

Une cartographie de l'écoulement des rivières de Corse

Pierre BRIGODE^{1,*}, Damien LILAS¹, Vazken ANDRÉASSIAN¹, Pierre NICOLLE¹, Nicolas LE MOINE², Charles PERRIN¹, Sébastien GREMMINGER³ et Bénédicte AUGÉARD⁴

¹ Irstea, UR HYCAR, Antony.

² UMR METIS, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

³ Service Biodiversité, Eau et Paysage, DREAL CORSE, Bastia.

⁴ Agence française pour la biodiversité (AFB), Vincennes.

* Maintenant à : Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, Géoazur ; e-mail: pierre.brigode@unice.fr

RÉSUMÉ. – Cet article présente une cartographie de l'écoulement des cours d'eau de Corse, constituée de deux débits caractéristiques : le débit moyen annuel (module), qui caractérise les écoulements moyens d'une rivière, et le débit mensuel minimal de fréquence quinquennale sèche (Q_{MNA5}), qui caractérise les basses eaux d'une rivière. Ces débits ont été calculés en tout point du réseau hydrographique corse grâce à deux modèles de prédétermination construits à l'échelle nationale et transposés en Corse. Ces modèles s'appuient sur une base de données hydro-climatiques récentes et critiquées regroupant 20 bassins versants jaugés. Les cartographies finales de ces débits seront diffusées par l'Agence Française pour la Biodiversité sur le portail Eaufrance (<http://www.eaufrance.fr/>). Ce travail permet également de quantifier de manière synthétique les écoulements des rivières de Corse, territoire très productif en eau superficielle relativement aux grands bassins versants français, puisque 50 % des eaux précipitées en Corse s'écoule en rivière (contre environ 30 % pour les bassins Artois-Picardie et Seine-Normandie, par exemple).

Mots-clés : Cartographie, étiage, débit moyen, Corse, hydrologie, régionalisation, Q_{MNA5} .

Mapping water resources in Corsica

ABSTRACT. – In this paper, we present a cartography of streamflow in Corsica, a French Mediterranean Island of 8,680 km² based on two streamflow characteristics: the mean annual streamflow, which is generally used in order to quantify the mean flow of a given river and the minimum monthly discharge with a 5-year return period (Q_{MNA5}), which is one of the main regulatory estimates for low flows in France. These two streamflow characteristics have been estimated over each point of the Corsican river network using two different models defined over France and adapted for Corsica. These models use a hydro-climatic database of 20 gauged catchments with recent and good quality hydro-climatic series. The final maps are available on the Eaufrance website (<http://www.eaufrance.fr/>). This work also provides a general quantification of water resources of Corsica, which is a productive region compared to the other large French watersheds, since 50% of the precipitated water in Corsica are flowing into the rivers (in comparison, 30% of the precipitated water are flowing into the rivers of the Artois-Picardie and Seine-Normandie catchments).

Key-words: Cartography, drought, mean flow, hydrology, Corsica, regionalization.

I. INTRODUCTION

La Corse est une île méditerranéenne de contrastes et d'extrêmes. Sur un territoire de 8 680 km², on y passe de la mer à la montagne, du granite aux schistes, de la sécheresse à l'abondance en eau. La saisonnalité marquée des précipitations, la forte intensité des pluies d'automne, les fortes pentes et les difficultés inhérentes à la mesure hydrométrique contribuent à rendre difficile l'évaluation du débit des rivières et, *a fortiori*, des ressources en eau de la Corse. Avec l'objectif de cartographier les ressources en eau superficielle sur l'ensemble du réseau hydrographique de l'île, nous nous sommes intéressés à deux débits caractéristiques : **(i) le débit moyen annuel**, ou module (noté Q_A par la suite), qui est le débit caractéristique généralement utilisé pour caractériser les écoulements moyens d'une rivière et **(ii) le débit mensuel minimal de fréquence quinquennale sèche** (noté Q_{MNA5} par la suite) qui est couramment utilisé pour caractériser les basses eaux d'une rivière (le Q_{MNA5} est souvent qualifié de « débit de référence d'étiage »).

Ces débits sont notamment utilisés par les gestionnaires de l'eau pour appliquer le code de l'environnement. Ainsi, en application de l'article L214-18 de ce même code, les ouvrages situés dans le lit d'un cours d'eau doivent comporter des dispositifs destinés à maintenir dans ce lit un débit minimal « garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux ». Ce débit ne doit pas être inférieur au dixième du module (Q_A) du cours d'eau ; il est donc nécessaire de connaître le Q_A au droit de tous les barrages ou seuils permettant la dérivation d'une partie de l'eau. De même, les déclarations ou les demandes d'autorisation administratives concernant les prélèvements ou les rejets se font à partir de seuils déterminés en utilisant le Q_{MNA5} (Article R214-1 du code de l'environnement). L'application de cette réglementation nécessite également d'avoir une estimation de ce débit d'étiage en n'importe quel point du réseau hydrographique.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour cartographier ces deux caractéristiques de l'écoulement de surface. Folton et Lavabre [2007] ont appliqué à la partie sud de la France

l'approche LOIEAU [Lavabre *et al.*, 1999], permettant de calculer des débits caractéristiques à partir d'une modélisation hydrologique de type conceptuel au pas de temps mensuel. L'application de cette méthode nécessite, pour obtenir les débits en un point donné, d'utiliser un modèle hydrologique préalablement calé sur les sites possédant une station hydrométrique (sites jaugés), et régionalisé pour les sites non-jaugés. Par ailleurs, Sauquet *et al.* [2000] ont proposé des cartes hydrologiques s'appuyant sur des techniques d'interpolation par krigeage. Pour nos travaux de cartographie, nous nous sommes appuyés sur une méthode développée à Irstea pour l'ensemble du territoire métropolitain continental français [Nicolle *et al.*, 2012], qui consiste à calculer des débits élémentaires en tout point du territoire étudié, débits qui sont ensuite cumulés le long du réseau hydrographique. Après avoir été calculés au droit des stations hydrométriques, les écarts entre débits observés et débits simulés sont interpolés sur l'ensemble du territoire afin d'améliorer les performances de la cartographie. L'intérêt majeur de l'approche proposée est qu'elle permet de produire une cartographie cohérente avec les observations disponibles, tout en maintenant une cohérence amont-aval des débits. Cet article présente les résultats de l'application de cette méthode de cartographie sur la Corse et une évaluation s'appuyant sur 20 bassins versants jaugés.

II. LE CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE CORSE

II.1. Le climat de la Corse

Avec une altitude médiane de 450 m, la Corse est la plus montagneuse des grandes îles méditerranéennes. Le climat corse est majoritairement méditerranéen et caractérisé notamment par des cumuls pluviométriques spatialement et temporellement très variables (aux échelles journalière, saisonnière et interannuelle) [Leroux *et al.*, 2002]. Ainsi, des zones de plaines ne recevant qu'environ 600 mm/an de précipitations côtoient des massifs dépassant 2 000 m sur lesquels les lames d'eau précipitées dépassent 1 500 mm/an. Les zones de plus hautes altitudes sont influencées par un climat de type alpin, se manifestant par exemple par des chutes de neige importantes durant l'hiver [Rome et Giorgetti, 2007]. La majeure partie des précipitations se concentre au printemps et durant le mois de novembre, périodes durant lesquelles sont principalement observées les crues. Cependant, de violents orages estivaux peuvent se produire et entraîner des débits considérables du fait des fortes pentes et des très faibles temps de réaction des bassins versants. L'été se caractérise par l'occurrence de sécheresses prononcées, entraînant des étiages marqués durant les mois de juillet, d'août et de septembre.

II.2. Bref historique des études hydrologiques passées

Les premières informations hydrologiques sur la Corse datent de l'entre-deux-guerres et sont liées à l'hydro-électricité, du fait notamment de la configuration de bassins versants se prêtant « admirablement à la construction de barages-réservoirs » [Sylvestre, 1928]. La question du potentiel hydraulique avait d'abord été abordée par Brun [1918], puis reprise par Sylvestre [1928] qui a dressé un premier bilan des forces hydrauliques présentes et du potentiel futur. Certaines caractéristiques des rivières corses y sont décrites : le Taravo est ainsi vu comme « la rivière de l'île dont le

régime est le plus régulier et le débit le plus fort, moyenne de 1.000 litres à l'étiage » [Sylvestre, 1928]. Le développement de l'irrigation après la création de la SOMIVAC (société pour la mise en valeur agricole de la Corse) en 1957 entraîne un développement des réseaux de mesure du débit. Actuellement, une vingtaine de stations hydrométriques sont opérationnelles et mesurent en continu l'évolution du débit des principales rivières de Corse. Ces données ont été plus récemment utilisées dans le cadre de différentes études hydrologiques régionales incluant la Corse. Ainsi, le modèle LOIEAU [Lavabre *et al.*, 1999], permettant la régionalisation du Q_A et du Q_{MNA5} a été appliqué à la moitié sud de la France, Corse incluse [Folton et Lavabre, 2007].

III. DONNÉES UTILISÉES

III.1. Données hydrologiques

Vingt stations hydrométriques (19 gérées par les services de l'État et une gérée par Électricité De France) produisant des séries de débits moyens journaliers ont été prises en compte pour le calcul du Q_A , et un sous-ensemble de 14 stations a été retenu pour le calcul du Q_{MNA5} . Ce sous-ensemble de stations a été constitué sur la base (i) de critères numériques évaluant la disponibilité des données hydrologiques et (ii) de l'expertise du service hydrométrique local, jugeant la fiabilité des mesures hydrologiques, notamment en étiage. Le protocole de sélection de stations à utiliser pour le calcul du Q_{MNA5} a ainsi permis d'écarter certaines stations considérées comme trop influencées en été (prélèvements, hydro-électricité, etc.). La position des vingt stations est représentée sur la figure 1(a). Une série chronologique de débits parmi ces vingt a été constituée par assemblage de trois séries chronologiques de débits issues de stations très proches, sur la Bravone (codes Banque HYDRO Y9215010, Y9215020, Y9215030) et est notée Y9215020 par la suite.

III.2. Données climatiques

Les données climatiques utilisées pour cette étude sont issues de la réanalyse SAFRAN de Météo-France [Vidal *et al.*, 2010], disponible sur un maillage régulier (de 8 km par 8 km) depuis 1958 au pas de temps journalier. Les variables considérées sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, calculée avec la formule proposée par Oudin *et al.* [2005] et détaillée par Oudin [2006]. Cette formule générale, développée pour décrire spécifiquement la demande évaporatoire à l'échelle du bassin versant, a déjà été appliquée dans des milieux méditerranéens (e.g. Lespinas *et al.* [2014] ; Ruelland *et al.* [2015]). La position des mailles SAFRAN recouvrant la Corse est représentée sur la figure 1. Ces données climatiques ont été simplement désagrégées spatialement à l'échelle du MNT en prenant en compte le pourcentage de maille SAFRAN recouvrant chaque maille du MNT. Ainsi, des séries journalières de pluie et d'évapotranspiration potentielle sont disponibles pour chaque maille du MNT, et, par agrégation, pour chaque bassin versant étudié.

III.3. Données géomatiques

La BD CARTHAGE a été utilisée comme base de données du linéaire hydrographique : la cartographie finale est donc constituée de l'ensemble des tronçons CARTHAGE corses, chaque tronçon étant caractérisé par une valeur de

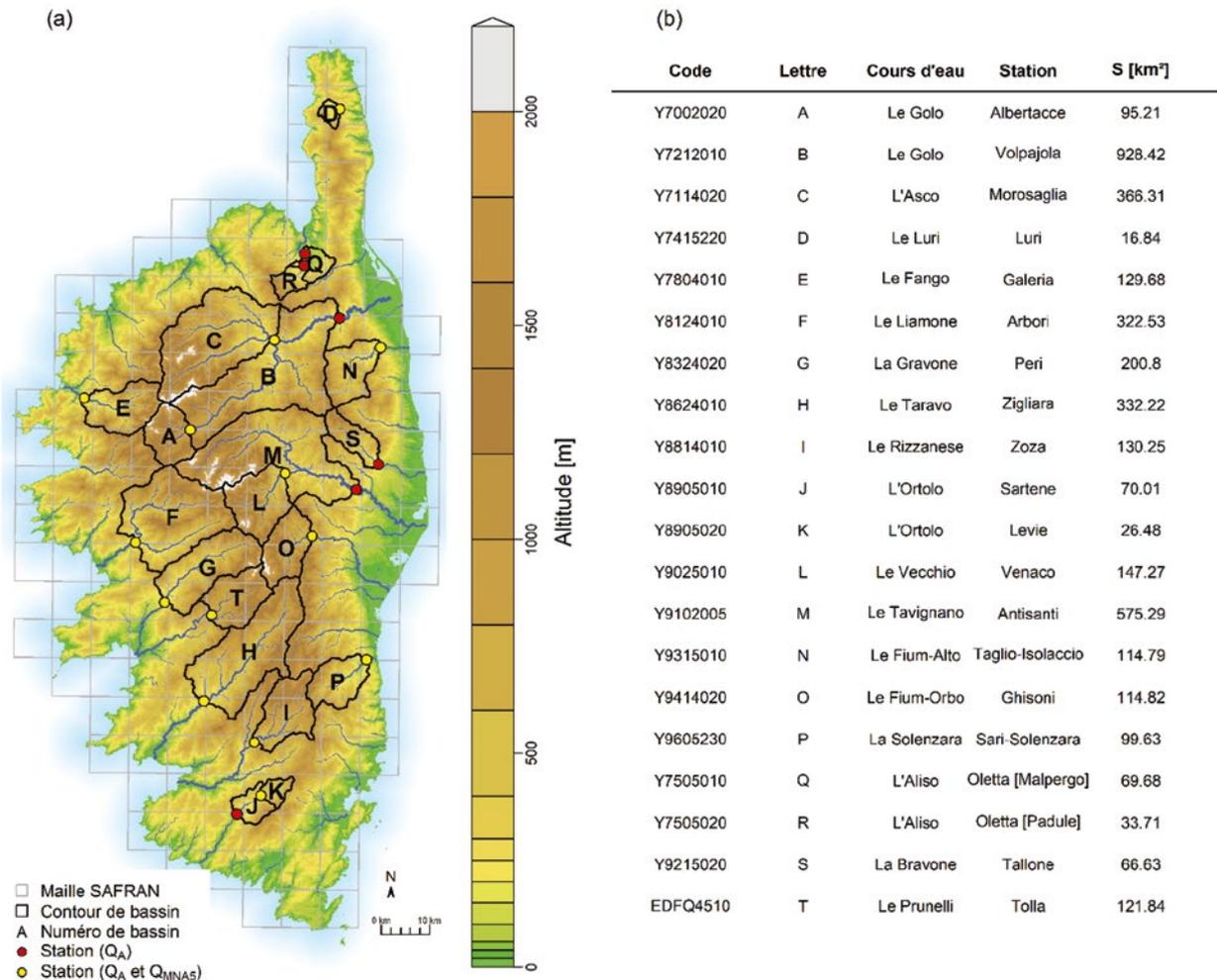


Figure 1 : (a) Maillage SAFRAN (en gris), contour des bassins versants (en noir) et position des 20 stations hydrométriques considérées dans cette étude. La couleur du point indique si les stations sont utilisées pour le calcul de Q_A et de Q_{MNA5} (jaune) ou uniquement pour le calcul de Q_A (rouge). La topographie est également représentée en fond de carte. La taille de chaque point du réseau hydrographique est fonction de la surface drainée en amont. (b) : Code Banque HYDRO (lettre de bassin), nom du cours d'eau et de la station et superficie des 20 bassins versants étudiés.

Q_A et une valeur de Q_{MNA5} ainsi que par une estimation des incertitudes associées. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 25 m fourni par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a été utilisé afin de décrire la topographie de la Corse. Il a été corrigé « hydrologiquement », afin de faire correspondre le réseau hydrographique obtenu à partir du traitement du MNT avec le réseau hydrographique réel (ici considéré comme étant le réseau CARTHAGE).

IV. MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DES DÉBITS DE RÉFÉRENCE

IV.1. Méthodologie générale

Cette section décrit les différentes étapes de la méthode de cartographie des débits utilisée pour l'estimation du Q_A puis du Q_{MNA5} sur l'ensemble du réseau hydrographique.

IV.1.1. Cartographie « brute » des débits de référence

Le modèle de cartographie des débits de référence est un modèle distribué, calculant en chaque point du maillage du

MNT un débit potentiel à partir de moyennes climatiques. Ces débits unitaires sont ensuite cumulés le long du réseau de drainage afin de proposer une cartographie cohérente d'amont en aval [Nicolle *et al.*, 2012]. La formule générale du modèle est présentée dans l'équation (1) :

$$\hat{Q} = \left(\frac{S}{b}\right)^a \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\theta_n \times P_n \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times (P_n)^\beta \times (E_n)^\gamma} \right) \right] \quad (1)$$

où \hat{Q} indique la valeur de débit de référence (Q_A ou Q_{MNA5}) calculée en mm/j pour le point du réseau hydrographique considéré, S indique la surface du bassin versant considéré en km², N indique le nombre de mailles du MNT constituant le bassin versant considéré, θ_n indique le facteur correctif calculé pour la maille n (sans unité, détaillé ci-après dans l'équation (2)), P_n et E_n indiquent respectivement la pluie moyenne annuelle et l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle de la maille n (en mm/j) et a, b, α , β et γ (sans unité) indiquent les paramètres du modèle d'estimation de débit de référence considéré (Q_A ou Q_{MNA5}). Un jeu de paramètres distinct a été déterminé pour chacun des deux débits de référence par Nicolle *et al.* [2012], à partir d'une

base de données de 1081 bassins versants français (situés en France continentale). Les valeurs optimisées des cinq paramètres seront détaillées pour chacun des deux débits de référence dans la section IV.2.

L'application de ce modèle sans considération de facteurs correctifs (i.e. en considérant θ égal à 1) permet d'avoir, en tout point du réseau, une première cartographie des débits de référence. La possibilité de comparer les résultats de ce modèle « brut » avec les valeurs observées aux stations de référence a été mise à profit pour améliorer les performances du modèle, et donc proposer une cartographie cohérente avec les données observées.

IV.1.2. Calcul d'écart entre la cartographie « brute » et les observations

Les deux débits de références ont été calculés pour chaque station hydrométrique considérée, sur la base des séries temporelles de débits observés et de l'expertise du service hydrométrique local. Ces valeurs de références (Q_A et/ou Q_{MNA5}) ont ensuite été comparées aux valeurs de débits obtenues par la cartographie « brute », en calculant des écarts pour chaque station, grâce à l'équation (2) :

$$\theta = \frac{Q}{\hat{Q}} \tag{2}$$

où θ indique l'écart relatif entre l'estimation du modèle « brut » et la valeur de référence (sans unité), Q indique la valeur observée du débit de référence (Q_A ou Q_{MNA5} , en mm/j) et \hat{Q} indique la valeur de débit (Q_A ou Q_{MNA5}) calculée avec le modèle « brut » (en mm/j). Une valeur de θ inférieure (supérieure) à 1 indique une sur-estimation (sous-estimation) de la valeur du débit de référence par le modèle « brut ».

IV.1.3. Correction de la cartographie grâce aux écarts entre observations et simulations

La méthode présentée par Nicolle *et al.* [2012] prévoit de régionaliser les écarts (qui ne sont connus que sur un petit nombre de stations de référence) sur le maillage de calcul (maillage du MNT ici), afin de les prendre en compte dans le calcul final de débits de référence, ce qui permet de produire une cartographie cohérente avec les observations. Une valeur d'écart est donc attribuée à chaque maille du MNT (facteurs correctifs de l'équation 1), en fonction de son appartenance à un bassin jaugé ou non. Trois types de mailles sont considérés :

1. Mailles appartenant à un bassin versant jaugé amont : on assigne à ces mailles la valeur de l'écart calculé pour le bassin versant jaugé auxquelles elles appartiennent. Par exemple, toutes les mailles du MNT appartenant au bassin versant du Golo à Albertacce (bassin versant A) ont comme valeur de θ_n , la valeur de l'écart θ calculé pour la station A.
 2. Mailles appartenant à un bassin versant intermédiaire (i.e. compris entre deux stations de mesure de débits) : on assigne à ces mailles la valeur de l'écart calculé pour le bassin versant intermédiaire auxquelles elles appartiennent. Par exemple, toutes les mailles du MNT appartenant au bassin versant du Golo à Volpajola (bassin B) et situées à l'aval de la station du Golo à Albertacce (bassin A) et de celle de l'Asco à Morosaglia (bassin C) ont comme valeur de θ_n la valeur de l'écart θ calculé pour le bassin intermédiaire (B-A-C). Afin de ne prendre en compte que les erreurs du modèle sur la portion intermédiaire du bassin, les débits

utilisés pour le calcul des écarts des bassins intermédiaires sont les débits observés et simulés auxquels on a retranché la somme des débits simulés aux différentes stations amont.

3. Mailles n'appartenant à aucun bassin versant jaugé : on assigne à ces mailles une valeur d'écart égale à la moyenne des écarts calculés pour les bassins versants jaugés. Afin de simplifier ce travail d'interpolation spatiale, une unique valeur d'écart est attribuée à l'ensemble des mailles constituant un même bassin versant non-jaugé. L'interpolation spatiale des écarts est donc réalisé par bassin versant : des distances sont calculées entre chaque bassin versant non-jaugé et les 20 (14) bassins versants jaugés pour le Q_A (Q_{MNA5}). La moyenne des écarts attribuée à chaque bassin versant non-jaugé est pondérée par l'inverse de la distance entre le bassin considéré et les bassins versants jaugés disponibles. La distance entre deux bassins versants est constituée à 20 % de la distance entre les deux exutoires et à 80 % de la distance entre les deux centroïdes des bassins versants [Lebecherel *et al.*, 2016].

Cette étape de régionalisation des écarts permet d'assigner à chaque maille du MNT une valeur d'écart d'estimation, qui permet de passer d'une cartographie « brute » des débits de référence (équation (1), en considérant θ_n égal à 1) à une estimation corrigée spatialement (équation (1), avec θ_n différent pour chaque maille du MNT). L'utilisation de ce facteur correctif permet de « forcer » la cartographie à passer par les valeurs de références, tout en conservant une cohérence amont-aval.

IV.2. Modèles d'estimation de Q_A et de Q_{MNA5}

Les équations (3) et (4) présentent les formules finales de calcul du Q_A et du Q_{MNA5} , respectivement. Les valeurs de Q_A et de Q_{MNA5} sont obtenues à partir de deux moyennes climatiques (précipitation et évapotranspiration potentielle moyennes annuelles) et à partir de la surface en amont du point considéré pour le Q_{MNA5} . Il est important de rappeler que les paramètres de ces formules empiriques ont été obtenus à partir d'un échantillon de 1081 bassins versants ne contenant pas de bassins versants corses [Nicolle *et al.*, 2012].

$$\hat{Q}_A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\theta_n \times P_n \times \left(1 - \frac{1}{1 + 0.65 \times (P_n)^{1.59} \times (E_n)^{-2.66}} \right) \right] \tag{3}$$

$$\hat{Q}_{MNA5} = \left(\frac{S}{2406.5} \right)^{0.082} \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\theta_n \times P_n \times \left(1 - \frac{1}{1 + 0.16 \times (P_n)^{0.53} \times (E_n)^{-2.67}} \right) \right] \tag{4}$$

IV.3. Méthode de quantification des incertitudes

Les incertitudes inhérentes au modèle de cartographie utilisé ont été quantifiées à l'aide de la méthode empirique CemaM, qui s'appuie sur une analyse des erreurs relatives (ici entre débits de référence observés et simulés) et qui a été récemment testée dans différents contextes hydrologiques par Bourgin [2014]. Elle consiste à calculer des quantiles de la distribution empirique des erreurs relatives pour différentes classes de débits simulés. L'ensemble de la

méthodologie est détaillé en annexe. L'application de cette méthode a permis d'associer une borne basse et une borne haute d'incertitude à l'estimation de Q_A et de Q_{MNA5} pour chaque tronçon de rivières corse.

V. RÉSULTATS

La figure 2 présente les valeurs de référence de Q_A pour les 20 bassins versants de l'échantillon (a) et de Q_{MNA5} pour les 14 bassins versants de l'échantillon (b).

Les valeurs de Q_A les plus fortes (supérieures à 30 l/s/km²) sont observées pour les bassins versants situés en altitude, tels que l'amont du Golo (bassin A), du Tavignano (bassin L), du Fium-Orbo (bassin O) et du Prunelli (bassin T), alors que les valeurs les plus faibles (inférieures à 10 l/s/km²) sont observées pour les bassins du nord de la Corse (par exemple celui de l'Aliso (bassins Q et R)), région en moyenne plus chaude et moins arrosée. La variabilité des 14 valeurs de Q_{MNA5} obtenues est également importante, avec des valeurs inférieures à 0.5 l/s/km² et d'autres excédant 2.5 l/s/km². Trois stations hydrométriques présentent des valeurs fortes de Q_{MNA5} . Elles correspondent aux bassins du Taravo (bassin H), du Fium Orbo (bassin O) et du Rizzanese

(bassin I), tous situés dans la partie sud de la Corse. En guise de comparaison, la moyenne des valeurs de Q_{MNA5} obtenues sur les 11 autres bassins versants est de 1.05 l/s/km². Ces valeurs fortes peuvent être expliquées par la présence de pozzines sur l'amont de ces bassins versants. Le terme « pozzine » est issu de la contraction entre les mots *pozzi* (« puits » en corse et en italien) et *alpine*. Ces pelouses sont définies par Briquet [1910] comme étant « des tourbières acides, mais planes, sur sous-sol imperméable (boue glaciaire), à feutre tourbeux imbibé d'eau » et sont observables en Corse mais également dans les Pyrénées [Chouard, 1935]. La figure 3 représente une pozzine située entre la Punta Scaldasole et la Punta Capella (une des sources du Fium-Orbo), au nord de la station de ski du Val d'Esse. Ces pelouses peuvent, selon les caractéristiques climatiques de l'hiver, constituer un soutien d'étiage non négligeable.

La figure 4 présente les facteurs correctifs θ_n calculés pour chaque maille du MNT, utilisées pour le calcul du Q_A (a) et du Q_{MNA5} (b).

Pour le Q_A , les écarts calculés sur les 20 bassins versants étudiés sont tous supérieurs à 1, ce qui indique que les bassins corses ont un rendement hydrologique plus élevé que la valeur calculée avec la cartographie « brute ». Pour le Q_{MNA5} , les valeurs d'écarts calculés sur les 14 bassins

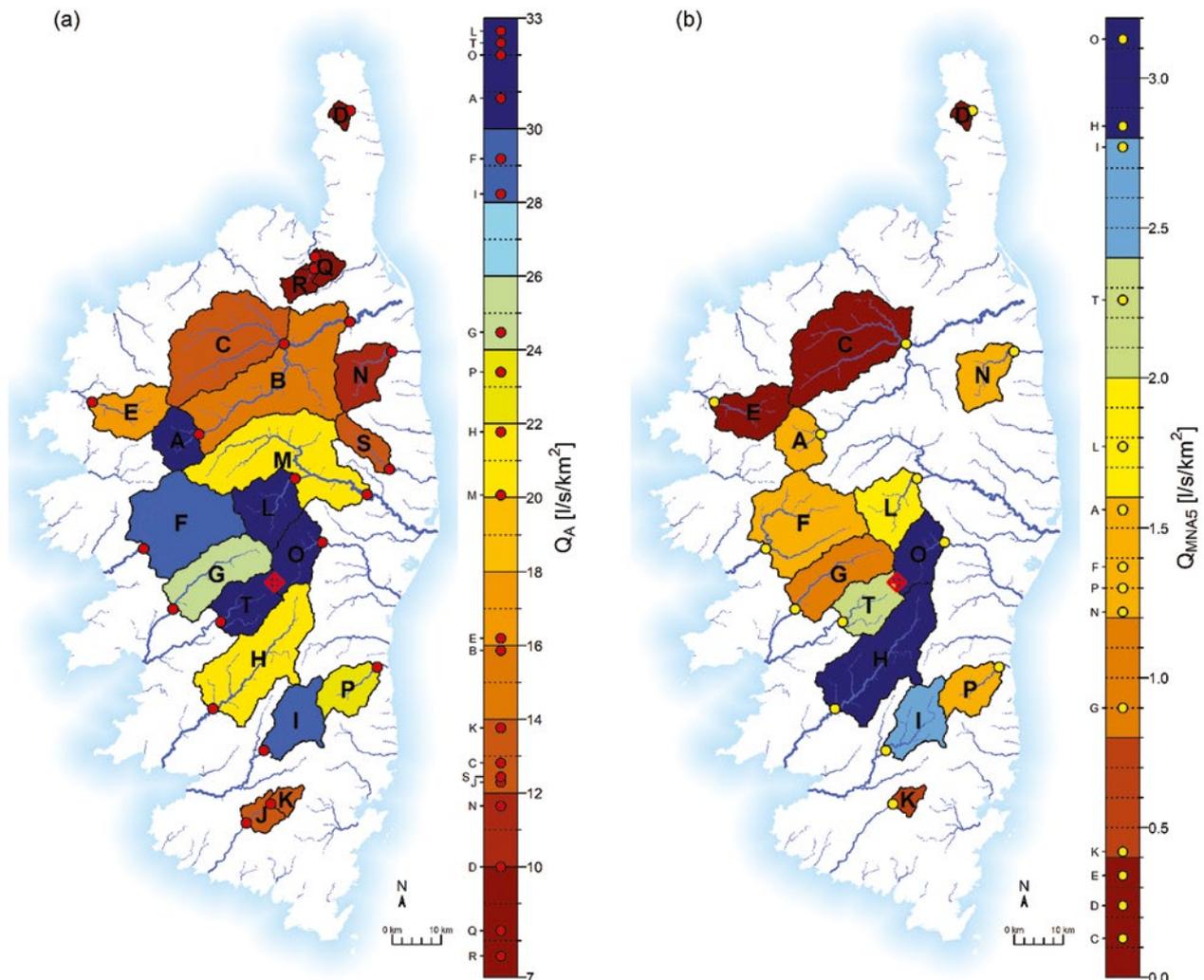


Figure 2 : Valeurs de référence de Q_A pour les 20 bassins versants sélectionnés (a) et de Q_{MNA5} pour les 14 bassins versants sélectionnés (b). Le losange rouge indique la position de la pozzine représentée sur la figure 3.



Figure 3 : Pozzine située entre la Punta Scaldasole et la Punta Capella, au nord de la station de ski du Val d’Ese (amont du Fium-Orbo). Photo de P. Brigode, août 2014 (longitude : 9° 08’ 05» E; latitude : 42° 02’ 08» E; altitude : 1817 m).

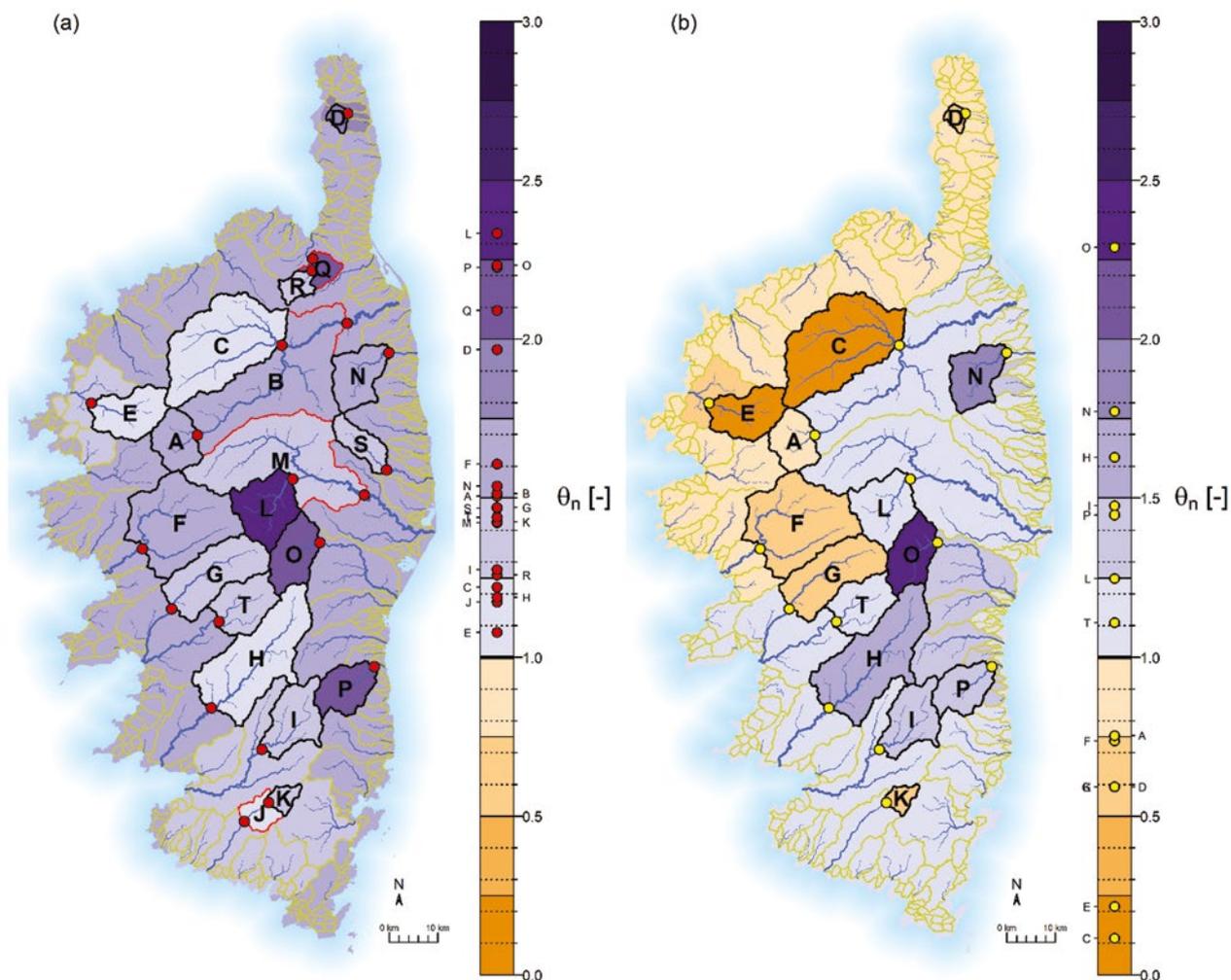


Figure 4 : Valeurs de facteurs correctifs (θ_n) pour la cartographie de Q_A (a) et de Q_{MNA5} (b), calculés pour chaque maille du MNT à partir des bassins versants étudiés (bassins « amont » en noir, bassins « aval » en rouge). Les contours des bassins versants non-jaugés drainant plus de 2 km² sont représentés en jaune foncé.

versants étudiés sont comprises entre 0,1 et 2,3, avec une surestimation des valeurs de Q_{MNA5} par le modèle « brut » pour 7 bassins versants et une sous-estimation des valeurs de Q_{MNA5} par le modèle « brut » pour les 7 autres bassins versants ; il n’y a donc pas de tendance systématique à la sur- ou la sous-estimation du modèle d’estimation de Q_{MNA5} sur les bassins versants considérés.

La figure 5 présente les estimations finales de Q_A (a) et de Q_{MNA5} (b) réalisées en tout point du réseau hydrographique. La carte de gauche (présentant les valeurs de Q_A en mm/an) permet de mettre en évidence les zones de montagne « produisant » des lames d’eau importantes. La carte de droite (présentant les valeurs de Q_{MNA5} en mm/mois) permet de mettre en évidence la région sud-ouest de la

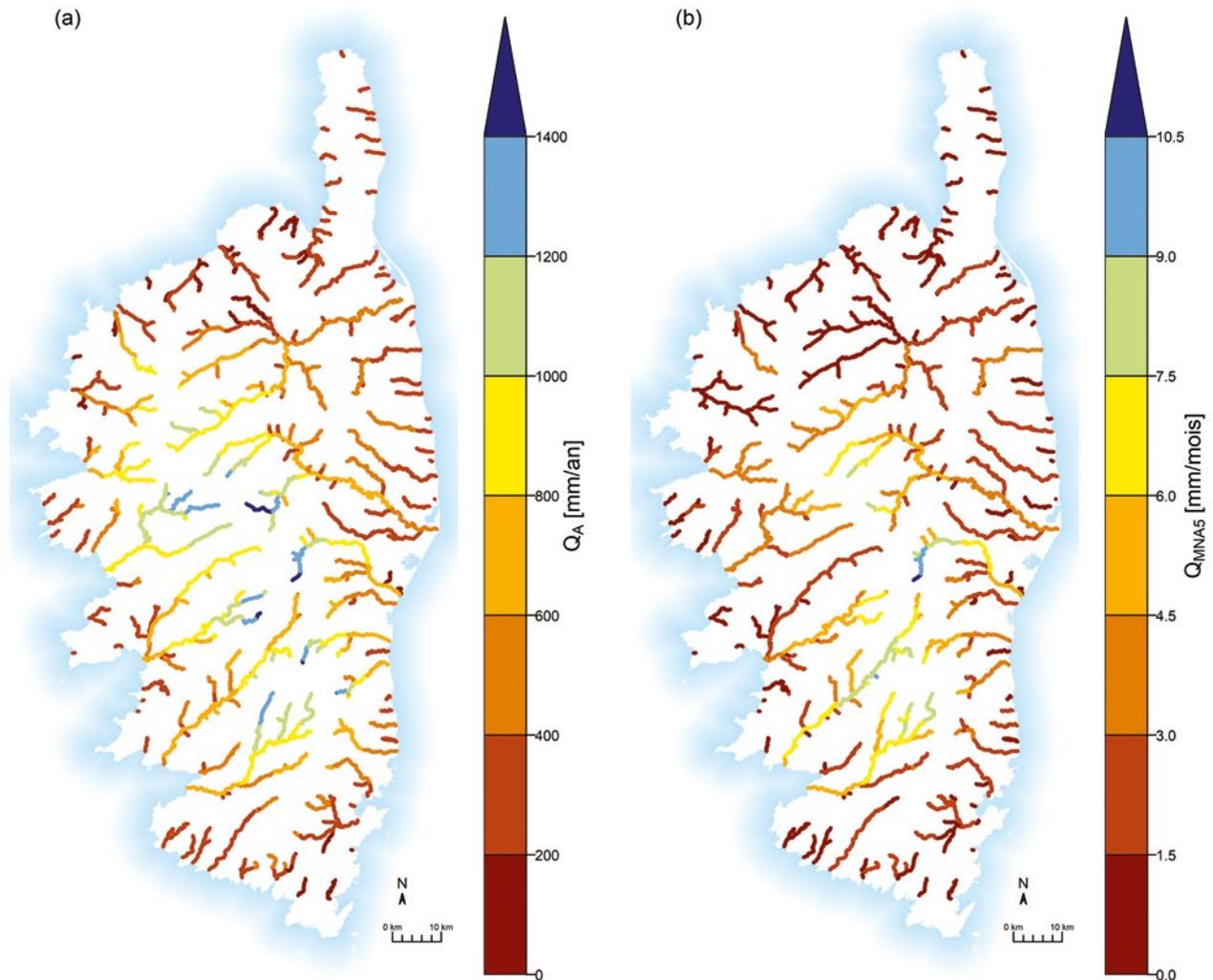


Figure 5 : Valeurs de Q_A (a) et Q_{MNAS} (b) calculées en chaque point du réseau hydrographique, exprimés en mm/an et en mm/mois respectivement. Pour ne pas surcharger les cartes, seuls les points drainant plus de 10 km² sont représentés.

Corse (rivières du Prunelli, du Taravo et du Rizzanese notamment) comme étant une région avec des étiages légèrement moins prononcés.

Enfin, la figure 6 est une illustration de la cartographie finale, présentant l'évolution du Q_A et du Q_{MNAS} le long du Golo et de son principal affluent, l'Asco, de leurs sources respectives jusqu'à l'embouchure du Golo au sud de Bastia. Les débits obtenus sont strictement croissants avec l'augmentation de la surface drainée. De plus, la prise en compte de facteurs correctifs permet bien d'obtenir une cartographie cohérente avec les valeurs de références disponibles à chaque station hydrométrique, à savoir 3 stations pour le Q_A (stations A, B et C) et 2 stations pour le Q_{MNAS} (stations A et C).

VI. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article les fondements méthodologiques qui ont permis de dresser une cartographie des écoulements des rivières de Corse, constituée de la carte des débits moyens (Q_A) et du débit de référence d'étiage (Q_{MNAS}). Cette cartographie a été réalisée de manière exhaustive sur l'ensemble des points du réseau hydrographique corse (BD CARTHAGE), et elle s'appuie sur l'analyse de plusieurs séries hydrologiques, sélectionnées sur

la base (i) de critères numériques évaluant la disponibilité des données hydrologiques (notamment en période estivale) et (ii) de l'expertise des services hydrométriques locaux, jugeant la fiabilité des mesures hydrologiques. Une méthode simple de quantification des incertitudes – récemment testée dans différents contextes de modélisation hydrologique par Bourgin [2014] – a également été systématiquement appliquée, pour associer à chaque valeur de débit de référence simulé une estimation de l'incertitude des calculs effectués, importante pour aider les gestionnaires à avoir une meilleure idée du niveau de confiance à accorder aux valeurs produites. L'intérêt majeur de l'approche appliquée est d'assurer la cohérence amont-aval des débits de référence, tout en produisant des valeurs cohérentes avec les observations disponibles.

Plusieurs perspectives d'amélioration de la cartographie présentée existent. Ainsi, l'effet potentiellement significatif de soutien d'étiage par des tourbières alpines locales (appelées *pozzines*) en amont de certains bassins versants pourrait être plus finement pris en compte en utilisant une cartographie systématique des *pozzines* (ou plus généralement des zones humides soutenant l'étiage) sur l'ensemble de la Corse, information encore non disponible à l'heure actuelle. Il apparaît en effet intéressant de considérer des données cartographiques d'intérêt en termes d'évaluation des écoulements pour tenter d'améliorer la cartographie

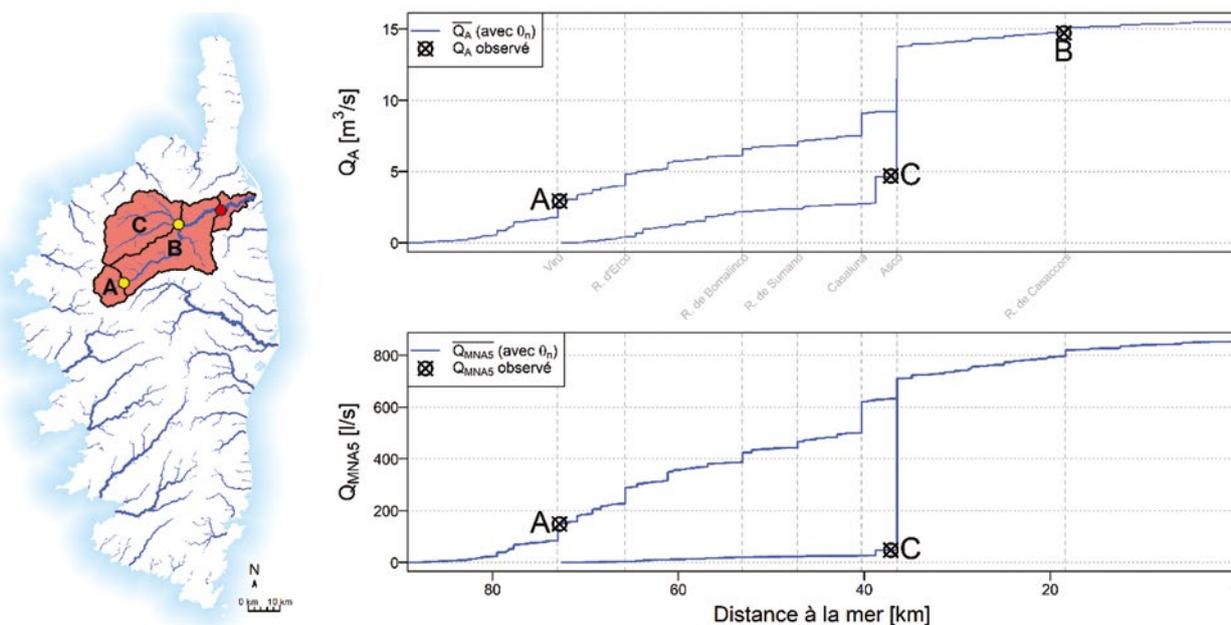


Figure 6 : Évolution du Q_A et du Q_{MINAS} le long du Golo et de son principal affluent, l'Asco. Les valeurs de références calculées aux stations hydrométriques du bassin versant sont également représentées.

et également mieux comprendre la variabilité spatiale des écoulements de surface.

Les forçages climatiques utilisés dans cette étude (précipitation et température) sont issus de la réanalyse SAFRAN. Cette réanalyse présente un biais connu à la sous-estimation des précipitations en zone de montagne (causé notamment par la sous-captation des précipitations solides, Gottardi [2009] ; Valéry [2010] et Lafaysse [2011]). Néanmoins, ce biais systématique a été indirectement pris en compte dans la méthodologie appliquée, grâce à l'utilisation de séries de débits aux points jaugés, qui permettent de caler les paramètres des relations empiriques reliant les entrées climatiques et les débits observés (les valeurs des coefficients θ en l'occurrence) et donc de compenser un biais potentiel à la sous-estimation des précipitations.

Il serait également intéressant de proposer une cartographie prenant en compte la variabilité temporelle de la ressource en eau superficielle en Corse, en lien avec les changements potentiels du climat méditerranéen.

La cartographie décrite dans cet article a finalement été combinée avec celle produite par une autre méthode, basée

sur une modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel (Folton et Lavabre [2007]), afin de constituer une cartographie de référence du Q_A et du Q_{MINAS} et de prendre en compte les qualités respectives des deux méthodes appliquées pour améliorer l'estimation finale des débits. Le produit final de cette combinaison est diffusé par l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) sur le portail EauFrance (<http://www.eaufrance.fr/>).

Enfin, ce travail de cartographie permet de présenter quelques données très synthétiques sur les ressources en eau de la Corse, territoire recevant environ 8 km^3 de précipitation (solide et liquide) en moyenne par année, sur lesquels environ 4 km^3 se déversent dans la mer Méditerranée par écoulement superficiel dans les rivières. Le Tableau 1 permet de comparer les écoulements corses avec ceux d'autres grands bassins versants français : relativement à ces bassins versants et à superficie comparable, la Corse est un territoire très productif en eau, puisque 50 % des eaux précipitées s'écoule en rivière (contre environ 30 % pour les bassins Artois-Picardie et Seine-Normandie par exemple).

Tableau 1 : Écoulements de surface moyens de la France par district hydrographique : volume moyen annuel précipité (estimé à partir des données SAFRAN sur la période 1981-2010 et noté P) et écoulé en rivières (noté Q).

	P (km^3/an)	Q (km^3/an)	Q / P (%)
Artois-Picardie	16	5	31
Rhin-Meuse	31	11	35
Seine-Normandie	78	23	29
Loire-Bretagne	133	43	32
Adour-Garonne	118	49	42
Rhône-Méditerranée	130	57	44
Corse	8	4	50

VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'AFB pour son soutien financier, Météo-France pour la mise à disposition de la réanalyse SAFRAN et EDF pour les données de la station du Prunelli. Ils remercient également Gilles Drogue et un autre relecteur anonyme pour leurs commentaires détaillés et constructifs sur l'article, qui ont permis d'en améliorer la qualité.

VIII. RÉFÉRENCES

- BOURGIN F. (2014) — Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat. AgroParisTech (Paris), Irstea (Antony), 230 pp.
- BRIQUET J. (1910) — Prodrôme de la flore Corse : comprenant les résultats botaniques de six voyages exécutés en Corse sous les auspices de M. Emile Burnat. Tome I : Préface. Renseignements préliminaires. Bibliographie. Catalogue critique des plantes vasculaires de la Corse : Hymenophyllaceae – Lauraceae. Vols. 1-3, Vol. I. Genève : Georg & Co.
- BRUN B. (1918) — La Houille Blanche en Corse. *La Houille Blanche*, **6**, 351-352. doi:10.1051/lhb/1918053
- CHOUARD P. (1935) — Les tourbières de pelouses, ou pozzines, dans les Pyrénées, formations homologues des pozzines de Corse. *Bulletin de la Société Botanique de France* **82(5)**, 632-642. doi:10.1080/00378941.1935.10833025
- FOLTON N. & LAVABRE J. (2007) — Approche par modélisation pluie-débit pour la connaissance régionale de la ressource en eau : application à la moitié du territoire français. *La Houille Blanche*, **3**, 64-70. doi:10.1051/lhb:2007037
- GOTTARDI F. (2009) — Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat. Institut Polytechnique de Grenoble, 284 pp.
- LAFAYSSÉ M. (2011) — Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées. Thèse de doctorat. Université Toulouse III Paul Sabatier, 366 pp.
- LAVABRE J., ARNAUD P., MASSON J. M. & FOLTON N. (1999) — Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues. *La Houille Blanche*, **3-4**, 67-72. doi:10.1051/lhb/1999037
- LEBECHEREL L., ANDRÉASSIAN V. & PERRIN C. (2016) — On Evaluating the Robustness of Spatial-Proximity-Based Regionalization Methods. *Journal of Hydrology*, **539**, 196-203. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.031
- LEROUX M. (2002) — Les climats subtropicaux dits « méditerranéens » et les climats de la Méditerranée (2^e partie) *ingeo* **66(1)**, 34-52. doi:10.3406/ingeo.2002.2788
- LESPINAS F., LUDWIG W. & HEUSSNER S. (2014) — Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*, **511**, 403-422. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.033
- 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. Rapport ONEMA. Irstea - UR HBAN – Antony, 27 pp.
- NICOLLE P., ANDRÉASSIAN V. & SAUQUET E. (2013) — Blending neighbor-based and climate-based information to obtain robust low-flow estimates from short time series. *Water Resources Research*, **49(12)**, 8017-8025. doi:10.1002/2012WR012940
- UDIN L., HERVIEU F., MICHEL C., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., ANCTIL F. & LOUMAGNE C. (2005) — Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, **303(1-4)**, 290-306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- UDIN L. (2006) — Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *La Houille Blanche*, **6**, 113-120. doi:10.1051/lhb:2006109
- ROME S. & GIORGETTI J.-P. (2007) — La montagne corse et ses caractéristiques climatiques. *La Météorologie*, **59**, 39-50. doi:10.4267/2042/14846
- RUPELLAND D., HUBLART P. & TRAMBLAY Y. (2015) — Assessing uncertainties in climate change impacts on runoff in Western Mediterranean basins. Presented at the Hydrologic Non-stationarity and Extrapolating Models to Predict the Future (HS02 – IUGG2015). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, **371**, 75-81. doi:10.5194/piahs-371-75-2015
- SAUQUET E., GOTTSCHALK L. & LEBLOIS E. (2000) — Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, **45(6)**, 799-815. doi:10.1080/02626660009492385
- SYLVESTRE V. (1928) — Les forces hydrauliques en Corse. *La Houille Blanche*, **3**, 65-69. doi:10.1051/lhb/1928011
- 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), 303 pp.
- 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. doi:10.1002/joc.2003

IX. ANNEXE

Cette annexe décrit la méthode appliquée pour quantifier les incertitudes associées à la cartographie du débit moyen annuel (Q_A) et du débit de référence d'étiage (Q_{MNA5}) en Corse. La méthode de quantification des incertitudes appliquée, notée CemaM [Bourgin, 2014], est une méthode empirique s'appuyant sur une analyse des erreurs relatives (ici entre débits de référence observés et simulés). Elle consiste à calculer des quantiles de la distribution empirique des erreurs relatives pour différentes classes de débits simulés. La méthode est articulée autour de trois étapes :

1. Calcul des erreurs relatives à partir d'une série de débits observés et simulés ;
2. Création de N classes de débits simulés de même effectif (i.e. chaque classe contient le même nombre de valeurs de débits simulés).
3. Calcul, pour chaque classe de débit simulé, de K quantiles de la distribution empirique des erreurs relatives.

Ces trois étapes permettent donc d'obtenir $N \cdot K$ quantiles de la distribution empirique des erreurs relatives, notés M_k^n . Ces quantiles sont ensuite utilisés comme coefficients multiplicatifs des débits simulés pour obtenir les quantiles de la distribution prédictive, selon l'équation (5) :

$$q_{\alpha^k} = Q_{SIM}^i \cdot M_k^i \tag{5}$$

où q_{α^k} indique le quantile prédictif d'ordre α^k et Q_{SIM}^i est un débit simulé appartenant à la $i^{ème}$ classe de débits.

Pour quantifier les incertitudes associées à la cartographie des débits de référence, les erreurs relatives sont calculées

en divisant les valeurs de débits obtenues par la méthode de cartographie au droit de stations hydrométriques (débits simulés) par les valeurs de débits de références calculées pour chacune de ces stations (débits observés). Il y a donc autant de valeurs d'erreurs relatives que de bassins versants considérés. Ces erreurs relatives sont ensuite divisées en 10 classes de débits simulés ($N = 10$) et deux quantiles ($K = 2$) sont calculés par classes de débits simulés : le quantile 10 % des erreurs relatives, qui est ensuite utilisé pour quantifier la « borne inférieure » des incertitudes et le quantile 90 % des erreurs relatives, ensuite utilisé pour quantifier la « borne supérieure » des incertitudes.

Le nombre très restreint de bassins versants instrumentés en Corse (20) est une limite forte à l'application de cette méthode, car il ne permet pas de décrire de manière exhaustive les différentes distributions d'erreurs relatives. Ce travail de quantification des erreurs de cartographie a donc été mené à partir des 1081 bassins versants de France continentale utilisés par Nicolle *et al.* [2012]. Le résultat de la division en 10 classes de débits simulés et les erreurs relatives associées sont illustrées pour le Q_A et le Q_{MNA5} sur la figure 7. La première classe de Q_A simulés, par exemple, rassemble 108 bassins versants pour lesquelles les valeurs de Q_A simulées sont comprises entre 100 et 184 mm/an. Pour ces 108 bassins versants, les valeurs des quantiles 10 % et 90 % des erreurs relatives (Q_A simulés sur Q_A observés) sont respectivement de 0.760 et 1.228. Ces deux valeurs seront donc utilisées pour tout Q_A simulé compris entre 100 et 184 mm/an, pour calculer les bornes hautes et basses de sa distribution prédictive. Ainsi, tout Q_A simulé valant 150 mm/an sera encadré d'une borne d'incertitude basse de 114 mm/an ($150 \cdot 0.760$) et d'une borne d'incertitude haute de 184 mm/an ($150 \cdot 1.228$).

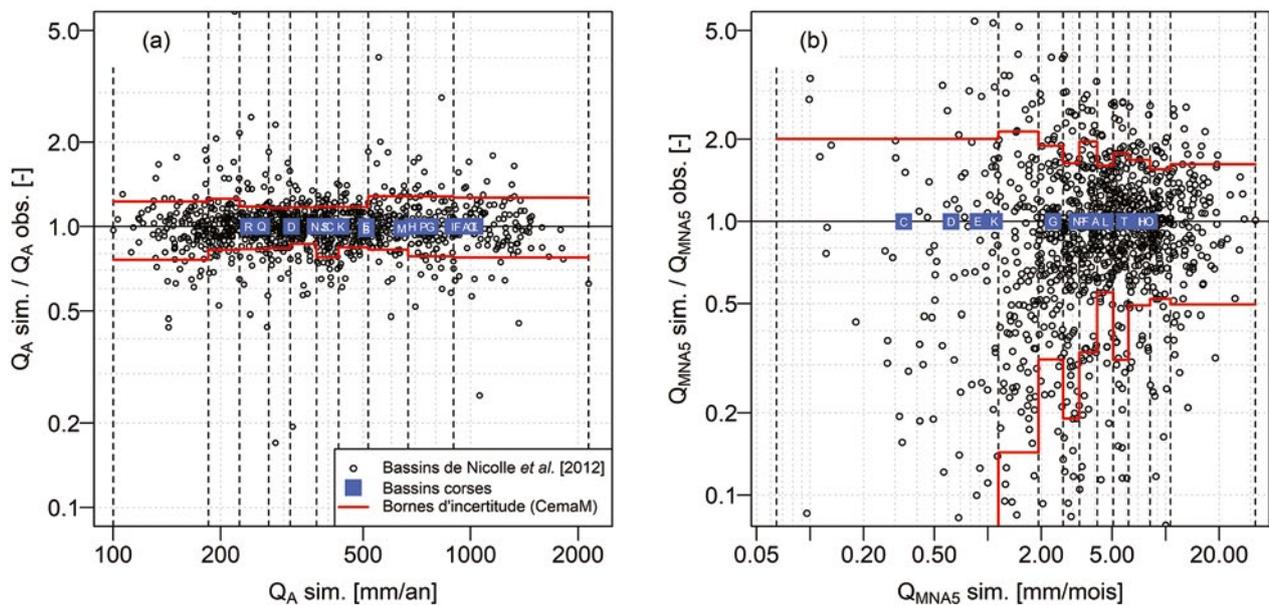


Figure 7 : Application de la méthode CemaM pour l'estimation du Q_A (a) et du Q_{MNA5} (b). Les cercles noirs représentent les erreurs relatives estimées sur les 1081 bassins versants de France continentale étudiés par Nicolle *et al.* [2012], et les carrés bleus représentent les erreurs calculées sur les bassins corses (nulles grâce aux facteurs correctifs). Les lignes verticales pointillées matérialisent les 10 classes de débits simulés identifiées. Pour chacune de ces classes, les segments horizontaux rouges représentent les quantiles 10% et 90% des erreurs relatives, utilisés ensuite pour quantifier l'incertitude de la cartographie finale.