



HAL
open science

Utilisation d'une base de données de jaugeages à une échelle régionale pour la réalisation et la mise à jour d'un référentiel d'étiage

Benjamin Grelier, Hajar El Khalfi, Claire Delus, Gilles Drogue, Sébastien Lebaut, Luc Manceau, Didier Francois

► To cite this version:

Benjamin Grelier, Hajar El Khalfi, Claire Delus, Gilles Drogue, Sébastien Lebaut, et al.. Utilisation d'une base de données de jaugeages à une échelle régionale pour la réalisation et la mise à jour d'un référentiel d'étiage. LHB Hydrosience Journal, 2023, Special Issue: Secheresse-Etiages 2023, pp.2287051. 10.1080/27678490.2023.2287051 . hal-04342393

HAL Id: hal-04342393

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04342393v1>

Submitted on 13 Dec 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Utilisation d'une base de données de jaugeages à une échelle régionale pour la réalisation et la mise à jour d'un référentiel d'étiage

Benjamin Grelier, Hajar El Khalfi, Claire Delus, Gilles Drogue, Sébastien Lebaut, Luc Manceau & et Didier François

To cite this article: Benjamin Grelier, Hajar El Khalfi, Claire Delus, Gilles Drogue, Sébastien Lebaut, Luc Manceau & et Didier François (13 Dec 2023): Utilisation d'une base de données de jaugeages à une échelle régionale pour la réalisation et la mise à jour d'un référentiel d'étiage, LHB, DOI: [10.1080/27678490.2023.2287051](https://doi.org/10.1080/27678490.2023.2287051)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2023.2287051>



© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 13 Dec 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)

Utilisation d'une base de données de jaugeages à une échelle régionale pour la réalisation et la mise à jour d'un référentiel d'étiage

Benjamin Grelier, Hajar El Khalfi, Claire Delus, Gilles Drogue, Sébastien Lebaut, Luc Manceau et Didier François

Université de Lorraine, laboratoire LOTERR, Metz, France

RÉSUMÉ

Dans le bassin Rhin-Meuse (partie française), des catalogues de débits de référence d'étiage ont été publiés à la fin de années 1990. Cet article présente l'approche utilisée pour leur élaboration, qui se fonde notamment sur de nombreuses campagnes de jaugeages ayant couvert l'ensemble du territoire à une échelle fine, et servant à l'ajustement de profils hydrologiques d'étiage. Ces catalogues ont constitué un outil opérationnel largement utilisé par les services opérationnels de l'eau. La question de leur mise à jour s'est ensuite posée, à travers l'analyse de la stationnarité d'un indice d'étiage (QMNA) sur la période 1971–2022. En effet les résultats de cette étude montrent qu'une part importante des stations étudiées ne sont pas stationnaires, en particulier dans le massif des Vosges. Une tendance à la baisse des QMNA apparaît de manière généralisée au début des années 2000. Les prochaines étapes de travail envisagées prévoient notamment l'identification d'une nouvelle période de référence, ainsi que la constitution d'une large base de données des jaugeages d'étiage. Cette dernière permettra la comparaison des profils hydrologiques d'étiage actuels avec les données des catalogues, et servira à identifier d'éventuelles mesures d'étiage additionnelles.

Use of a regional-scale stream gauge database to produce and update a low-flow reference system

ABSTRACT

In the Rhine-Meuse basin (French part), catalogues of low-water reference flows were published at the end of the 1990s. This article describes the approach used to produce them, based in particular on numerous gaging campaigns covering the entire territory at a fine scale, and used to adjust low-water hydrological profiles. These catalogues have become a widely used operational tool for local water authorities. The question of updating them then arose, through an analysis of the stationarity of a low-water index (QMNA) over the period 1971–2022. The results of this study show that a large proportion of the stations studied are not stationary, particularly in the Vosges massif. There has been a general downward trend in QMNA since the early 2000s. The future work stages include the identification of a new reference period and the creation of a large database of low-water gauges. The latter will enable current low-water hydrological profiles to be compared with catalogue data, and will be used to identify possible additional low-water measures.

MOTS-CLÉS

étiage ; jaugeages ; base de données ; profil hydrologique ; stationnarité ; bassin Rhin-Meuse

KEYWORDS

Low-flow; gauging; database; hydrological profile; stationarity; Rhine-Meuse basin

1. Introduction

1.1. Contexte des catalogues

En France, la connaissance « fine » des débits caractéristiques des cours d'eau pour gérer les ressources en eaux superficielles est une préoccupation ancienne. Dès 1860, le service des Ponts et Chaussées est chargé de dresser un « inventaire des cours d'eau non navigables ni flottables », référençant les hautes, moyennes et basses eaux. Cette mission aboutira à la publication pour chaque département d'un « état statistique des cours d'eau non navigables ni flottables » (Cheysson, 1879).

C'est cette même préoccupation qui amène, un siècle plus tard, la Mission Déléguée de Bassin Rhin-Meuse à

produire un catalogue des débits d'étiage à l'échelle de son territoire. A cette époque, celui-ci regroupe encore de vieilles industries très consommatrices d'eau (sidérurgie, industrie textile...). Cette première version des catalogues s'appuie sur un réseau encore peu dense de stations hydrométriques (Zumstein et Auer, 1975, 1976, 1978a, 1978b, 1979 pour les bassins de la Meuse et de la Moselle, et Auer et al., 1982 pour le bassin du Rhin en Alsace) et a connu une mise à jour une vingtaine d'années plus tard. Pour cette dernière édition (Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse, 1998, 1999, 2000a, 2000b), une méthode différente a été déployée (François et al., 1994), associant des campagnes de mesure des débits d'étiage aux données des stations hydrométriques. Ainsi, depuis leur dernière

CONTACT Benjamin Grelier  benjamin.grelier@univ-lorraine.fr

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

parution, les catalogues ont constitué une référence pour l'estimation des débits d'étiage reconnue et largement consultée par les gestionnaires dans le bassin Rhin-Meuse. Son usage a été renforcé avec l'entrée en vigueur de la Directive européenne Cadre sur l'Eau (DCE) en 2000, qui demande une description, entre autres, des variables d'étiage en tous points des cours d'eau.

Ces catalogues sont toujours utilisés, mais leur représentativité a été mise en cause ces dernières années avec une succession d'étiages marqués dans le bassin (François et al., 2023) ; certaines valeurs des catalogues apparaissant alors comme obsolètes aux yeux des utilisateurs et gestionnaires. De ce fait, des travaux sont en cours en vue de caractériser l'évolution des étiages et déployer une mise à jour des valeurs de référence proposées par les catalogues.

Cet article rappelle dans un premier temps les méthodes qui ont permis l'élaboration de ce référentiel des débits d'étiage dans le bassin Rhin-Meuse, puis présente les analyses déjà mises en œuvre pour évaluer son caractère (supposé) obsolète ainsi que les travaux prévus pour sa mise à jour.

1.2. Objectif des catalogues

Les catalogues, dans leur première version (1975–1982), proposaient des valeurs de référence (débit moyen mensuel minimum annuel, QMNA 2, QMNA 5, QMNA 10¹ et module) aux stations hydrométriques et aux limites des zones hydrographiques. Dans la version suivante (1998–2000), l'objectif était très clairement d'affiner la spatialisation des débits. En effet, avec les données des seules stations hydrométriques, l'estimation des débits d'étiage en tête de bassin-versant ou dans des bassins non jaugés demeure hasardeuse (Arts et Sary, 2000). À l'époque, l'objectif est de proposer des valeurs à des points relativement rapprochés (entre et en amont des stations hydrométriques), et ainsi d'obtenir une trame qui permette des estimations entre deux points du catalogue (sans déployer des analyses poussées pour un utilisateur des catalogues). Il y a également la volonté de spatialiser et quantifier les différentes influences qui modifient l'écoulement, à la fois naturelles (ex. karst, lithologie), et anthropiques (ex. navigation, exhaures, prises et rejets). Enfin, l'enjeu est d'aboutir à un outil commun à l'échelle de tout un territoire (le bassin Rhin-Meuse dans sa partie française) qui fournisse des valeurs pour des bassins de tailles modestes (à l'échelle de la zone hydrographique, soit 30 km²). On peut résumer le cahier des charges de la méthode attendue ainsi :

- (1) spatialisation fine des variables d'étiage et pour toutes les échelles de bassin,
- (2) estimation aisée en dehors des points fournis,
- (3) prise en compte des influences,

- (4) outil unique à l'échelle du bassin Rhin-Meuse.

La prise en compte des influences en particulier d'origine anthropique permet de proposer deux versions des données d'étiage :

- (1) l'une avec des débits "naturalisés",
- (2) l'autre avec des débits observés qui *rendent* compte des influences.

1.3. Revue des référentiels de basses eaux existants

À l'époque de l'élaboration des catalogues, la bibliographie concernant la spatialisation des débits d'étiage est peu abondante. Elle provient surtout du CTGREF et de l'ORSTOM avec notamment les travaux d'Oberlin et al. (1973) et de Zumstein (1976) qui s'appuient sur des jaugeages d'étiage et expliquent la répartition des écoulements par le contexte hydrogéologique des bassins versants. En Angleterre, on a surtout recours à des modèles de régressions multiples utilisant des variables issues d'une classification des sols (Hydrology of Soil Types, HOST, Gustard et al., 1992). Les modèles de régression multiples régionalisés sont également très utilisés aux États-Unis (Vogel & Kroll, 1992 et Risley et al., 2008).

Depuis l'élaboration des catalogues, différentes approches ont été mises en œuvre pour produire des référentiels de débit d'étiage. Par exemple, en Autriche, Laaha et Blöschl (2007) ont mis en œuvre une procédure d'estimation du Q95 (débit surpassé 95 % du temps) sur 21 000 sites (pour une superficie du territoire nationale d'environ 84 000 km²) basée notamment sur des régressions régionales entre caractéristiques des bassins et débit d'étiage couplées à des réajustements (utilisation des données de débit locales) et une évaluation de l'incertitude. Les résultats ont été intégrés dans l'Atlas Hydrologique d'Autriche, un outil destiné aux professionnels et au grand public (Fürst et al., 2009).

En France, on peut notamment citer les travaux élaborés dans le cadre du partenariat ONEMA-IRSTEA (2011) visant à produire une cartographie nationale des débits d'étiage. Dans ce cadre, trois estimations des modules et QMNA 5 (provenant des recherches des équipes IRSTEA des centres d'Antony, de Villeurbanne et d'Aix-Marseille) ont été combinées (approche de "consensus" statistique) pour produire la cartographie (Riffard et al., 2012). Les trois estimations se basent sur des approches statistiques avec les travaux de Nicollet et al. (2012) liant le QMNA avec des variables physio-climatiques (interpolation du débit par un modèle gravitaire ou *inverse distance weighting*, IDW en anglais), et ceux de Catalogne and Sauquet (2012) utilisant des modèles régressifs régionalisés entre différents descripteurs du bassin et le QMNA pour différentes régions (modèle CART2) ; ou de modélisation pluie-débit, avec les travaux de Folton et Arnaud (2012, modèle LoiEau).

¹QMNA de période de retour 2 ans (fréquence 1/2), 5 ans (1/5) et 10 ans (1/10).

Dans une démarche similaire de réponse à une demande des pouvoirs publics, plus récemment, le Québec a publié un *Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (MELCCFP, 2022²), offrant un référentiel, entre autres, d'étiage, pour près de 10 000 tronçons de rivières jaugés et non jaugés. L'outil permet soit d'étendre des séries de mesure trop courtes, soit d'estimer des séries temporelles sur des sites (ou tronçons) non jaugés, à partir d'une interpolation optimale utilisant l'assimilation d'observations et des simulations hydrologiques (Lachance-Cloutier et al., 2017).

Dans les zones proches du bassin Rhin-Meuse français, en Wallonie (Belgique), une approche originale a été développée. Celle-ci consiste à produire un modèle (en version globale ou par zone homogène) liant des caractéristiques physiques des bassins avec un débit d'étiage spécifique (MAM7, débit moyen sur 7 jours minimum annuel), et qui intègre de plus la période de retour au non-dépassement (Grandry et al., 2013). Cependant, à notre connaissance, cela n'a abouti à aucune cartographie « officielle ». En Allemagne, pour l'État fédéral du Bade-Wurtemberg, Blatter et al. (2007) ont développé pour l'ensemble du territoire une approche multivariée à partir de données physiques et climatiques des bassins, pour la régionalisation des débits caractéristiques (hautes-eaux, module et étiage). Cette méthode a été transcrite dans un outil en ligne accessible à tous (*BW_Ablfluss*) pour le compte de l'office de l'environnement fédéral et concernait 13 000 sites sur les cours d'eau en 2015 (pour une superficie de 36 000 km²), soit un maillage relativement fin. Il existe par ailleurs des coopérations internationales sur le suivi d'étiage dans les commissions internationales³ des bassins concernés. Cependant, les efforts sont portés sur le suivi d'étiage pour une part relativement réduite des stations ; il ne semble pas exister d'expérience conjointe aux pays frontaliers ? pour l'estimation des débits d'étiage de référence à l'échelle régionale.

Les méthodes précitées permettent de produire une donnée de débit en tout point ou presque du réseau hydrographique. Les auteurs avancent tout de même certaines limites notamment pour des bassins de petite taille. Ainsi, Catalogne et Sauquet (2012) limitent leurs estimations à des bassins supérieurs à 50 km². Cette limite se retrouve également dans la cartographie de l'atlas hydroclimatique du Québec méridional, qui ne fournit pas d'estimation pour les bassins de taille inférieure à 50 km² (Alberti-Dufort & Desjardins 2022) et recommande de ne pas utiliser les estimations pour les bassins de moins de 100 km². De plus, pour un utilisateur final, hormis en redéployant l'ensemble de la méthode à l'exutoire du bassin concerné, il n'est pas possible de réaliser une estimation rapide et relativement fiable des valeurs d'étiage.

Enfin, la plupart de ces approches ont été développées à partir d'un ensemble de cours d'eau considérés comme non-influencés. Dans le cadre des catalogues mis en place en Rhin-Meuse, les cours d'eau influencés sont pris en compte car ils présentent un intérêt tout aussi fort que les cours d'eau naturels par les études, les usages et les projets d'aménagements dont ils font l'objet.

1.4. Bassins concernés par les catalogues des débits d'étiage

Les cours d'eau présents dans les catalogues des débits d'étiage sont situés dans les limites administratives de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, c'est-à-dire les parties françaises des bassins du Rhin et de la Meuse situées dans le nord-est de la France (cf. Figure 1). Le relief est dominé par le massif des Vosges à l'est, par une succession de plateaux limités vers l'est par des *cuestas* (ex. côtes de Moselle, de Meuse, des Bars) qui correspondent à la partie est du bassin parisien. Vers le nord-ouest, la Meuse entaille le massif ardennais. À l'est des Vosges, une large plaine alluviale s'étend dans le fossé rhénan. Les rivières s'écoulant du versant oriental des Vosges sont drainées dans cette plaine d'Alsace par l'Ill jusqu'à la confluence avec le Rhin à Strasbourg. La nappe alluviale rhénane fournit également de nombreux apports, et est même à l'origine de quelques rivières phréatiques. Sur le versant occidental du massif, la Moselle et de nombreuses rivières trouvent leurs sources dans le socle granitique (Vosges cristallines) ou les formations gréseuses, puis s'écoulent ensuite vers le plateau lorrain constitué d'une alternance de calcaires, de marnes et d'argiles. Les affluents principaux de la Moselle sont la Meurthe (confluence en aval de Nancy), la Seille (confluence à Metz) et la Sarre (confluence plus en aval en Allemagne). Adossé à l'ouest du bassin de la Moselle, le bassin de la Meuse est démembré suite à une succession de captures (notamment celle de la Moselle). Il est donc très peu large dans sa partie amont avec une succession de petits affluents avant de s'élargir dans sa partie aval avec la confluence de la Chiers.

Le bassin connaît de nombreuses influences d'origine anthropique : production énergétique, usage industriel, alimentation des canaux, AEP, soutien d'étiage ainsi que des modifications des écoulements naturels dues à l'exploitation minière. En raison de l'affleurement de roches calcaires, de nombreux phénomènes karstiques sont présents dans les bassins de la Moselle et de la Meuse.

Le climat est semi-continentale, en s'accroissant vers l'est (en Alsace spécifiquement). Les cumuls de précipitations annuels oscillent en moyenne autour de 700 à 1000 mm dans la majeure partie du bassin mais peuvent s'échelonner plus localement d'environ 600 mm (vers Colmar) à plus de 2000 mm (au sommet du massif des Vosges). Les flux de secteur ouest associés à la rencontre avec le massif des

²<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/index.htm>.

³Commission Internationale de la Meuse, Commission Internationale pour la Protection de la Moselle et de la Sarre, Commission Internationale pour la Protection du Rhin.

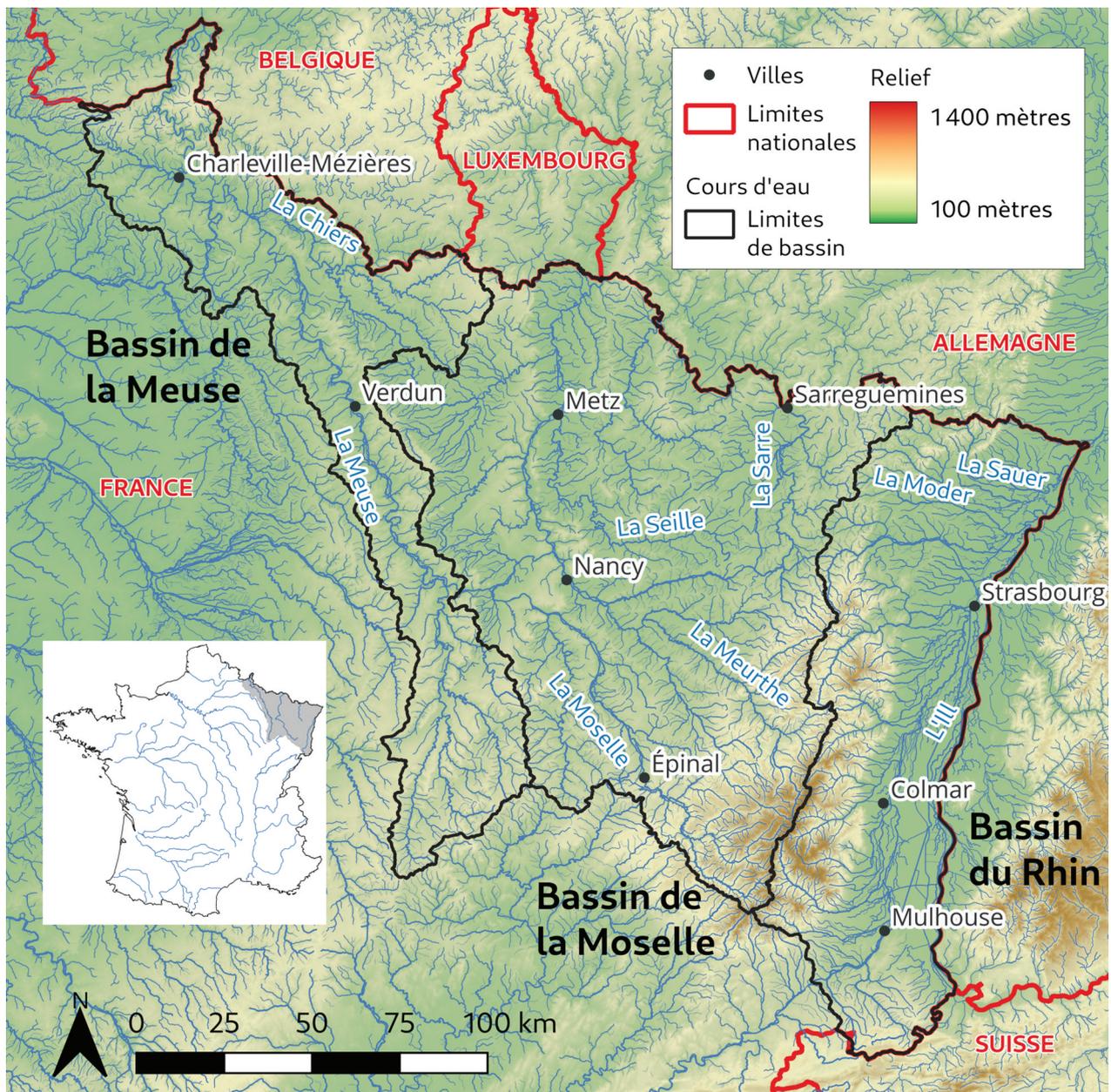


Figure 1. Carte de la zone d'étude : bassins français de la Meuse et du Rhin (le bassin de la Moselle, affluent du Rhin en Allemagne, est symbolisé). Les cours d'eau majeurs ont été annotés. L'encart précise la localisation des bassins (en gris) en France.

Vosges expliquent des cumuls plus importants sur le versant occidental de ce massif. A l'inverse, de plus faibles précipitations sont observées sur son versant oriental.

2. Méthode d'élaboration des référentiels

2.1. Aperçu global

En vue de répondre aux objectifs présentés précédemment, le CEGUM⁴ (Université Paul Verlaine – Metz) s'est vu confier, au début des années 1990, une étude pour développer une méthode de spatialisation des débits d'étiage utilisant le large jeu de données issues

de campagnes de mesures d'étiage réalisées pendant 18 ans (1978–1996) dans le bassin Rhin-Meuse. Cette méthode repose sur l'élaboration de profils hydrologiques à partir des débits issus des campagnes de jaugeages. Ceux-ci sont ensuite calés sur les débits caractéristiques d'étiage aux stations hydrométriques, ce qui permet de transférer la situation d'étiage de référence à tout le profil. La méthode est brièvement présentée ici, nous renvoyons aux travaux de François et al. (1994) pour une description plus détaillée.

2.2. Campagnes de jaugeages

Entre 1978 et 1996, afin de comprendre la répartition des écoulements en étiage, de nombreuses campagnes de jaugeages ont été réalisées (suivant les données actuellement disponibles et non exhaustives, il s'agit

⁴Centre d'Études Géographiques de l'Université Paul Verlaine – Metz, Laboratoire de Géographie Physique, composante messine de l'actuel LOTERR.

de plus de 50 campagnes). Parallèlement, une étude méthodologique a été menée (François et al., 1994) pour définir toutes les étapes nécessaires à la réalisation des catalogues Grelier: nombre de points de mesure, élaboration des profils hydrologiques de référence et calage sur les débits caractéristiques d'étiage.

La répartition géographique des sites de jaugeage est établie d'un point de vue théorique (surface drainée pour chacun des points de jaugeage), puis elle est ajustée selon des critères « hydrogéographiques » Grelier: organisation du réseau hydrographique, structure géologique, topographie, modifications anthropiques, et faisabilité de la mesure (accessibilité du site et bonne section de mesure).

Pour chaque cours d'eau, en période d'étiage (juin à octobre), trois campagnes de jaugeages sont nécessaires au minimum. Une procédure de critique des données est appliquée et les débits des campagnes de jaugeage sont comparés deux à deux, ce qui permet, le cas échéant, une correction ponctuelle des débits mesurés (les jaugeages n'étant pas dépouillés sur le terrain, les anomalies ne sont détectées qu'après les campagnes).

Les campagnes de mesure ont été réalisées par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, les services de l'État (SRAE/DIREN), les services de la Navigation, des laboratoires de recherche (CEGUM, CEREG⁵) et des bureaux d'étude privés.

2.3. Profils hydrologiques

Les profils hydrologiques sont établis à l'échelle d'un cours d'eau, et pour chaque campagne, en mettant en relation le débit mesuré en un site (en ordonnées) avec la surface de bassin drainée (en abscisses). La représentation obtenue en coordonnées logarithmiques suggère un alignement des points suivant un ou plusieurs segments (Figure 2). Cette segmentation est réalisée par expertise (procédure non automatisée), pour chacun des profils. Si la segmentation obtenue pourrait peut-être se justifier statistiquement, ce choix de rester uniquement sur une identification « experte » des segments s'explique par la cohérence « hydrogéographique » du découpage obtenu.

Les segments retranscrivent l'organisation spatiale des terrains drainés, ainsi que les perturbations naturelles (confluences, phénomènes karstiques) et anthropiques (prises, rejets, navigation). Par exemple, sur la Figure 2, le profil hydrologique de la Mortagne (d'après Arts et Sary, 2000) est organisé en quatre segments :

- (1) Le premier, de l'amont jusqu'à une surface d'environ 30 km², se rapporte à une partie de bassin versant où la vallée de la Mortagne est

très encaissée et draine un volume important de terrains gréseux ;

- (2) Le second tronçon, jusqu'à une surface de bassin de 100–110 km² s'inscrit encore dans des grès mais avec une part plus importante de conglomérats, moins capacitifs ;
- (3) Le troisième tronçon, jusqu'à une surface de bassin d'environ 250 km², a une pente légèrement plus faible. Dans ce secteur le bassin versant est composé d'une lithologie variée Grelier: alternance de grès, d'argiles et d'alluvions peu productifs ;
- (4) Enfin, le dernier tronçon, jusqu'à la confluence avec la Meurthe, correspond au passage du cours d'eau dans des terrains alternativement calcaires et argileux du Plateau lorrain.

Les profils des différentes campagnes sont parallèles, et peuvent être modélisés suivant la relation utilisée par Leopold et Miller (1956) :

$$Q = h \times A^g \quad (1)$$

avec Grelier:

- (1) Q : le débit (l/s ou m³/s),
- (2) A : la surface de bassin (km²),
- (3) h et g : des paramètres propres au bassin,
- (4) h : caractérise les conditions d'alimentation du bassin lors de la campagne de mesure,
- (5) g : dépend de l'évolution du rendement des terrains drainés (le débit spécifique augmente ou diminue, respectivement lorsque g est supérieur ou inférieur à 1).

Ainsi, pour un segment de cours d'eau, après détermination du paramètre g qui est supposé constant, seul le paramètre h est variable, suivant la situation hydrologique du cours d'eau. On peut dès lors calculer la valeur de h pour une situation d'étiage de référence. On peut ainsi caler le profil sur un débit de référence issu d'une station hydrométrique ou d'une estimation pour les bassins dits « non jaugés ». Pour le catalogue, les débits de référence retenus sont les QMNA de fréquences 1/2, 1/5 et 1/10.

2.4. Apports de la méthode

Les catalogues ont été construits sous forme de tableaux, à partir des données fournies par les profils calés, et contiennent, pour chaque cours d'eau des éléments de la codification hydrographique, l'identification des points (rivière et emplacement), le P.K.H. (point kilométrique hydrographique), la surface de bassin drainée, la valeur du module, et les valeurs de QMNA 2, 5 et 10. Les points indiqués dans les tableaux correspondent : aux stations hydrométriques, aux limites des zones hydrographiques, et aux points de rupture des profils.

⁵Centre d'Etudes et de Recherches Ecogéographiques de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.

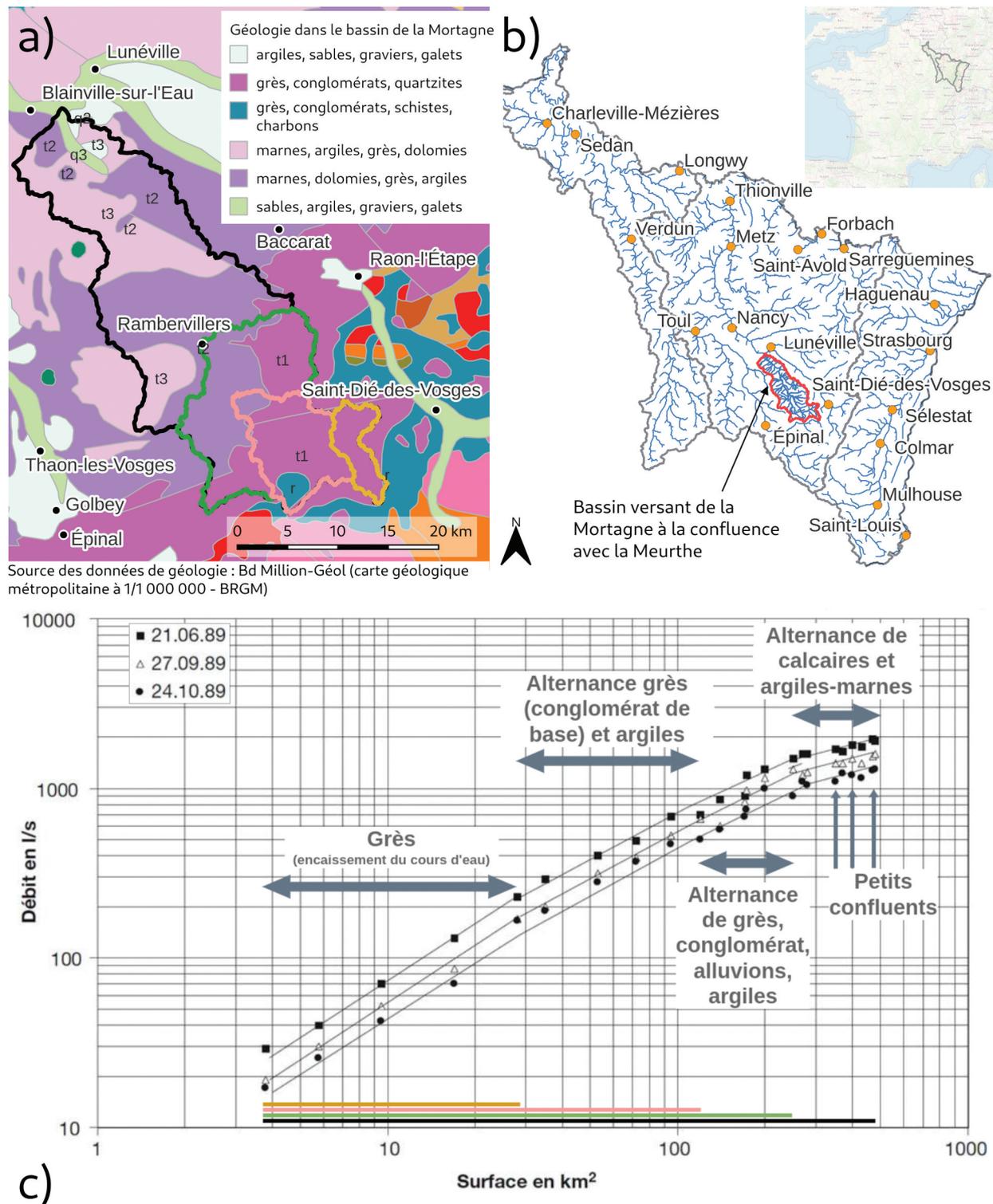


Figure 2. (a) Bassin en orange versant de la Mortagne (affluent de la Meurthe, sous-affluent de la Moselle amont) à sa confluence avec la Meurthe, en noir ; les exutoires des bassins versants dessinés en Orange et vert correspondent respectivement aux première et seconde ruptures des profils hydrologiques. (b) Situation du bassin versant de la Mortagne dans le bassin Rhin-Meuse. (c) Profil hydrologique de la Mortagne depuis l'amont du bassin jusqu'à la confluence avec la Meurthe, adapté de Arts et Sary, 2000 (des barres colorées ont été ajoutées sous les profils pour symboliser les bassins versants représentés sur la carte du bassin).

Un premier apport des catalogues concerne à ces points de rupture. Ils renseignent sur un changement notable dans l'écoulement (différenciant ainsi deux tronçons de cours d'eau présentant un débit spécifique relativement homogène), et sont à mettre en relation avec des changements de substratum ou des perturbations impactant l'écoulement : confluence, perte et

apport d'origine karstique, prise et rejet d'eau d'origine anthropique.

La densité élevée de mesures utilisées pour l'élaboration des profils (un point de jaugeage pour environ 10 km²) et l'expertise hydrogéographique mise en œuvre permettent de considérer qu'entre deux points de rupture d'un profil, l'écoulement du cours d'eau

évolue de manière homogène et log-linéaire. Cela induit le fait que les valeurs peuvent être simplement interpolées entre deux sites proposés par le catalogue.

L'échelle fine à laquelle se sont construits les catalogues permet également de fournir des valeurs relativement fiables pour des bassins très petits, par exemple jusqu'à 10 km² (François et al., 1994).

L'étude menée a également permis de spatialiser les débits spécifiques à l'échelle des zones hydrographiques. La Figure 3 présente les résultats pour les valeurs d'étiage du QMNA 10 dans la partie médiane et amont du bassin de la Moselle (jusqu'à l'aval de la confluence Meurthe-Moselle). Dans ce bassin, les débits spécifiques se répartissent ainsi :

- (1) les plus forts se situent dans le massif vosgien au niveau de poches d'altérations du socle granitique (q supérieurs à 5 l/s/km²), puis en aval avec l'auréole des grès vosgiens (environ 2-5 l/s/km²).
- (2) sur le plateau lorrain, les débits spécifiques diminuent, parfois notablement, en drainant des terrains marneux et calcaires.

Les catalogues ont permis également de montrer l'influence des phénomènes karstiques (pertes,

résurgences) sur les écoulements en étiage avec des mesures en amont et en aval de ces phénomènes. C'est le cas notamment de l'Aroffe (affluent de la Meuse) et de la Meuse en amont de Neufchâteau. D'autre part on a pu constater que pour certains bassins vosgiens, les cônes de déjection peuvent constituer des sites de pertes.

Enfin, les catalogues ont permis de localiser et quantifier les principaux prélèvements et rejets et leur impact sur les débits d'étiage. Ces influences anthropiques n'étaient alors pas toujours connues ni mesurées en période d'étiage. Pour chaque grand secteur hydrographique (Meuse, Moselle amont, Moselle aval, et Rhin), un schéma hydraulique a été établi, représentant le linéaire des cours d'eau principaux et les influences rencontrées, naturelles (confluences notamment) et anthropiques. Les cours d'eau les plus fortement influencés ont également fait l'objet d'une naturalisation de leurs débits d'étiage. Cette procédure cherchait à déterminer les contributions réelles des bassins qui les alimentent. Concernant le module, les influences ont été considérées comme négligeables et la naturalisation n'a pas été effectuée.

L'élaboration des catalogues a nécessité un engagement financier très élevé de la part de l'Agence de

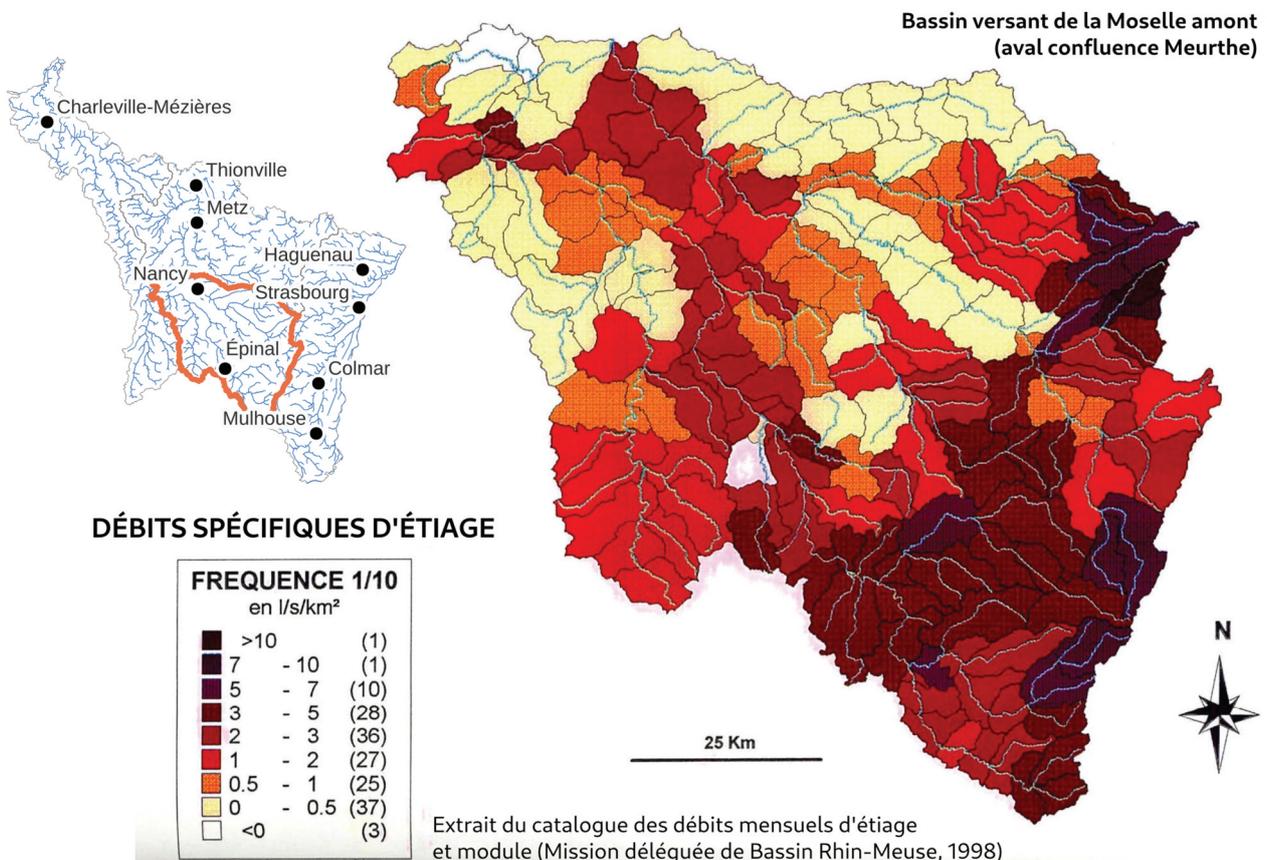


Figure 3. Carte des débits spécifiques d'étiage pour le bassin versant de la Moselle amont (à l'aval de la confluence avec la Meurthe), établie sur des valeurs de QMNA de fréquence 1/10 (extrait de : Débits mensuels d'étiage et modules.2 – Bassin de la Moselle amont (bassin de la Meurthe inclus), Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse, 1998, <https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/carte-des-rendements-qmna-2-5-et-10-a15994.html>).

l'Eau Rhin-Meuse et la mobilisation d'un nombre important de personnels sur une très longue durée pour les mesures et leur traitement. Alors qu'il semble indispensable de réaliser une mise à jour de ce référentiel, un tel investissement n'est pas envisageable à la fois en raison de son coût et des délais engendrés par l'organisation de nouvelles campagnes d'ampleur. Le choix de valoriser les données existantes s'est imposé avec comme interrogation la représentativité de profils hydrologiques réalisés il y a plus de 30 ans : alors que les débits d'étiage ont incontestablement diminué, l'allure des profils a-t-elle significativement changé ?

3. Mise à jour des catalogues

3.1. Constat et questionnements

Pour rappel, les catalogues n'ont pas connu de mise à jour depuis leur publication entre 1998 et 2000. Des actualisations ont tout de même été menées, par exemple dans le cadre de l'étude PRESAGES (CEGUM, 2006), ou lors de travaux de stage de master (ex. Wagner, 2008). Cependant, les écarts obtenus étant faibles, il n'est pas apparu utile d'en publier une nouvelle version et les catalogues initiaux sont toujours en vigueur. Néanmoins, récemment, des services gestionnaires ou services de police de l'eau ont constaté un décalage entre l'apparition récurrente d'étiages sévères et les fréquences proposées par les catalogues pour de tels débits.

La période de référence considérée dans les catalogues est la période 1971–1990. Il apparaît légitime de s'interroger sur la validité des valeurs de référence d'étiage qu'ils proposent. Des modifications dans le régime climatique sont apparues entre la période 1971–1990 et la période récente (2003–2022). Elles sont détectées et régionalisées par des tests statistiques (Kolmogorov-Smirnov pour tester si les deux échantillons proviennent de la même distribution, et de Welch⁶ pour tester la significativité du changement de moyenne) effectués sur les points de grille de la base SAFRAN (Vidal et al., 2010).

Les changements ne semblent pas majeurs pour les précipitations (Figure 4 en bas, tests non significatifs pour tous les mois), bien qu'une variabilité saisonnière existe, avec de légers écarts positifs en majorité en hiver, des écarts négatifs au printemps et en automne, et une situation proche de la situation 1971–1990 pour l'été. On remarque toutefois pour l'été que cette situation moyenne de changements peut être précisée à l'échelle mensuelle (non montré) : juin connaît des différences quasi uniquement négatives et marquées (jusqu'à –20%), juillet montre des écarts répartis entre –15% et 10%, tandis qu'août dévoile au contraire une situation d'écarts

uniquement positifs, d'environ 5% à 40%, provenant certainement d'épisodes orageux plus intenses et/ou fréquents.

Les températures affichent de leur côté des changements positifs marqués (Figure 4 en haut). Ces derniers suivent un caractère saisonnier assez bien visible, avec les évolutions les moins fortes en hiver (+0,7°C en moyenne sur le bassin, très majoritairement non significatives sur l'ensemble des points de grille), et les plus fortes en été (+1,7°C en moyenne, très majoritairement significatives en juin et juillet). Le réchauffement en hiver (décembre, janvier, février) atteint jusqu'à +1,4°C, les plus fortes valeurs se situant globalement sur le massif des Vosges, tandis qu'en été, les écarts sont toujours supérieurs à + 1°C et culminent à 2,3°C. Au printemps et en automne, on retrouve des valeurs intermédiaires (respectivement +1,2°C et +1°C en moyenne sur le bassin, et majoritairement significatives pour avril, mai et novembre).

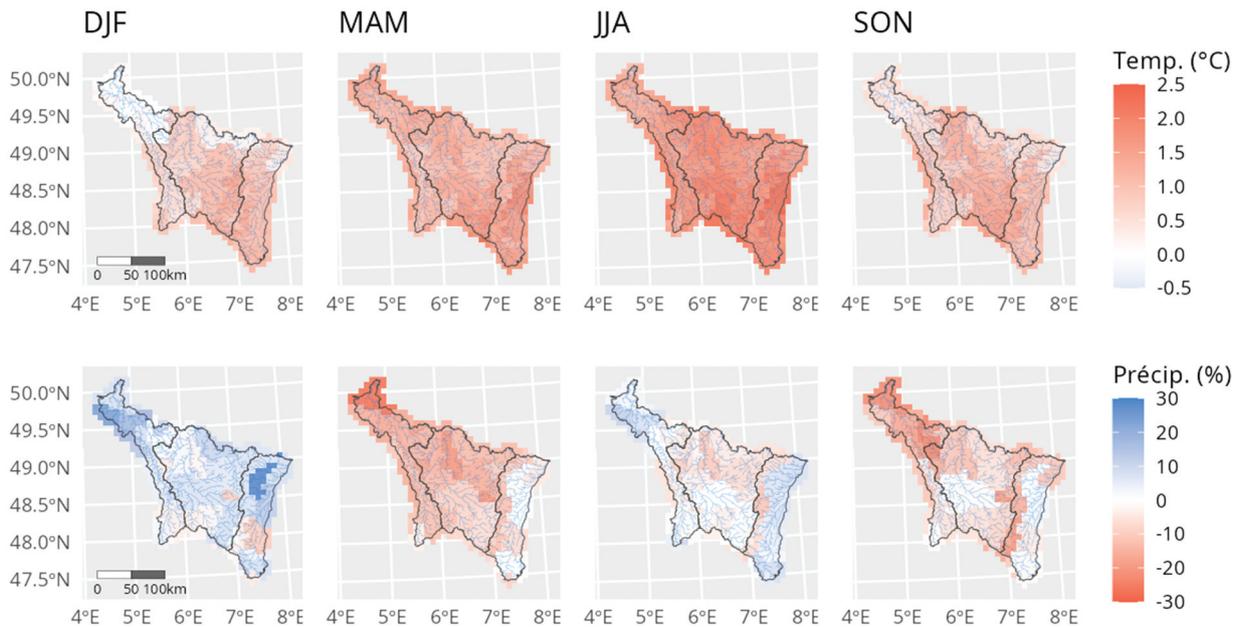
Les données SAFRAN étant basées sur un jeu de postes d'observation évoluant au cours du temps, une part des variations décrites ci-dessus pourrait provenir en partie des évolutions du réseau de mesure. Les mêmes tests ont été portés sur un jeu de données au poste, présentant des données complètes sur les périodes 1971–1990 et 2003–2022 (10 séries pour la température mensuelle, 33 séries pour les précipitations mensuelles, partie aval du bassin de la Meuse non couverte). Les résultats sont sensiblement similaires et confirment les ordres de grandeur et la significativité ou non des changements présentés plus haut.

Cette évolution de la température, et dans une moindre mesure, des précipitations a un impact fort sur les écoulements et en particulier sur les étiages, avec un moindre stockage des précipitations hivernales sous forme de neige (et des écoulements hivernaux potentiellement plus abondants), ou encore une demande en eau atmosphérique, et donc une évapotranspiration, plus fortes dès le printemps (changements significatifs majoritaires sur les moyennes de l'évapotranspiration moyenne mensuelle pour mars, avril, et de juin à octobre). Cette tendance, couplée à des apports de pluie légèrement plus réduits dans certaines zones du bassin, mène à des situations de sécheresses hydrologiques plus précoces. Les apports pluvieux renforcés de la fin d'été atténuent en partie la sévérité de l'étiage puis à l'automne la diminution des pluies et l'augmentation des températures prolongent les étiages. La Figure 5 montre cette évolution, pour la station de la Moselle à Fresse-sur-Moselle (située dans les Vosges tout à l'amont du bassin de la Moselle). En comparaison avec le début de la période, on observe au fil du temps une baisse significative des précipitations en juin, concomitante à une nette précocité de l'étiage. En juillet et surtout en août, le cumul des précipitations est plus important que pour les périodes antérieures, et permet probablement en partie de soutenir

⁶Version du test *t* de Student sans hypothèse sur la variance. Dans le cas de séries ne présentant pas une distribution normale (via le test de Shapiro-Wilk), le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé.

Évolutions saisonnières des températures (haut) et précipitations (bas)

2003-2022 par rapport à 1971-1990



Source des données : climatologie en grille SAFRAN (Météo-France)

Figure 4. Anomalies saisonnières de températures (ligne du haut) et de précipitations (ligne du bas) entre les périodes 2003–2022 et 1971–1990, à partir des données SAFRAN.

très légèrement l'étiage. À l'automne et notamment en septembre, les précipitations baissent de façon marquée au cours des années les plus récentes, ce qui s'accorde avec une sortie d'étiage plus tardive. Les températures montrent une augmentation progressive au fil du temps, et pour tous les mois, avec cependant des écarts plus marqués pour le printemps et l'été (particulièrement en avril et juin) mais également novembre par exemple.

3.2. Analyse de la stationnarité

Suite aux signalements effectués par les services de police de l'eau, une première étape a consisté à vérifier la stationnarité des chroniques de QMNA, depuis 1971 (début de la période utilisée dans la dernière version des catalogues) jusqu'à 2022.

3.2.1. Sélection des stations

L'objectif est de constituer l'échantillon de stations le plus exhaustif possible sur le bassin Rhin-Meuse mais il existe peu de stations de cette durée sans lacunes. Pour les combler nous avons utilisé la méthode du modèle débit-débit proposée par Andréassian et al. (2012) : l'hydrogramme d'une station « cible » (lacunaire) est estimé à partir des données d'une ou de plusieurs stations « donneuses ». Pour chaque station « cible », on identifie une station « donneuse » : celle avec laquelle on obtient la meilleure fonction-objectif (*i.e.* qui définit quantitativement l'objectif à atteindre). La fonction-objectif utilisée

est empruntée aux travaux du projet CHIMERE21 (Thirel et al., 2019) où la modélisation hydrologique visait spécifiquement les bas débits. Elle correspond à la moyenne des critères KGE (Gupta et al., 2009) calculés sur les débits, l'inverse des débits, et les débits classés. À partir de ces éléments, deux critères de sélection des stations sont énoncés sur les séries de débits moyens journaliers) :

- (1) le taux de lacune ne doit pas excéder 33 % de la série sur l'ensemble de la période 1971–2022,
- (2) la fonction objectif de la station donneuse identifiée doit obtenir un score au moins égal à 0,75 (1 étant l'optimum).

Au final, 81 stations dans le bassin Rhin-Meuse ont été retenues : pour chacune d'elles, on dispose, après comblement, d'une série complète de QMNA sur la période 1971–2022. Les stations sont relativement bien réparties au sein du bassin (cf., Figure 6). Parmi ces 81 stations, 37 présentent des lacunes dont 21 seulement pendant la période d'étiage (de mai à octobre). Le taux de lacunes de 33 % retenu comme critère de sélection peut apparaître important. Toutefois, pour la station présentant le nombre maximum de lacunes en période d'étiage, il s'agit de 58 jours (soit 0,3%) tandis que les 20 autres stations présentent 18 jours lacunaires ou moins. Ces lacunes sont observées principalement pendant l'été 2022, mais pas forcément de manière continue. Les performances ont été évaluées, pour les

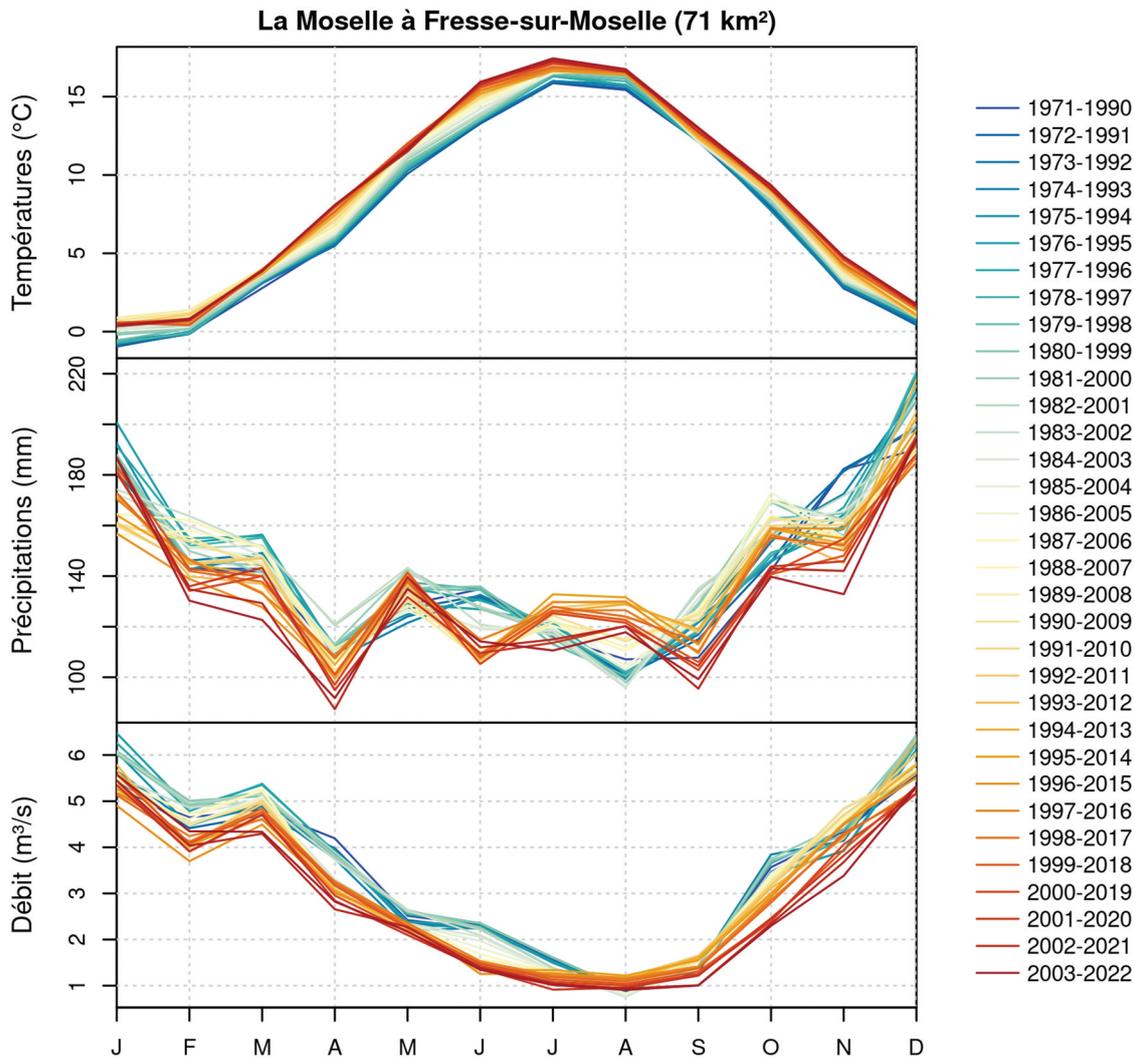


Figure 5. Évolution des régimes mensuels de précipitations (en haut) et de débits (en bas) pour la Moselle à Fresse-sur-Moselle, par moyennes mobiles mensuelles sur 20 années, de 1971–1990 à 2003–2022. Les précipitations ont été calculées en moyennant les 9 points de grille de la climatologie SAFRAN qui couvrent le bassin versant, et les données de débits ont été extraites de l’HydroPortail.

stations présentant des lacunes en période d’étiage, *via* la métrique du MAPE,⁷ entre les QMNA calculés sur les valeurs observées et ceux calculés sur les valeurs reconstitués. Les valeurs de MAPE s’échelonnent entre 12 % et 71 %, ⁸ avec une médiane à 22 % et un écart interquartile situé entre 15 % et 27,5 %. Les valeurs comblées peuvent en effet avoir un effet sur la valeur de QMNA calculée pour 2022. Cependant, on estime que cet effet est très limité au vu du taux de lacunes effectivement présentes et des performances jugées globalement correctes de la reconstitution.

On peut dès à présent se questionner sur l’utilité d’introduire dans la même analyse des données de bassins influencés et non-influencés . En effet, à ce jour et pour cette étude, les données d’influence (prélèvements et rejets notamment) ne sont pas disponibles

⁷Mean absolute percentage error : moyenne absolue des erreurs relatives.

⁸Il s’agit de l’Aroffe à Vannes-le-Châtel, une station subissant une influence karstique très marquée.

ou n’ont pas encore été inventoriées. Malgré cela, il nous semble nécessaire de détecter dès à présent l’existence d’un changement ou non dans nos séries temporelle, quelle que soit la particularité du bassin (influencé ou non). On pourra ensuite s’interroger sur une éventuelle modulation du signal suivant le caractère influencé ou non des stations. Une telle analyse n’est pas encore possible mais des travaux futurs devraient permettre d’apporter des éclaircissements sur ce point.

3.2.2. Tests de stationnarité

La stationnarité a été testée sur les séries de QMNA (1971–2022) à l’aide de deux tests non-paramétriques : le test de Mann-Kendall, conçu pour détecter les tendances d’une série, et le test de Pettitt, qui vise à repérer des ruptures (Renard et al., 2006). Une autocorrélation des valeurs peut altérer la sensibilité des tests. Elle peut être liée au caractère non stationnaire de la série ou à un effet de persistance : dans cette situation, un étiage sévère peut influencer l’étiage de l’année suivante.

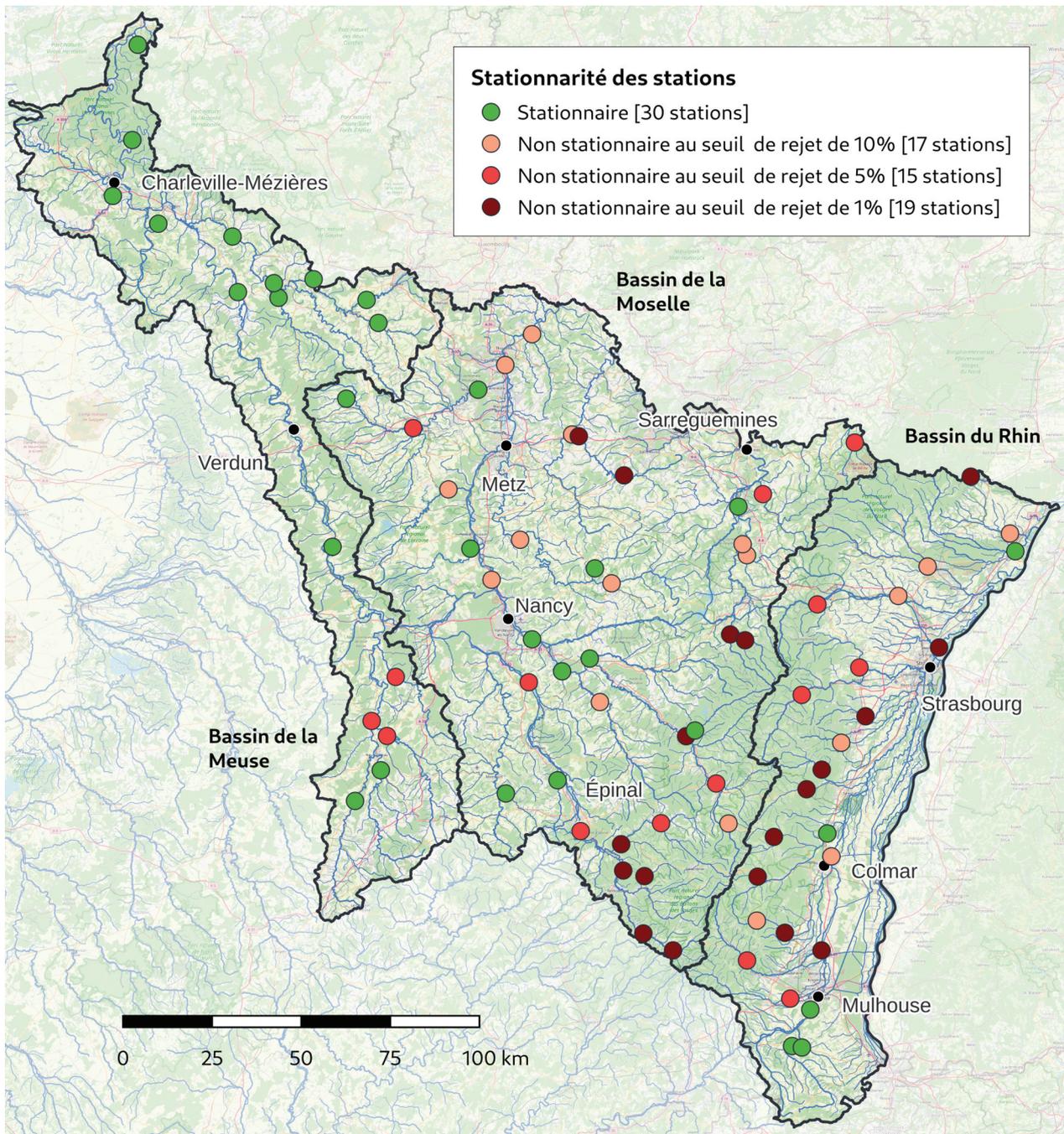


Figure 6. Stationnarité des séries de QMNA sur la période 1971–2022, suivant les seuils de rejet de 1%, 5% et 10%, à partir des tests de Mann-Kendall et de Pettitt (une station est indiquée comme non stationnaire si au moins un test renvoie un résultat de non stationnarité).

Parmi les séries étudiées, une autocorrélation significative (suivant le test de Bravais-Pearson) est détectée pour 65 % des stations. Pour celles-ci, les tests de stationnarité sélectionnés ont été utilisés dans des versions modifiées, suivant Hamed et Ramachandra Rao (1998) pour le test de Mann-Kendall, et d'après Sernaldi et Kilsby (2016) pour le test de Pettitt (suivant une procédure TFPWcu ou Trend-Free PreWhitened corrected unbiased).

3.2.3. Résultats des tests

Les résultats indiquent que 38 % des stations sont non stationnaires suivant le test de Mann-Kendall, et 23 %

suivant le test de Pettitt (pour un seuil de rejet de 5 % pour les deux tests). 20 % le sont pour les deux tests à la fois, et au final, ce sont 34 stations, soit 42 % de l'effectif, qui présentent un caractère non stationnaire pour au moins un des deux tests. Dans la très grande majorité des cas (31/34 stations), il s'agit d'une tendance à la baisse des débits (voir plus bas). Dans le cas d'un seuil de rejet de 1 % et 10 %, la part de stations possédant des séries non stationnaires s'élève respectivement à 23 % et 63 %.

La carte de la Figure 6 informe du caractère stationnaire ou non stationnaire des stations dans l'espace régional, pour les différents seuils de rejet.

Les QMNA révèlent des séries non stationnaires réparties de manière assez inégale sur le territoire. Ainsi, le massif vosgien (versants alsacien et lorrain confondus) ressort comme la zone où la non-stationnarité est la plus marquée. Ces résultats sont à rapprocher des travaux de Francois et al. (2019), qui montrent que sur 16 stations situées dans le massif vosgien, la totalité est affectée par une tendance à la baisse sur la période 1980–2019. Ces auteurs indiquent également que l'étiage 2003 semble avoir représenté un point de rupture sur une part importante d'entre elles.

En dehors du massif vosgien, on retrouve des séries non stationnaires de manière plus disparate en plaine d'Alsace et sur le plateau lorrain. Concernant le bassin de la Meuse, la majorité des stations sont considérées comme stationnaires (*i.e.* les deux tests ne détectent pas de non-stationnarité jusqu'à un seuil de 10%) : seules 3 stations des 17 du bassin ont au moins un des deux tests indiquant une non-stationnarité au seuil de rejet de 5 % pour les chroniques de QMNA.

Cette non-stationnarité n'a pas forcément qu'une origine climatique, il peut s'agir de stations de cours d'eau connaissant des influences anthropiques importantes (avec par exemple, l'Ill, la Doller ou la Thur en Alsace) et qui ont pu évoluer depuis les analyses des années 1990. À l'inverse, une station peut être stationnaire « par compensation », en raison des influences qu'elle subit (exemple de la Plaine et de la Meurthe influencées par des soutiens d'étiage). Des travaux ultérieurs fournissant des données sur les influences seront utiles pour proposer une distinction claire entre stations influencées ou non et proposer régionalement, une analyse comparative du niveau de stationnarité.

Ajoutons que lorsqu'on compare les résultats obtenus par Francois et al. (2019) avec ceux de la présente étude,

on s'aperçoit que pour les stations communes (81), 16 nouvelles stations (soit 20 % de l'effectif) apparaissent comme non stationnaires (seuil de rejet de 5%). Dans une analyse de l'étiage 2022, portant sur 87 stations dans le bassin Rhin-Meuse et sur la période 1971–2022, François et al. (2023) ont montré que cet étiage a constitué le minimum absolu (en QMNA) pour 23 stations, et se classe entre le premier et le troisième rang des étiages les plus sévères pour la moitié d'entre elles. La sévérité des étiages 2022 et 1976 est comparable : pour chacun d'eux, 23 stations des 87 étudiées par François et al. (2023) ont connu leur valeur de QMNA la plus basse de la période. Ces deux événements présentent toutefois des caractéristiques différentes, 1976 se distinguant par une durée plus longue, et par une sévérité plus forte dans l'ouest du bassin Rhin-Meuse. En 2022 c'est le massif vosgien qui a été le plus durement touché.

On peut raisonnablement faire l'hypothèse que la combinaison de l'étiage 2022 et de celui déjà marqué de 2020 pèse dans le résultat des tests.

La Figure 7(a) qui montre l'évolution, sur la période considérée, du rapport entre le QMNA et la QMNA médian, pour l'ensemble des stations retenues, vient compléter notre analyse. On observe une grande variabilité au sein des séries. Des investigations approfondies paraissent nécessaires, mais en première analyse, on retrouve un schéma temporel globalement identique : les étiages sévères des dernières décennies se démarquent pour toutes les séries, en particulier l'étiage de 1976, celui de 2003 ou encore celui de 2022. À l'inverse, on distingue également le « pic humide » de l'étiage 2021 dénotant fortement, pour l'ensemble des stations, parmi les dernières années caractérisées par des étiages sévères (2018, 2019, 2020, 2022). On note que l'étiage 2021 se situe en

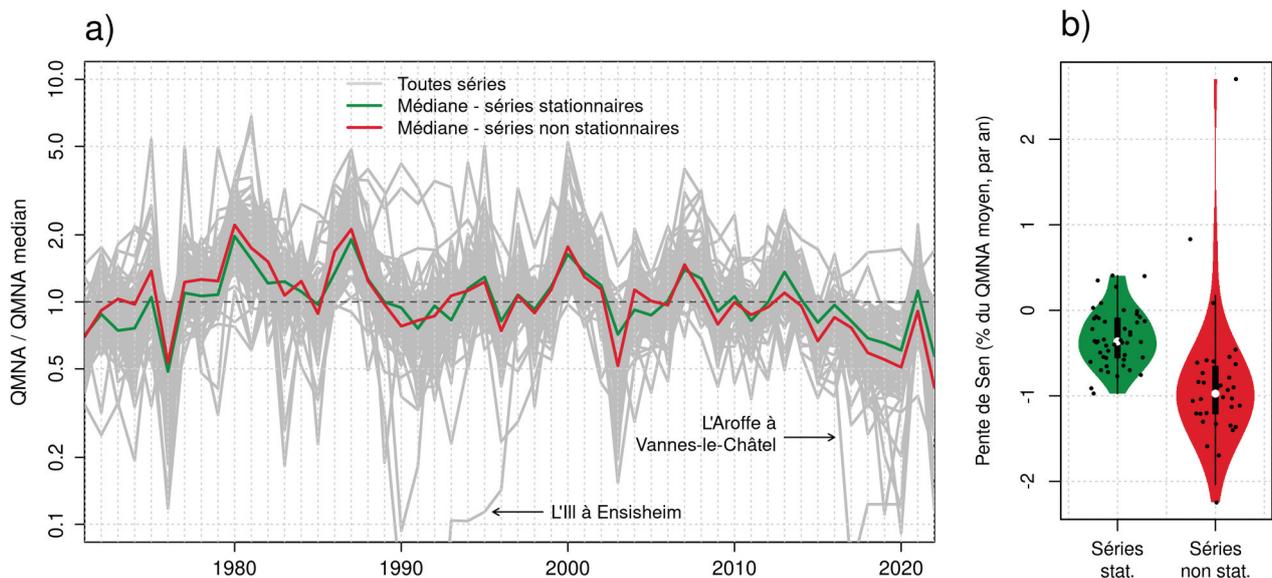


Figure 7. (a) Évolution des rapport QMNA/QMNA_{médian} sur la période 1971–2022 pour les 81 stations étudiées ; (b) Dispersion de la pente de Sen, en pourcentage de la valeur du QMNA moyen sur la période 1971–2022, suivant le caractère stationnaire/non-stationnaire des stations.

moyenne dans des valeurs moyennes à basses, en comparaison des valeurs d'étiages humides sur la période avant 2015. Certaines stations montrent des valeurs extrêmement basses certaines années. Il s'agit de stations situées sur des cours d'eau karstiques ou subissant des influences anthropiques.

Visuellement, une tendance nette à la baisse ressort, au début des années 2000, pour toutes les stations (stationnaires ou non), et légèrement plus soutenue pour les stations non stationnaires. Afin de caractériser l'intensité de ces changements, la pente de Sen peut être utilisée (Héraud et al., 2022). Cet estimateur correspond ici à la médiane des pentes calculées entre toutes les valeurs successives de QMNA. Il peut être considéré comme une valeur de pente d'une droite de tendance. Les résultats (Figure 7(b)) confirment la tendance détectée visuellement. Les stations détectées comme non stationnaires (en rouge) montrent une baisse concentrée en majorité autour de 1 % par an du QMNA moyen (1971–2022) et pour la moitié d'entre elles, supérieure à 1 % par an. Bien que moins prononcée, on observe également une tendance très majoritaire à la baisse pour les stations considérées comme stationnaires (médiane de -0.36 %/an).

D'une sévérité comparable à 1976, et survenant après trois autres étiages sévères, l'étiage de l'été 2022 et les résultats qui précèdent nous questionnent sur la récurrence récente des épisodes d'étiage et sécheresses.

L'effet de la non stationnarité a enfin été examiné via l'évolution des valeurs fréquentielles d'étiage. Dans un premier temps, pour chacune des séries, une loi lognormale à deux paramètres (méthode du maximum de vraisemblance) a été ajustée sur les valeurs de QMNA de 1971–1990 (en référence aux catalogues) et les valeurs théoriques des QMNA 2, 5 et 10 ont été calculées. La période totale (1971–2022) a ensuite été

découpée en quatre période de 20 ans, et pour chacune d'entre elles, on a dénombré pour chaque station le nombre de QMNA ayant une valeur inférieure à la valeur du QMNA quinquennal 1971–1990 (cf. Figure 8). Les résultats pour 1971–1990 suggèrent des valeurs globalement proches, et relativement peu dispersées, de la valeur de 4, qui est en effet la valeur théorique attendue pour le QMNA5 (une valeur tous les 5 ans en moyenne inférieure au QMNA5 soit 4 en 20 ans). La période 1981–2000 montre une dispersion plus marquée, et des valeurs majoritairement inférieures à 4, suggérant une période d'étiages moins sévères. Pour la période 1991–2010, on retrouve des valeurs réparties autour de 4, avec toutefois une dispersion nettement plus étendue que pour 1971–1990. Cette dispersion se retranscrit géographiquement : un certain nombre de stations en particulier situées dans la moitié est du bassin (côté alsacien, nord-est du bassin de la Moselle, et deux stations sur la Meuse médiane) présentent des valeurs supérieures à 6, tandis que de nombreuses stations (principalement dans l'amont du bassin de la Meuse, dans les bassins de la Moselle amont, et quelques stations en Alsace) montrent encore des valeurs inférieure à 3. Bien que moins marquée, une distinction globalement similaire se retrouve avec les valeurs 1981–2000. Ainsi, bien que des investigations supplémentaires seront nécessaires pour justifier cette distinction géographique et le comportement des stations concernées, on peut supposer qu'avec une décennie 2001–2010 plus sèche que les précédentes, les écarts ont pu se creuser au sein de cette répartition. On doit toutefois ajouter que les modifications dans les influences d'origine anthropique ont également pu jouer un rôle majeur dans la mise en place de cette tendance pour certaines stations ; ce point fera l'objet d'investigations supplémentaires. Enfin pour la période 2003–2022, un décrochage très

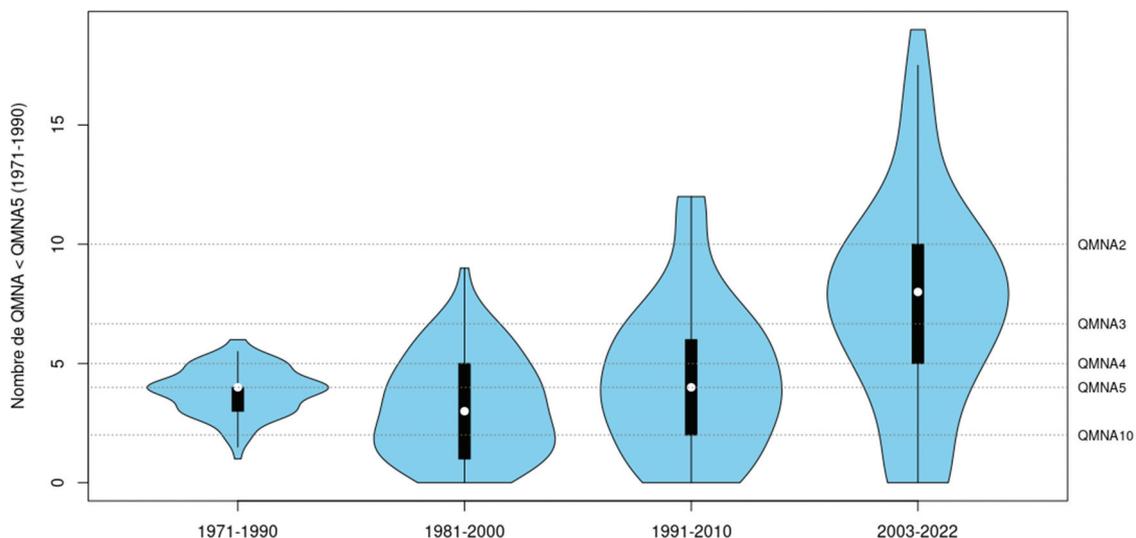


Figure 8. Positionnement des QMNA des stations étudiées au cours de périodes glissantes, en comparaison des valeurs du QMNA quinquennal sec (statistiquement le QMNA est inférieur à cette valeur, 1 année sur 5) ajustées sur la période 1971–1990.

net survient, avec des valeurs interquartiles comprises entre 5 et 10 et témoignant d'une « banalisation » d'étiages auparavant considérés comme relativement rares. De ce fait il semble assez clair que les valeurs de référence 1971–1990 ne sont plus cohérentes avec les conditions hydrologiques produisant les étiages récents. C'est ce changement de régime qui a été perçu par les services gestionnaires.

Les évolutions observées ici sont supposées être en partie liées aux modifications climatiques, elles-même cohérentes avec les effets du changement climatique attendus (en particulier une modification du régime mensuel des pluies et une augmentation généralisée de la température sur l'année et en particulier l'été). Des travaux supplémentaires seront nécessaires pour attribuer la part respective due au changement climatique et celle relative à une variabilité naturelle voire aux activités humaines. Toutefois, quelle que soit l'origine des changements, des évolutions apparaissent dans les étiages et de manière significative pour une partie des stations étudiées. À ce titre, les données des catalogues en usage ne semblent plus refléter la réalité des étiages actuels, et la production de valeurs actualisées s'impose.

3.3. Démarche proposée pour une mise à jour

3.3.1. Période de référence

Les résultats de la section précédente suggèrent qu'une mise à jour des données du catalogue est nécessaire, au moins pour une partie des stations. En ce sens, une nouvelle période de référence, sur laquelle sont établies les valeurs d'étiage de référence, doit être définie et être commune à l'ensemble du bassin Rhin-Meuse. Cette période devra offrir une durée suffisante pour obtenir des résultats statistiquement robustes. Elle devra également être considérée comme stationnaire, et idéalement être caractéristique des évolutions récentes du climat et de l'hydrologie du bassin.

Les travaux à venir viseront donc à déterminer la période la plus récente et la plus longue, pour laquelle le nombre de stations non stationnaires est minimal. Pour cela, les analyses de stationnarité décrites plus haut seront appliquées aux stations pour des durées différentes. Sur cette base, le nombre de stations à analyser pourrait être plus important (la contrainte d'avoir des séries remontant à 1971 n'existant plus ici) et les résultats ainsi plus robustes et représentatifs du bassin à une échelle plus fine. Des travaux préliminaires suggèrent qu'une période d'environ 30 ans, coïncidant avec la dernière normale climatique de Météo-France, pourrait être un choix satisfaisant ; ce choix doit être confirmé avec l'intégration des étiages les plus récents (2020–2022).

Une démarche par projection pourrait être une bonne stratégie pour l'élaboration d'une nouvelle version des catalogues. En effet, des méthodes sont apparues pour estimer des valeurs fréquentielles à partir d'une dérive des débits d'étiage (ex. Blum et al., 2019).

Cependant, cela impose des hypothèses fortes de continuité des tendances observées ce qui rend ces méthodes difficiles à appliquer. Une autre approche consisterait à « cadrer » et faciliter la procédure de mise à jour, afin d'ajuster dynamiquement les valeurs des catalogues en cohérence avec les données hydrologiques les plus récentes.

3.3.2. Données de jaugeages, profils et influences anthropiques

Un autre aspect de la mise à jour des catalogues concerne la validité des profils hydrologiques, établis selon la méthode présentée en section 2. En effet, si les valeurs d'étiage de référence ont probablement évolué, comme indiqué plus haut, il est important d'évaluer si l'aspect des profils a été modifié ou non. Pour le vérifier, il serait souhaitable d'effectuer quelques jaugeages d'étiage en des sites « clés » (représentant potentiellement des points de rupture des profils) et de comparer l'allure des profils obtenus avec celle des profils issus des mesures des années 80. La principale difficulté liée à ce travail provient de la disponibilité des données de débit, qui n'ont pas toutes été retrouvées et qui n'existent qu'au « format papier ».

À ce titre, le laboratoire LOTERR a entamé, en 2021, un travail de numérisation et de bancarisation de ces données de jaugeages. La base de données, dénommée BaDJE pour **B**ase de **D**onnées de **J**augeages d'**E**tiage, est librement accessible en ligne *via* une interface de recherche cartographique (Figure 9). Elle compile à ce jour 7706 jaugeages pour 2542 points de jaugeages, et doit encore être complétée. Le processus de bancarisation implique une redéfinition éventuelle de la localisation précise du point de mesure, afin d'obtenir une base cohérente avec la BD TOPAGE des cours d'eau français. Une délimitation automatique du bassin versant à partir d'un MNT corrigé est ensuite réalisée.

L'intérêt d'une telle base est multiple. Elle vise en effet :

- (1) la mise à disposition des mesures pour connaître les ordres de grandeur des écoulements en étiage sur les cours d'eau mesurés lors des campagnes ;
- (2) l'estimation de débits d'étiage fréquentiels par comparaison avec les débits enregistrés aux stations au moment des mesures (Sauquet et al., 2016) ;
- (3) la comparaison des mesures actuelles et à venir, et donc des profils hydrologiques, avec les données des précédents catalogues ;
- (4) un accès libre des données. A ce titre elle représente un outil utile pour d'autres initiatives de recherches.

Notons qu'à partir de nouvelles campagnes de jaugeages d'étiage dans le massif des Vosges, Francois et al. (2019)

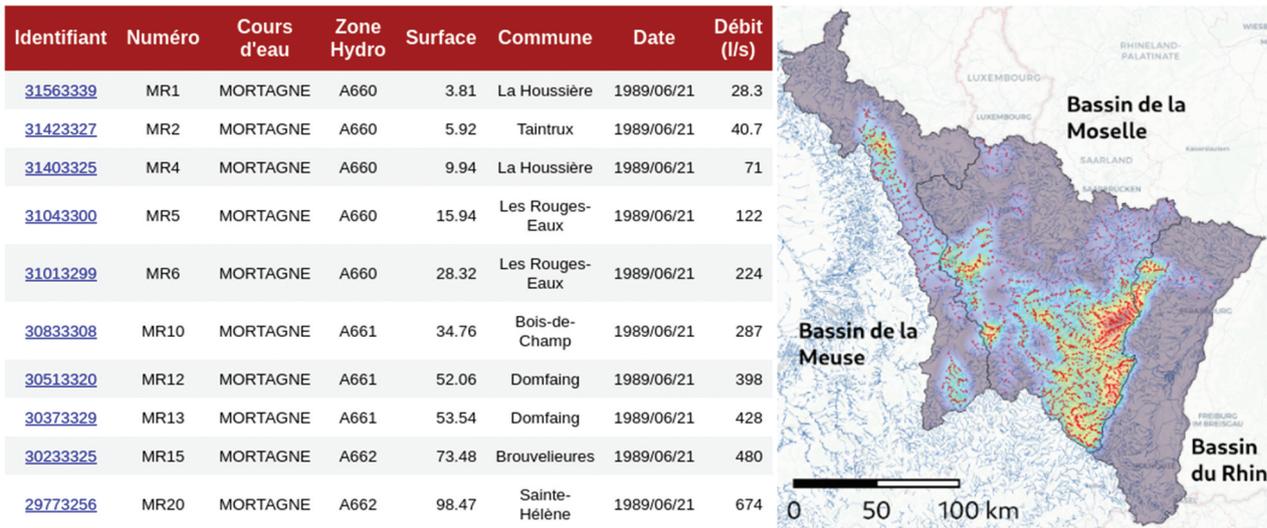


Figure 9. BaDJE (Base de Données des Jaugeages d'Étiage). À gauche : capture d'écran de la liste des jaugeages dans l'interface web (https://deli.loterr.univ-lorraine.fr/BaDJE/BaDJE_Recherche.php) – la surface est donnée en km^2 ; à droite : cartographie des sites de jaugeages actuellement référencés dans la base de données (http://deli.loterr.univ-lorraine.fr/BaDJE/BaDJE_map.html), les points rouges représentent les sites de jaugeage, et leur densité sur le territoire est mise en relief sous forme de carte de chaleur.

n'ont pas constaté de changement dans la forme des profils des cours d'eau. Cependant, les cours d'eau étudiés avaient des profils « simples » (avec peu de tronçons, et des terrains relativement homogènes d'un point de vue hydrogéographique). Il convient alors de reproduire l'analyse sur des cours d'eau présentant des profils davantage différenciés, c'est-à-dire dans des bassins plus contrastés (sur le plan géologique notamment). Sans reproduire l'immense travail de mesure réalisé entre les années 1978 et 1996, mais en ciblant certains cours d'eau, de nouvelles mesures d'étiage seront nécessaires. Si l'occasion se présente, des mesures réalisées pour un étiage exceptionnel comme celui de 2022 seront envisagées. Les données d'autres outils (Réseau de Contrôle et Surveillance des cours d'eau, ONDE – Observatoire National Des Étiage) pourront peut-être également être utiles pour étayer l'analyse.

Le recensement des influences anthropiques doit également être mené. Il permettra d'affiner les analyses. Il visera en particulier à mettre à jour les schémas hydrauliques des bassins, et à fournir les données nécessaires au travail de naturalisation des débits. Pour le cas spécifique des modules, pour lesquels une valeur dite « naturelle » est nécessaire dans le calcul d'un débit réservé (Code de l'environnement, 2006 ; Directive européenne Cadre sur l'Eau, 2000), les données de la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE), fournies à une échelle annuelle, pourront être mobilisées.

4. Conclusions et perspectives

Dans le bassin Rhin-Meuse, la problématique des étiages a été abordée depuis plusieurs décennies,

notamment à travers l'élaboration de catalogues de débits de référence d'étiage. L'approche employée pour leur mise en œuvre s'est appuyée sur de la donnée d'observation davantage que par l'emploi de méthodes de régionalisation ou de modélisation hydrologique. Les catalogues ont vu le jour à la suite de nombreuses campagnes de mesures d'étiages qui ont couvert l'ensemble du bassin, avec un maillage relativement fin. Cette donnée de terrain, couplée à une expertise géographique du territoire étudié, a donné lieu à la réalisation de profils hydrologiques des cours d'eau. Après un ajustement statistique, ceux-ci ont pu être calés aux stations hydrométriques. En définitive, cet outil permet d'estimer des débits de référence d'étiage en tout point d'un cours d'eau dans le bassin Rhin-Meuse. Largement utilisé par les services gestionnaires des eaux de surface, il présente un intérêt fort dans le territoire.

Aujourd'hui, ces catalogues semblent obsolètes car la période de référence sur laquelle ils ont été élaborés s'étend de 1971 à 1990. Le contexte climatique a en effet connu des modifications rapides (en particulier pour les températures). Ainsi, une première analyse de la stationnarité d'une variable d'étiage (QMNA), sur un lot de stations hydrométriques disposant de longues chroniques (1971–2022), a été réalisée. Elle révèle le caractère non-stationnaire d'un nombre important des stations étudiées. Une tendance nette à la baisse des valeurs de QMNA a été mise en évidence. Cette évolution semble être principalement d'origine climatique. Pour attester (ou non) de ce lien avec le climat, une évaluation de la stationnarité de la relation variables climatiques – débits d'étiage devra être menée ultérieurement, en utilisant par exemple, un modèle hydrologique. En effet, bien qu'un tel lien soit très

plausible, le changement climatique peut ne pas être la seule cause des changements hydrologiques constatés. D'autres facteurs comme les activités humaines ou l'occupation des sols peuvent incriminer. Dans tous les cas, les résultats obtenus dans ces travaux justifient une mise à jour des catalogues.

L'analyse de stationnarité devra donc être étendue pour permettre de déterminer une nouvelle période de référence et de produire une version actualisée des catalogues. La période retenue devra être stationnaire et représentative des conditions hydrologiques récentes. Parallèlement, le travail de mise en place d'une base de données des jaugeages d'étiage (BaDJE) devra se poursuivre. Il vise à recueillir l'ensemble des jaugeages réalisés dans des conditions de basses-eaux depuis la première version des catalogues. Cette base de données permettra de réajuster les profils des catalogues si les nouveaux jaugeages montrent une évolution de leur allure générale.

Enfin, la mise à jour des catalogues devra également intégrer les évolutions des influences anthropiques dans le bassin. Un travail de recensement des rejets et prélèvements a débuté. Cela aidera également à identifier la cause de certains changements ou tendances observés dans les débits d'étiage.

Pour terminer, les questionnements sur la mise à jour de débits d'étiage de référence impliquent également une réflexion sur l'établissement des valeurs seuils réglementaires. En effet, ces dernières sont souvent fixées selon des statistiques hydrologiques Grelier: par exemple, le débit réservé correspond généralement à 1/10 du module ; le seuil de crise d'étiage est établi dans le Grand-Est comme le « débit moyen minimum sur trois jours consécutifs (VCN3) calculé sur 20 ans⁹ » ; ou encore, le QMNA 5 est utilisé par la Police de l'eau dans les dossiers de rejet et prélèvement en eau. Or, si les débits témoignent d'une non-stationnarité, les débits caractéristiques sont modifiés, en l'occurrence à la baisse. Conserver les valeurs réglementaires sur les mêmes bases de calcul provoque une réduction de la quantité d'eau minimale à laisser dans les cours d'eau en situation d'étiage, avec un impact potentiel important, par exemple sur les populations aquatiques ou encore la disponibilité en eau pour l'adduction d'eau potable ou les centrales nucléaires. Nos travaux sur l'identification des évolutions et l'actualisation des valeurs de référence d'étiage, permettront d'alimenter les réflexions sur la détermination des différents seuils et leur articulation avec les nouvelles situations d'étiage de référence que nous aurons identifiées.

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Déclaration de disponibilité des données

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, Benjamin Grelier, upon reasonable request.

Funding

This work was supported by the Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

Références

- Alberti-Dufort, A. & Desjardins, R. (2022). *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022 (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, la Faune et des Parcs (MELCCFP) – Ouranos)*. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/>
- Andréassian, V., Lerat, J., Le Moine, N., & Perrin, C. (2012). Neighbors: Nature's own hydrological models. *Journal of Hydrology*, 414–415, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.007>
- Arts, I., & Sary, M. (2000). Cartographie des débits d'étiage : Application au bassin de la Meurthe. *Revue Géographique de l'Est*, 40(1–2), Article 1–2. <https://journals.openedition.org/rge/4175>
- Auer, J.-C., Dubant, C., Migayrou, J., & Zumstein, J.-F. (1982). *Débits mensuels d'étiage. Débits naturels et contrôlés. Bassin du Rhin en Alsace*. AERM ; DIREN Lorraine ; Délégation de bassin Rhin-Meuse ; Comité technique de l'eau Alsace.
- Blatter, A. S., Liebert, J., Preuss, P. A., Szabadics, J., & Ihringer, J. (2007). Information system "BW_Abfluss" : Regionalisation of flood, mean and low flow parameters. *Advances in Geosciences*, 11, 57–61. <https://doi.org/10.5194/adgeo-11-57-2007>
- Blum, A. G., Archfield, S. A., Hirsch, R. M., Vogel, R. M., Kiang, J. E., & Dudley, R. W. (2019). Updating estimates of low-streamflow statistics to account for possible trends. *Hydrological Sciences Journal*, 64(12), 1404–1414. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1655148>
- Catalogne, C., & Sauquet, E. (2012). *Cartographie des débits de référence : Interpolation des caractéristiques d'étiage*. IRSTEA – ONEMA.
- CEGUM. (2006). *PRESAGES : PREvision et Simulation pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse ; Université Paul Verlaine (Metz).
- Cheysson, E. (1879). Notice sur l'atlas statistique des cours d'eau, usines et irrigations. *Journal de la Société Statistique de Paris, Tome, 20*, 172–180. http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1879_20_172_0
- Folton, N., & Arnaud, P. (2012). *Cartographie des débits de référence d'étiage La méthode LOIEAU*. IRSTEA – ONEMA.
- Francois, D., Delus, C., Lebaut, S., & Manceau, L. (2019). *Ressources en eau souterraine dans les Vosges et vulnérabilité au changement climatique. Campagnes de jaugeages des débits d'étiage 2019 [Report]*. LOTERR, Université de Lorraine. <https://hal.science/hal-02864671>
- François, D., El-Khalfi, H., Grelier, B., Delus, C., Drogue, G., Lebaut, S., & Manceau, L. (2023). *L'étiage 2022 dans les bassins français de la Meuse et du Rhin. Sécheresse et Étiages 2022*. Société Hydrotechnique de France.
- François, D., Sary, M., Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1994). *Étude méthodologique des débits d'étiage*. CEGUM – Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

⁹Arrêté préfectoral N°2017/451 du 8 juin 2017, région Grand-Est.

- Fürst, J., Godina, R., Nachtnebel, H. P. & Nobilis, F. (2009). The Hydrological Atlas of Austria – Comprehensive transfer of hydrological knowledge and data to engineers, water resources managers and the public. In *Proceedings of IAHS Symposium on the Role of Hydrology in Water Resources Management* (Vol. 327, pp. 36–44). https://iahs.info/uploads/dms/14599.10-36-44-327-03-Fuerst_sm.pdf
- Grandry, M., Gailliez, S., Sohler, C., Verstraete, A., & Degré, A. (2013). A method for low-flow estimation at ungauged sites: A case study in Wallonia (Belgium). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), 1319–1330.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Gustard, A., Bullock, A., & Dixon, J. M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom* (IH Report No. 108). Institute of Hydrology. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/6050/1/IH_108.pdf
- Hamed, K. H., & Ramachandra Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1), 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Héraut, L., Sauquet, É. & Mansanarez, V. (2022). *Catalogue du portail de bassin Adour-Garonne* [Rapport de recherche]. RiverLy-INRAE; Agence de l'Eau Adour-Garonne. <https://catalogue-adour-garonne.eaufrance.fr/geonet/work/srv/fre/catalog.search#/metadata/cad11782-61e8-4081-a172-dbb0fb5f7a93>
- Laaha, G., & Blöschl, G. (2007). A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 625–644. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.625>
- Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., & Cyr, J.-F. (2017). Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 550, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.011>
- Leopold, L. B., & Miller, R. L. (1956). Ephemeral stream-hydraulic factors and their relation to the drainage network. *USGS Professional Paper*, 282–A.
- Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse. (1998). *Débits mensuels d'étiage et modules. 2 – Bassin de la Moselle amont (bassin de la Meurthe inclus)*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse. (1999). *Débits mensuels d'étiage et modules. 4 – Bassin de la Meuse*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse. (2000a). *Débits mensuels d'étiage et modules. 1 – Bassin du Rhin en Alsace*. Agence de l'Eau Rhin Meuse.
- Mission déléguée de bassin Rhin-Meuse. (2000b). *Débits mensuels d'étiage et modules. 3 – Bassin de la Moselle aval (Sarre inclus)*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- Nicolle, P., Andréassian, V., Riffard, M., Peschard, J., Boldetti, G., & Le Moine, N. (2012). *Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen en France: Une approche distribuée pour garantir la continuité des estimations le long du réseau hydrographique*. IRSTEA – ONEMA.
- Oberlin, G., Galea, G. C., & Toni, J. T. (1973). Intérêt des jaugeages épisodiques pour l'estimation des étiages de petits bassins non équipés. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 10(4), 349–368. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/14895.pdf
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Gailhard, J., Laurent, C., Neppel, L., & Sauquet, E. (2006). Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. *La Houille Blanche – Revue Internationale de L'eau*, 6, 48. <https://doi.org/10.1051/lhb:2006100>
- Riffard, M., Andréassian, V., Nicolle, P., & Peschard, J. (2012). *Combinaison multi-modèle et cartographie de consensus du débit de référence d'étiage et du débit moyen à l'échelle de la France*. IRSTEA – ONEMA.
- Risley, J., Stonewall, A., & Haluska, T. (2008). *Estimating flow-duration and low-flow frequency statistics for unregulated streams in Oregon*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5126. https://www.oregon.gov/odot/Programs/ResearchDocuments/Low-flow_Stream_Flow.pdf
- Sauquet, E., Catalogne, C., Plasse, J., & Lang, M. (2016). *Guide pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie – Application à la prédétermination des débits caractéristiques d'étiage*. Onema. <https://hal.inrae.fr/hal-02604844>
- Serinaldi, F., & Kilsby, C. G. (2016). The importance of prewhitening in change point analysis under persistence. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(2), 763–777. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1041-5>
- Thirel, G., Collet, L., Etchevers, P., Francois, D., Gailhard, J., Perrin, C., Reverdy, M., Rousset, F., Samacoits, R., Vidal, J.-P., Vincendon, B., & Wagner, J.-P. (2019). *CHIMERE21: Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21e siècle*. 16. <https://hal.inrae.fr/hal-02609951>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & 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. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Vogel, R. M., & Kroll, C. N. (1992). Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, 28(9), 2451–2458. <https://doi.org/10.1029/92WR01007>
- Wagner, G. (2008). *Réactualisation des catalogues des débits caractéristiques d'étiage du bassin Rhin-Meuse: Période 1971–2006*. Rapport de stage. AERM; Université de Metz.
- Zumstein, J.-F. (1976). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973. *La Houille Blanche*, 6–7, 569–581. <https://doi.org/10.1051/lhb/1976038>
- Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1975). *Débits mensuels d'étiage. Bassin de la Moselle. 1 – Amont de Frouard*. AERM; Délégation de bassin Rhin-Meuse.
- Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1976). *Débits mensuels d'étiage. Bassin de la Moselle. 3 – Bassin de la Sarre*. AERM; Délégation de bassin Rhin-Meuse.
- Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1978a). *Débits mensuels d'étiage. Bassin de la Meuse. 1 – Entre Maxey-sur-Meuse et la frontière franco-belge*. AERM; Délégation de bassin Rhin-Meuse.
- Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1978b). *Débits mensuels d'étiage. Bassin de la Moselle. 2 – Aval de Frouard et bassins de la Rosselle, de la Bisten et de la Nied*. AERM; Délégation de bassin Rhin-Meuse.
- Zumstein, J.-F., & Auer, J.-C. (1979). *Débits mensuels d'étiage. Bassin de la Meuse. 1 – Bassin de la Haute-Meuse, en amont de Maxey-sur-Meuse*. AERM; Délégation de bassin Rhin-Meuse.