





Partenariat 2011 – Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux – Action Prédétermination des étiages.

# 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

Pierre Nicolle\*, Vazken Andréassian\*, Marine Riffard\*, Julien Peschard\*, Gianluca Boldetti\*, Nicolas Le Moine\*\*

\*Cemagref, UR HBAN, Antony \*Université Paris 6, UMR Sisyphe



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



#### Contexte de programmation et de réalisation

Les situations d'étiages, et plus généralement de sécheresses et de raretés d'eau, font l'objet d'attentions croissantes, sous l'effet conjugué des politiques publiques et d'événements répétés de manques d'eau. Il s'agit en particulier, dans les cadres conjoints de la DCE et du Grenelle de l'Environnement, de pouvoir déterminer des débits d'objectif d'étiages.

L'enjeu prioritaire, auquel contribue cette action, est la détermination des DOE, débits d'objectifs d'étiages. Cette détermination nécessite des principes d'action nationaux par les porteurs de l'action publique, des données et approches thématiques de référence (hydrologie, hydrobiologie, gestion multi-usages), et un pilotage par la compétence métier "gestion de l'eau".

La prédétermination des débits d'étiage de référence est un socle indispensable à l'ensemble de la problématique. La sous-action 3.1 constitue la deuxième étape vers la production d'un atlas national de référence, qui fera la synthèse des méthodes disponibles (modèles et approches de régionalisation):

Le rapport proposé ici est la contribution à la sous-action 3.1 de l'équipe Hydrologie de l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédé du Cemagref/Irstea d'Antony.

#### Les auteurs

Vazken Andréassian

Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et

Forêts

vazken.andreassian@cemagref.fr

Cemagref/Irstea Antony

Marine Riffard Ingénieur d'études marine.riffard@cemagref.fr

Cemagref/Irstea Antony

Julien Peschard Assistant Ingénieur julien.peschard@cemagref.fr Cemagref/Irstea Antony Pierre Nicolle Ingénieur d'études

pierre.nicolle@cemagref.fr Cemagref/Irstea Antony

Gianluca Boldetti Doctorant

gianluca.boldetti@cemagref.fr Cemagref/Irstea Antony

Nicolas Le Moine

Maitre de conférences nicolas.le\_moine@upmc.fr

UPMC, Paris

2

#### Les correspondants

Onema: Pascal Maugis, DAST, pascal.maugis@onema.fr

Cemagref: Eric Sauguet, Cemagref/Irestea, eric.sauguet@cemagref.fr

Droits d'usage : accès libre

Couverture géographique : France hexagonale

Niveau géographique : National

Niveau de lecture : Professionnels, experts

Nature de la ressource : Document



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



# Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen annuel en France

Pierre Nicolle, Vazken Andréassian, Marine Riffard, Julien Peschard, Gianluca Boldetti, Nicolas Le Moine

Resume	4
Abstract	4
/ COTRACT	
Introduction	5
1. DEVELOPPEMENT DU MODELE DE PREDETERMINATION DU Q <sub>MNA5</sub>	5
1.1 Le modèle de Le Moine (2008)	5
1.2 Modification de la relation : application d'un modèle type T	urc 7
1.3 Exploration des variables explicatives	
1.3.1 P <sub>MNA5</sub>	10
1.3.2 Surface	11
2. CALCUL GLOBAL VS DISTRIBUE	15
2.1 Cartographie des relations amont-aval	15
2.2 Passage au calcul distribué	17
3. REGIONALISATION DU MODELE	19
3.1 Exploitation des erreurs du modèle	19
3.2 Régionalisation distribuée du résidu	
3.3 Traitement des bassins de montagne	
4. RESULTAT DES FORMULATIONS RETENUES	21
4.1 Débit de référence étiage : Q <sub>MNA5</sub>	21
4.2 Débit moyen annuel : Q <sub>A</sub>	
4.3 Cartes nationales	
ANNEXE 1: PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS	25



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



### Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen annuel en France

Pierre Nicolle, Vazken Andréassian, Marine Riffard, Julien Peschard, Gianluca Boldetti, Nicolas Le Moine

# Résumé

Dans ce rapport, nous présentons les résultats des travaux de cartographie nationale du débit de référence d'étiage, le Q<sub>MNA5</sub>, et du débit moyen annuel, réalisés au Cemagref d'Antony. Le développement des modèles a été effectué en premier lieu pour le calcul du débit de référence d'étiage et a ensuite été appliqué et modifié pour l'adapter au module. Le présent rapport est axé sur 3 points principaux :

- 1. le développement du modèle qui vise à établir la relation entre débit et variables physio-climatiques;
- 2. la cartographie des relations amont-aval comme support de calcul : construction d'un réseau de drainage et méthode pour le calcul des variables en tout point du réseau hydrographique;
- 3. la régionalisation du modèle : prendre en compte les particularités régionales que le modèle n'est pas en mesure d'expliquer;

Une quatrième partie présente les résultats des modèles retenus et la cartographie nationale des débits de référence d'étiage et des débits moyens annuels.

# **Abstract**

In this report, we present the results of a national map of QMNA5, a widely-used reference discharge for low flows, and of the mean annual discharge. The development of the models has been made on the low flow reference discharge in a first time, and then modified to be applied to the mean annual discharge. The present report is based on three main points:

- 1. the development of the model to establish the relationship between discharges and physic and climatic variables;
- 2. the mapping of the downstream-upstream relationships as a computation support : construction of a drainage network and method for the variable computation all along the hydrographic network;
- 3. the model regionalization : to take in account the regional characteristics that the model can not explain;

A fourth part presents the results of the models and the national map for the low flow reference discharges and the mean annual discharges.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



## Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen annuel en France

Pierre Nicolle, Vazken Andréassian, Marine Riffard, Julien Peschard, Gianluca Boldetti, Nicolas Le Moine

# Introduction

Le travail présenté ici s'inscrit dans la sous-action 3.1 de la convention de partenariat ONEMA-Cemagref. Ce rapport présente les résultats obtenus par l'équipe hydrologie du Cemagref/Irstea d'Antony, et porte sur la cartographie nationale des débits de référence d'étiage  $Q_{MNA5}$  et des débits moyens annuels.

Le rapport est articulé en 4 parties :

- Dans un premier temps, nous présentons le développement du modèle de prédétermination. Nous faisons un bref rappel des travaux de Le Moine (2008) qui nous ont servis de base, puis les résultats de la recherche de variables physiques explicatives des débits cibles estimés aux stations de jaugeage et la modification de la relation pour la cartographie;
- La deuxième partie vise à présenter le réseau de drainage utilisé comme support de calcul et la méthode de calcul retenue pour limiter les discontinuités graphiques ;
- La troisième partie montre la méthode de régionalisation développée et appliquée pour prendre en compte les particularités régionales que le modèle n'arrive pas à prendre en compte.
- Enfin, la dernière partie présente les résultats des formulations retenues pour le débit de référence d'étiage et le débit moyen annuel, ainsi que les résultats cartographiques.

# 1. Développement du modèle de prédétermination du Q<sub>MNA5</sub>

# 1.1 Le modèle de Le Moine (2008)

Le principe de la méthode développée est inspiré et s'inscrit dans la continuité des travaux de Le Moine (2008). Dans ses travaux, Le Moine cherche à définir les débits cibles comme une fonction de plusieurs variables physio-climatiques  $(X_1, \ldots, X_k)$ , dans le but d'évaluer l'intérêt de la densité de drainage comme facteur explicatif. Il a analysé pour cela différentes régressions logarithmiques de la forme :

$$\log(Q) = \alpha + \sum_{k} \beta_k \log(X_k)$$
 Eq. 1

Les résultats obtenus l'ont amené à retenir trois variables physio-climatiques principales :

5

- P : Précipitations moyennes annuelles (mm)
- ETP: Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm)
- Surface (km²)



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



Par calage des relations sur l'optimisation du coefficient de corrélation (R²), Le Moine aboutit à une formule du type :

$$Q_{MNA5} = \alpha \times P^{1.820} \times E^{-4.284} \times S^{1.102}$$
 Eq. 2

Dans le cadre de la présente étude, les coefficients de la régression ont été optimisés sur notre échantillon de bassins versants (décrit en Annexe 1), par optimisation du critère C2M (version bornée du critère de NASH) (Eq. 3) calculé sur les racines des débits en mm/j :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{nbv} (\sqrt{\hat{Q}cal_n} - \sqrt{Qobs_n})^2}{\sum_{n=1}^{nbv} (\sqrt{Qobs_n} - \sqrt{Qobs})^2}$$

$$C2M = \frac{NS}{2 - NS}$$
Eq. 3

Par ailleurs, nous avons évalué l'intérêt d'introduire une ou plusieurs variables climatiques supplémentaires parmi :

- Densité de drainage sur le bassin versant (exprimée en km², taille moyenne des zones sources) : DD
- Pluie Décennale Journalière (mm) sur le bassin versant : PJ<sub>10</sub>
- Pluie Mensuelle Minimum Annuelle (mm) sur le bassin versant : P<sub>MNA5</sub>
- Pourcentage de forêt (%) sur le bassin versant
- Indice d'irrégularité des pluies : IRP (IRP = (PmMax PmMin)/Pm, avec Pm : Pluie mensuelle de bassin)
- Indice de variabilité de l'ETP : IEO (IEO = (EomMax-EomMin)/Eom), avec EO : ETP mensuelle de bassin)

La  $P_{MNA5}$  étant la seule variable qui permettait une amélioration des résultats, la formule optimale retenue s'écrit (Eq. 4) :

$$Q_{MNA5} = \alpha \times P^{2} \times \left(P_{MNA5} + \frac{P}{1000}\right)^{0.5} \times E^{-3.5} \times S^{0.2}$$
 Eq. 4

La Figure 1 présente les résultats des Q<sub>MNA5</sub> calculés à l'aide de la formule



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



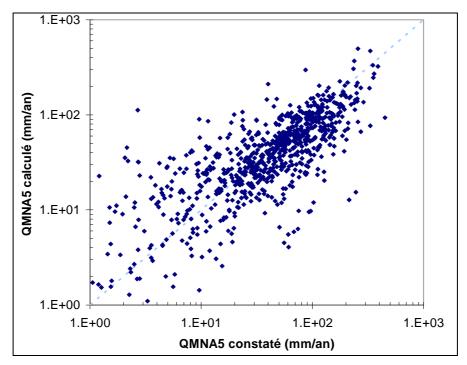


Figure 1 : corrélogramme des Q<sub>MNA5</sub> calculés et observés

# 1.2 Modification de la relation : application d'une formulation semblable à celle proposée par Turc (1954)

L'application de cette formule (Eq. 4) a révélé des faiblesses sur le plan de l'extrapolation. En effet, cette formule présente l'inconvénient de surestimer largement le  $Q_{MNA5}$  en zone de montagne. Même si il est classique d'observer des difficultés d'extrapolation loin du domaine climatique où la régression a été obtenue, les erreurs faites par cette formule peuvent être énormes et surtout *hydrologiquement inacceptables* (avec un  $Q_{MNA5}$  supérieur à la pluie annuelle par exemple).

On pourrait bien sûr se contenter de ne pas fournir de valeur pour toutes ces zones, trop loin du domaine où la relation a été calée, mais cela pose un problème pour notre cartographie, qui s'appuie sur un modèle distribué: nous avons besoin d'une estimation sur les mailles amont, et les erreurs obtenues sur l'amont se propagent vers l'aval.

Pour éviter des valeurs déraisonnables de Q<sub>MNA5</sub>, nous avons donc décidé de nous inspirer de la transformation proposée par Turc<sup>1</sup> en 1954, afin de borner le débit par rapport aux précipitations (Eq. 5) et ainsi sécuriser notre extrapolation.

$$Q_{MNA5} = P \times \left(1 - \frac{1}{1 + f(X)}\right)$$
 Eq. 5

Avec *X* les variables physio-climatiques représentatives du bassin

L'Eq. 5 nous permet de contraindre le Q<sub>MNA5</sub> afin que sa valeur ne dépasse pas les

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Turc, L., 1954. Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Annales Agronomiques, Série A(5): 491-595.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



précipitations, même en extrapolation.

Nous pouvons nous poser la question du choix de borner le  $Q_{MNA5}$  par les précipitations. Le préalable est bien entendu de vérifier la validité de cette limite sur les données observées : la Figure 2 montre le rapport entre  $Q_{MNA5}$  (exprimé en mm/j) et la précipitation annuelle moyenne (exprimée elle aussi en mm/j). On voit bien sur cette figure (et c'est hydrologiquement rassurant) que le  $Q_{MNA5}$  est effectivement toujours assez largement inférieur à la précipitation pour les 1081 bassins versants de cet échantillon (il ne dépasse jamais 2/3 de la précipitation).

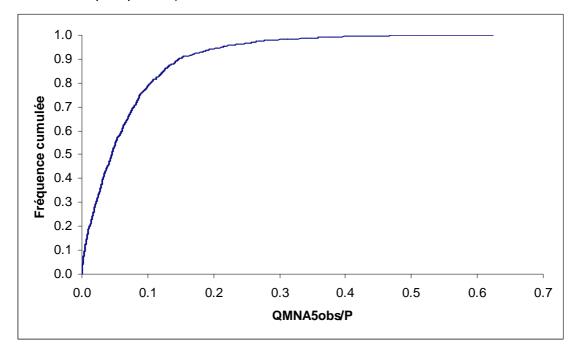


Figure 2 : Distribution du Q<sub>MNA5</sub> observé en pourcentage des précipitations pour l'échantillon de bassins versant

Afin de vérifier les résultats en extrapolation, nous optons dans un premier temps pour un modèle simple avec précipitation et évapotranspiration comme seuls facteurs (Eq. 6).

$$Q_{MNA5} = P \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma}}\right)$$
 Eq. 6

Le calage effectué sur les 1081 bassins de notre échantillon donne  $\alpha$  = 0.16,  $\beta$  = 0.41 et  $\gamma$  = -2.75 (optimisés avec le C2M calculé sur les racines des débits en mm/j). Il faut noter que dans un premier temps, les calculs ont été effectués en mode global pour limiter les temps de calcul (les différents modes de calcul possible seront développé en partie 2)

Le Tableau 1 compare les performances de l'ancienne formule et de la nouvelle. Même si les valeurs des critères numériques (C2M et RMSE) restent assez proches, il est rassurant de constater qu'elles sont meilleures pour la nouvelle formule. A noter que dans cette comparaison, la formule bornée est 'désavantagée' car elle n'utilise pas (encore) la surface.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



Tableau 1: performance des deux modèles

Formule	C2M sur les débits en mm	C2M sur la racine des débits en mm	C2M sur le log des débits en mm	RMSE 1081 BVs (mm/j)
$Q_{MNA5} = P \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma}}\right)$	0.166	0.210	0.217	0.157
$Q_{MNA5} = \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma} \times S^{\delta}$	0.138	0.208	0.212	0.161

Notons que pour cette même optimisation des paramètres (C2M sur racine des mm/j pour 1081 bassins), le RMSE (mm/j) a été calculé pour l'échantillon de 631 bassins sur lequel porte l'évaluation du modèle. Le modèle "borné" (Eq. 6) fournit une RMSE de 0.174 mm/j contre 0.230 mm/j pour la formule non bornée)

Nous comparons ici le comportement des modèles en extrapolation. Pour ce faire, nous appliquons ces formules à chaque maille SAFRAN. La Figure 3 présente le  $Q_{MNA5}$  potentiel de maille "ancienne formule" en fonction du  $Q_{MNA5}$  "formule bornée" pour les 9892 mailles SAFRAN. On voit bien ici la différence de comportement sur les fortes valeurs, qui représentent de fortes précipitations pour une faible ETP (typiquement les zones de montagne où nous avions des problèmes d'extrapolation). La Figure 4 montre la distribution du rapport  $Q_{MNA5}$  potentiel par maille/Précipitation. On voit clairement ici que le  $Q_{MNA5}$  potentiel de la maille est toujours inférieur à la précipitation sur cette maille pour la formule "bornée", contrairement à la formule non bornée.

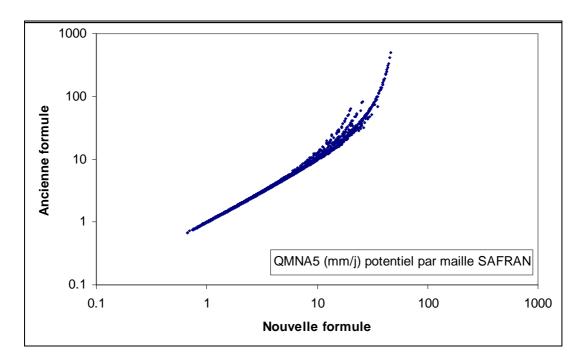


Figure 3 : Q<sub>MNA5</sub> potentiel "ancienne formule" en fonction du Q<sub>MNA5</sub> potentiel formule "bornée"



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



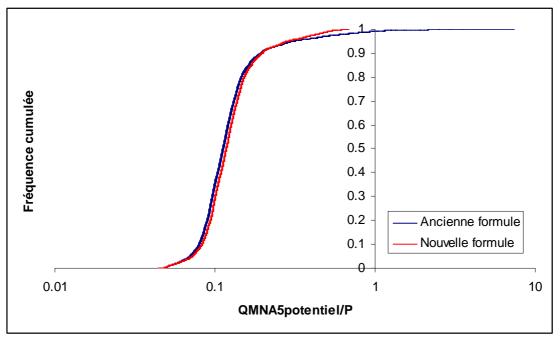


Figure 4 : Distribution du rapport QMNA<sub>5</sub> potentiel sur précipitation des 9892 mailles SAFRAN

# 1.3 Exploration des variables explicatives

Le modèle précédemment retenu (non borné) présenté en 1.1 (Eq. 4), intégrait deux autres variables physio-climatiques explicatives : la P<sub>MNA5</sub> et la surface. Nous vérifions dans cette partie si ces variables sont pertinentes dans le cas de l'utilisation d'une formulation "bornée".

#### 1.3.1 PMNA5

Pour tester si ce facteur est toujours pertinent dans la nouvelle formule (Eq. 5), nous présentons en Figure 5 l'erreur relative du modèle "borné" (Eq. 6) en fonction de la  $P_{MNA5}$ . Il semble qu'il n'existe pas de relation entre les deux, ce qui nous amène à abandonner cette piste.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



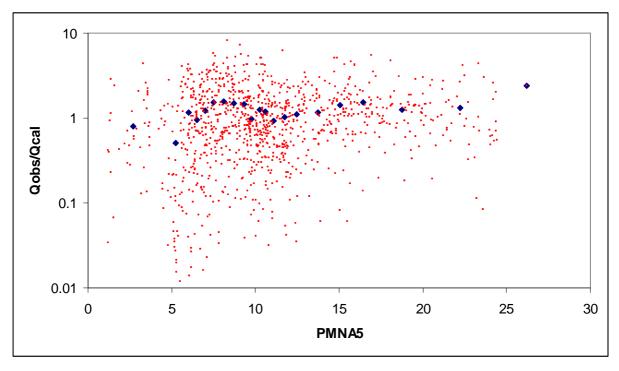


Figure 5 : erreur du modèle "borné" (Eq. 6) en fonction de la  $P_{MNA5}$  (en bleu : la moyenne de l'erreur en fonction de la moyenne de la  $P_{MNA5}$  pour des groupes d'effectifs égaux)

#### 1.3.2 SURFACE

Notre formule initiale (Eq. 4) utilisait la surface, ce qui correspond à un effet d'échelle (un terme d'*abattement* en jargon hydrologique). Nous avons cherché à évaluer pour la nouvelle équation si les erreurs du modèle sans terme d'abattement pouvaient être liées à la surface des bassins. Nous choisissons de discrétiser notre échantillon de bassins en fonction de la surface en 20 groupes d'effectifs égaux. La Figure 6 montre la distribution des erreurs du modèle pour chaque groupe en fonction de la surface moyenne de ce groupe. On voit bien ici que le modèle sans abattement a tendance à sous-estimer le Q<sub>MNA5</sub> des grands bassins et à surestimer celui des petits bassins.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



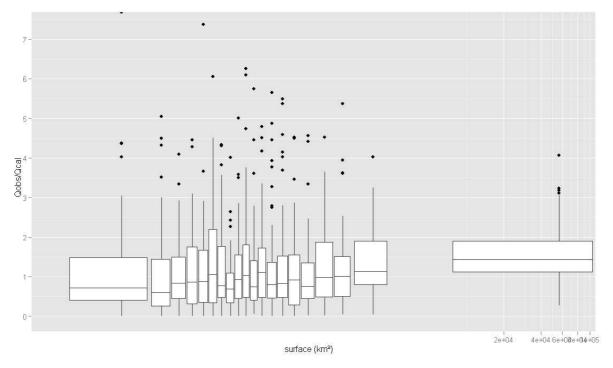


Figure 6 : distribution des erreurs du modèle sans abattement en fonction de la surface

Il est donc nécessaire d'introduire une correction fonction de la surface du bassin versant. Dans le cas du modèle distribué (développé en partie **Erreur! Source du renvoi introuvable.**), intégrer la surface au sein de la fonction climatique n'aurait pas l'effet escompté puisque toutes les mailles sont d'égales surfaces. Ainsi, nous choisissons d'intégrer la surface en tant que terme correctif du calcul à base climatique, tel que

$$Q_{MNA5} = \delta(S) \times P \times \left(1 - \frac{1}{1 + 0.16 \times P^{0.41} \times E^{-2.75}}\right)$$
 Eq. 7

Pour chaque classe de surface, nous avons estimé l'erreur moyenne du modèle sans prise en compte de l'effet de la surface. La Figure 7 présente la valeur de cette erreur en fonction de la surface moyenne du groupe de bassins. On peut en déduire que  $\delta$  est une fonction croissante de la surface. Nous avons donc choisi de tester deux formulations :  $\delta$  = a ln(S) + b

et 
$$\delta = \left(\frac{S}{b}\right)^a$$
, et le Tableau 2 rassemble les performances observées sur notre échantillon.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



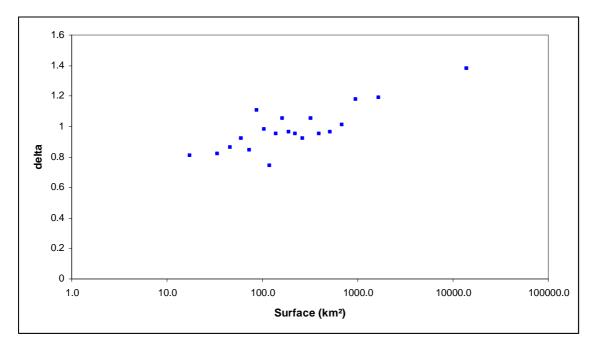


Figure 7 : évolution de l'erreur du modèle ne prenant pas en compte la surface du bassin en fonction de la surface du bassin

Tableau 2 : performances des modèles

Formule	C2M sur les débits en mm	C2M sur la racine des débits en mm	C2M sur le log des débits en mm	RMSE 1081 BVs (mm/j)
$Q_{MNA5} = P \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma}}\right)$	0.166	0.210	0.217	0.157
$Q_{MNA5} = \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma} \times S^{\delta}$	0.138	0.208	0.212	0.161
$Q_{MNA5} = \left(\frac{S}{b}\right)^{a} \times P \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma}}\right)$ avec a = 0.0816 et b = 266.4 (Figure 8)	0.180	0.220	0.225	0.154
$Q_{MNA5} = \left(a\ln(S) + b\right) \times P \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P^{\beta} \times E^{\gamma}}\right)$ avec a = 0.0874 et b = 0.5152 (Figure 9)	0.184	0.220	0.225	0.154

De la même façon que précédemment, on a aussi calculé la RMSE sur l'échantillon de 631 bassins. Les deux corrections sont similaires et fournissent une erreur de 0.170 mm/j.

La Figure 8 et la Figure 9 présentent les erreurs du modèle en fonction de la surface après correction. Les graphiques montrent que les 2 corrections sont très similaires. De même, les



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



valeurs numériques des critères calculés sont quasi-semblables. Même si numériquement la différence est faiblement marquée avec le modèle sans correction, la Figure 8 et la Figure 9 montrent d'assez nettes différences avec la Figure 6. Etant donné le peu de différence entre les deux corrections pour les gammes de débit qui nous concernent, nous choisissons

d'utiliser la plus simple à mettre en place, c'est-à-dire celle qui correspond à  $\delta = \left(\frac{S}{b}\right)^a$ .

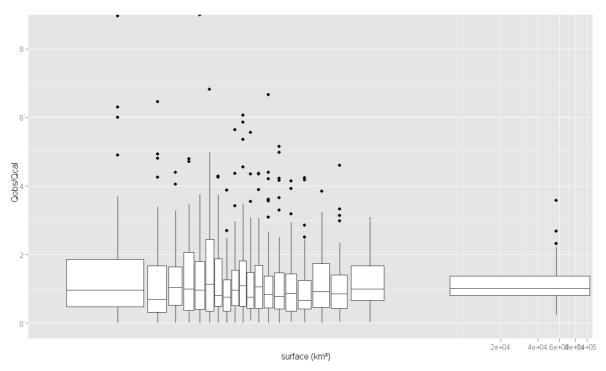


Figure 8 : Erreur du modèle en fonction de la surface après correction par  $\delta = \left(\frac{S}{b}\right)^a$ 



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



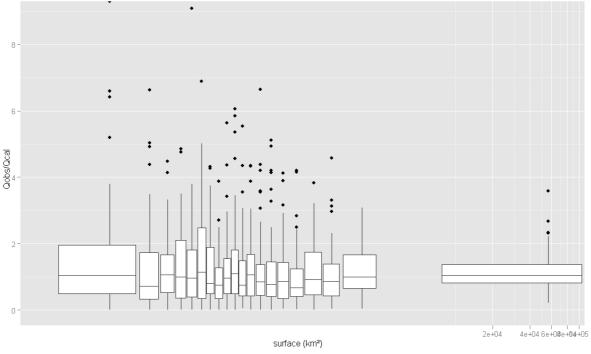


Figure 9 : Erreur du modèle en fonction de la surface après correction par  $\delta$  = a ln(S) + b

# 2. Calcul global vs calcul distribué

# 2.1 Cartographie des relations amont-aval

La formule de calcul des débits cibles est basée sur les variables physiographiques et météorologiques du bassin ciblé. Afin de calculer le débit en tout point du réseau hydrographique français, il est nécessaire de délimiter un bassin versant en tout point de ce réseau et de pouvoir en déterminer les variables correspondantes. Nous présentons ici la méthode qui permet de calculer le débit en tout point du réseau.

Le support de calcul utilisé consiste en un plan de drainage avec un maillage de 100 \* 100 m. La Figure 10 présente un schéma de la construction du réseau de drainage. Une discrétisation de la France en mailles de 100 \* 100 m est effectuée à partir d'un MNT. Une altitude est affectée à chaque maille et pour chacune d'elle, une direction de pente maximale est calculée : on est capable de dire dans quelle maille adjacente s'écoule chaque maille. Ceci donne une première idée du plan de drainage. Le problème est qu'il est possible que ce premier plan ne suive pas le tracé réel des rivières qui constituent les points bas, du fait de la "grossièreté" du maillage, notamment dans les zones "planes". Pour palier à cela, le réseau hydrographique est vectorisé sur la France à partir d'une image raster : il fournit le "squelette" du plan de drainage et va permettre de forcer les écoulements dans ce sens. Ce plan de drainage permet de définir les limites des bassins versants en tout point du réseau hydrographique et de discrétiser ce bassin.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



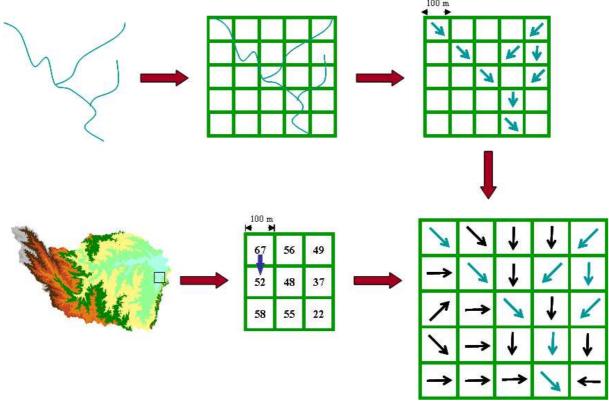


Figure 10 : Principe de la construction du plan de drainage, détermination des directions d'écoulement

A chaque maille du réseau correspond ainsi une valeur de chacune des variables retenues. Ainsi, il est possible d'effectuer le calcul de la formule de deux manières différentes :

• modèle global : la formule est appliquée au bassin : l'agrégation des variables sur le bassin est effectuée avant le calcul de la formule

$$Q_{MNA5} = \delta \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} P_n\right) \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} P_n\right)^{\beta} \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} E_n\right)^{\gamma}}\right)$$
 Eq. 8

où N est le nombre de mailles du bassin versant

• modèle distribué : la formule est appliqué à chaque maille, fournissant un débit potentiel. C'est l'agrégation des débits potentiels sur le bassin qui va fournir le débit à l'exutoire.

$$Q_{MNA5} = \delta \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left[ P_n \times \left( 1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P_n^{\ \beta} \times E_n^{\ \gamma}} \right) \right]$$
 Eq. 9

où N est le nombre de mailles du bassin versant



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



# 2.2 Passage au calcul distribué

Jusqu'à présent, pour des raisons de temps de calcul, nous avons opéré en mode global. Ce mode de calcul présente des problèmes de discontinuité pour la cartographie sur le réseau hydrographique pour la cartographie sur (notamment au niveau des confluences). Nous présentons à présent les résultats obtenus lors de la mise en place d'un modèle distribué.

lci, tous les paramètres du modèle ont été calés en même temps sur le Nash en racine des débits en mm/j pour les 1081 bassins. Le Tableau 3 présente les valeurs des paramètres pour le modèle global et distribué. On remarque que ceux-ci sont relativement similaires.

Tableau 3 : valeurs des paramètres pour le modèle global et distribué

Modèle	α	β	γ	а	b	b <sup>-a</sup>
global	0.16	0.60	-2.73	0.095	2342	0.479
distribué	0.16	0.51	-2.77	0.082	1323	0.555

Le Tableau 4 présente les performances des deux modèles. On observe que le modèle distribué semble être légèrement meilleur. La Figure 11 montre que les deux modèles fournissent des valeurs très proches, même si celles du modèle distribuée semblent en général légèrement supérieures.

Tableau 4 : performances du modèle global et distribué

Formule	Nash sur les débits en mm	Nash sur la racine des débits en mm	Nash sur le log des débits en mm	RMSE 1081 BVs (mm/j)
Global	0.188	0.222	0.225	0.153
Distribué	0.197	0.227	0.230	0.152

Remarque : les résultats du modèle global sont très légèrement différents de ceux présentés au Tableau 3, parce que l'on a recalé l'ensemble des paramètres de la formule simultanément.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



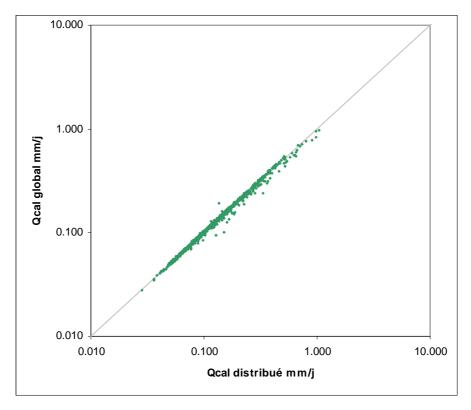


Figure 11 : Q<sub>MNA5</sub> calculés avec le modèle global vs calculés avec le modèle distribué

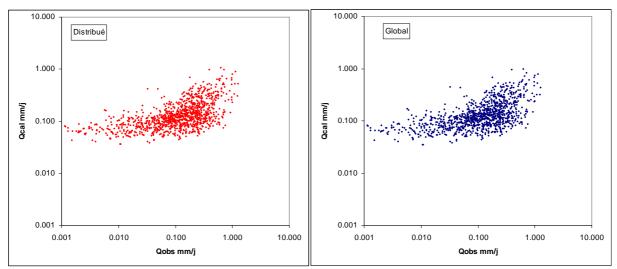


Figure 12 : Q<sub>MNA5</sub> calculés vs observés avec le modèle global (à gauche) et distribué (à droite)



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



# 3. Régionalisation du modèle

# 3.1 Exploitation des erreurs du modèle

La relation explicative du Q<sub>MNA5</sub> ayant été fixée, on peut (pour chaque station jaugée) l'utiliser pour calculer les erreurs du modèle, comme indiqué Eq. 10 :

$$\theta = \frac{Q_{MNA5}"observ\acute{e}"}{\delta \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left[ P_n \times \left( 1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P_n^{\ \beta} \times E_n^{\ \gamma}} \right) \right]}$$
 Eq. 10

La relation explicative de l'Eq. 9 a tendance à se tromper de la même façon pour des stations géographiquement proches : cela signifie qu'il est possible d'exploiter l'erreur constatée aux stations jaugées pour essayer de prévoir l'erreur résiduelle de la relation explicative aux sites non-jaugés : si l'erreur de la méthode a une cohérence géographique, il est donc possible d'utiliser cette information pour améliorer nos prévisions. Il faut pour cela régionaliser le résidu  $\theta$ , en utilisant les stations de mesure comme donneurs, et chaque point non-jaugé du réseau hydrographique comme un receveur.

# 3.2 Régionalisation distribuée du résidu

Toujours dans l'optique d'éviter les discontinuités graphiques sur le réseau hydrographique, nous choisissons de régionaliser le résidu  $\theta$  (rapport  $Q_{MNA5}$  observé sur  $Q_{MNA5}$  calculé) à l'échelle de la maille (Eq. 12) et non plus du bassin (Eq. 11).

Modèle global :

$$Q_{MNA5} = \theta \times \delta \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} P_n\right) \times \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} P_n\right)^{\beta} \times \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} E_n\right)^{\gamma}}\right)$$
 Eq. 11

Modèle distribué :

$$Q_{MNA5} = \delta \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left[ \theta_n \times P_n \times \left( 1 - \frac{1}{1 + \alpha \times P_n^{\ \beta} \times E_n^{\ \gamma}} \right) \right]$$
 Eq. 12

Ce choix présente cependant une difficulté : le résidu  $\theta$  résulte d'un calcul par bassin versant, et passer du bassin à une grille régulière nécessite un travail d'interpolation (qui prenne de plus en compte le fait que certains bassins sont emboîtés).

La première étape consiste à affecter à chaque maille i d'un bassin la valeur de  $\theta$  du bassin qui l'englobe. Mais quelle valeur affecter à une maille i qui appartient à plusieurs bassins? Nous choisissons de pondérer cette valeur de  $\theta$  par l'importance de la maille i au sein de chaque bassin qui l'englobe. L'équation XX présente le calcul effectué.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



$$\theta'_{i} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{J} \left(\frac{S_{0}}{S_{j}}\right)} \times \sum_{j=1}^{J} \left(\theta_{j} \times \frac{S_{0}}{S_{j}}\right)$$
 Eq. 13

Avec S la surface du bassin versant et  $S_0$  la surface de la maille

La deuxième étape consiste à étendre l'information au-delà des frontières des bassins versants jaugés sur lesquels nous avons pu calculer un résidu  $(\theta)$ . Pour cela, on repart des  $\theta'$  que l'on interpole à l'aide d'une pondération par l'inverse de la distance entre la maille k qui reçoit et la maille i qui donne. L'Eq. 14 présente la formule retenue pour interpoler les résidus. Elle permet d'obtenir -en chaque point du réseau non-jaugé- un résidu régionalisé que nous notons  $\theta_{réa}$ :

$$\theta r \acute{e}g_k = \frac{1}{\sum_i \left(\frac{1}{D^a + b}\right)} \times \sum_i \left(\theta'_i \times \frac{1}{D^a + b}\right)$$
 Eq. 14

Avec:

D la distance géographique entre la maille *k* qui reçoit et la maille *i* qui donne

a = 3 et b = 0,01 les deux paramètres de la régionalisation optimisés sur le C2M calculé sur les racines des débits en mm/j

# 3.3 Traitement des bassins de montagne

Même après régionalisation, les bassins de montagne à régime nival fournissent des valeurs de débit peu réalistes. La formule définie précédemment est calée sur un échantillon de 1081 bassins, qui présentent majoritairement des régimes hydrologiques du type pluvial avec des hautes eaux l'hiver et des basses eaux l'été. Le choix d'une formule qui fait intervenir les précipitations et l'évapotranspiration est lié aux processus dominant qui interviennent dans l'écoulement d'une rivière. Les fortes pluies combinées aux faibles températures (donc à une plus faible ETP) l'hiver "gonflent" les débits en hiver, tandis que les pluies plus faibles combinées aux fortes températures (donc une ETP plus forte également) en été vont générer les basses eaux. Il en résulte donc une corrélation positive du  $Q_{MNA5}$  avec la pluie et une corrélation négative avec l'ETP.

Mais en montagne, les processus hydrologiques qui causent les étiages sont différents et le débit est régulé par le stockage en hiver et la fonte au printemps. Les étiages correspondent aux périodes hivernales, quand toutes les précipitations sont stockées sous forme de neige, la rivière n'étant plus alimentée que par les nappes et la fonte à la base du manteau neigeux. L'ETP n'intervient pas, et la formule générale n'est donc pas adaptée pour ces bassins.

Plusieurs autres variables ont été testées pour déterminer une autre relation pouvant convenir aux bassins de montagne (altitude de l'exutoire, moyenne, médiane du bassin, température moyenne annuelle, nombre de jours moyen annuel sous un seuil de température, pourcentage moyen par an de précipitation solide par rapport aux précipitations totales ...). Aucune de ces variables n'a donné de résultats satisfaisants. Nous avons donc décidé de fixer la lame de  $Q_{MNA5}$  des bassins de montagne. Les différents tests effectués nous ont permis de déterminer la meilleure variable parmi les différentes citées précédemment, pour définir un bassin nival. Ainsi, est considéré comme nival un bassin dont au moins 50% de sa surface est située à une altitude supérieure à 2000 m. Le  $Q_{MNA5}$  moyen pour ces bassins s'élève à 0.6 mm/j. En calcul distribué, on a également choisi de ne pas



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



retenir les bassins nivaux pour l'interpolation de l'erreur et les mailles situées à une altitude supérieure à 2000 m sont affectées de la valeur 0.6 mm/j.

Le Tableau 5 présente les résultats en RMSE avant et après traitement des bassins nivaux pour les 632 bassins, et permet de montrer l'apport significatif de cette prise en compte :

Tableau 5 : RMSE du modèle avant et après traitement des basins nivaux

	RMSE mm/j (mm/mois)
Avant traitement des bassins nivaux	0.138 (4.20)
Après traitement des bassins nivaux	0.126 (3.82)

# 4. Résultat des formulations retenues

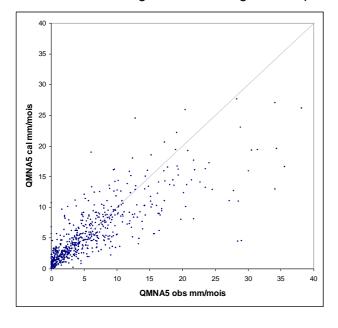
# 4.1 Débit de référence étiage : Q<sub>MNA5</sub>

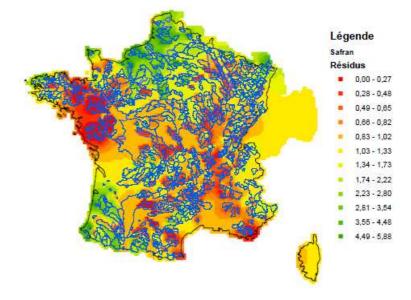
Le calcul du Q<sub>MNA5</sub> décrit par l'Eq. 15 se fait désormais comme décrit ci-dessous :

$$Q_{MNA5} = \left(\frac{S}{2406.5}\right)^{0.082} \times \frac{1}{Nmaille} \sum_{n=1}^{Nmaille} QMNA_5 potentiel_n$$
 Eq. 15

$$\begin{aligned} \textbf{Avec} & Q_{\mathit{MNA5}} \, \mathit{potentiel}_{\mathit{n}} = \theta \mathit{reg}_{\mathit{n}} \times P_{\mathit{n}} \times \left(1 - \frac{1}{1 + 0.16 \times P_{\mathit{n}}^{0.53} \times E_{\mathit{n}}^{-2.67}}\right) & \text{si Zn} \, \leq \, 2000 \, \, \mathrm{m} \\ & Q_{\mathit{MNA5}} \, \mathit{potentiel}_{\mathit{n}} = 0.6 & \text{si Zn} \, > \, 2000 \, \, \mathrm{m} \end{aligned}$$

La Figure 13 ci-dessous présente les résultats du calcul du Q<sub>MNA5</sub> sur l'échantillon de bassins versant. Notre modèle fournit une erreur moyenne (RMSE) de 3,8 mm/mois. La carte des résidus régionalisés est également présentée.







Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



Figure 13-gauche : Q<sub>MNA5</sub> calculés en fonction des Q<sub>MNA5</sub> observés, -droite : cartographie des résidus régionalisés

# 4.2 Débit moyen annuel : QA

A partir des résultats obtenus en Q<sub>MNA5</sub>, nous avons décidé de repartir de la formule de type Turc pour le calcul du débit moyen annuel. Nous nous sommes attachés à effectuer les mêmes tests pour vérifier que le modèle développé restait performant.

Les conclusions pour la formule sont les suivantes :

- nous ne sommes pas parvenus à identifier d'autres variables physico-climatiques explicatives en plus de la pluie et de l'ETP pour le calcul du module
- l'introduction d'un abattement n'est pas pertinente pour expliquer le débit moyen : le modèle à tendance à caler les paramètres de l'abattement de manière à annuler son effet.
- on n'observe pas de problèmes pour les bassins de montagne, les résultats sont relativement cohérents pour ceux-ci : les erreurs de modélisation après régionalisation ne sont pas plus importantes que pour les bassins pluviaux.

Le calcul du débit moyen annuel décrit par l'Eq. 16 se fait désormais comme décrit cidessous :

$$Q_{A} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left[ \theta reg_{n} \times P_{n} \times \left( 1 - \frac{1}{1 + 0.65 \times P_{n}^{1.59} \times E_{n}^{-2.66}} \right) \right]$$
 Eq. 16

Avec : P : pluie moyenne en mm/j

E: Evapotranspiration potentielle moyenne en mm/j

N: nombre de mailles du bassin versant

La Figure 14 présente les résultats du calcul du  $Q_A$  sur l'échantillon de bassins versant. Notre modèle fournit une erreur moyenne (RMSE) de 160,8 mm/an. La carte des résidus régionalisés est également présentée.



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



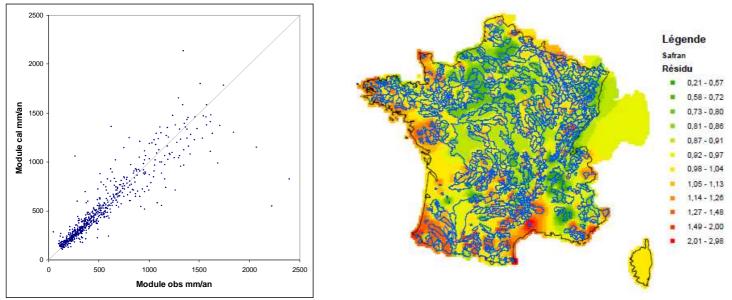


Figure 14-gauche : Débits moyens annuels calculés en fonction des modules observés, -droite : cartographie des résidus régionalisés

## 4.3 Cartes nationales

Les résultats sont fournis sous la forme d'une couverture SIG, exploitable sous un logiciel adapté. La Figure 15 ci-dessous illustre le résultat.



Partenariat 2010

Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



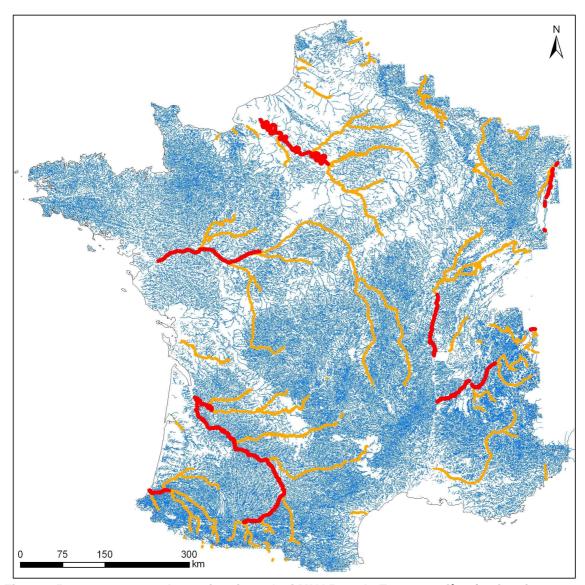


Figure 15 : cartogramme des estimations du QMNA5 sur la France entière (estimation régionalisée)



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



# Annexe 1 : présentation des bassins versants

L'échantillon national est composé de 1081 bassins versants répartis sur la France entière (). Il est en fait composé d'une base de données de 634 bassins versants commune aux équipes d'Aix, de Lyon et d'Antony, et de notre ancien échantillon de bassin utilisés dans nos précédents travaux. Les stations de jaugeage sont réputées "peu ou pas influencées" par les services producteurs des données.

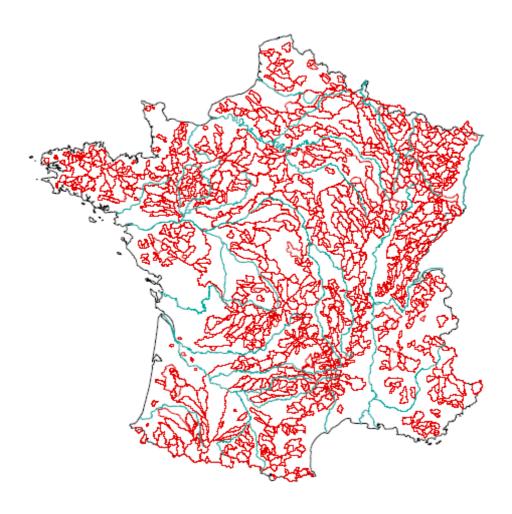


Figure 16 : cartographie de l'échantillon de bassins versant sur la France



Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux Action Prédétermination des étiages



Onema Hall C – Le Nadar 5 square Félix Nadar 94300 Vincennes 01 45 14 36 00 www.onema.fr Cemagref/Irstea
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
01 40 96 61 21
www.Cemagref.fr