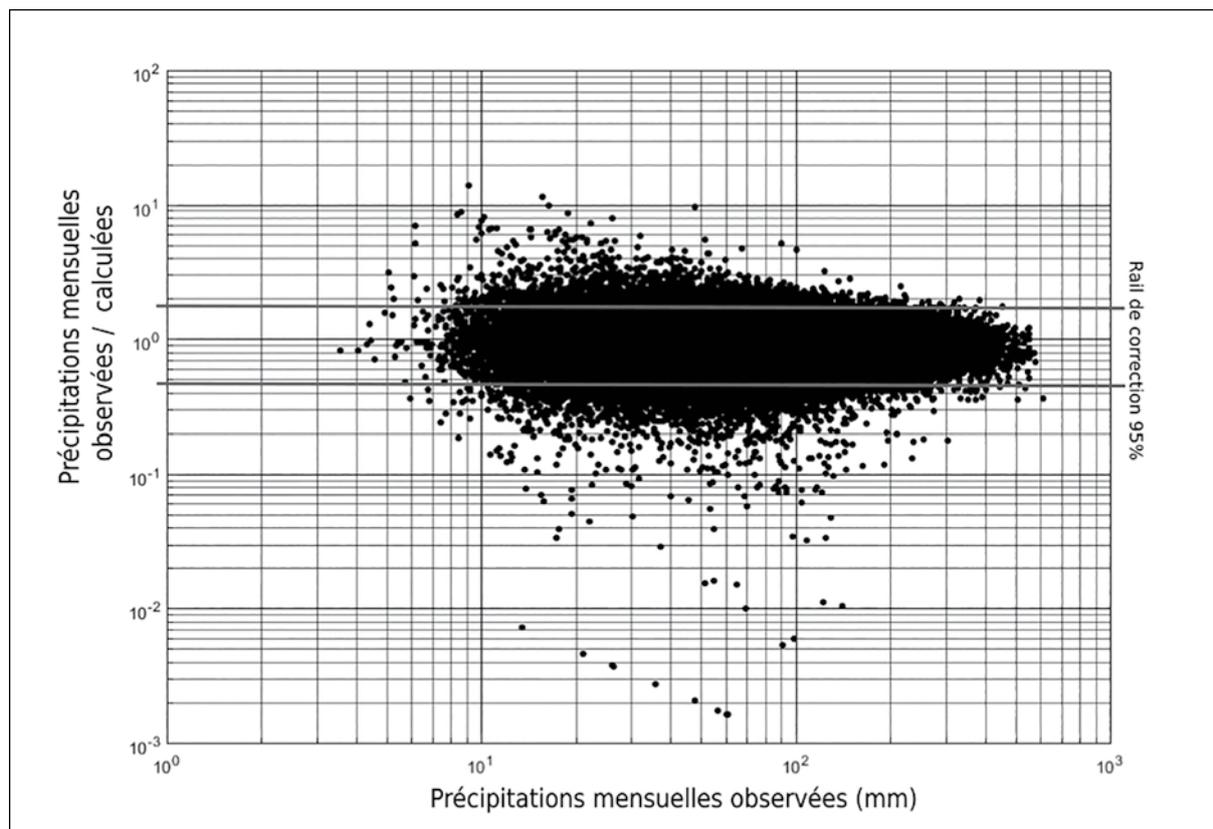


Figure 6. Détermination de l'intervalle de confiance pour la correction des précipitations

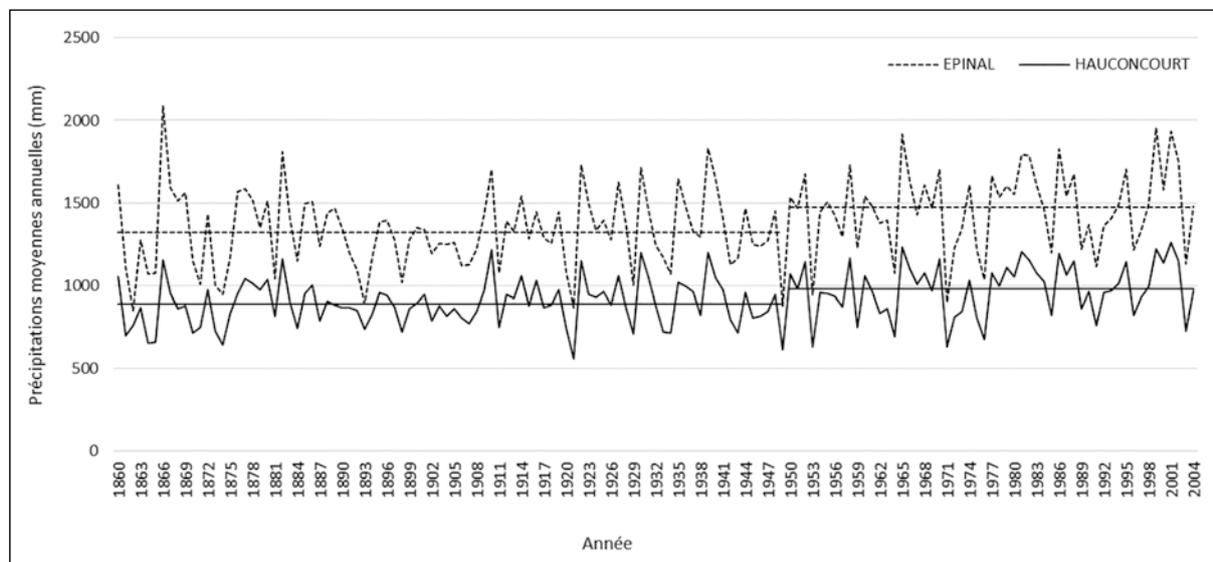


Figure 7. Précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de la Moselle de 1860 à 2004 (les droites représentent les précipitations moyennes pour la période sèche et pour la période humide)

V. LES ÉPISODES DE SÉCHERESSES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOSELLE ENTRE 1860 ET 2004

Les sécheresses se caractérisent d'abord par un déficit pluviométrique par rapport à une normale. Ces sécheresses que l'on qualifie de météorologiques,

peuvent avoir des répercussions sur les différents compartiments du cycle hydrologique (sécheresse édaphique, hydrologique, etc.) et sur les sociétés (sécheresse socio-économique). Nous nous intéressons ici aux épisodes qui ont pu générer des sécheresses hydrologiques en analysant en premier lieu les déficits pluviométriques qui ont précédé la période

d'été, afin d'établir un lien entre les sécheresses météorologiques et hydrologiques.

A. Les déficits pluviométriques mensuels cumulés

La Moselle présente un régime hydrologique pluvial océanique, caractérisé par des basses eaux estivales. Les précipitations mensuelles cumulées durant la période qui précède l'été constituent un bon indicateur pour expliquer la genèse des étages sévères (Lang Delus, 2011). Les déficits pluviométriques cumulés de janvier à juin ont ainsi été calculés sur le bassin versant de la Moselle à Épinal et à Hauconcourt (Figure 8). Ils permettent d'établir une première chronologie des années qui ont pu être concernées par des étages sévères.

Sur la période 1860-2004, soit 145 ans, on peut isoler une dizaine d'épisodes pour lesquels le cumul observé de janvier à juin est particulièrement déficitaire : 1870, 1874, 1875, 1893, 1911, 1921, 1929, 1949, 1976, 1991 et 1996. L'année 1870 présente à Hauconcourt et Épinal le déficit le plus fort de la période étudiée. Dans la partie amont du bassin versant représentée par la chronique d'Épinal, 1893 se situe au deuxième rang des années les plus déficitaires, suivie de 1929, 1874 et 1976. À Hauconcourt, c'est par contre l'année 1976 qui se classe en deuxième position, suivie par 1874 et 1921. Ces différences de classement peuvent s'expliquer par les variabi-

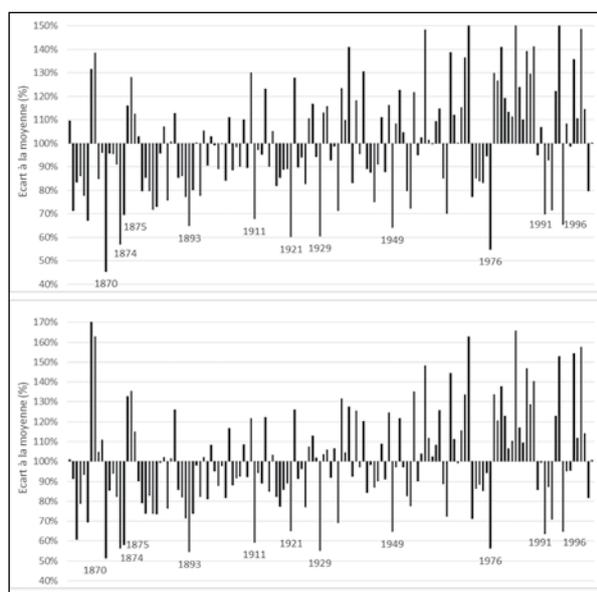


Figure 8. Déficit moyens mensuels cumulés de janvier à juin; bassin versant de la Moselle à Hauconcourt (haut) et Épinal (bas)

lités spatiales des précipitations au sein du bassin versant (cf. Figure 10 qui montre que 1893 est très déficitaire sur le massif des Vosges, 1976 est particulièrement sévère dans la partie aval et 1870 a touché l'ensemble du bassin). Le déficit pluviométrique cumulé de janvier à juin ne fait par contre pas ressortir l'année 2003 qui s'était surtout caractérisée par des températures exceptionnellement fortes (Fink *et al.*, 2004).

B. L'indice de sécheresse normalisé SPI

L'indice de sécheresse normalisé SPI (Standardized Precipitation Index) constitue un des indices de sécheresses les plus couramment utilisés. Il fait partie des indices recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2012) pour caractériser la sécheresse météorologique. Le SPI est basé sur la probabilité de précipitations mensuelles calculées durant un temps donné et qui est transformée en indice. Le calcul du SPI est d'autant plus intéressant que l'on dispose ici de longues séries de données, car la distribution de probabilité sera d'autant plus fiable que les chroniques sont longues et incluent de nombreux épisodes secs (Guttman, 1999). McKee *et al.* (1993) ont proposé une classification des épisodes afin de déterminer leur intensité, les sécheresses se caractérisant par un indice inférieur à zéro. Cette classification, qui a été reprise dans le guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé (OMM, 2012), est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs et interprétations de l'indice SPI

| | |
|-----------------|----------------------|
| 2,0 et plus | Extrêmement humide |
| de 1,5 à 1,99 | Très humide |
| de 1,0 à 1,49 | Modérément humide |
| de -0,99 à 0,99 | Proche de la normale |
| de -1,0 à 1,49 | Modérément sec |
| de -1,5 à 1,99 | Très sec |
| -2 et moins | Extrêmement sec |

Source : OMM, 2012.

L'indice de sécheresse normalisé a été calculé sur le cumul de 6 mois de précipitations (SPI 6) de janvier à juin sur la période 1860-2004, en moyenne à l'échelle du bassin versant (Figure 9) et à chaque point de grille. Les graphiques de la Figure 9 mettent plus particulièrement en évidence l'année 1870 qui se caractérise par un SPI inférieur à -2,

ce qui le classe dans la catégorie des sécheresses extrêmes à la fois dans la chronique d'Épinal et celle d'Hauconcourt.

Le calcul de cet indice pour chaque point de grille permet de cartographier le SPI 6 des années les plus sévères, afin d'observer la variabilité spatiale des sécheresses à l'intérieur du bassin versant de la Moselle (Figure 10).

Ces cartes permettent d'observer la variabilité spatiale des sécheresses pluviométriques. On constate ainsi que les sécheresses des années 1921 et 1949 ont moins affecté la partie amont du bassin versant. À l'inverse, en 1893 c'est dans le massif des Vosges que les déficits ont été les plus forts. La répartition spatiale des déficits pluviométriques constitue un facteur essentiel pour expliquer la genèse des étiages. Dans le bassin versant de la Moselle, l'essentiel des apports en eau provient en effet de l'amont situé dans le massif des Vosges. Ainsi, une sécheresse accrue dans cette partie du bassin versant peut impacter toute la Moselle. L'année 1893 a donc pu se caractériser par un étiage sévère même si l'aval a été moins touché par la sécheresse.

Enfin, sur la base du SPI 6, les années 1870 et 1976 constituent respectivement les sécheresses les plus

sévères des 19^e et 20^e siècles et elles ont concerné l'ensemble du bassin versant. L'année 1870 constitue l'événement le plus exceptionnel de la période étudiée avec un SPI inférieur à -2 sur une très grande partie du bassin versant de la Moselle française, soit un épisode que l'on peut qualifier d'extrêmement sec si l'on se réfère à la classification de McKee *et al.* (1993).

C. Les sécheresses des années 1870 et 1976 et leur impact sur les débits de la Moselle

Les sécheresses météorologiques ont un impact sur les cours d'eau qui peuvent être exposés à des étiages sévères. Ce lien entre sécheresse atmosphérique et sécheresse hydrologique peut être établi si l'on dispose de débits. Or, en France, les enregistrements hydrométriques remontent rarement au-delà des années 1960 et la Moselle ne fait pas figure d'exception. Les premières stations de mesure y ont en effet été installées vers le milieu du 20^e siècle. Côté allemand, par contre, on dispose d'une longue chronique de la Moselle à Cochem, où les débits sont enregistrés depuis 1900. Ces données hydrométriques permettent d'analyser les étiages qui se sont déroulés au cours du 20^e siècle. La Figure 11 présente les chroniques de débits moyens mensuels minimums de chaque année (QMNA) aux stations de Cochem, d'Hauconcourt et d'Épinal.

Pour ces trois stations situées sur la Moselle, l'année

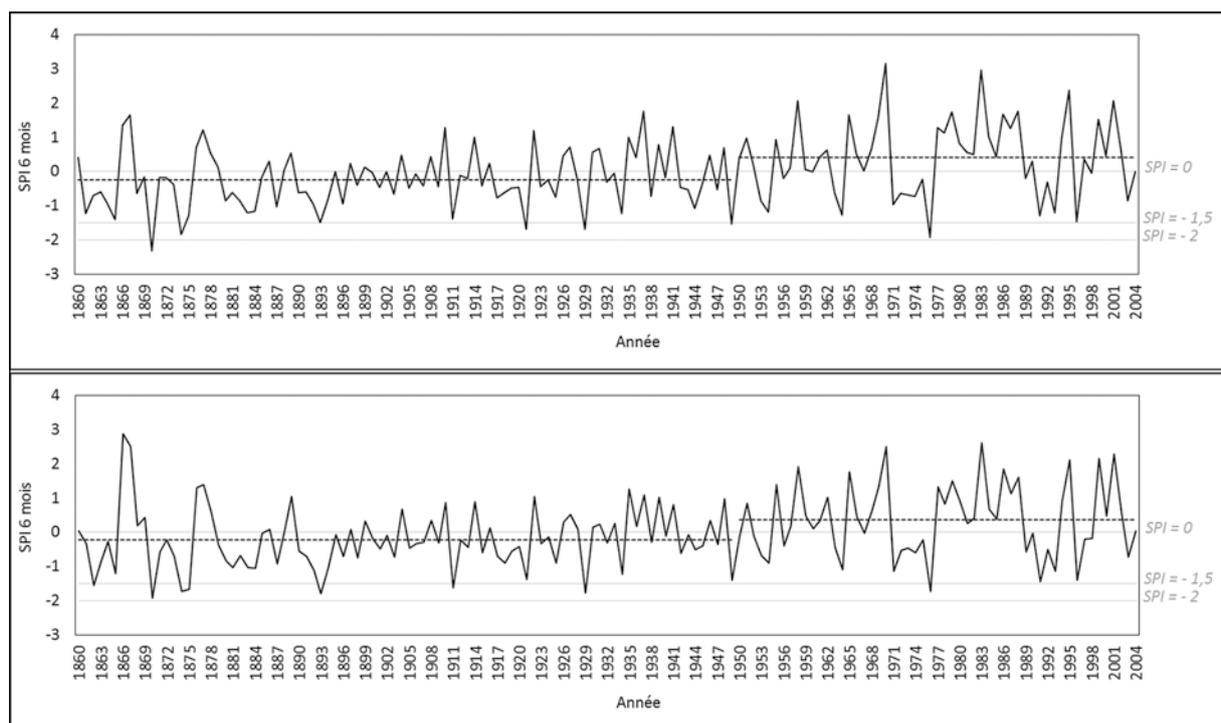


Figure 9. SPI 6 mois (janvier-juin) pour le bassin versant de la Moselle à Hauconcourt (haut) et Épinal (bas). Les traits indiquent le SPI moyen pour les périodes sèche et humide

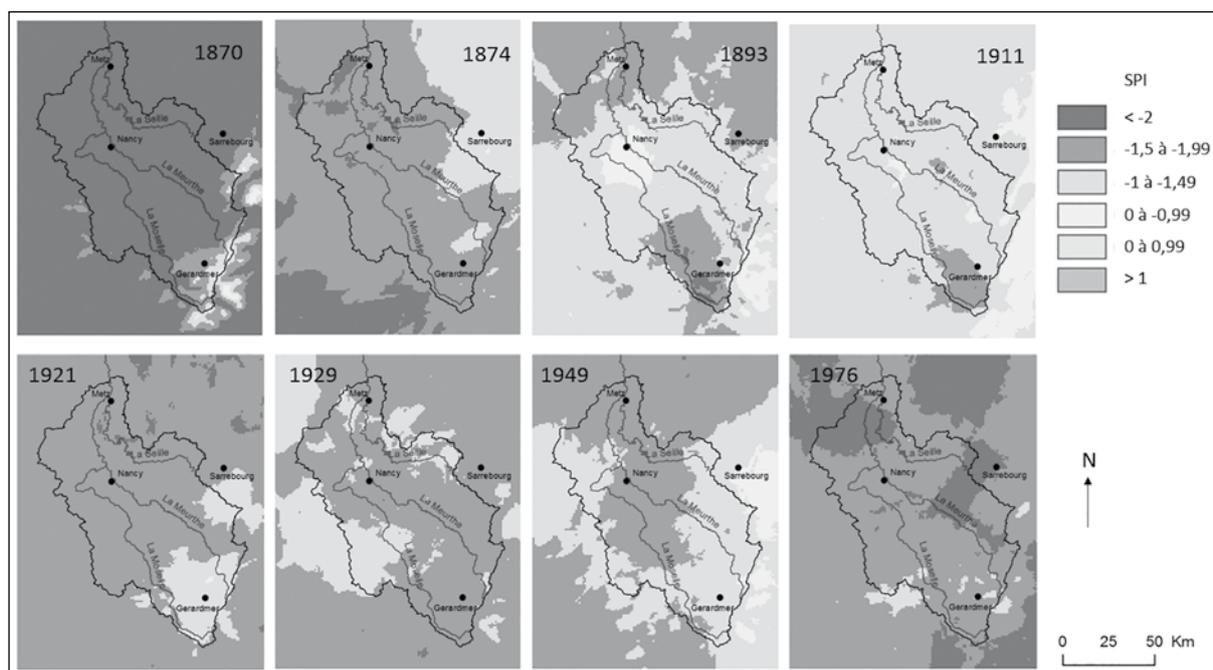


Figure 10. SPI 6 de janvier à juin dans le bassin versant de la Moselle française pour quelques sécheresses exceptionnelles

1976 apparaît comme l'étiage le plus sévère. La chronique de Cochem permet même de qualifier cet épisode comme l'événement le plus sévère du 20^e siècle, suivi dans l'ordre par 1949 puis 1921. Ces observations confirment les analyses des déficits pluviométriques et du SPI, qui positionnaient l'année 1976 au premier rang des années les plus sèches du 20^e siècle et qui montraient que 1921 et 1949 ont particulièrement touché l'aval du bassin versant de la Moselle.

Concernant le 19^e siècle, on dispose de nombreuses chroniques de hauteur d'eau, notamment de la Moselle à Trèves dont les hauteurs sont enregistrées depuis 1818. Ces hauteurs ne peuvent toutefois pas être utilisées car on ne dispose pas de courbe de tarage permettant de calculer les débits. Les nombreux aménagements réalisés ont en effet probablement modifié la relation hauteur/débit au cours du temps et le seul relevé des hauteurs ne constitue donc pas un indicateur fiable. On peut néanmoins souligner que l'année 1893 présente la hauteur la plus faible de la chronique de la Moselle à Trèves (Tein, 1905).

Par contre des comptes-rendus d'opération de jaugeage réalisés en basses eaux à Épinal au cours du 19^e siècle par les ingénieurs des Ponts et Chaussées ont été retrouvés aux archives départementales des Vosges (série S). Ces documents contiennent

notamment un compte-rendu d'une opération de jaugeage des eaux d'étiage faite à Épinal le 14 juillet 1870 qui conclut que le débit de la Moselle était de 4 m³/s à cette date. Le compte-rendu stipule également que « *ce chiffre doit représenter le débit minimum de la rivière, parce que depuis nombre d'années on n'a vu une sécheresse aussi persistante, et par suite un aussi bas étiage* ».

D'autres mesures ont été faites sur la Moselle à Épinal durant ce siècle : le 20 août 1840 (4 m³/s) et le 31 août 1842 (6,5 m³/s), mais ces années n'entrent pas dans la période étudiée. Le débit de la Moselle à Épinal a également été mesuré le 7 juillet 1865. Le jaugeage a estimé à 3,63 m³/s le débit de la Moselle à cette date qui s'inscrit dans une année déficitaire en terme de pluviométrie, mais pas exceptionnelle. Les résultats de ces différents jaugeages sont rassemblés dans une note intitulée « *note sur le régime de la Moselle à Épinal* » qui date de 1897. L'auteur en conclut que le débit de la Moselle à Épinal ne descend jamais en dessous de 3,5 à 4 m³/s, ce qui semble d'ailleurs se confirmer par les mesures plus contemporaines.

Enfin, cette note souligne également le caractère exceptionnellement sec de l'année 1893, ce qui ressort aussi très nettement de nos analyses pluviométriques (déficits très forts à l'amont du bassin versant durant cette année).

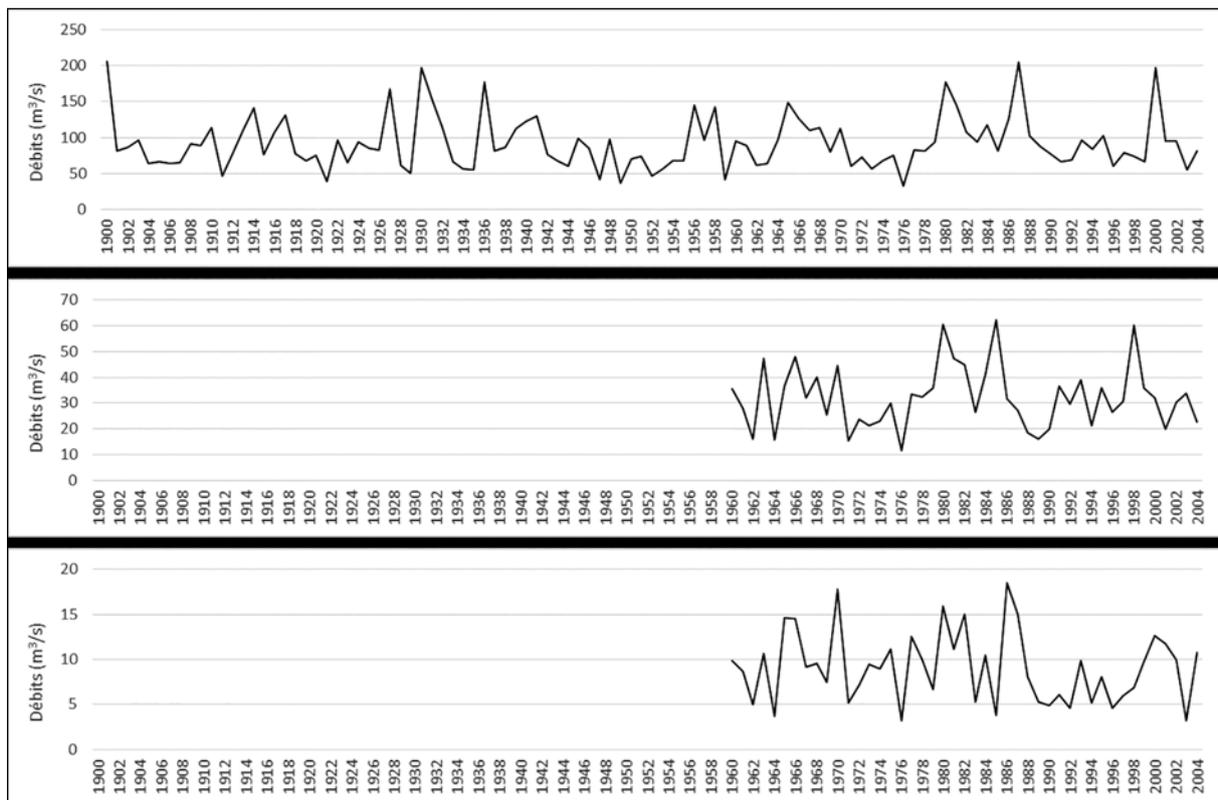


Figure 11. Débits moyens mensuels minimums (QMNA) de chaque année aux stations de Cochem (haut), d'Hauconcourt (milieu) et d'Epinal (bas)

VI. CONCLUSION

Les résultats issus de la base de données pluviométriques ont permis de mettre en évidence les années qui ont été marquées par des sécheresses météorologiques exceptionnelles. Leur impact sur les débits peut difficilement être évalué avant le milieu du 20^e siècle car on ne dispose que de peu d'informations hydrométriques. On peut toutefois souligner que la deuxième moitié du 19^e siècle semble avoir été marquée par au moins deux étiages très sévères, durant les années 1870 et 1893. Le caractère exceptionnel de l'année 1893 a par ailleurs été mis en évidence dans d'autres travaux, notamment ceux de Cook *et al.* (2015) et Caillouet *et al.* (2017). Ces derniers proposent, à partir d'une modélisation hydrologique pluie-débit, des reconstitutions de débits d'étiage à partir de 1871. Les résultats de leurs simulations montrent des débits d'étiage exceptionnellement bas dans l'est de la France pour l'année 1893.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet plus vaste et pluridisciplinaire qui vise à reconstituer les extrêmes hydrologiques dans le bassin versant de la Moselle. Les résultats issus de la période instrumentale seront complétés par des sources

documentaires qui peuvent également permettre d'identifier les épisodes exceptionnels suivant des techniques indirectes. Ces épisodes ont en effet des impacts sur les sociétés et sont ainsi souvent signalés par leur caractère exceptionnel.

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C. & Wieringa J. (2003). *Guidelines on climate metadata and homogenization*. (WMO/TD n° 1186). Récupéré de https://www.wmo.int/datastat/documents/WCD-MP-53_1.pdf
- Alexandre, P. (1987). *Le climat en Europe au Moyen Âge : contribution à l'histoire des variations climatiques de 1000 à 1425, d'après les sources narratives de l'Europe occidentale*. Paris : Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales.
- Arnaud, M. & Emery, X. (2000). *Estimation et interpolation spatiale*. Paris : Hermes Science Publications.
- Barriendos, M., Cœur, D., Lang, M., Llasat, M.-C., Naullet, R., Lemaitre, F. & Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th – 20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-583-2003>.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouardas, T., ... Bobée, B. (2004). Use

- of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. *Natural Hazards*, 31, 623-643. <https://doi.org/0.1023/B:NHAZ.0000024895.48463.eb>.
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., ... Esper, J. (2011). 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science*, 331, 578-582. <https://doi.org/10.1126/science.1197175>.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Devers, A. & Graff, B. (2017). Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2923-2951. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2923-2017>.
- Champion, M. (1863). *Les Inondations en France, depuis le VI^e siècle jusqu'à nos jours*. Paris : Victor Dalmont & Dunod, tome V.
- Cook, E.R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K.R., Büntgen, U., Frank, D., ... Zang, C. (2015). Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Science Advances*, 1(10): e1500561. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500561>.
- Drogue, G. & François, D. (2014). Quel référentiel pluviométrique pour débiaiser les sorties de modèles climatiques ? Apport de l'information hydrologique pour spatialiser les précipitations journalières à échelle fine. *Actes du XXVII^{ème} Colloque de l'AIC*, Dijon.
- Dubois, G. (2000). How representative are samples in a sampling network? *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 4(1), 1-10. Récupéré de http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_7/Dubois/Dubois.htm
- Ferber, F. (2009). Quand la rivière perdoit son droit cours : Metz face aux divagations de la Moselle au Moyen Âge. *Revue du Nord*, 14, 143-151.
- Fink, A.H., Brücher, T., Krüger, A., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G. & Ulbrich, U. (2004). The 2003 European summer heatwaves and drought – synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, 59(8). <https://doi.org/10.1256/wea.73.04>.
- François, D. & Humbert, J. (2000). Quantification spatiale des précipitations. Applications au Nord-Est de la France. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1-2).
- Garnier, E. (2010). Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes. *La Houille Blanche*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1051/LHB/2010039>.
- Garnier, E., Daux, V., Yiou, P. & García de Cortázar-Atauri, I. (2011). Grapevine harvest dates in Besançon (France) between 1525 and 1847: Social outcomes or climatic evidence? *Climatic Change*, 104, 703–727. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9810-0>.
- Guttman N.B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation Algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Jourdain, S., Roucaute, E., Dandin, P., Javelle, J.-P., Donet, I., Ménassère, S. & Cénac, N. (2015). Le sauvetage de données climatologiques anciennes à Météo-France. *La Météorologie*, 89. <https://doi.org/10.4267/2042/56598>
- Lang Delus C. (2011). Sévérité des étiages et indigence des précipitations : une relation évidente mais rarement simple - Exemple en régime pluvial océanique, *Revue Géographique de l'Est*, 51(3-4).
- Le Roy Ladurie, E. (1967). *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris : Flammarion.
- Litzenburger, L. (2015). *Une ville face au climat : Metz à la fin du Moyen Âge (1400-1530)*. Nancy : PUN – Editions Universitaires de Lorraine.
- Llasat, M.-C., Barriendos, M., Barrera, A. & Rigo, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, 313, 32-47. Récupéré de <http://www.zucaina.net/Publicaciones/joh-313-32.pdf>
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California*. <https://doi.org/10.1.1.462.4342>
- Olry (1885). *Recherches sur les phénomènes météorologiques de la Lorraine*. Nancy : Berger-Levrault & Cie. Récupéré de <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k866461?rk=21459;2>
- OMM (2012). *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé* (OMM n°1090). Récupéré de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_fr_2012.pdf
- OMM (2016), *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse* (OMM n°1173). Récupéré de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manuel-des-indicateurs_2016.pdf
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Pfister, C., Weingartner, R. & Luterbacher, J. (2006). Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. *Hydrological Sciences Journal*, 51, (5) 966-985. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.966>.
- Raulin, V., (1881a). Observations pluviométriques faites dans l'Est de la France (Alsace, Vosges, Lorraine, Bresse, Jura, Champagne et Bourgogne) de 1688 à 1870. *Actes de l'Académie Nationale des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Bordeaux*, 3^{ème} série, 40^{ème} année (supplément)-1878, E. DENTU, Paris. Récupéré de <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k339761>.

- Raulin, V., (1881b). Observations pluviométriques faites dans l'Est de la France (Alsace, Lorraine, Vosges, etc.) de 1871 à 1880. *Actes de l'Académie Nationale des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Bordeaux*, 3^{ème} série, 43^{ème} année-1881, Paris : E. DENTU. Récupéré de <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k339792>.
- Tein, M., (1905). *Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserverhältnisse im Deutschen Rheingebiet, VII, Das Moselgebiet*, Ernst und Sohn, Berlin.
- Uribe Larrea, D., Perez-Gonzalez, A. & Benito, G. (2003). Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (central Spain) over the past 500 years. *Quaternary Science Reviews*, 22, 2209-2221.
- 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). Récupéré de <https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2010-VALERY-THESE.pdf>

Coordonnées des auteurs :

Claire DELUS
Maître de conférences en géographie, LOTERR
claire.delus@univ-lorraine.fr

Didier FRANCOIS
Ingénieur de recherche, LOTERR,
didier.francois@univ-lorraine.fr

Vincent OLLIVE
Maître de conférences en géographie, LOTERR
vincent.ollive@univ-lorraine.fr

Emmanuel GILLE
Maître de conférences HDR, LOTERR
emmanuel.gille@univ-lorraine.fr