

# Cartographie des débits de référence – Interpolation du module

*Rapport final*

*Thomas CIPRIANI & Eric SAUQUET  
Iristea, Lyon*

*Janvier 2012*

## Contexte de programmation et de réalisation

---

Cette note intervient dans le cadre de la poursuite des travaux menés par l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique du centre de Lyon sur la régionalisation des débits de référence, notamment du débit annuel moyen interannuel ou module (Sauquet, 2005, 2006).

L'objectif principal étant de mettre en place une série de formulations empiriques dont la forme est inspirée du bilan hydrique afin de déterminer le module en fonction de caractéristiques climatiques de bassin, relativement simples et accessibles,

Une approche finale par krigeage des résidus obtenus par nos formulations permet également de reconstituer la part non expliquée de ces formules sur l'ensemble du territoire.

## Les auteurs

---

### **Thomas Cipriani**

Ingénieur de Recherche  
[thomas.cipriani@irstea.fr](mailto:thomas.cipriani@irstea.fr)  
Irstea Lyon, HHL Y

### **Eric Sauquet**

Chargé de Recherche  
[eric.sauquet@irstea.fr](mailto:eric.sauquet@irstea.fr)  
Irstea Lyon, HHL Y

## Les correspondants

---

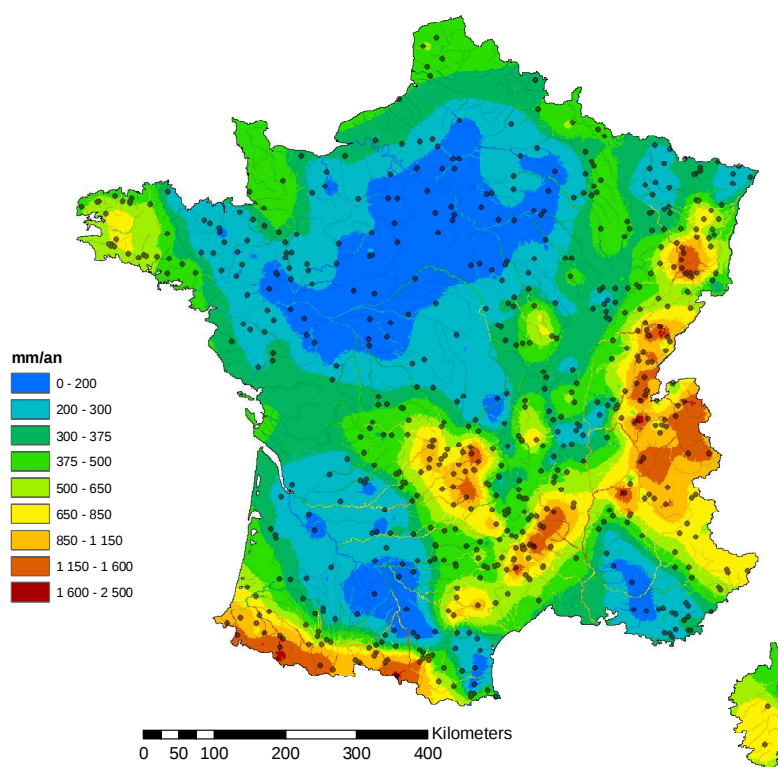
**Pascal Maugis, DAST, [pascal.maugis@onema.fr](mailto:pascal.maugis@onema.fr)**

**Eric Sauquet, HHL Y, [eric.sauquet@irstea.fr](mailto:eric.sauquet@irstea.fr)**

|                                                          |                                |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Droits d'usage :                                         | <b>accès libre</b>             |
| Couverture géographique :                                | <b>France</b>                  |
| Niveau géographique [ <b>un seul choix</b> ] :           | <b>National</b>                |
| Niveau de lecture [ <b>plusieurs choix possibles</b> ] : | <b>Professionnels, experts</b> |
| Nature de la ressource :                                 | <b>Document</b>                |

## Synthèse

La cartographie du module proposée dans ce rapport repose sur 634 stations sélectionnées en raison de leur longueur, qualité et influence. Ces stations ont été identifiées par Catalogne et Sauquet (2012) pour une étude similaire portant sur les étiages. L'estimation repose sur deux variables explicatives : précipitations annuelles interannuelles  $PA$  et évapotranspiration réelle annuelle interannuelle  $ETRA$  selon la formule de Turc, l'évapotranspiration potentielle (ETP) n'ayant pas été identifiée comme aussi puissante que l'ETR. L'utilisation de la seule variable  $PA-ETRA$ , comparable à une pluie efficace, s'est révélée presque aussi performante et moins coûteuse que deux variables  $PA$  et  $ETRA$  séparées. Des régressions linéaires simples reliant le module  $QA$  (en mm) à la variable  $PA-ETRA$  (en mm) ont été établies à l'échelle nationale et à l'échelle de secteur géographiques issus d'une partition reprenant en partie le contour des Hydro-Ecorégions (HERm). Cette approche se veut cohérente avec les équations du bilan hydrique et permet de limiter les extrapolations fantaisistes dues à l'introduction de variables exotiques. Enfin, pour intégrer des facteurs locaux non pris en compte dans les régressions, une interpolation des résidus a été réalisée. Même si le découpage en HERm améliore les estimations, il ressort que le gain n'est pas très significatif, le pouvoir explicatif des régressions étant déjà élevé, et qu'une unique formule valable sur le territoire combinée avec une carte des erreurs se révèle tout aussi précise :  $QA = -92 + 1.093 (PA - ETRA)$  sauf sur certains territoires limités insuffisamment couverts par des stations éligibles. Au final, le critère de Nash sur l'estimation du module en m<sup>3</sup>/s est excellent (0.968). La carte finale est la suivante :



Cette carte contribue à la carte de consensus au même titre que les cartographies des centres d'Aix (Folton et al., 2012) et d'Antony (Nicole et al., 2012 ; Riffard et al., 2012).

## Sommaire

|          |                                                                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction.....</b>                                                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Acquisition de la variable d'intérêt .....</b>                                                                        | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>Présentation des variables descriptives.....</b>                                                                      | <b>10</b> |
| 3.1      | Cartographie de la pluie annuelle moyenne.....                                                                           | 10        |
| 3.2      | Cartographie de l'évapotranspiration annuelle .....                                                                      | 12        |
| <b>4</b> | <b>Construction de formulations empiriques .....</b>                                                                     | <b>13</b> |
| 4.1      | Ajustement de formules nationales.....                                                                                   | 13        |
| 4.2      | Amélioration des formulations globales .....                                                                             | 18        |
| 4.3      | Découpage régional.....                                                                                                  | 25        |
| <b>5</b> | <b>Apport du krigeage.....</b>                                                                                           | <b>34</b> |
| 5.1      | Application au module .....                                                                                              | 34        |
| 5.2      | Application aux résidus des régressions empiriques sur le module.....                                                    | 35        |
| 5.3      | Comparaison des performances après krigeage.....                                                                         | 37        |
| 5.4      | Comparaison des performances avec les travaux antérieurs (Sauquet, 2005, 2006).....                                      | 39        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion.....</b>                                                                                                   | <b>42</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliographie .....</b>                                                                                               | <b>44</b> |
| <b>8</b> | <b>Annexes .....</b>                                                                                                     | <b>45</b> |
|          | Annexe 1 : Ajustement des variogrammes théoriques sur les résidus .....                                                  | 46        |
|          | Annexe 2 : Cartographie du module .....                                                                                  | 47        |
|          | Annexe 3 : Comparaison des résidus déterminés empiriquement ou après Validation Croisée .....                            | 48        |
|          | Annexe 4 : Visualisation des ajustements initiaux par HER - Modèle 2VRs et après re-estimation en Validation Croisée. 53 |           |
|          | Annexe 5 : Performance du modèle national avec le module exprimé en m <sup>3</sup> /s .....                              | 58        |

## Table des illustrations

|                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Localisation des 634 stations hydrométriques et contour de leur bassin topographique respectif.....                                                                                                                                  | 8  |
| Figure 2 : Chronique de débits journaliers (en $m^3/s$ ) mesurés à la station A1050310 pour la période 1970-2005 .....                                                                                                                          | 8  |
| Figure 3 : $QA$ (mm/an) observé aux 634 stations hydrométriques étudiées.....                                                                                                                                                                   | 9  |
| Figure 4 : Cartographie des précipitations annuelles d'AURELHY (gauche) et de SAFRAN (droite).....                                                                                                                                              | 11 |
| Figure 5 : Comparaison des disparités issues du maillage des précipitations annuelles moyennes d'AURELHY et de SAFRAN dans trois régions françaises .....                                                                                       | 11 |
| Figure 6 : Cartographie de l'EvapoTranspiration Potentielle Annuelle.....                                                                                                                                                                       | 12 |
| Figure 7 : Cartographie de l'ETR Annuelle d'AURELHY (gauche) et de SAFRAN (droite).....                                                                                                                                                         | 12 |
| Figure 8 : $QA$ observé et estimé par les trois configurations nationales.....                                                                                                                                                                  | 16 |
| Figure 9 : $QA$ observé et estimé par la formulation du Cemagref 1987, et par Voisinages Glissants.....                                                                                                                                         | 17 |
| Figure 10 : Résidus normalisés en fonction du $QA$ calculé sur le modèle 2VR.....                                                                                                                                                               | 19 |
| Figure 11 : $QA$ observé et estimé avec ou sans la prise en compte des stations karstiques – Modèle 2VR .....                                                                                                                                   | 20 |
| Figure 12 : $QA$ observé et estimé avec ou sans la prise en compte des stations karstiques – Modèle 2VRs .....                                                                                                                                  | 21 |
| Figure 13 : Schéma de deux bassins emboîtés, BV2 étant situé en amont du BV1.....                                                                                                                                                               | 22 |
| Figure 14 : $QA$ observé et estimé avec la prise en compte ou non des variables recalculées par sous bassins .....                                                                                                                              | 23 |
| Figure 15 : $QA$ observé et estimé avec la prise en compte ou non des variables recalculées par sous bassins – sans karst .....                                                                                                                 | 24 |
| Figure 16 : Présentation des HER définies par Wasson et al. (2001) modifiées dans le cadre de notre étude.....                                                                                                                                  | 26 |
| Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion.....                                                                                                                                                | 27 |
| Figure 18 : Cartographie des performances statistiques (Nash) des formulations ajustées par hydro-écorégions.....                                                                                                                               | 33 |
| Figure 19 : Variogramme théorique ajusté sur le $QA$ (Palier : 145 000 $mm^2$ ; pépité : 0 ; portée : 40 km : variogramme théorique ajusté de manière à ré estimer convenablement les valeurs empiriques sur les 100 premiers kilomètres) ..... | 34 |
| Figure 20 : Cartographie du module par krigeage (palier : 145 000 $mm^2$ ; pépité : 0 ; portée : 40 km).....                                                                                                                                    | 35 |
| Figure 21 : Cartographie des résidus issus du modèle national 2VRs d'après les pluies d'AURELHY.....                                                                                                                                            | 36 |
| Figure 22 : Cartographie des résidus issus du modèle 2VRs par HER d'après les pluies d'AURELHY.....                                                                                                                                             | 37 |
| Figure 23 : Comparaison des résultats en validation croisée réalisée par Sanquet (2005, 2006) à ceux obtenus ici en validation croisée avec la formulation NAT et le krigeage des résidus.....                                                  | 40 |

# 1 Introduction

Le module défini comme la moyenne interannuelle des débits annuels est une variable d'intérêt en France qui intervient dans le cadre réglementaire de la gestion de l'eau. Le débit réservé a été fixé sur nombre de cours d'eau comme le dixième du module naturel. La note technique du Cemagref datant de 1987 intitulée « Guide méthodologique en vue de l'estimation du « module » d'un cours d'eau » avait pour objectif d'aider les services techniques à estimer ce module des cours d'eau. Son intérêt réside dans son aspect très pragmatique : est proposée une méthode « jugée la plus performante » selon la disponibilité de données hydrologiques. Elle reflète un état de l'art compte tenu des outils mobilisables et des données facilement disponibles à la date de parution.

Depuis 1987, des développements méthodologiques réalisées au Cemagref centre de Lyon ont permis de cartographier cette valeur (Sauquet, 2005, 2006). La carte a été obtenue à partir de la donnée hydrologique et d'une variable auxiliaire exploitée dans des formulations empiriques : l'altitude moyenne. L'objectif de ce document est de réactualiser les éléments publiés.

Nous n'avons pas évoqué toutes les méthodes rappelées dans (Sauquet et Catalogne, 2010). L'idée ici est de nous appuyer sur des formulations empiriques. Le choix de la forme analytique de la régression empirique et des variables auxiliaires n'est pas totalement libre. **Nous avons choisi d'exploiter une équation incontournable en hydrologie pour assurer la robustesse des estimations : cette équation est celle du bilan hydrique** qui s'appuie sur l'équation de continuité/de conservation de la masse et qui s'écrit dans sa forme simplifiée (en négligeant les termes liés aux variations de stock et de pertes définitives) à l'échelle du bassin versant et à l'échelle interannuelle :

$$QA = PA - ETA$$

où  $QA$  désigne le débit annuel moyen (mm),  $PA$  les précipitations liquides et solides annuelles moyennes (mm) et  $ETA$  les pertes par évapotranspiration moyennes annuelles (mm).

**Nous avons décidé délibérément de ne pas faire appel à des variables autres que celles liées aux précipitations et à l'évapotranspiration.** Celles ci devraient en effet suffire à elles-seules, sous réserve d'une bonne connaissance de ces variables en site non jaugé, une estimation fiable des débits. On souhaite garantir des extrapolations réalistes car inspirées par une physique et limiter de manière physique des formes analytiques fantaisistes. Cet exercice est possible grâce aux travaux récents de Météo-France sur la spatialisation des données pluviométriques (Vidal *et al.*, 2010 ; Bénichou et Le Breton, 1987).

Ce présent rapport est scindé en plusieurs parties. La première est consacrée aux données hydrologiques, la seconde aux données climatiques exploitées. La quatrième partie contient les formulations empiriques ajustées sur le jeu de données et l'analyse de leur performance, la sixième partie s'inscrit dans le

prolongement des travaux de Sauquet (2005, 2006) ; l'apport d'une technique géostatistique est examiné.  
Enfin, la dernière partie est une conclusion générale.

## 2 Acquisition de la variable d'intérêt

Une sélection de 634 stations hydrométriques, référencées dans la banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) a été récemment réalisée dans une action connexe (Catalogne et Sauquet, 2012).

Ces dernières enregistrent des écoulements de bassins versants jugés naturels ou peu influencés, de superficie topographique comprise entre 4 et 8800 km<sup>2</sup>, sur un minimum de 26 années de suivi hydrologique.

Afin de ne pas perturber les résultats dus aux effets éventuels de la variabilité climatique, il a été choisi une plage de mesure commune à toutes les stations : de 1970 à 2005.

En un premier temps, l'information mise à notre disposition est une moyenne journalière des débits journaliers mesurés en station.

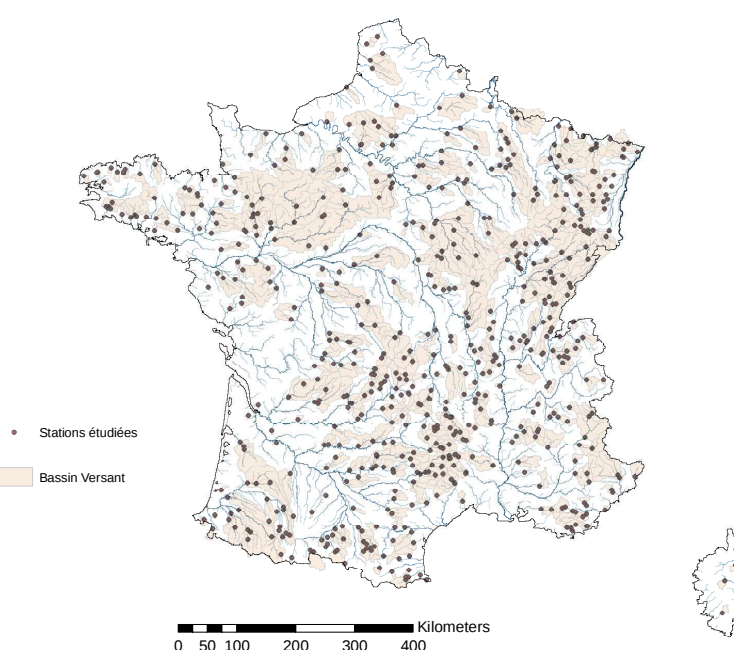


Figure 1 : Localisation des 634 stations hydrométriques et contour de leur bassin topographique respectif

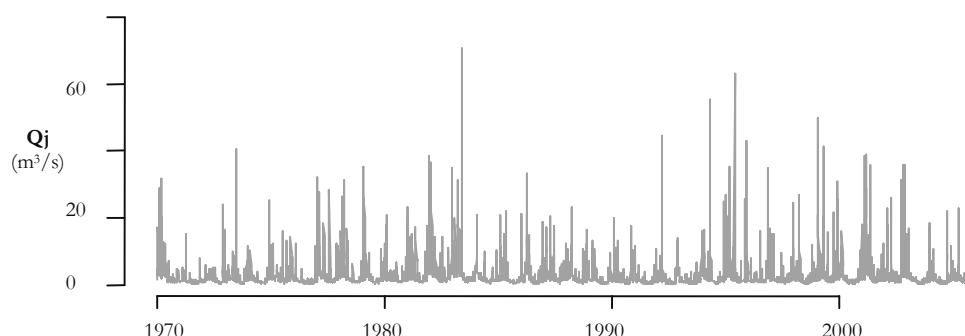


Figure 2 : Chronique de débits journaliers (en m<sup>3</sup>/s) mesurés à la station A1050310 pour la période 1970-2005

L'objectif est alors d'en déterminer le module  $QA$ .

A titre d'exemple, la station A1050310 (Figure 2), mesurant le bassin versant de l'Ill à Altkirch d'une superficie de 233 km<sup>2</sup>, dispose d'une chronique de mesure complète. Le module  $QA$  a été défini en effectuant une moyenne de l'ensemble des valeurs journalières : soit un  $QA$  de 2427 l/s mesuré sur la période 1970-2005. La Banque Hydro indique un module de 2440 l/s sur la période 1962-2011.

Afin de disposer d'une variable exprimable par unité de surface,  $QA$  est converti en lame d'eau :

$$QA(mm/an) = \frac{QA \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365.25}{S \cdot 10^6}$$

avec  $QA$  en l/s et  $S$  surface du bassin en km<sup>2</sup>.

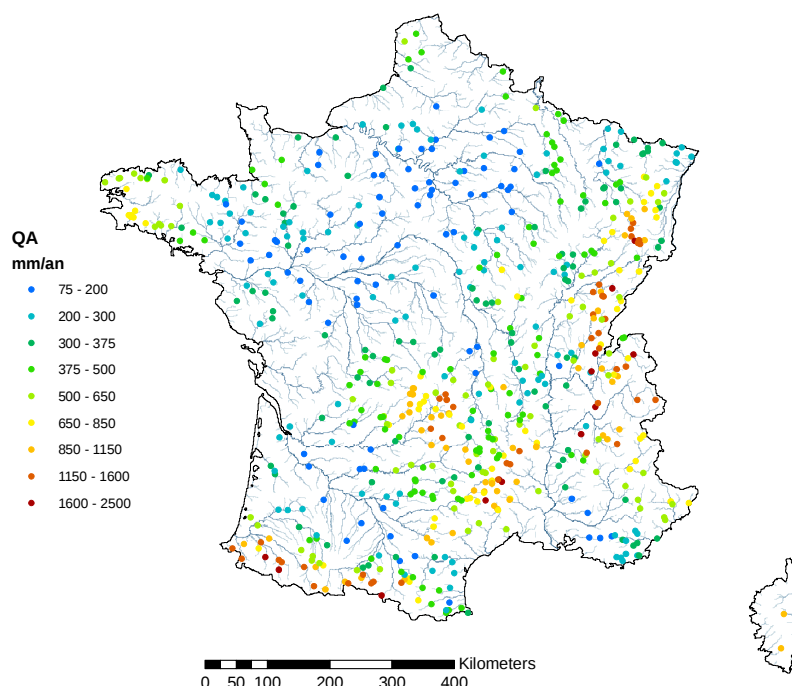


Figure 3 :  $QA$  (mm/an) observé aux 634 stations hydrométriques étudiées

La Figure 3 fait apparaître dans l'ensemble une grande hétérogénéité à l'échelle nationale. Les régions montagneuses (Pyrénées, Cévennes, Massif Central, Alpes, Jura et Vosges) sont, par unité de surface, les plus productrices avec un module très fréquemment supérieur à 650 mm/an.

### 3 Présentation des variables descriptives

Parmi un nombre important de variables descriptives, nous avons choisi d'acquérir principalement les valeurs de Pluie Annuelle  $PA$ , d'EvapoTranspiration Potentielle Annuelle  $ETPA$  et d'EvapoTranspiration Réelle Annuelle  $ETRA$ .

L'évaluation de l' $ETRA$  a été réalisée selon la formulation de Turc (1954) :

$$ETRA = \frac{PA}{\sqrt{0.9 + \frac{PA^2}{L^2}}}$$

avec :  $PA$  en mm/an et  $L$  paramètre de Turc donné par :

$$L = 300 + 25 \cdot TA + 0.05 \cdot TA^3$$

avec :  $TA$  température annuelle en °C.

Deux sources de données pluviométriques annuelles sont à disposition pour l'exercice d'interpolation :

- les pluies annuelles interpolées à l'aide de la méthode AURELHY (Benichou et Lebreton, 1987) calculées sur la période 1961-1990 et disponibles sur un maillage kilométrique ;
- les pluies de la réanalyse SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010) fournies de 1970 à 2005 représentées selon une résolution plus grossière (mailles de 64 km<sup>2</sup>).

#### 3.1 Cartographie de la pluie annuelle moyenne

Les cartes de  $PA$  fournies par SAFRAN et AURELHY sont très similaires (Figure 4). De manière générale, on observe de grands cumuls de précipitation dans les régions montagneuses et exposées aux flux d'ouest. Ainsi les Alpes du Nord, le Massif Central, le Jura et les Vosges sont plus arrosés que les Alpes du Sud ou la Corse. De même pour les Pyrénées Atlantiques et les Hautes Pyrénées faces aux Pyrénées Orientales. Les Cévennes, quant à elles reçoivent d'importantes quantités de pluie principalement dues aux entrées maritimes méditerranéennes.

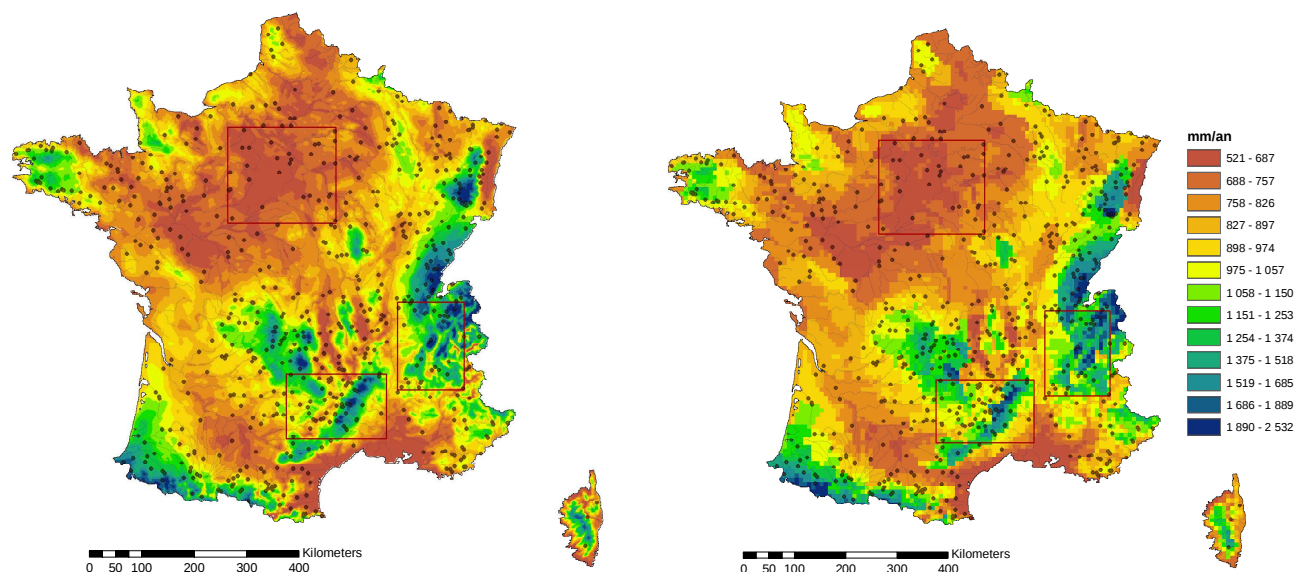


Figure 4 : Cartographie des précipitations annuelles d'AURELHY (gauche) et de SAFRAN (droite)

Toutefois les données de SAFRAN sont représentées par un maillage beaucoup plus grossier que celui d'AURELHY (une donnée sur un pixel de 64 km<sup>2</sup> contre 1 km<sup>2</sup> pour AURELHY), pouvant donner par conséquent des estimations moins cohérentes en zones montagneuses. La Figure 5 en est une illustration : sont représentées les estimations de pluie annuelle d'AURELHY en abscisse et les valeurs de pluie annuelle fournies par SAFRAN en ordonnée. La moyenne de la racine des écarts quadratiques entre logarithme des pluies est précisée sur chaque secteur. Les valeurs fortes témoignent d'un grand désaccord entre valeurs.

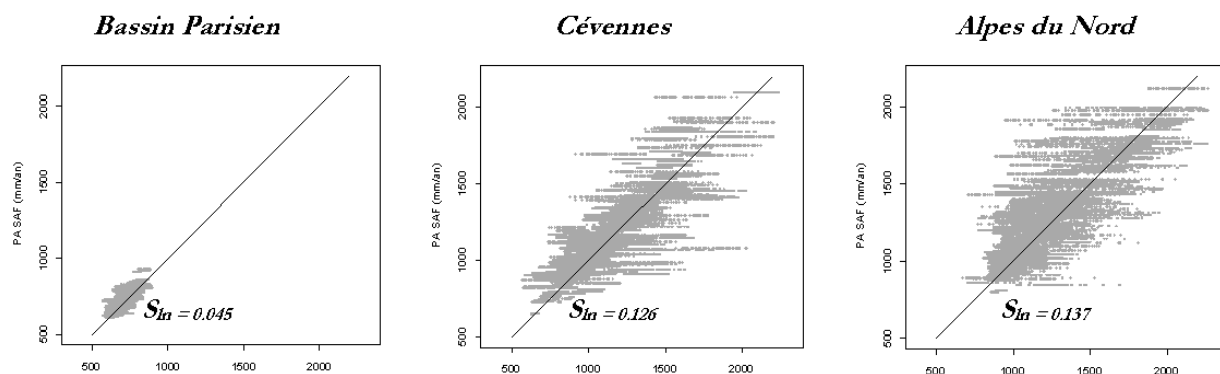


Figure 5 : Comparaison des disparités issues du maillage des précipitations annuelles moyennes d'AURELHY et de SAFRAN dans trois régions françaises

### 3.2 Cartographie de l'évapotranspiration annuelle

L'EvapoTranspiration Potentielle Annuelle *ETPA*, est disponible sur un maillage kilométrique par application de la formulation de Oudin (2004). La répartition spatiale des valeurs (Figure 6) est gouvernée par l'altitude (valeurs faibles en haute altitude et élevées en plaine). En second lieu intervient le caractère méditerranéen : toutes choses égales par ailleurs, les valeurs dans le Sud de la France sont plus fortes que dans le Nord de la France.

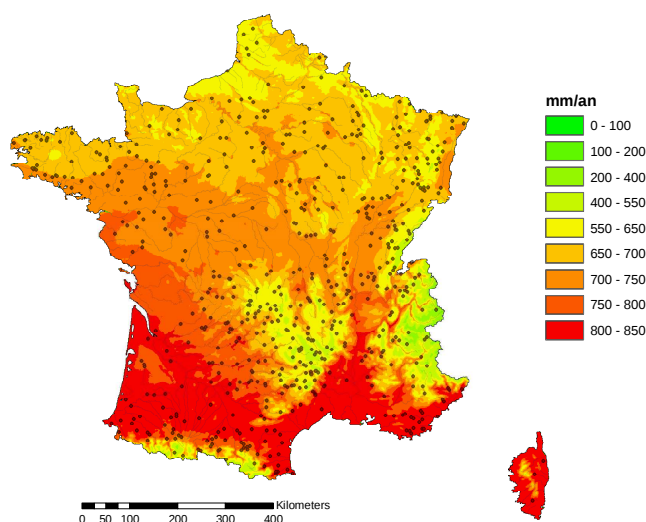


Figure 6 : Cartographie de l'EvapoTranspiration Potentielle Annuelle

Concernant l'*ETRA*, le maillage de la Température Annuelle *TA* étant de 64 km<sup>2</sup>, la cartographie s'en trouve moins finement reproduite. Par conséquent nous calculons une *ETRA* assez similaire qu'il s'agisse à l'origine des données de *PA* d'AURELHY ou bien de SAFRAN. Nous retrouvons en Figure 7 les mêmes facteurs de variabilité que pour l'*ETPA* ; cependant les contrastes spatiaux sont atténués.

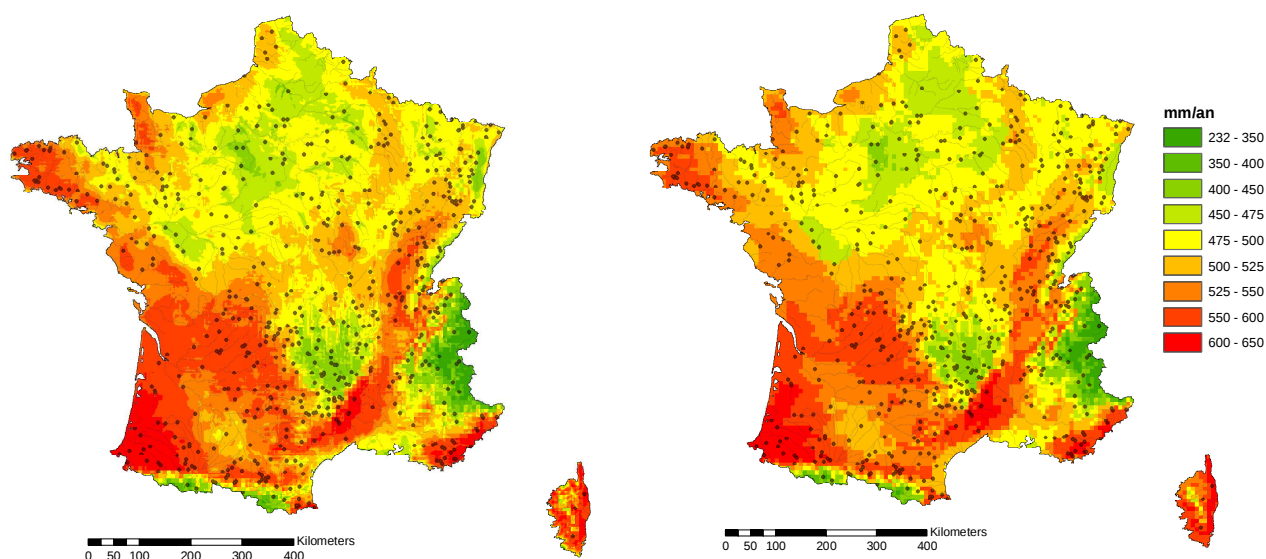


Figure 7 : Cartographie de l'ETR Annuelle d'AURELHY (gauche) et de SAFRAN (droite)

## 4 Construction de formulations empiriques

### 4.1 Ajustement de formules nationales

Il s'agit d'estimer le module  $QA$  (exprimé en lame d'eau) grâce à des formulations empiriques basées sur les variables descriptives suivantes :

- la Pluie Annuelle  $PA$  (en mm/an) ;
- l'EvapoTranspiration Potentielle Annuelle  $ETPA$  (en mm/an) ;
- l'EvapoTranspiration Réelle Annuelle  $ETRA$  (en mm/an).

1) Les formules proposées sont obtenues par régression linéaire. Trois configurations nationales sont étudiées aussi bien avec les données d'AURELHY que celles de SAFRAN avec les deux variables du bilan hydrique (d'où l'appellation « **2V** »). Nous testons la formule intégrant l'ETP (« **2VP** ») ou l'ETR (« **2VR** ») :

$$\mathbf{2VP : } QA = \alpha + (\beta \cdot PA) + (\zeta \cdot ETPA)$$

$$\mathbf{2VR : } QA = \alpha + (\beta \cdot PA) + (\zeta \cdot ETRA)$$

$$\mathbf{2VRs : } QA = \alpha + \beta \cdot (PA - ETRA)$$

La dernière formulation testée offre moins de degrés de liberté et est la plus proche de l'équation de bilan.

2) Nous avons également testé la formulation suggérée par la note technique du Cemagref (1987), en guise de référence :

$$\mathbf{Cemagref 1987 : } QA = 0.75 \cdot PA + 0.40 \cdot ZMOY - 450 \quad (1)$$

$$QA = \left( \frac{PA}{34} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot \left( \frac{ZMOY}{100} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ si le résultat de (1) est inférieur à 300 mm}$$

où  $ZMOY$  est l'altitude moyenne du bassin versant (m).

3) Enfin nous avons testé une formulation par Voisinages Glissants, consistant à ajuster une formule régionale de la forme  $QA = \alpha + \beta \cdot (PA - ETRA)$ . Le domaine d'interpolation est circulaire et centré autour du centre de gravité du bassin versant dont on cherche à déterminer le module. La distance d'une station à une autre est prise comme la distance géographique séparant leurs centres de gravité respectifs.

Au final, cinq modes de calcul (formules ou zonage) sont considérés et appliqués aux deux sources de données climatiques SAFRAN (« **SAF** ») et AURELHY (« **AUR** »). Les performances des méthodes sont appréciées en application sur le jeu de bassins versants complet et en Validation Croisée « **\_VC** » (exclusion tour à tour de chacune des stations de référence et établissement des formules empiriques en l'absence du bassin versant et comparaison entre estimation et observation à la station exclue) sur toutes les méthodes exceptées « **Cemagref 1987** » qui ne comprend pas de calage paramétrique.

Tous les coefficients de détermination ( $R^2$ ) et les écarts-types de l'erreur d'estimation ( $S_{ln}$ ) seront calculés sur les variables transformées par le logarithme népérien :

$$S_{ln} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( (\ln Q_{A_{Obs}} - \ln Q_{A_{Est}}) - (\overline{\ln Q_{A_{Obs}}} - \overline{\ln Q_{A_{Est}}}) \right)^2}$$

Les intervalles de confiance sont calculés à partir des écarts-types exprimés en logarithme, sous hypothèse de normalité des résidus. Nous calculons les intervalles de confiance à 70%, c'est-à-dire qu'il y a une probabilité de 70% pour que la valeur de débit « vraie » soit contenue dans cet intervalle ; les bornes de ces intervalles sont des fonctions de  $Q$  qui correspond à l'estimation issue de la formulation empirique.

L'efficacité de Nash est calculée sur les variables brutes (non transformées). Plus une méthode est performante, plus le critère de Nash et le coefficient de détermination s'approchent de 1 ; les écarts-types s'approchent de zéro et l'intervalle de confiance est centré autour de 1.

Les résultats sont fournies en Figure 8 et en Figure 9. Les codes couleurs renvoient à quatre classes de superficie et permettent de mesurer si un biais lié à la taille du support se manifeste au travers d'une organisation particulière des points selon la couleur. La première bissectrice est représentée. Deux droites définissant un intervalle de  $-B_{inf}$  à  $B_{sup}$  autour de la valeur attendue où :

$$B_{sup}(x) = \exp(1.04 \cdot S_{ln}) \cdot x$$

$$B_{inf}(x) = \exp(-1.04 \cdot S_{ln}) \cdot x$$

avec :  $x$  donné pour un point de la bissectrice

L'examen des figures montre l'efficacité des méthodes : de manière générale, les points s'organisent autour de la première bissectrice avec peu de dispersion. Il ne semble pas qu'il y ait de biais systématique lié à la taille du bassin versant : qu'il soit petit ou grand, l'écart à la valeur de référence semble identique.

Les coefficients des régressions de type 2V s'approchent des valeurs « théoriques » attendues : la constante  $\alpha$  est proche de zéro,  $\beta$  est proche de 1 et  $\eta$  proche de -1. Naturellement, les formules empiriques tendent vers le bilan hydrique. Les écarts aux valeurs théoriques sont acceptables et résultent d'erreur d'estimation des variables de pluie et d'évapotranspiration du fait de la procédure d'interpolation et de la résolution des données ou liée à l'échantillonnage (périodes non strictement concomitantes de calcul des variables hydrologiques et climatiques).  $\eta$  prend la valeur -0.582 ou -0.753 lorsqu'il se rapporte à l'ETP et il prend la valeur -1.42 ou -1.257 lorsque lorsqu'il se rapporte à l'ETR, signe d'une probable surestimation des pertes réelles par évapotranspiration avec l'ETP et d'une sous-estimation avec l'ETR de Turc dans le cadre du schéma théorique de bilan.

Les régressions nationales semblent plus performantes si l'on choisit le couple  $PA$ ,  $ETRA$  comme variables descriptives (modèles 2VR et 2VRs), l' $ETRA$  étant plus pertinent que l' $ETPA$  dans le bilan d'estimation du  $QA$ , car certainement plus cohérent avec les retours à l'atmosphère du bassin. L'étude par Voisinages Glissants offre également de bons résultats pour un domaine d'interpolation de 75 km maximum. En effet, cette valeur correspond à peu près à deux fois la longueur de corrélation du module. Avec une telle valeur, on écarte de la pondération les stations peu corrélées. La formulation du Cemagref de 1987 est en revanche la moins efficace sur notre échantillon de stations.



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



**Visualisation du module calculé par les formulations nationales 2VP, 2VR et 2VRs,  
d'après les données d'AURELHY ou de SAFRAN :**

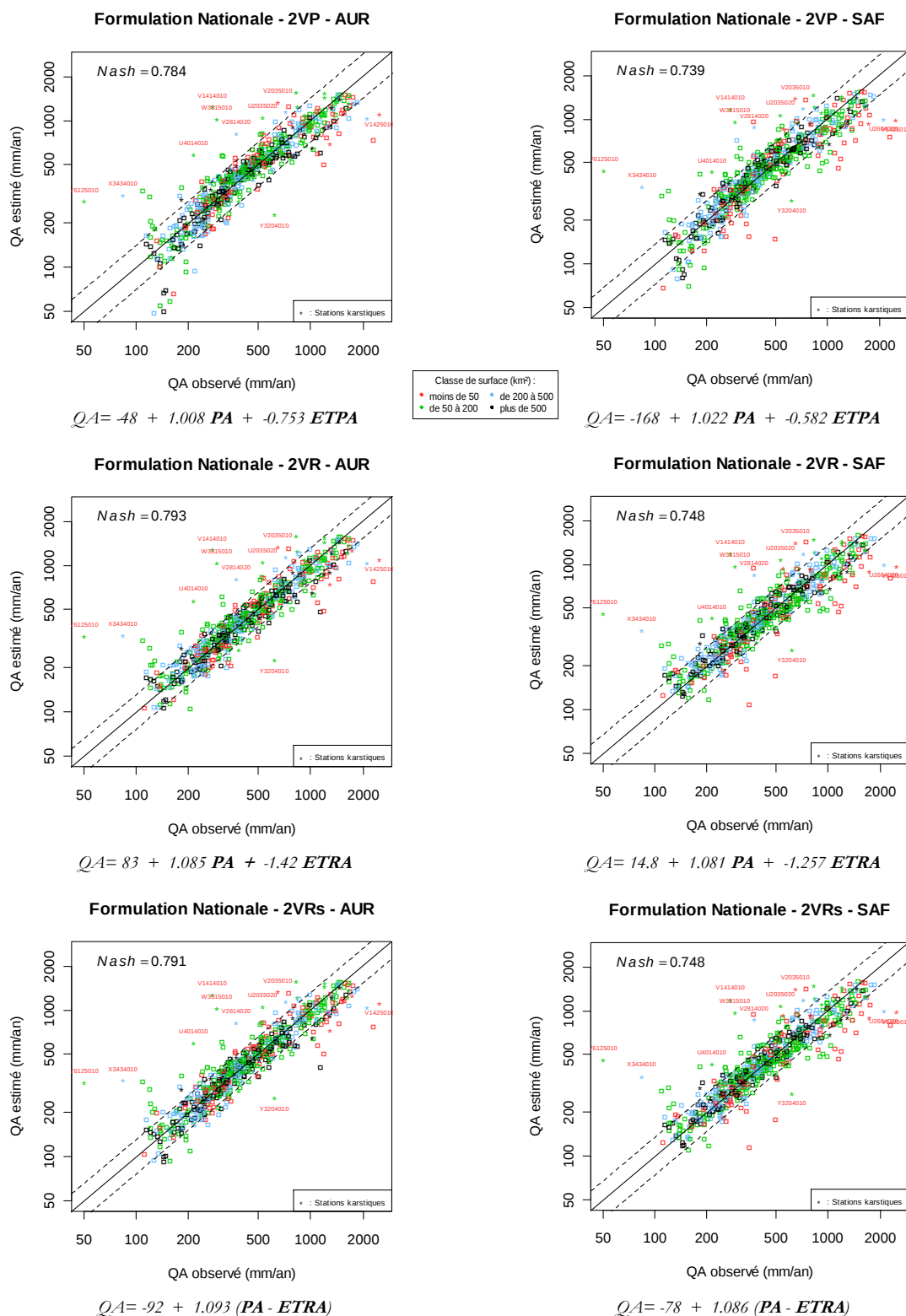


Figure 8 : QA observé et estimé par les trois configurations nationales

**Visualisation du module calculé par la formulation du Cemagref de 1987 et par voisinages glissants d'après les données d'AURELHY ou de SAFRAN :**

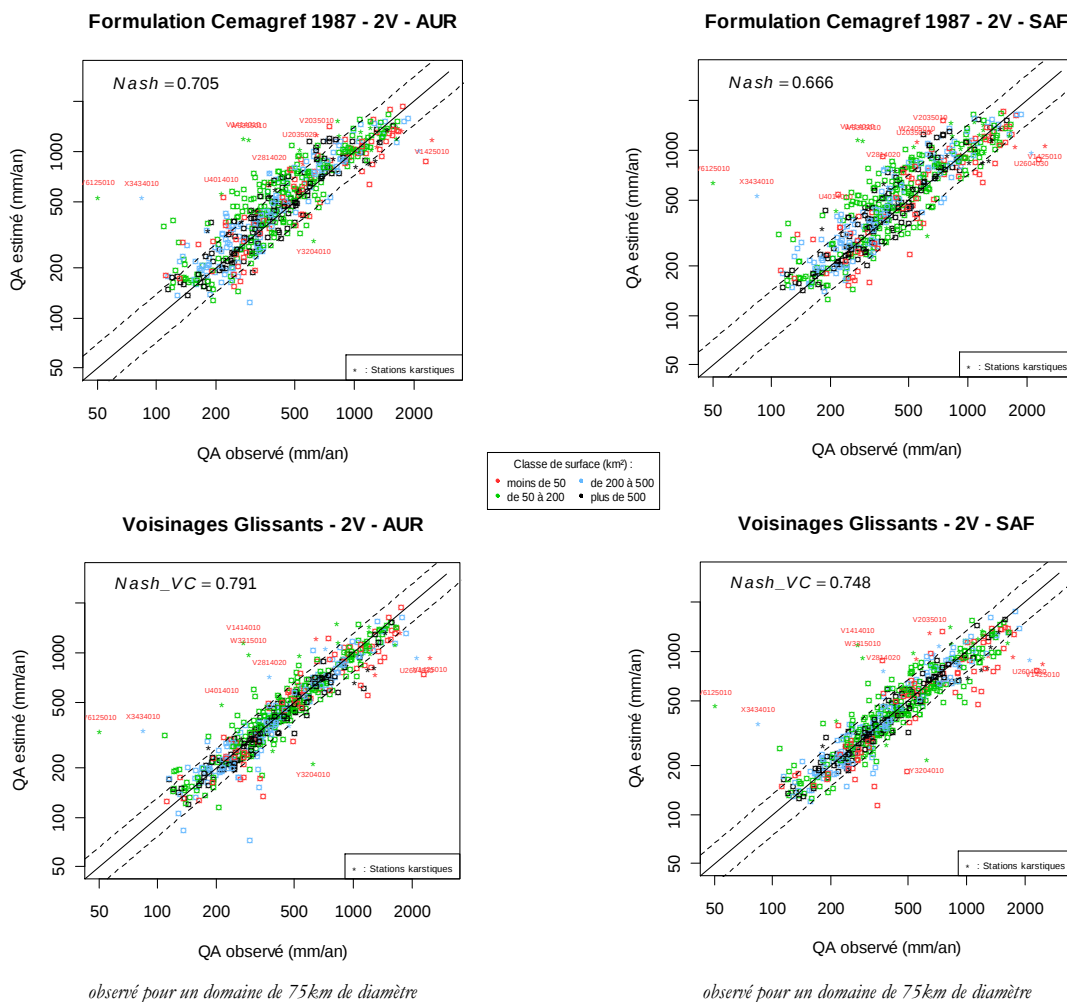


Figure 9 : QA observé et estimé par la formulation du Cemagref 1987, et par Voisinages Glissants

Seul le nom des stations karstiques identifiées d'après les travaux de Sauquet (2005) fortement excentrées est affiché sur les graphiques. L'ensemble de ces stations est repérable par le symbole \*

| <i>Formulation</i>                                            | <i>R<sup>2</sup></i> | <i>R<sup>2</sup></i><br>(Validation<br>Croisée) | <i>Nash</i> | <i>Nash</i><br>(Validation<br>Croisée) | <i>S<sub>ln</sub></i> | <i>IC 70%</i>     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>2VP - Régression nationale</b><br><i>QA ~ PA, ETPA</i>     | 0.776                | 0.757                                           | 0.784       | 0.781                                  | 0.335                 | [ 0.71Q ; 1.42Q ] |
| <b>2VR - Régression nationale</b><br><i>QA ~ PA, ETRA</i>     | 0.846                | 0.845                                           | 0.793       | 0.790                                  | 0.259                 | [ 0.76Q ; 1.31Q ] |
| <b>2VRs - Régression nationale</b><br><i>QA ~ (PA - ETRA)</i> | 0.845                | 0.844                                           | 0.791       | 0.789                                  | 0.260                 | [ 0.76Q ; 1.31Q ] |
| <b>Formulation Cemagref 1987</b>                              | 0.774                | —                                               | 0.705       | —                                      | 0.319                 | [ 0.72Q ; 1.39Q ] |
| <b>Voisinage glissant</b><br>(domaine de 75 km de diamètre)   | —                    | 0.839                                           | —           | 0.791                                  | 0.258                 | [ 0.76Q ; 1.31Q ] |

Tableau 1 : Synthèse des performances statistiques des modèles globaux avec les données d'AURELHY

Les formulations basées sur les données d'AURELHY sont nettement supérieures à celles basées sur SAFRAN, ceci étant dû à la résolution du maillage des données de SAFRAN mal adaptée aux petits bassins versants, ainsi qu'aux zones montagneuses. Dans la suite du document, nous ne conservons que les formulations 2VR et 2VRs exploitant les données AURELHY.

| <i>Formulation</i>                                            | <i>R<sup>2</sup></i> | <i>R<sup>2</sup></i><br>(Validation<br>Croisée) | <i>Nash</i> | <i>Nash</i><br>(Validation<br>Croisée) | <i>S<sub>ln</sub></i> | <i>IC 70%</i>     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>2VP - Régression nationale</b><br><i>QA ~ PA, ETPA</i>     | 0.793                | 0.791                                           | 0.739       | 0.735                                  | 0.305                 | [ 0.73Q ; 1.37Q ] |
| <b>2VR - Régression nationale</b><br><i>QA ~ PA, ETRA</i>     | 0.812                | 0.810                                           | 0.748       | 0.745                                  | 0.284                 | [ 0.74Q ; 1.35Q ] |
| <b>2VRs - Régression nationale</b><br><i>QA ~ (PA - ETRA)</i> | 0.814                | 0.812                                           | 0.748       | 0.745                                  | 0.285                 | [ 0.74Q ; 1.35Q ] |
| <b>Formulation Cemagref 1987</b>                              | 0.750                | —                                               | 0.666       | —                                      | 0.337                 | [ 0.70Q ; 1.42Q ] |
| <b>Voisinage glissant</b><br>(domaine de 75 km de diamètre)   | —                    | 0.765                                           | —           | 0.748                                  | 0.279                 | [ 0.75Q ; 1.34Q ] |

Tableau 2 : Synthèse des performances statistiques des modèles globaux avec les données de SAFRAN

## 4.2 Amélioration des formulations globales

### 4.2.1 Etude sans stations karstiques

Nous avons décidé d'identifier l'impact des stations karstiques sur nos formulations nationales basées sur les données d'AURELHY. Les stations ont été regroupées en classes définies selon la valeur observée du module. Les médianes et écarts-types des erreurs par classe ont été calculées et sont considérées discordantes les stations aux écarts en dehors de l'intervalle [médiane-écart-type ; médiane+écart-type].

Sur le modèle 2VR, l'étude des résidus normalisés en fonction du  $QA$  calculé signale de nombreuses stations discordantes.

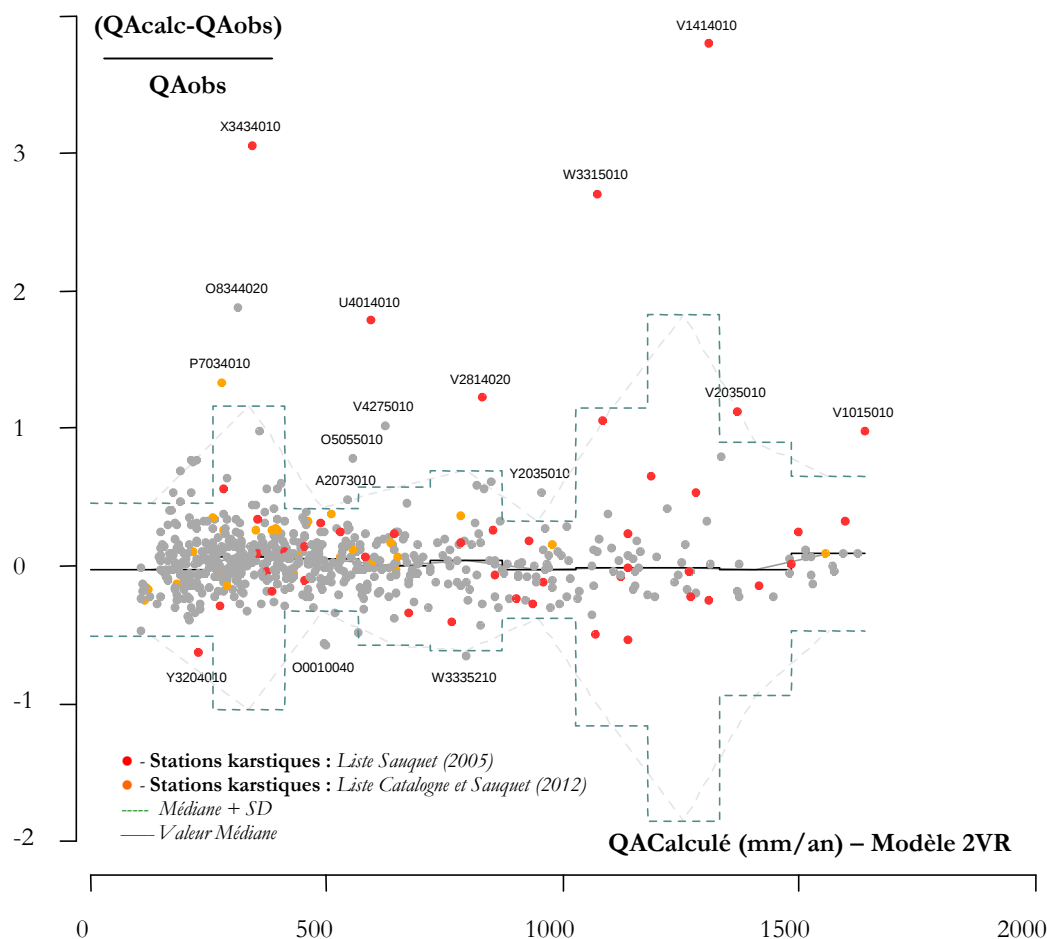


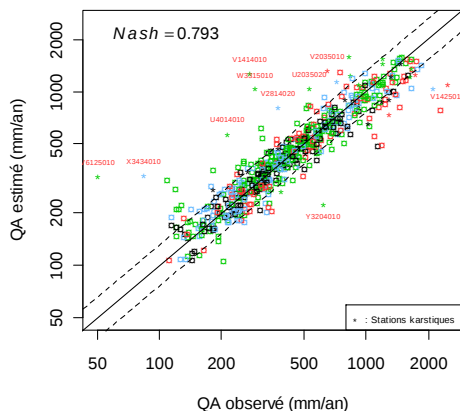
Figure 10 : Résidus normalisés en fonction du  $QA$  calculé sur le modèle 2VR

Les points discordants sont pour la plupart des stations karstiques identifiées par Sauquet (2005) (●), qui s'écartent nettement de la valeur médiane calculée par tranches fixes. Hormis la station P7034010, les stations karstiques listées par Catalogne et Sauquet (2012) (●) semblent plus stables.

Les stations karstiques peuvent perturber l'élaboration des formules empiriques du fait de données climatiques non concordantes avec l'extension du bassin versant hydrogéologique. La mise à l'écart de ces stations karstiques peut sensiblement améliorer les résultats à l'échelle nationale. Par conséquent nous avons choisi de relancer une régression dite « épurée » sans les stations karstiques (●) (soit un nouvel échantillon de 588 stations contre 634 auparavant). L'équation obtenue est ensuite reportée pour validation sur l'échantillon total de stations.

**Visualisation du module calculé par la formulation nationale 2VR,  
avec ou sans stations karstiques, d'après les données d'AURELHY :**

**Formulation Nationale - 2VR - AUR**



**Régression à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

**Régression R : 83 + 1.085 PA + -1.42 ETRA**

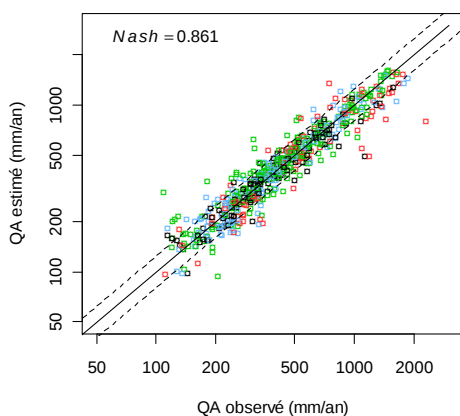
REG\_R

Valid\_Empir : Nash = 0.793

Valid\_Empir : R<sup>2</sup> = 0.846

S\_log (log mm/an) = 0.259

**Formulation Nationale Epurée - 2VR - AUR**



**Régression épurée à l'échelle nationale**

2V - AUR 588 stations

**Régression R : 91 + 1.123 PA + -1.507 ETRA**

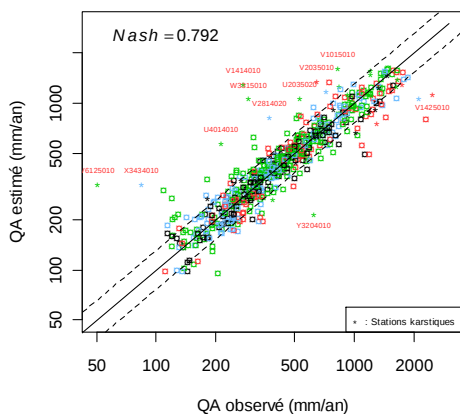
REG\_R

Valid\_Empir : Nash = 0.861

Valid\_Empir : R<sup>2</sup> = 0.891

S\_log (log mm/an) = 0.211

**Formulation Nationale Epurée - 2VR - Reportée - AI**



**Régression épurée reportée à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

**Régression R : 91 + 1.123 PA + -1.507 ETRA**

REG\_R

Validation : Nash = 0.792

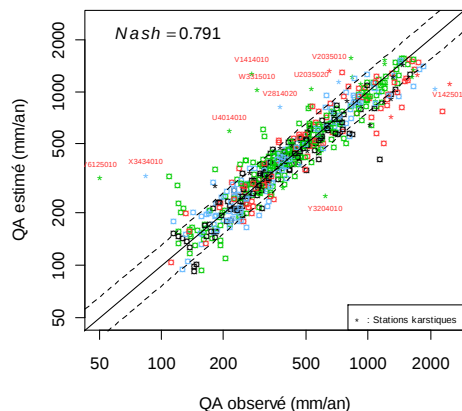
Validation : R<sup>2</sup> = 0.845

S\_log (log mm/an) = 0.261

*Figure 11 : QA observé et estimé avec ou sans la prise en compte des stations karstiques – Modèle 2VR*

**Visualisation du module calculé par la formulation nationale 2VRs,  
avec ou sans stations karstiques, d'après les données d'AURELHY :**

**Formulation Nationale - 2VRs - AUR**



**Régression à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

**Régression Rs :  $-92 + 1.093 (PA - ETRA)$**

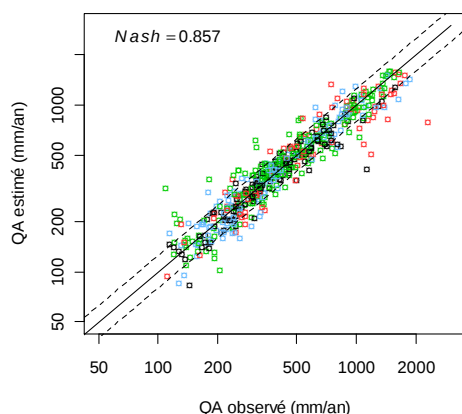
REG\_R

Valid\_Empir : Nash = 0.791

Valid\_Empir :  $R^2$  = 0.845

S\_log (log mm/an) = 0.260

**Formulation Nationale Epurée - 2VRs - AUR**



**Régression épurée à l'échelle nationale**

2V - AUR 588 stations

**Régression Rs :  $-108 + 1.13 (PA - ETRA)$**

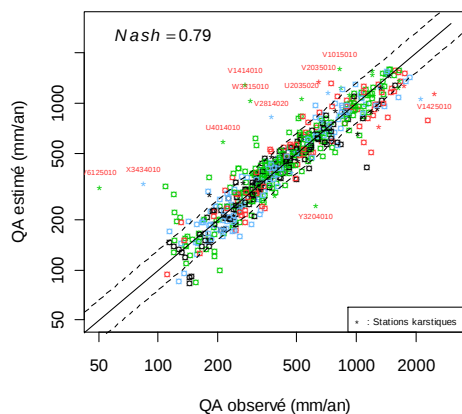
REG\_Rs

Valid\_Empir : Nash = 0.857

Valid\_Empir :  $R^2$  = 0.888

S\_log (log mm/an) = 0.215

**Formulation Nationale Epurée - 2VRs - Reportée - A**



**Régression épurée reportée à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

**Régression Rs :  $-108 + 1.13 (PA - ETRA)$**

REG\_R

Validation : Nash = 0.790

Validation :  $R^2$  = 0.844

S\_log (log mm/an) = 0.264

Figure 12 : QA observé et estimé avec ou sans la prise en compte des stations karstiques – Modèle 2VRs

L'approche sans station karstique permet de définir une nouvelle équation plus performante ( $Nash = 0.861$  contre  $0.793$  initialement par exemple avec 2VR). De plus avec un Nash de  $0.792$ , son report sur l'échantillon complet ne la rend pas obsolète. Elle pourrait ainsi être utilisée d'une manière générale avec la certitude de mieux estimer une station non karstique. Les coefficients de pondération avec ou sans station karstique sont équivalents. Ces faibles écarts résultent d'une proportion faible de stations karstiques dans notre échantillon de référence.

#### 4.2.2 Etude par sous bassin versant

Lorsque des stations d'un même linéaire sont incluses dans l'échantillon, l'information amont est introduite plusieurs fois dans les formules établies. Cette étude propose de différencier chaque bassin en les rendant indépendant les uns des autres.

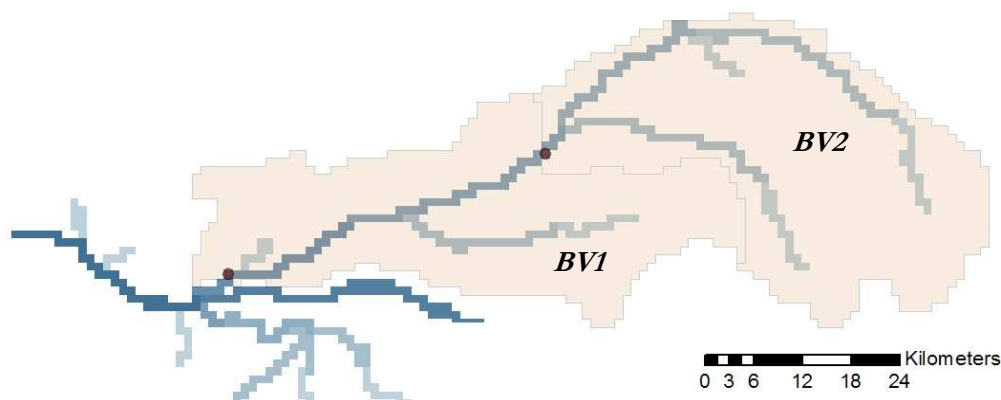


Figure 13 : Schéma de deux bassins emboîtés, BV2 étant situé en amont du BV1

Dans l'exemple ci dessus et jusqu'à présent, le BV1, station aval, englobait le BV2. Son module  $QA$  et l'ensemble de ses variables descriptives étaient calculées sous l'influence de la station amont, le BV2. Afin de s'affranchir des redondances et des sur-représentation des bassins de tête, nous avons décidé de redéfinir des sous bassins versants, notés ssBV.

Le module  $QA$  ainsi que l'ensemble des descripteurs ont été recalculés pour chacun de ces bassins élémentaires. L'équation obtenue, de la forme :  $ssQA = ss\alpha + ss\beta \cdot (ssPA - ssETRA)$  et est ensuite reportée sur les descripteurs initiaux :  $QA = ss\alpha + ss\beta \cdot (PA - ETRA)$ .

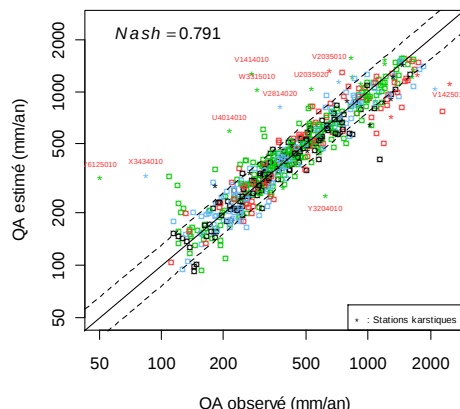
Toutefois dans notre étude sur les 634 bassins versants de référence, nous avons bien plus de bassins indépendants que de bassins emboîtés. Nous avons exclu les valeurs obtenues par sous bassins aberrantes négatives parce que karstiques ou parce les surfaces des sous bassins associés sont très faibles (quelques  $km^2$ ) et amplifient les erreurs d'estimation des débits utilisés dans le calcul. Quatre sous-bassins ont été exclus. Ainsi nous n'observons pas de différences notables entre les variables initiales et celles redéfinies par bassins élémentaires :

- $ssQA$  est très différent de  $QA$ , concernant 47 stations,
- de même pour  $ssPA$  face à  $PA$ , pour 6 stations,
- $ssETRA$  est très largement inférieur à  $ETRA$ , à seulement trois reprises.

ces stations étant identifiées pour un rapport  $ssV / V$  inférieur à  $0.80$  ou supérieur à  $1.25$

**Visualisation du module calculé par la formulation nationale 2VRs, avec prise en charge ou non du recalcul des variables par bassins élémentaires, d'après les données d'AURELHY :**

**Formulation Nationale - 2VRs - AUR**



**Régression à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

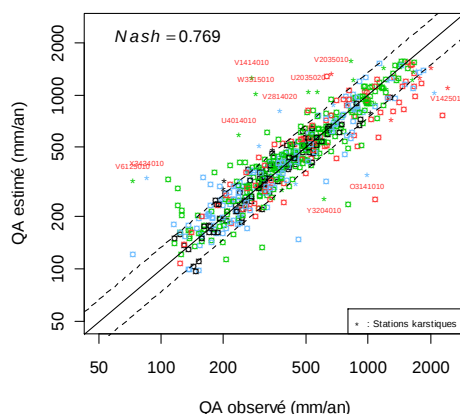
Régression P :  $-48 + 1.008 \text{ PA} + -0.753 \text{ ETPA}$

Régression R :  $83 + 1.085 \text{ PA} + -1.42 \text{ ETRA}$

**Régression Rs :  $-92 + 1.093 (\text{PA} - \text{ETRA})$**

|                                | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|--------------------------------|-------|-------|--------|
| Valid_Empir : Nash =           | 0.784 | 0.793 | 0.791  |
| Valid_Empir : R <sup>2</sup> = | 0.776 | 0.846 | 0.845  |
| S_log (log mm/an) =            | 0.335 | 0.259 | 0.260  |

**Formulation Nationale - 2VRs - AUR**



**Régression par ssBV à l'échelle nationale**

2V - AUR 630 stations

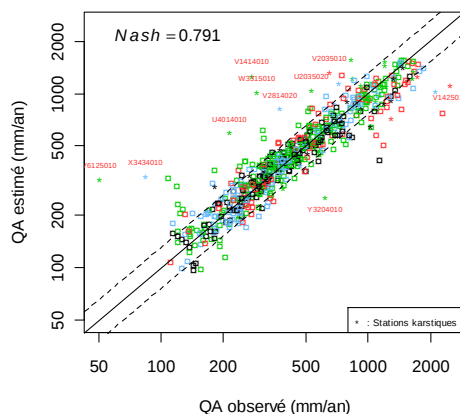
Régression P :  $-153 + 1.02 \text{ ssPA} + -0.61 \text{ ssETPA}$

Régression R :  $-1.8 + 1.08 \text{ ssPA} + -1.25 \text{ ssETRA}$

**Régression Rs :  $-86 + 1.09 (\text{ssPA} - \text{ssETRA})$**

|                                  | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|----------------------------------|-------|-------|--------|
| Construc ssBV : Nash =           | 0.757 | 0.769 | 0.769  |
| Construc ssBV : R <sup>2</sup> = | 0.785 | 0.818 | 0.818  |
| S_log (log mm/an) =              | 0.318 | 0.281 | 0.283  |

**Formulation Nationale - 2VRs - ValidSBV - AUR**



**Régression reportée à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

Régression P :  $-153 + 1.02 \text{ PA} + -0.61 \text{ ETPA}$

Régression R :  $-1.8 + 1.08 \text{ PA} + -1.25 \text{ ETRA}$

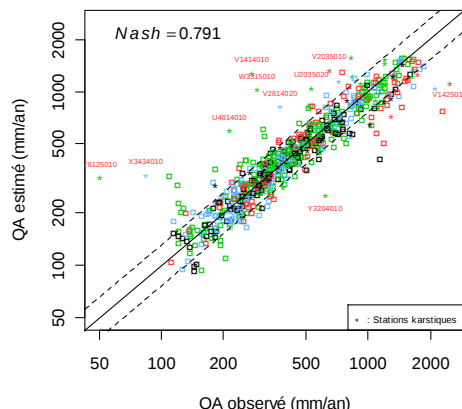
**Régression Rs :  $-86 + 1.09 (\text{PA} - \text{ETRA})$**

|                                  | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|----------------------------------|-------|-------|--------|
| Portage -> BV : Nash =           | 0.783 | 0.793 | 0.791  |
| Portage -> BV : R <sup>2</sup> = | 0.819 | 0.848 | 0.846  |
| S_log (log mm/an) =              | 0.287 | 0.258 | 0.259  |

Figure 14 : QA observé et estimé avec la prise en compte ou non des variables recalculées par sous bassins

**Visualisation du module calculé par la formulation nationale 2VRs, avec prise en charge du recalcul des variables par bassins élémentaires avec ou sans stations karstiques :**

**Formulation Nationale - 2VRs - AUR**



**Régression à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

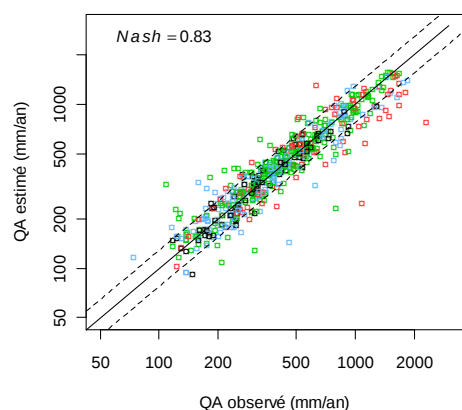
Régression P :  $-48 + 1.008 PA + -0.753 ETPA$

Régression R :  $83 + 1.085 PA + -1.42 ETRA$

**Régression Rs :  $-92 + 1.093 (PA - ETRA)$**

|                                | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|--------------------------------|-------|-------|--------|
| Valid_Empir : Nash =           | 0.784 | 0.793 | 0.791  |
| Valid_Empir : R <sup>2</sup> = | 0.776 | 0.846 | 0.845  |
| S_log (log mm/an) =            | 0.335 | 0.259 | 0.260  |

**Formulation Nationale Epurée - 2VRs - AUR**



**Régression par ssBV épurée à l'échelle nationale**

2V - AUR 584 stations

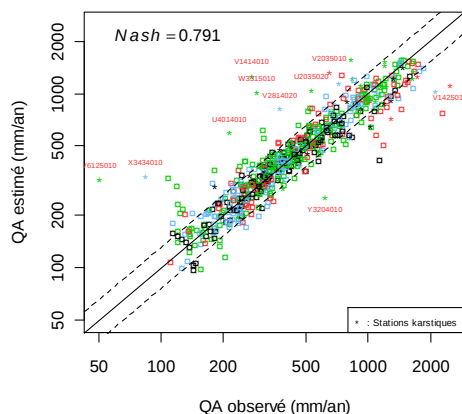
Régression P :  $-155 + 1.039 ssPA + -0.632 ssETPA$

Régression R :  $-2.6 + 1.108 ssPA + -1.288 ssETRA$

**Régression Rs :  $-96 + 1.112 (ssPA - ssETRA)$**

|                                | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|--------------------------------|-------|-------|--------|
| Valid_Empir : Nash =           | 0.816 | 0.831 | 0.830  |
| Valid_Empir : R <sup>2</sup> = | 0.810 | 0.859 | 0.859  |
| S_log (log mm/an) =            | 0.298 | 0.243 | 0.243  |

**Formulation Nationale - 2VRs - ValidSBV - AUR**



**Régression reportée à l'échelle nationale**

2V - AUR 634 stations

Régression P :  $-155 + 1.039 PA + -0.632 ETPA$

Régression R :  $-2.6 + 1.108 PA + -1.288 ETRA$

**Régression Rs :  $-96 + 1.112 (PA - ETRA)$**

|                                  | REG_P | REG_R | REG_Rs |
|----------------------------------|-------|-------|--------|
| Portage -> BV : Nash =           | 0.783 | 0.793 | 0.791  |
| Portage -> BV : R <sup>2</sup> = | 0.813 | 0.847 | 0.845  |
| S_log (log mm/an) =              | 0.297 | 0.259 | 0.261  |

Figure 15 : QA observé et estimé avec la prise en compte ou non des variables recalculées par sous bassins – sans karst

Les coefficients de nos trois configurations de régressions nationales 2VP, 2VR et 2VRs sont assez cohérents. Lorsque  $PA$  et  $ETPA$ , ou  $PA$  et  $ETRA$  sont indépendants (respectivement 2VRP ou 2VR), les coefficients sont ajustés librement mais se rapprochent toujours du bilan hydrique autour du  $QA$ . Ainsi  $PA$  se voit attribuer un facteur multiplicateur compris entre 1.01 et 1.12,  $ETPA$  obtient un coefficient négatif légèrement surestimé de  $-0.61$  à  $-0.75$ , et  $ETRA$  présente un coefficient légèrement sous-timée de  $-1.25$  à  $-1.51$ , si on se réfère à la valeur  $-1$ .

Afin de mieux cerner les apports des différentes améliorations, nous effectuons une synthèse des performances statistiques sur le modèle 2VRs :  $QA = \alpha + \beta \cdot (PA - ETRA)$

| <b>2VRs - Régression nationale</b><br><i>Données d'AURELHY</i> |                                                  | <b><i>n</i></b> | <b><i>R</i><sup>2</sup></b> | <b><i>Nash</i></b> | <b><i>S<sub>ln</sub></i></b> | <b><i>IC 70%</i></b> |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|
| <b>1</b>                                                       | <b>Formulation Initiale</b>                      | 634             | 0.845                       | 0.791              | 0.260                        | [ 0.76Q ; 1.31Q ]    |
| <b>1k</b>                                                      | <b>Formulation sans stations karstiques</b>      | 588             | 0.888                       | 0.857              | 0.215                        | [ 0.80Q ; 1.25Q ]    |
|                                                                | <b>&gt; VALIDATION</b>                           | 634             | 0.844                       | 0.790              | 0.264                        | [ 0.76Q ; 1.32Q ]    |
| <b>2</b>                                                       | <b>Formulation ssBV</b>                          | 630             | 0.818                       | 0.769              | 0.283                        | [ 0.75Q ; 1.34Q ]    |
|                                                                | <b>&gt; VALIDATION</b>                           | 634             | 0.846                       | 0.791              | 0.259                        | [ 0.76Q ; 1.31Q ]    |
| <b>2k</b>                                                      | <b>Formulation ssBV sans stations karstiques</b> | 584             | 0.859                       | 0.830              | 0.243                        | [ 0.78Q ; 1.29Q ]    |
|                                                                | <b>&gt; VALIDATION</b>                           | 634             | 0.845                       | 0.791              | 0.261                        | [ 0.76Q ; 1.31Q ]    |

Tableau 3 : Synthèse des performances statistiques des modèles globaux améliorés (*n* : nombre de stations étudiées)

Comme nous avons pu l'interpréter précédemment, la reformulation du modèle 2VRs sans les stations karstiques permet d'améliorer sensiblement les performances sur un jeu de 588 stations. Mais le report de cette équation sur l'échantillon total (634 sites), ne provoque pas de changements significatifs. Ainsi il serait tout à fait possible d'employer la formulation (1k) dans les régions françaises non concernées par un environnement karstique :  $-92 + 1.093 (PA - ETRA)$

D'une manière similaire, la formulation par sous bassins versants (2), bien que plus incertaine sur les 630 bassins élémentaires, ne diffère pas de la formulation initiale une fois reportée sur les 634 stations. La même opération réalisée sans les stations karstiques (2k) aboutit aux mêmes observations. Ces deux formulations étant tributaires de la bonne connaissance des contours de bassin versant, elles n'ont pas été retenues.

### 4.3 Découpage régional

Afin d'améliorer nos estimations, nous choisissons de réaliser une formulation propre à une région donnée. Les hydro-écorégions (HER) définies par Wasson *et al.* (2001) permettent de délimiter 22 régions relativement homogènes en termes de climatologie et de géologie.

Afin de proposer par la suite des régressions robustes, nous avons regroupé certaines régions, constituant au final 15 entités incluant au minimum 11 stations, par exemple la HERm 11 « Coteaux Aquitains » (Figure 16) (HERm pour HER dont les contours ont été modifiés). Nous choisissons également de pondérer les formulations empiriques selon la proportion de superficie d'un bassin inclus dans telle ou telle HERm. Les résidus issus des régressions ont donc un poids relativement réduit au niveau des frontières régionales.

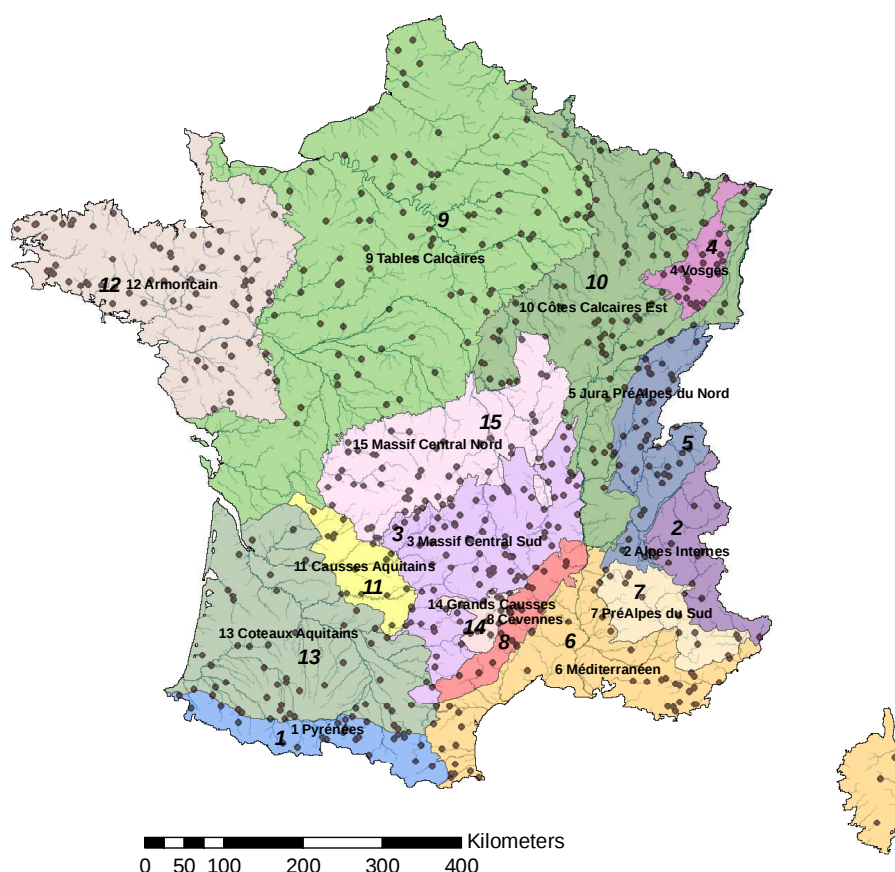


Figure 16 : Présentation des HER définies par Wasson et al. (2001) modifiées dans le cadre de notre étude (HERm).

Les ajustements régionaux qui vont suivre (Figure 17, colonne HER) sont basés sur le modèle 2VRs :  $QA = \alpha + \beta \cdot (PA - ETRA)$  avec  $PA$  et  $ETRA$  définis selon les données d'AURELHY. Ce modèle a en effet une seule variable explicative, tout en conservant des performances voisines de celles avec deux variables. Le mode d'acquisition des variables n'est pas indexé sur les bassins élémentaires, et aucune station karstique n'est écartée. A titre de comparaison, les résultats issus de la régression nationale 2VRs sont présentés pour chacune des régions (Figure 17, colonne NAT).

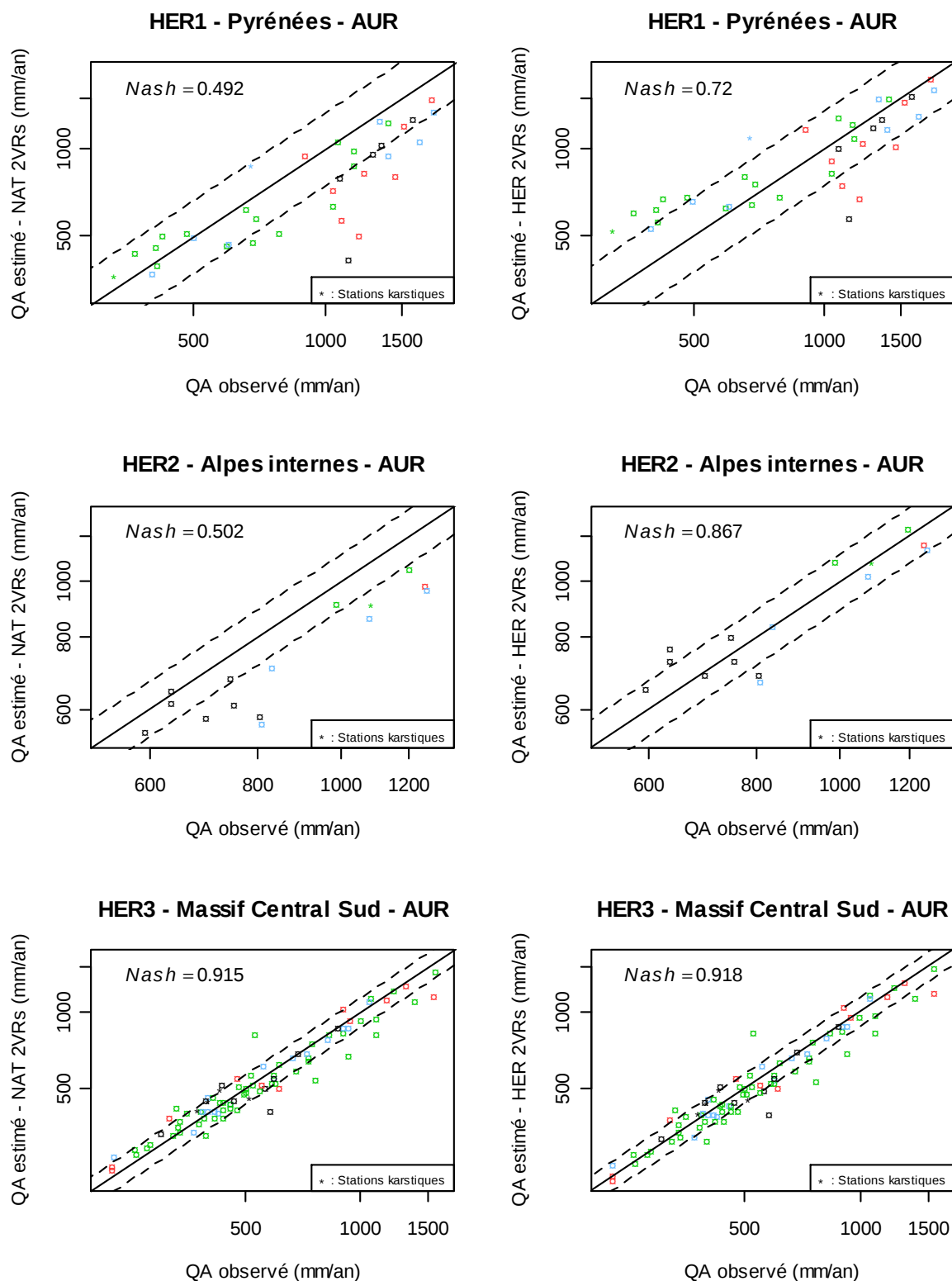


Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion modifiée  
gauche : modèle national, droite : décliné par HERm

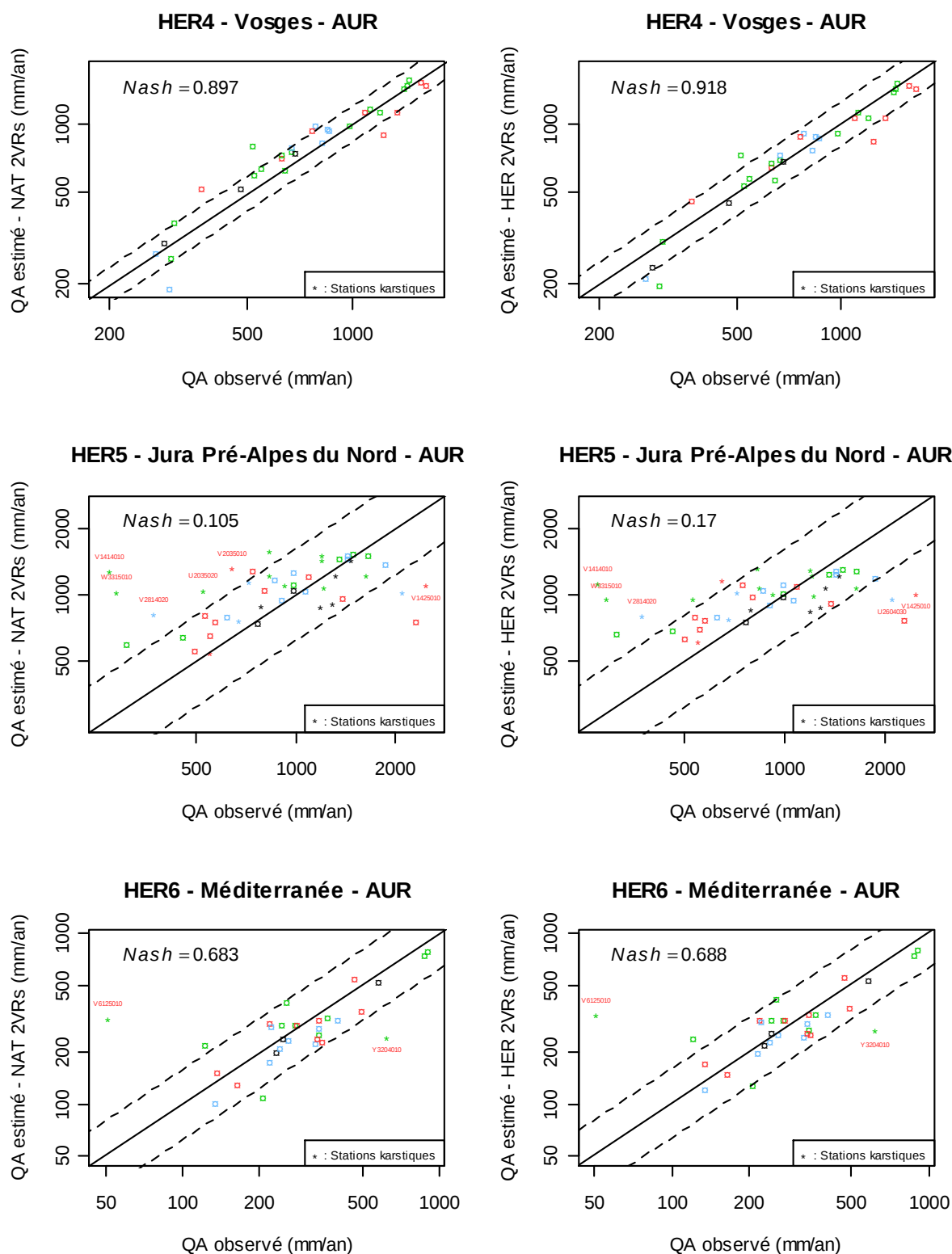


Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion modifiée  
gauche : modèle national, droite : décliné par HERm

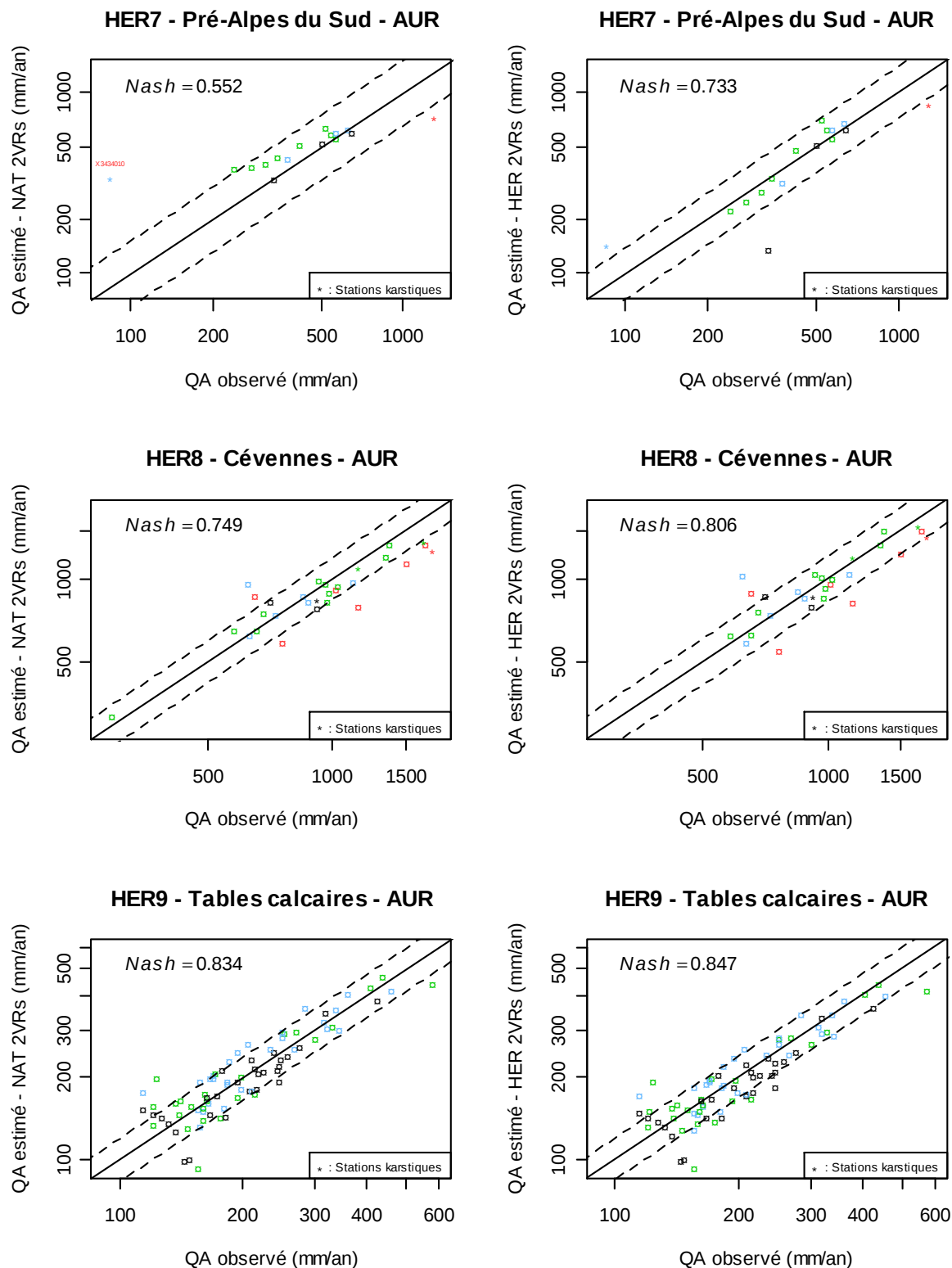


Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion

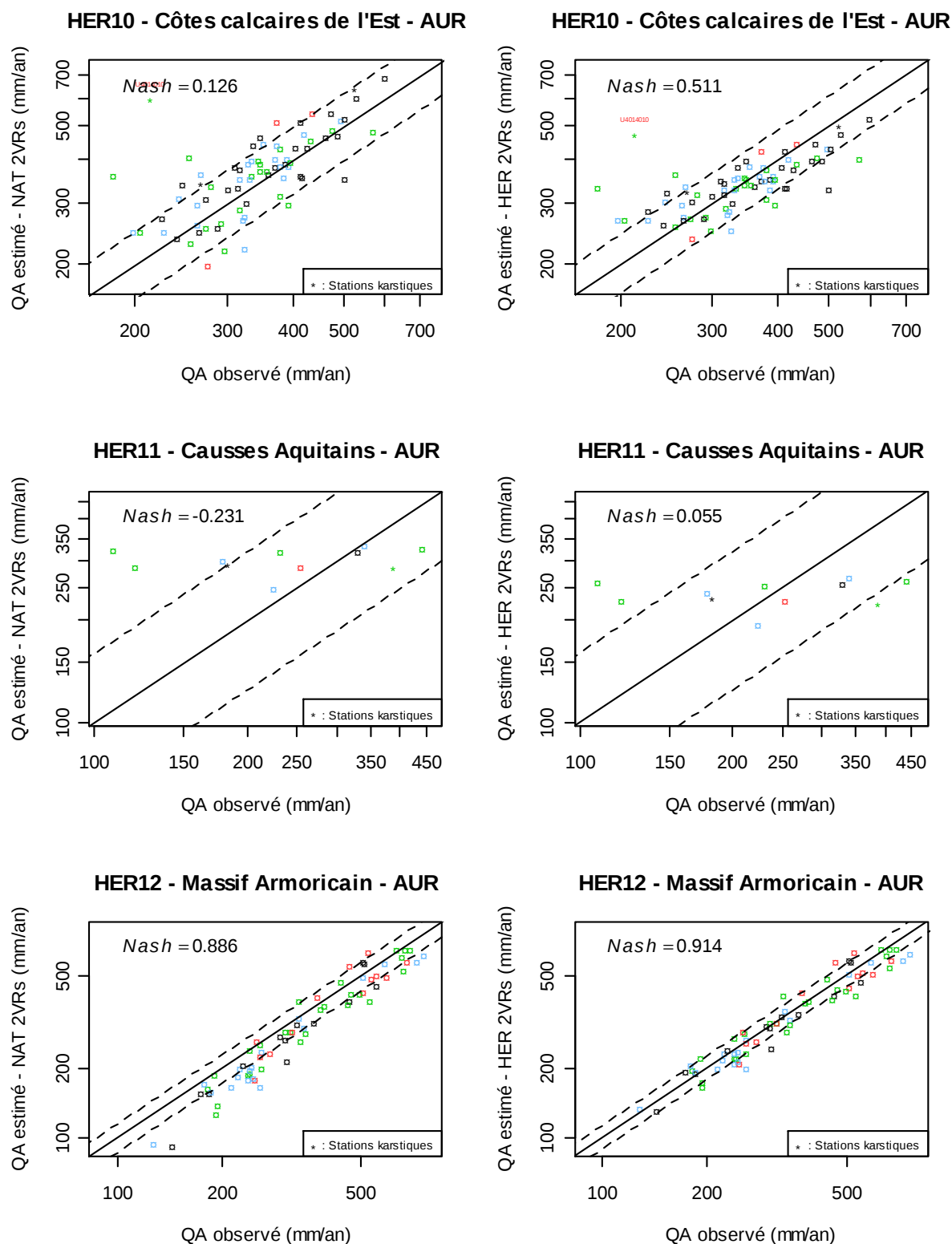


Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion modifiée  
gauche : modèle national, droite : décliné par HERm

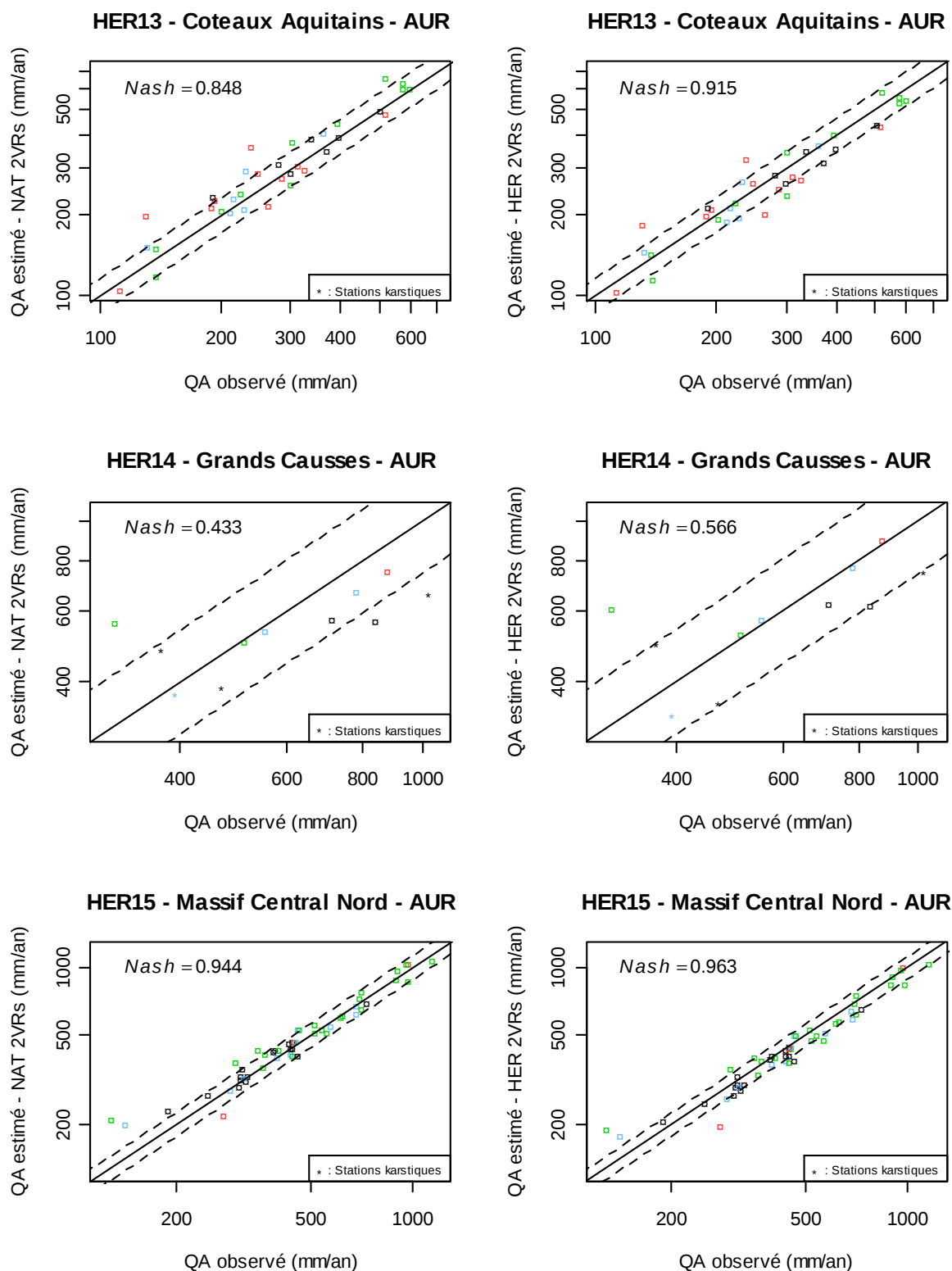


Figure 17 : Modules observés et calculés par la formule ajustée pour chaque hydro-écorégion modifiée  
gauche : modèle national, droite : décliné par HERm

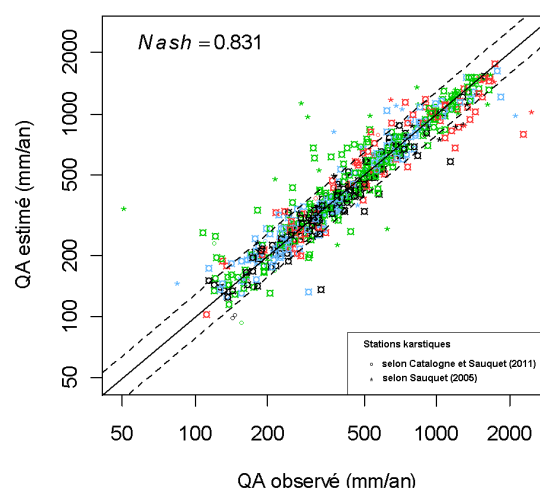
Les résultats détaillés par HERm sont décrits dans les documents suivants :

Tableau 4 : Formules empiriques ajustées pour la détermination du QA et statistiques de performance des formulations régionales ajustées sur les hydro-écorégions modifiées de niveau 1 (N : nombre de stations dans la région) avec P : Pluie Annuelle et ET : EvapoTranspiration Réelle Annuelle de Turc avec les données d'AURELHY

| Hydro-écorégion modifiée      | N  | Formule empirique             | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> (VC) | Nash | Nash (VC) | IC 70%            |
|-------------------------------|----|-------------------------------|----------------|---------------------|------|-----------|-------------------|
| 1 - Pyrénées                  | 37 | $15.3 + 1.219 \cdot (P - ET)$ | 0.69           | 0.65                | 0.72 | 0.69      | [ 0.74Q ; 1.35Q ] |
| 2 - Alpes internes            | 15 | $-97 + 1.278 \cdot (P - ET)$  | 0.83           | 0.78                | 0.87 | 0.82      | [ 0.90Q ; 1.12Q ] |
| 3 - Massif Central Sud        | 90 | $-134 + 1.16 \cdot (P - ET)$  | 0.93           | 0.92                | 0.92 | 0.91      | [ 0.88Q ; 1.14Q ] |
| 4 - Vosges                    | 32 | $-160 + 1.10 \cdot (P - ET)$  | 0.89           | 0.86                | 0.92 | 0.91      | [ 0.80Q ; 1.25Q ] |
| 5 - Jura Pré-Alpes du Nord    | 47 | $195 + 0.75 \cdot (P - ET)$   | 0.24           | 0.17                | 0.17 | 0.11      | [ 0.62Q ; 1.62Q ] |
| 6 - Méditerranée              | 31 | $-70 + 1.088 \cdot (P - ET)$  | 0.41           | 0.38                | 0.69 | 0.65      | [ 0.62Q ; 1.60Q ] |
| 7 - Pré-Alpes du Sud          | 16 | $-664 + 2.04 \cdot (P - ET)$  | 0.73           | 0.57                | 0.73 | 0.53      | [ 0.72Q ; 1.39Q ] |
| 8 - Cévennes                  | 29 | $-331 + 1.40 \cdot (P - ET)$  | 0.79           | 0.77                | 0.81 | 0.78      | [ 0.82Q ; 1.21Q ] |
| 9 - Tables calcaires          | 81 | $-80 + 1.02 \cdot (P - ET)$   | 0.78           | 0.77                | 0.85 | 0.83      | [ 0.84Q ; 1.19Q ] |
| 10 - Côtes calcaires de l'Est | 77 | $70 + 0.646 \cdot (P - ET)$   | 0.46           | 0.43                | 0.51 | 0.48      | [ 0.82Q ; 1.22Q ] |
| 11 - Causses Aquitains        | 11 | $-101 + 0.95 \cdot (P - ET)$  | 0.03           | 0.24                | 0.05 | -0.40     | [ 0.62Q ; 1.60Q ] |
| 12 - Massif Armoricain        | 70 | $-40 + 1.03 \cdot (P - ET)$   | 0.94           | 0.93                | 0.91 | 0.91      | [ 0.89Q ; 1.12Q ] |
| 13 - Coteaux Aquitains        | 35 | $-68 + 0.95 \cdot (P - ET)$   | 0.90           | 0.89                | 0.92 | 0.90      | [ 0.86Q ; 1.16Q ] |
| 14 - Grands Causses           | 11 | $-362 + 1.62 \cdot (P - ET)$  | 0.47           | 0.35                | 0.57 | 0.41      | [ 0.74Q ; 1.35Q ] |
| 15 - Massif Central Nord      | 52 | $-106 + 1.07 \cdot (P - ET)$  | 0.94           | 0.94                | 0.96 | 0.96      | [ 0.89Q ; 1.12Q ] |

Synthèse globale et représentation graphique des valeurs ajustées (VC : Validation Croisée) :

|                             | 2VRs Nationale    | 2VRs par HERm     |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| R <sup>2</sup>              | 0.845             | 0.873             |
| R <sup>2</sup> (VC)         | 0.844             | 0.855             |
| Nash                        | 0.791             | 0.831             |
| Nash (VC)                   | 0.789             | 0.813             |
| S <sub>ln</sub> (log mm/an) | 0.260             | 0.236             |
| IC 70%                      | [ 0.76Q ; 1.31Q ] | [ 0.78Q ; 1.28Q ] |



L'utilisation de formules régionalisées permet d'améliorer grandement les estimations dans certains secteurs à forte variation du relief : les Alpes du Nord, les PréAlpes du Sud, les Cévennes et les Pyrénées ou au sein de régions atypiques par rapport à la moyenne nationale comme les Grands Causses (morphologie tabulaire souvent karstique).

Mais dans l'ensemble certaines régions mal représentées en stations de mesure (Grands Causses et Causses Aquitains) ou assujetties à des sites atypiques (stations karstiques dans la région du Jura et des

PréAlpes du Nord) sont très mal estimées (Figure 18). On note également la région des « Cotes Calcaires de l'Est » composite puisque incluant les HER originelles « Plaine de Saône » et « Alsace ». Ce regroupement de trois entités, pas forcément homogènes, en une génère une formulation hasardeuse qui s'adapte assez mal aux variations géologiques et climatologiques que celle ci contient.

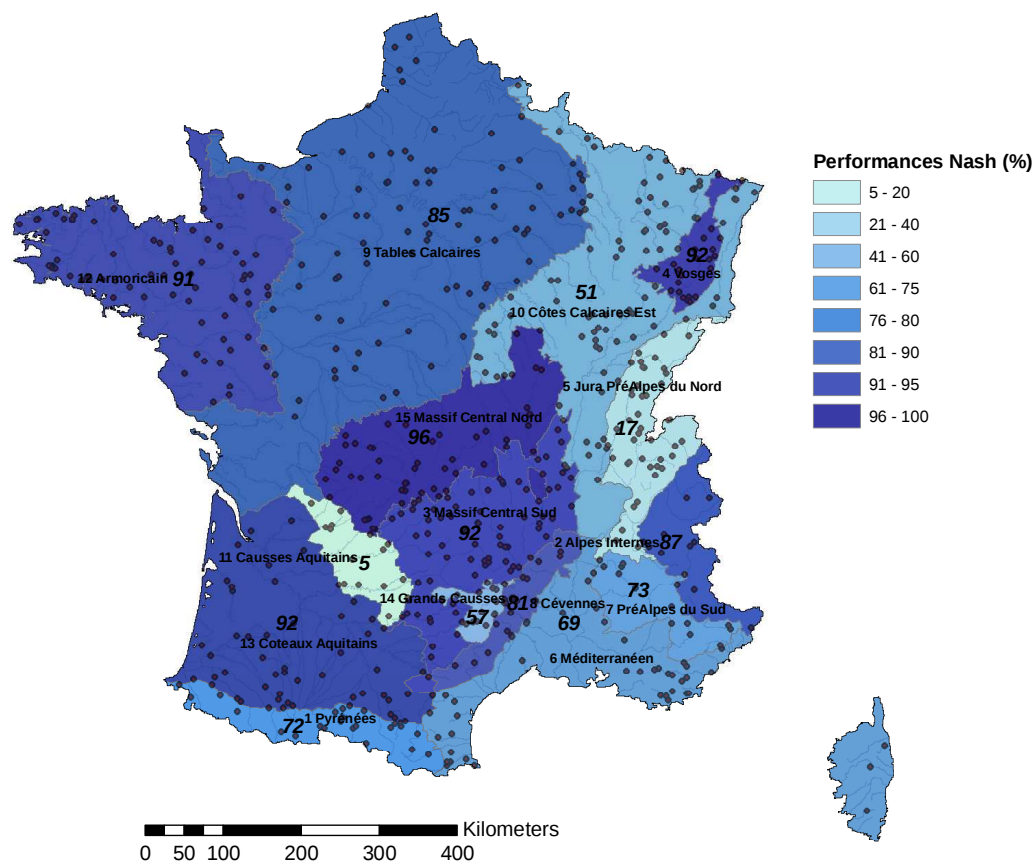


Figure 18 : Cartographie des performances statistiques (Nash) des formulations ajustées par hydro-écorégion modifiée

Pour l'heure, l'utilisation de cette méthodologie peut être entreprise pour une grande majorité de la zone d'étude. Ailleurs, le modèle national pourra tout à fait convenir malgré des interrogations concernant les massifs karstifiés ou à fonctionnement hydrologique complexe.

## 5 Apport du krigage

### 5.1 Application au module

Le module  $QA$  est reconstitué selon la technique du krigage et d'après l'information observée aux 634 stations étudiées. Nous avons choisi pour cela d'ajuster un variogramme de type exponentiel (Figure 19) :

$$\gamma(d) = \gamma_0 + (\gamma_\infty - \gamma_0) \left( 1 - \exp\left(-\frac{d}{b}\right) \right)$$

où  $d$  est la distance entre bassins, avec les paramètres descriptifs suivants : la pépité  $\gamma_0$ , le palier  $\gamma_\infty$  et la portée  $b$ . La distance entre les bassins correspond à celle calculée entre leurs différents centres de gravité.

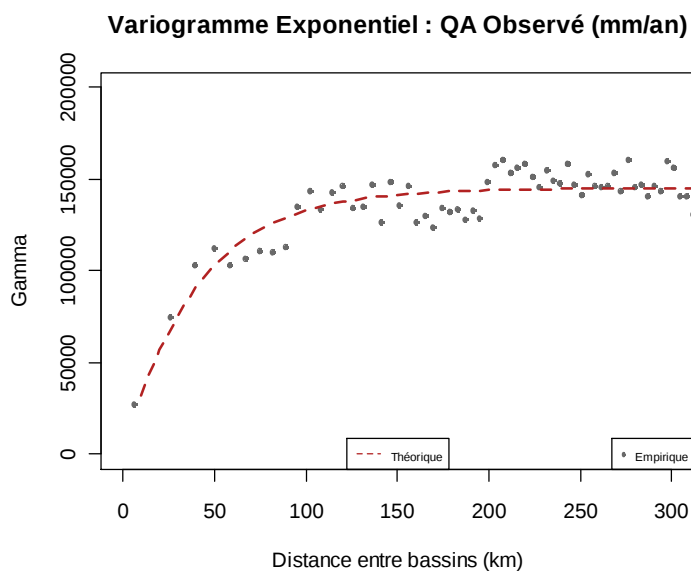


Figure 19 : Variogramme théorique ajusté sur le  $QA$  (Palier : 145 000  $mm^2$  ; pépité : 0 ; portée : 40 km : variogramme théorique ajusté de manière à ré estimer convenablement les valeurs empiriques sur les 100 premiers kilomètres)

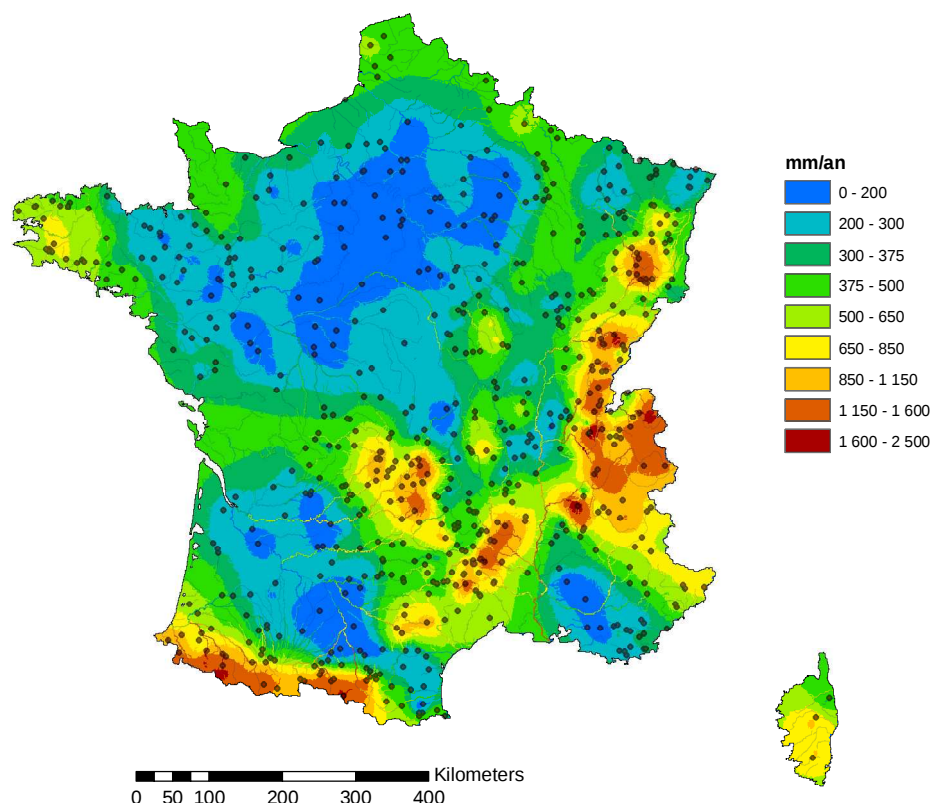


Figure 20 : Cartographie du module par krigeage (palier : 145 000 mm<sup>2</sup> ; pépité : 0 ; portée : 40 km)

Le krigeage du module  $QA$  semble cohérent et voisin de la cartographie des pluies annuelles (Figure 4), malgré la présence de certaines zones incertaines :

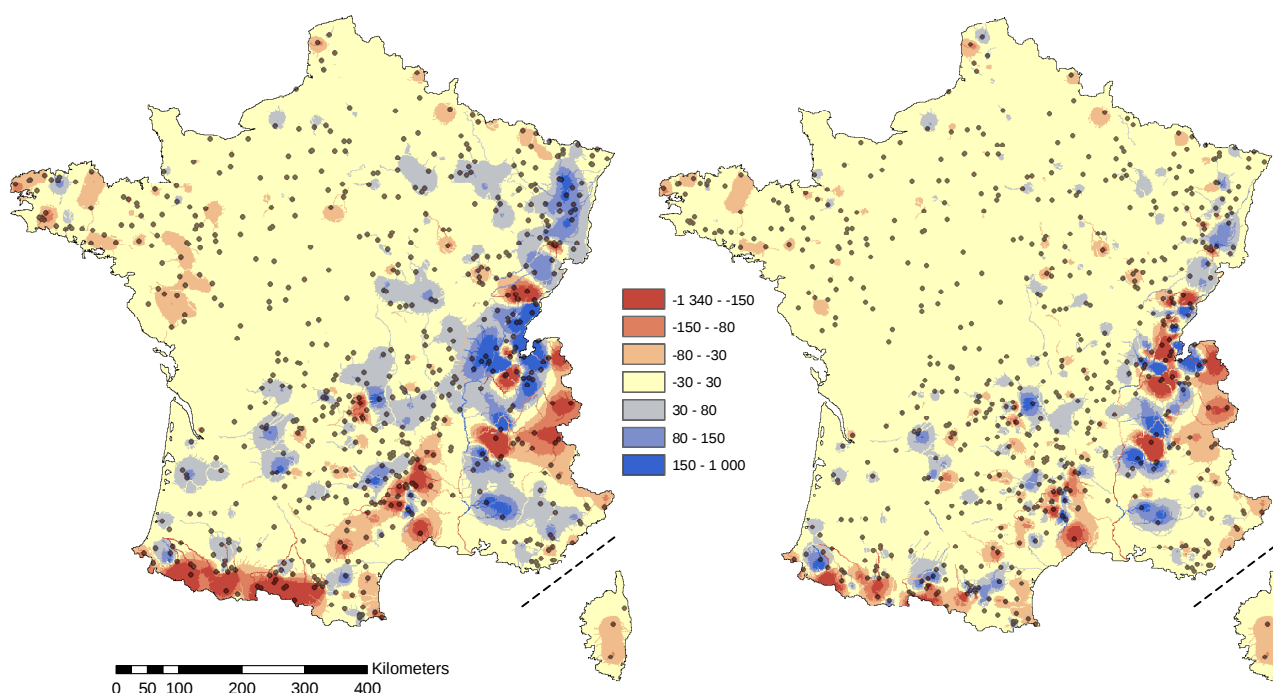
- en Charente Maritime où l'absence de sites de mesure contraint le krigeage à extrapoler ce qu'il se produit plus à l'Est ;
- en Corse, les trois stations ne permettent pas de représenter finement les écoulements à l'échelle du relief.

## 5.2 Application aux résidus des régressions empiriques sur le module

Une autre option d'application du krigeage est d'interpoler la part non expliquée par les régressions empiriques, c'est-à-dire les résidus (ou erreurs) entre le module observé et son homologue calculé par les régressions empiriques.

Nous choisissons premièrement de nous focaliser sur les résidus issus du modèle national 2VRs établi avec les pluies d'AURELHY (voir §3.1), pour lequel les performances statistiques sont correctes, et où les variables explicatives nécessaires sont facilement accessibles.

**Phase 1 :** Après l'ajustement d'un nouveau variogramme théorique de type exponentiel, l'estimation de l'erreur du modèle de régression représentée par la formule  $QA_{Estimé} - QA_{Observé}$ , est interpolée en tout point du domaine (Figure 21 – 1 – Résidus déterminés par les régressions empiriques).



**Résidus déterminés par les régressions empiriques (1)**

**Résidus déterminés après Validation Croisée (2)**

*Figure 21 : Cartographie des résidus issus du modèle national 2VRs d'après les pluies d'AURELHY*

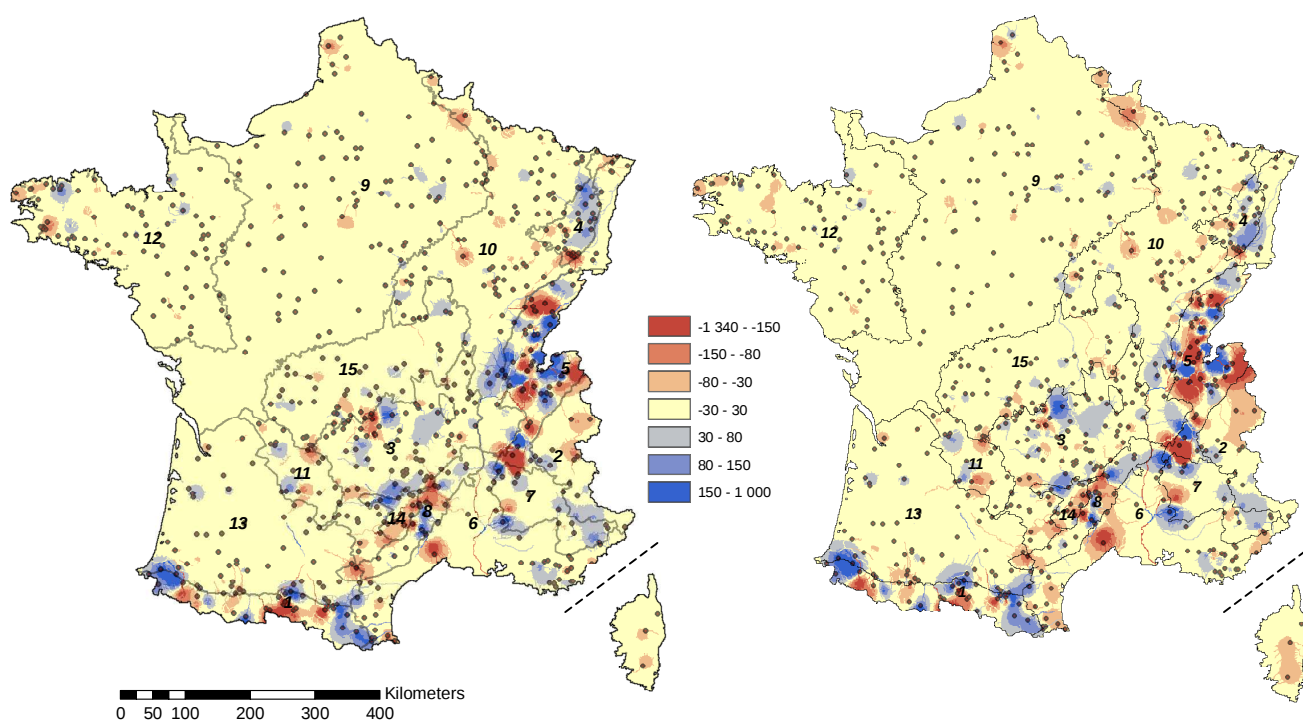
**Phase 2 :** Les paramètres d'ajustement du variogramme : palier : 34.000 mm<sup>2</sup> ; pépité : 0 ; portée : 15 km sont exploités en phase de Validation Croisée (Annexe 1). Lors du processus de Validation Croisée, chaque station est tour à tour exclut. Une régression Reg\_VC est établie en l'absence de cette station (il y a autant de régressions Reg\_VC que de stations). Une estimation est fournie en ce point et les résidus sont établis en tout point. Une interpolation est faite au point exclu par krigeage. On peut ensuite comparer le résidu déterminé par la régression Reg\_VC à celui obtenu par interpolation. Avec ces seuls paramètres, notre programme reconstitue en chaque point exclu tour à tour le résidu en fonction des valeurs observées aux stations voisines par krigeage. Cette deuxième opération est réalisée sur l'ensemble des stations de la zone d'étude.

**Phase 3 :** Nous soustrayons ces derniers résidus au  $QA_{Estimé}$  déterminé empiriquement afin d'obtenir le  $QA_{EstimVC}$  par Validation Croisée.

Nous pouvons vérifier en Validation Croisée (Figure 21 – 2 – Résidus déterminés après Validation Croisée) la persistance ou non de spécificités régionales pour les résidus (à gauche : carte des résidus intégrant toutes les valeurs ; à droite : carte des estimations des résidus obtenus à l'issue de la Validation Croisée). De manière générale les anomalies les plus marquées sont conservées. De grands ensembles comme les Pyrénées sont par exemple sous estimés par notre formulation (ils sont en réalité plus productifs que prévu). Cet ensemble réapparaît clairement lors de la phase de Validation Croisée. C'est également le cas pour les Cévennes, les Vosges, ou le Jura, et un peu plus confus concernant les Alpes (à cause notamment de la perturbation de certains sites très karstifiés comme les stations V1414010 et W3315010).

A ce stade, la persistance de spécificités régionales est avérée mais non optimale. Nous nous basons en effet sur le modèle de régression le plus simpliste.

Nous réalisons la même opération sur les résidus issus du modèle 2VRs par HERm d'après les pluies d'AURELHY (voir §3.3), nous obtenons les deux cartes suivantes :



**Résidus déterminés par les régressions empiriques (1)**

**Résidus déterminés après Validation Croisée (2)**

*Figure 22 : Cartographie des résidus issus du modèle 2VRs par HERm d'après les pluies d'AURELHY*

Les paramètres d'ajustement du variogramme : palier : 29.000 mm<sup>2</sup> ; pépite : 0 ; portée : 10 km sont reportés en phase de Validation Croisée (Annexe 1). Mais pour cette seconde approche les valeurs fortes (en valeur absolue) des résidus sont plus isolés ; du fait d'une meilleure adéquation des formulations à l'échelle régionale, les écarts sont plus faibles (Figure 22). Leur regroupement au sein d'entités régionales telles que les Pyrénées ou les Alpes est limité à des zones plus restreintes.

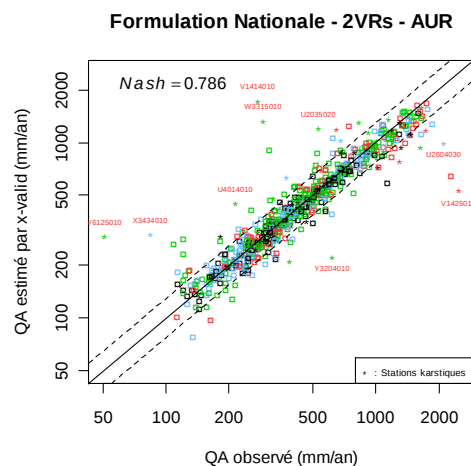
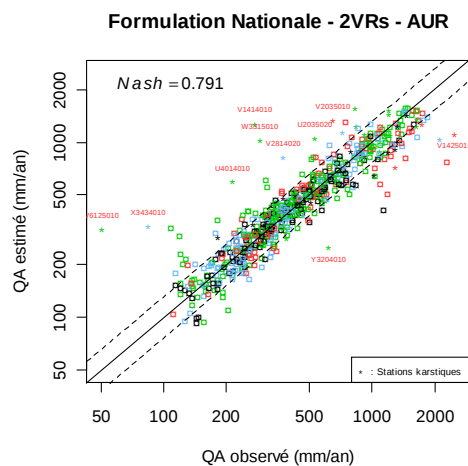
### 5.3 Comparaison des performances après correction par les résidus krigés

Nous choisissons de vérifier le gain éventuel de performances après krigeage des résidus en Validation Croisée, opposée au modèle initial empirique. Nous comparons en un premier temps l'apport de cette technique sur le modèle national 2VRs (rappel des valeurs obtenues plus haut contenues dans Tableau 3).

Tableau 5 : Optimisation de la formulation nationale 2VRs après recalcul des résidus en Validation Croisée

1 -  $QA_{Estimé}$  obtenu par les régressions empiriques  
d'après le modèle 2VRS par HERm

2 -  $QA$  recalculé après krigeage en Validation  
Croisée



| Modèle / Technique | $R^2$ | Nash  | $S_{In}$ | IC 70%            |
|--------------------|-------|-------|----------|-------------------|
| 2VRs               | 0.845 | 0.791 | 0.260    | [ 0.76Q ; 1.31Q ] |
| 2VRs + krigeage    | 0.862 | 0.786 | 0.246    | [ 0.78Q ; 1.29Q ] |

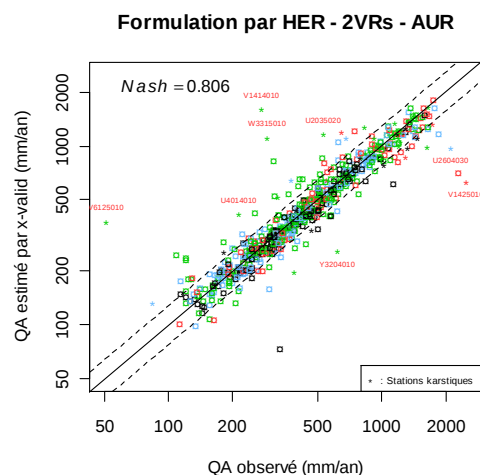
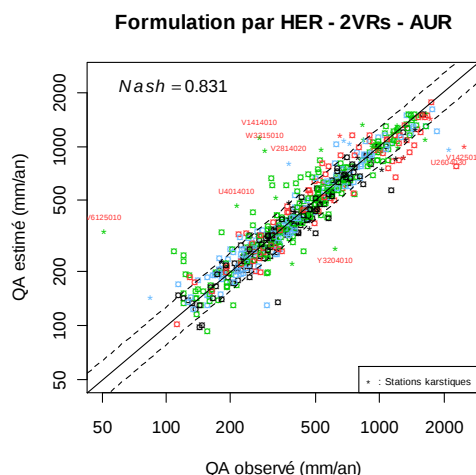
Si les performances statistiques après Validation Croisée sont comparables au modèle initial, les points atypiques s'écartent encore un peu plus de l'ajustement. Notamment les deux stations karstiques V1414010 et W3315010 peu productives et en très net décalage avec les stations voisines d'altitude dans la région du Jura et des PréAlpes du Nord.

Nous effectuons la même opération sur le modèle 2VRs par hydro-écorégions (HERm) :

Tableau 6 : Optimisation de la formulation par HERm 2VRs après recalcul des résidus en Validation Croisée

1 -  $QA_{Estimé}$  obtenu par les régressions empiriques  
d'après le modèle 2VRs par HERm

2 -  $QA$  recalculé après krigeage en Validation  
Croisée



| Modèle / Technique      | $R^2$ | Nash  | $S_{ln}$ | IC 70%            |
|-------------------------|-------|-------|----------|-------------------|
| 2VRs par HERm           | 0.873 | 0.831 | 0.236    | [ 0.78Q ; 1.28Q ] |
| 2VRs par HERm +krigeage | 0.869 | 0.806 | 0.241    | [ 0.78Q ; 1.28Q ] |

Contrairement au modèle national, les performances statistiques après Validation Croisée sont inférieures au modèle initial. Les points atypiques sont plus nettement renforcés alors que le reste de l'échantillon semble plus recentré. Cette déstabilisation est sans doute due à la mauvaise ré-estimation des résidus en Validation Croisée, à proximité des zones frontalières de chaque hydro-écorégions. En effet l'opération ne s'est pas bornée à chaque HERm mais a pu s'étendre sur des régions voisines au comportement hydrologique différent. Cependant, la réalisation du calcul de Validation Croisée limitée à une HERm distincte peut être hasardeuse notamment au sein de régions mal pourvues en site de mesure.

Il semble ainsi plus intéressant de se reporter sur les résultats issus du modèle national. Les résultats régionaux n'étant pas assez robustes vu les contraintes énoncées précédemment (on notera principalement le manque de stations dans certains secteurs, d'où découle le regroupement de plusieurs régions pouvant comporter des différences géologiques et climatologiques notables).

Les ajustements détaillés pour chaque HERm sont quant à eux signalés en Annexe 4.

## 5.4 Comparaison des performances avec les travaux antérieurs (Sauquet, 2005, 2006)

En introduction, nous avons rappelé l'existence d'une précédente carte établie par Sauquet (2005, 2006). Cette carte ayant été diffusée et utilisée, il s'agit de comparer les estimations de 2005 à celles proposées ici. Nous nous attarderons sur l'approche exploitant la formulation nationale et le krigeage des résidus.

La carte de 2005 a été établie à partir de régressions empiriques exploitant uniquement l'altitude moyenne du bassin versant sur un découpage en secteurs hydrographiques sur la période 1981-2000 avec pour points d'observation un ensemble de 967 stations réputées peu influencées. Nous voyons que la période de référence et le jeu de référence diffèrent. Notre propos est de comparer les résultats de la Validation Croisée sur les stations communes aux deux exercices. Le croisement des deux listes permet d'isoler 442 stations communes et les estimations en validation croisée sont reportées en Figure 23. En abscisse est précisé le module observé pour 1981-2000 (●) extrait de Sauquet (2005, 2006) et celui calculé sur la période 1970-2005 (Δ). D'où des différences dans la localisation des points. Ainsi le module est de 1902 mm sur la période 1981-200 et de 1796 mm sur la période 1970-2005 pour le Giffre à Taninges. Il n'y a pas lieu de s'inquiéter. L'analyse des valeurs observées montre que le rapport des modules calculés sur les deux période est en moyenne proche de 1. En termes d'hydraulicité, les deux périodes sont comparables et la comparaison des résultats de validation croisée est donc possible (les écarts de performance ne seraient pas attribuables à deux périodes hydroclimatiquement différentes). En ordonnée nous retrouvons les valeurs estimées en validation croisée.

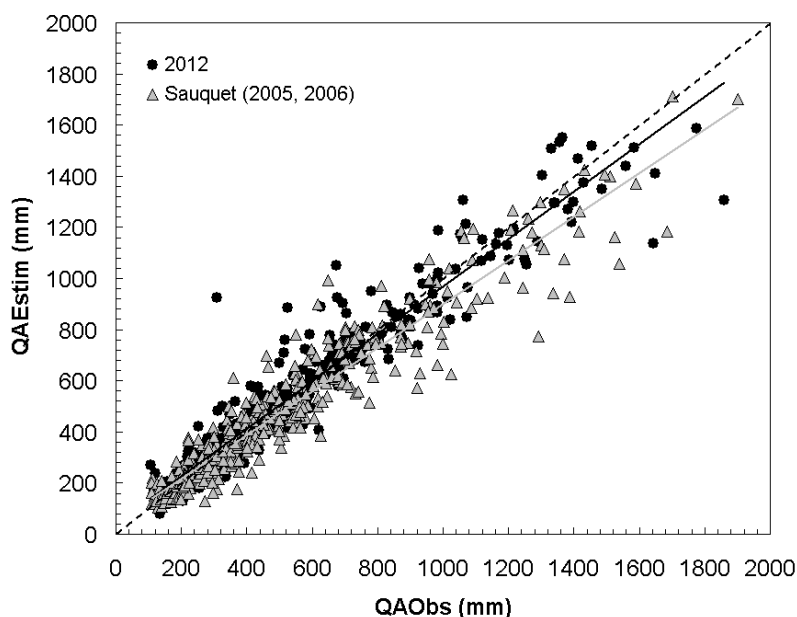


Figure 23 : Comparaison des résultats en validation croisée réalisée par Sauquet (2005, 2006) à ceux obtenus ici en validation croisée avec la formulation NAT et le krigage des résidus

La Figure 23 représente les droites de régression ajustées (trait plein) entre estimations et observations et la première bissectrice (trait pointillé). Les derniers travaux sont plus efficaces : la droite de régression est plus proche de la bissectrice. De ce fait, les estimations de 2012 seraient globalement plus fiables que celles obtenues précédemment.

La carte en Figure 24 permet de visualiser les écarts le long du réseau hydrographique pour les bassins en totalité à l'intérieur des frontières. Les stations exploitées par Sauquet (2005, 2006) sont représentées par des carrés noirs, celles exploitées dans le cadre de cette étude par des carrés gris. Les points rouges identifient les stations karstiques de Sauquet (2005, 2006). Nous pouvons remarquer (cf. zoom sur la

partie droite) que, sans surprise, les écarts les plus importants concernent les secteurs karstiques pour lesquels une correction sur la base d'expertise et de connexion entre pertes et résurgences avait été réalisée. 80% (resp. 90%) des écarts sont en valeur absolue inférieurs à 90 mm (resp. 140 mm).

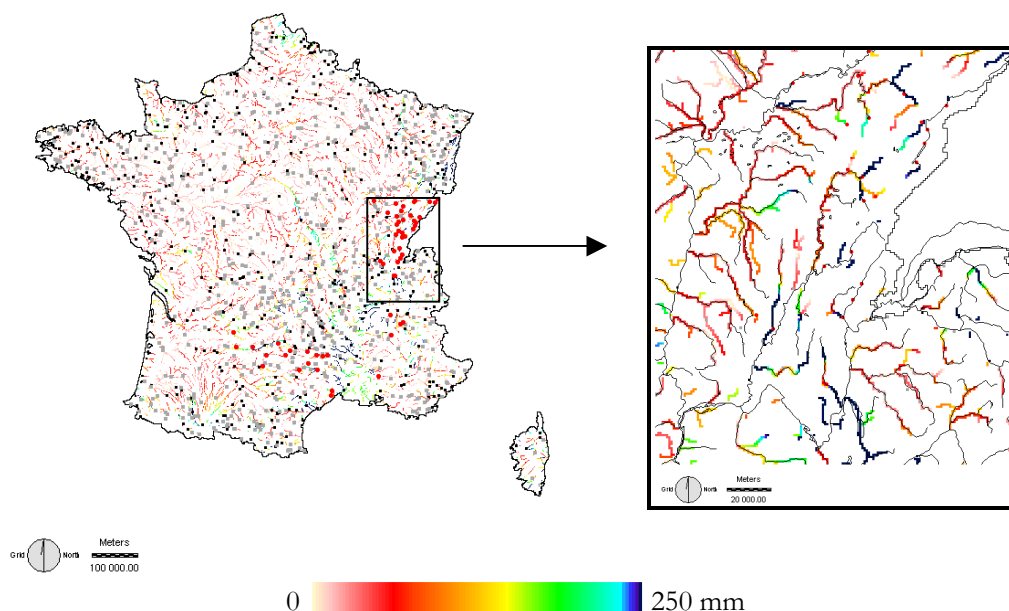


Figure 24 : Valeur absolue entre la carte établie à partir de la formule nationale NAT corrigée du résidu krigé et celle établie par Sauquet (2005, 2006) (à gauche zoom sur le secteur du Jura et Nord des Alpes)

## 6 Conclusion

La constitution du jeu de données a permis de dégager 634 stations hydrométriques ayant suivie le débit journalier sur une période fixée allant de 1970 à 2005. Si une attention toute particulière a été menée sur cette plage de mesure, ainsi que sur le caractère naturel des écoulements (l'influence anthropique est jugée limitée dans les bassins correspondants), il n'en reste pas moins la possibilité d'inclure les fonctionnements hydrologiques atypiques comme les secteurs karstiques.

Dans le but de définir le module  $QA$ , nous avons réalisé un ensemble de régressions empiriques à partir de variables issues des données d'AURELHY et de SAFRAN concernant la pluie annuelle  $PA$  et l'évapotranspiration réelle annuelle  $ETRA$ , donnée par la formule de Turc. D'autres variables comme l'évapotranspiration potentielle annuelle  $ETPA$ , la température annuelle  $TA$ , ou encore l'altitude moyenne ont été approchées mais ont donné de moins bonnes estimations.

A l'échelle globale, la régression simple basée sur la variable  $(PA-ETRA)$  :  $QA = \alpha + \beta \cdot (PA - ETRA)$  est un bon compromis entre performances statistiques et cohérence des coefficients ajustés. Nous conseillons l'application de la formulation nationale :

$$QA = -92 + 1.093 (PA - ETRA)$$

avec en Validation Croisée,  $R^2 = 0.844$  et  $Nash = 0.790$  obtenus avec les données pluviométriques d'AURELHY (1961-1990). Cette formule est liée aux estimations pluviométriques. Elle pourrait être remise en cause si une autre source de données devait être exploitée.

A un niveau plus localisé, par découpage d'hydro-écorégions, la robustesse de nos régressions est fortement liée à la présence ou non de stations karstiques identifiées Sauquet (2005), ainsi qu'à un nombre minimal de sites étudiés. Certaines zones sont très bien estimées comme une large moitié Nord-Ouest de la France. Alors qu'il serait peut être préférable de conserver la formulation nationale pour d'autres secteurs.

Enfin, le krigeage a permis de cartographier la part non expliquée de ces diverses régressions. La persistance de ces résidus dans les zones montagneuses où nos modèles ont tendance à sous estimer les écoulements, a pu être vérifiée en Validation Croisée. Dans ce cas, nous avons pu dresser une cartographie des écoulements « corrigée » en chaque point du territoire le long du plan de drainage kilométrique. L'utilisation d'une telle méthodologie reste néanmoins soumise à une plage restreinte de superficies drainées (bassins étudiés de superficie comprise entre 4 et 8800 km<sup>2</sup>), à un régime d'écoulement naturel, et à une couverture géographique des stations voisines la plus dense possible (on évitera la Charente Maritime et la Corse car trop peu de stations ont été étudiées dans ces régions).

L'ensemble des résultats cartographiques est donnée en Annexe 2, selon les formulations initiales nationale ou régionales (HERm). Nous remarquons la forte ressemblance entre valeurs proposées sur une grande partie du territoire. Les secteurs de montagne offrent le plus de différence. L'Annexe 5 comporte une analyse des résultats avec les valeurs en m<sup>3</sup>/s. Pour cette estimation du module absolu, il faut noter que le Nash vaut 0.968 ce qui dénote une excellente estimation.

## 7 Bibliographie

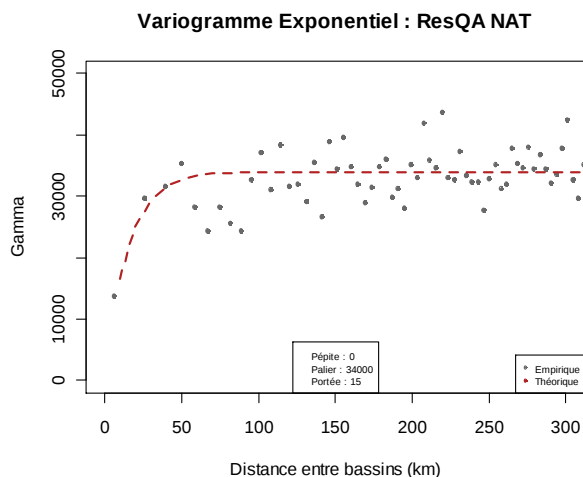
- Bénichou, P. et Le Breton, O. (1987). Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7, série 19, 23-34.
- Catalogne, C. et Sauquet, E. (2012). Cartographie des débits de référence – Interpolation des caractéristiques d'étiage. Rapport d'étape Cemagref, 60 pages.
- Cemagref (1987). Guide méthodologique en vue de l'estimation du module du cours d'eau. Note technique, 10 pages.
- Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models : 1 A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 : 257-274.
- Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), 495 pages.
- Sauquet, E. (2005). Cartographie des écoulements annuels moyens en France. Rapport d'étude Cemagref, 41 pages.
- Sauquet, E. (2006). Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies, *Journal of Hydrology*, 331 (1-2): 300-314. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.05.018
- Sauquet, E. et Catalogne, C. (2011). Guide méthodologique en vue de l'estimation du module d'un cours d'eau - Interpolation des modules : quelles évolutions depuis la note technique de 1987 ? Annexe 3 à la circulaire relative à l'application de l'article. L.214-18 du code de l'environnement, 28 pages.
- 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.
- Vidal, J-P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. et 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
- Wasson, J.G., Chandestrès, A., Pella, H. et Blanc, L. (2002). Définition des hydro-écorégions françaises métropolitaines. Rapport final Cemagref, 190 pages.

## 8 Annexes

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Annexe 1 : Ajustement des variogrammes théoriques sur les résidus .....                                              | 46 |
| Annexe 2 : Cartographie du module .....                                                                              | 47 |
| Annexe 3 : Comparaison des résidus déterminés empiriquement ou après Validation Croisée .....                        | 48 |
| Annexe 4 : Visualisation des ajustements initiaux par HER - Modèle 2VRs et après re-estimation en Validation Croisée | 53 |
| Annexe 5 : Performance du modèle national avec le module exprimé en m <sup>3</sup> /s .....                          | 58 |

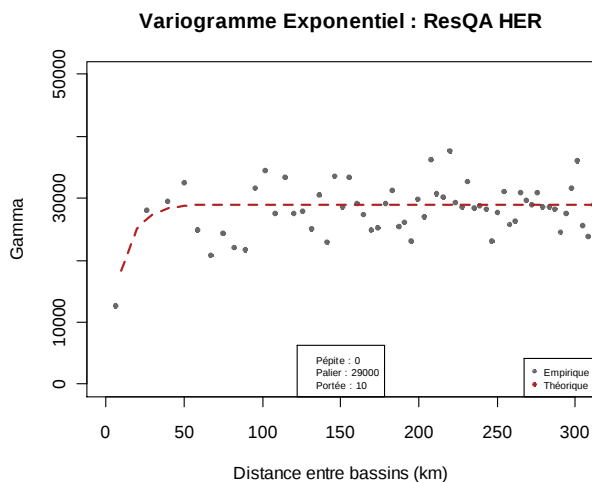
## Annexe 1 : Ajustement des variogrammes théoriques sur les résidus

### Résidus sur le modèle National 2VRs



*Ajustement des résidus déterminés par les régressions empiriques*

### Résidus sur le modèle par HERm 2VRs

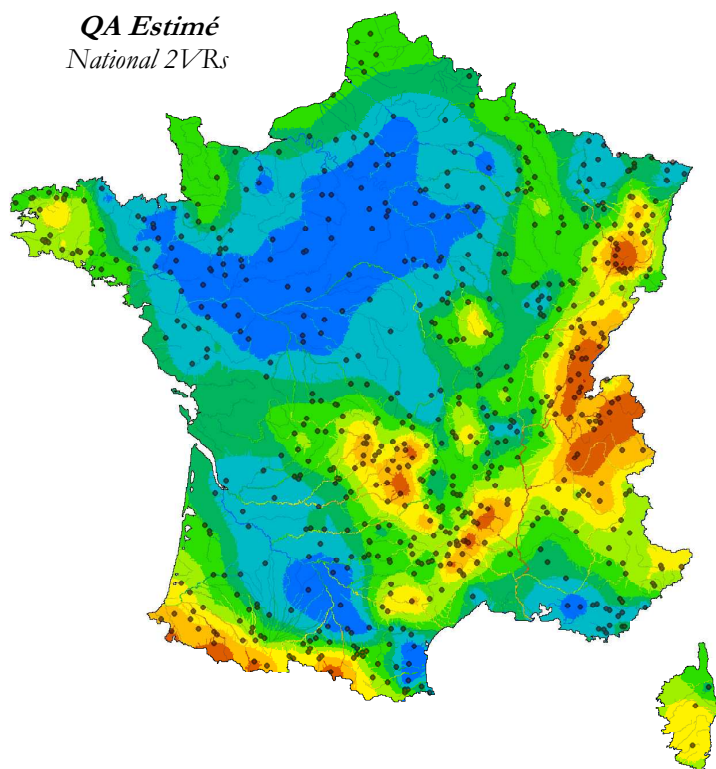


*Ajustement des résidus déterminés par les régressions empiriques*

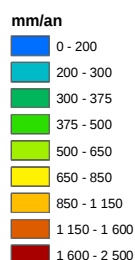
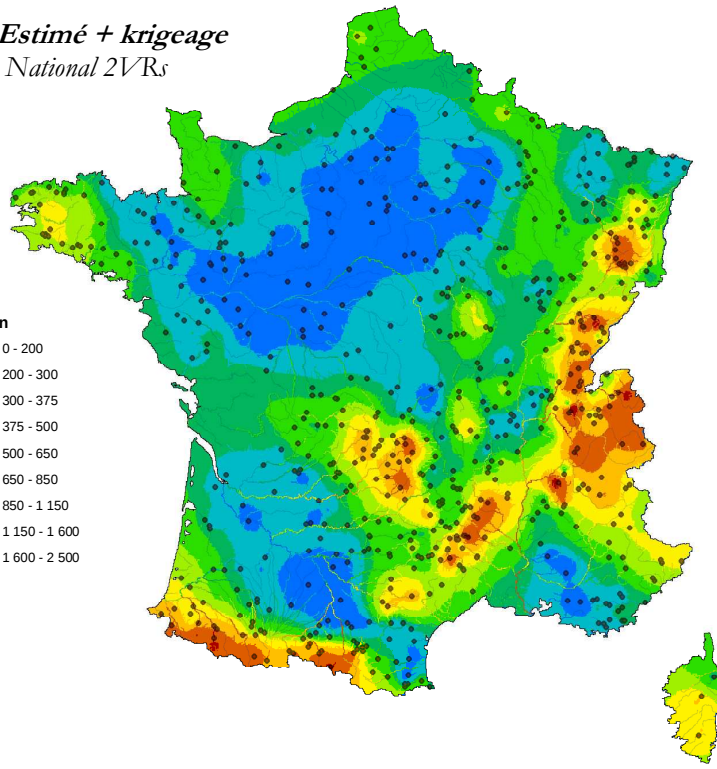
$ResQA$  correspond aux résidus déterminés par les formulations empiriques :  $QA_{Estimé} - QA_{Observé}$

## Annexe 2 : Cartographie du module

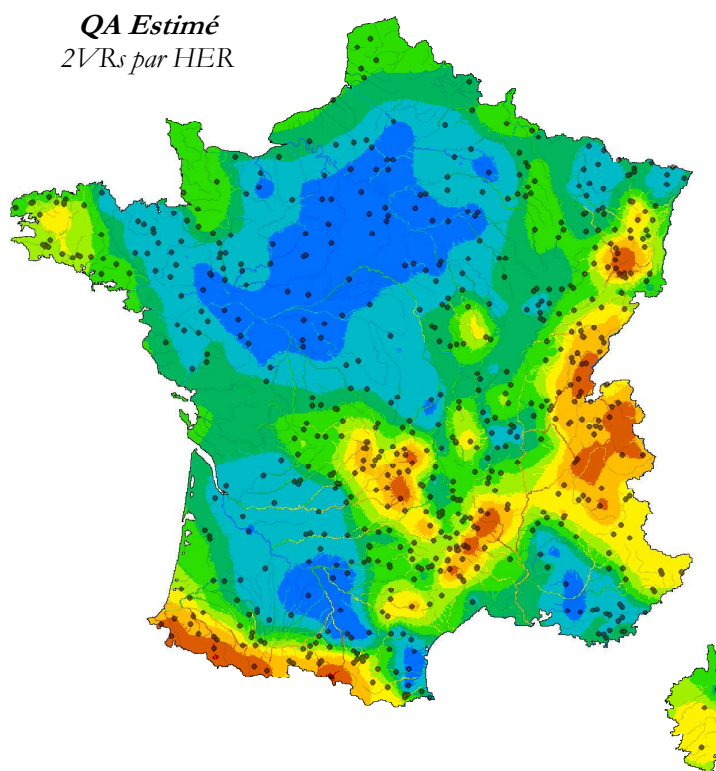
*QA Estimé  
National 2VRs*



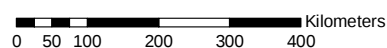
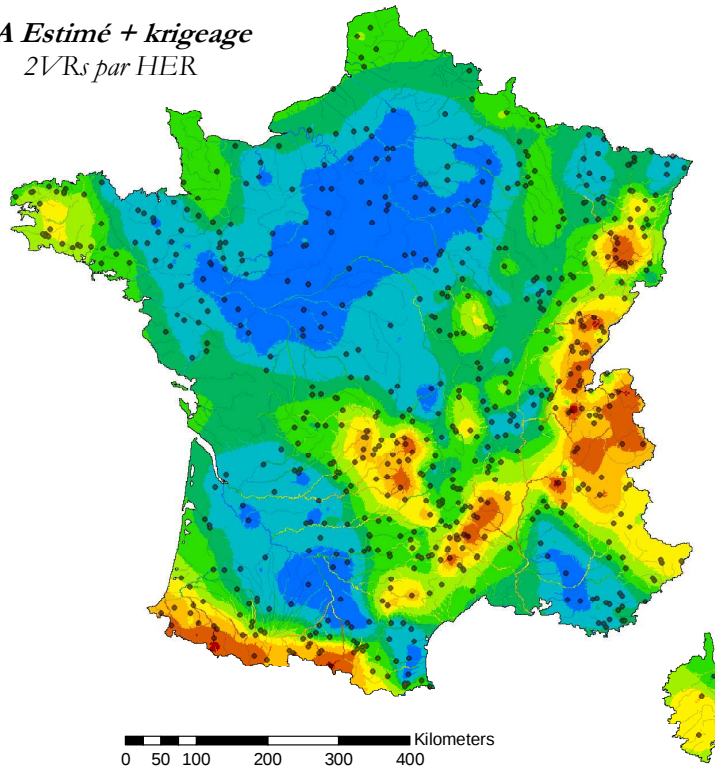
*QA Estimé + krigeage  
National 2VRs*



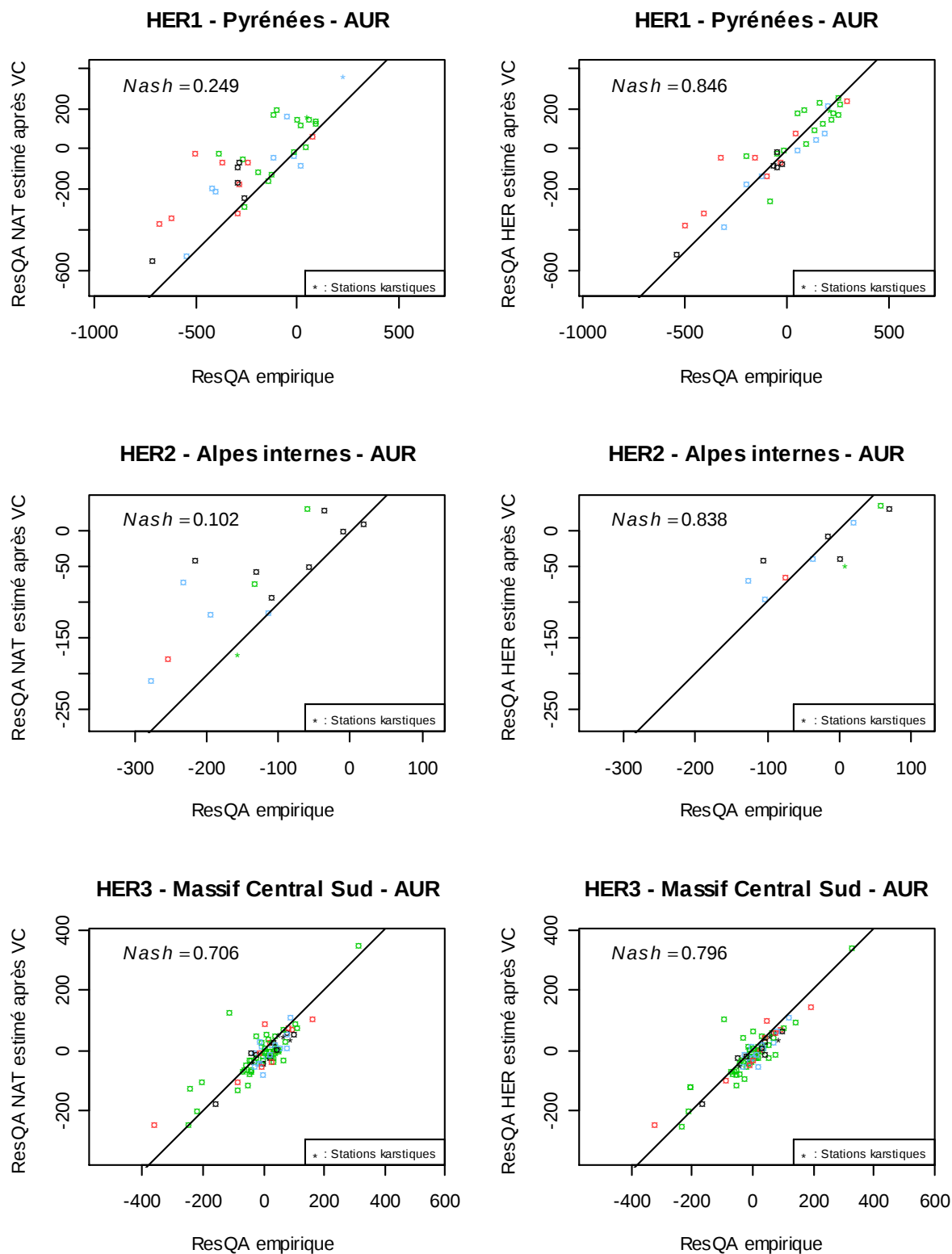
*QA Estimé  
2VRs par HER*



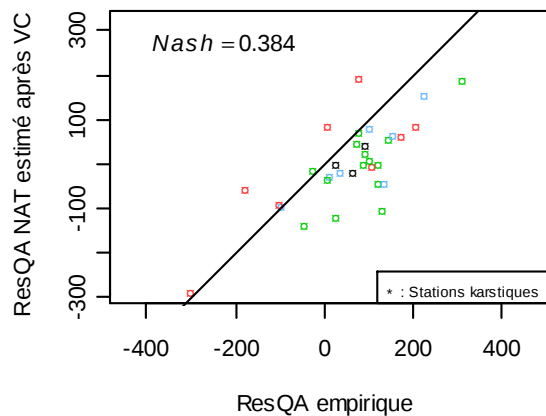
*QA Estimé + krigeage  
2VRs par HER*



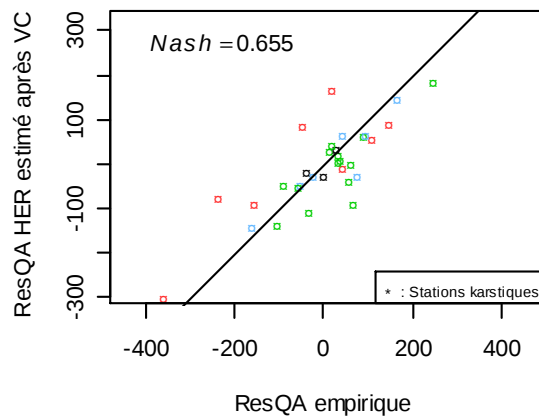
## Annexe 3 : Comparaison des résidus déterminés empiriquement ou après Validation Croisée



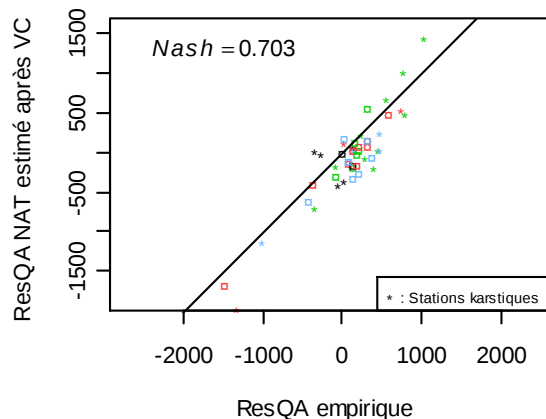
**HER4 - Vosges - AUR**



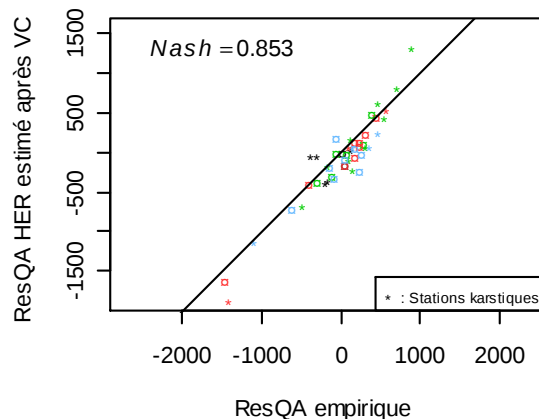
**HER4 - Vosges - AUR**



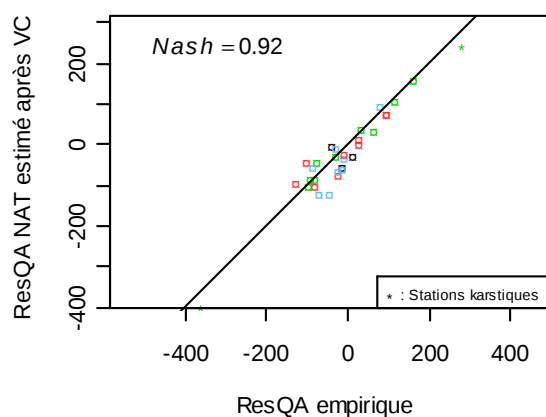
**HER5 - Jura Pré-Alpes du Nord - AUR**



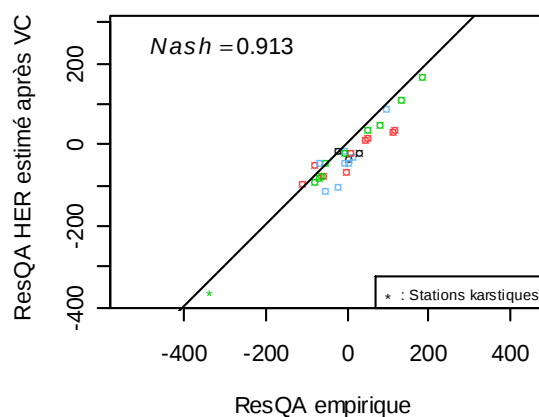
**HER5 - Jura Pré-Alpes du Nord - AUR**

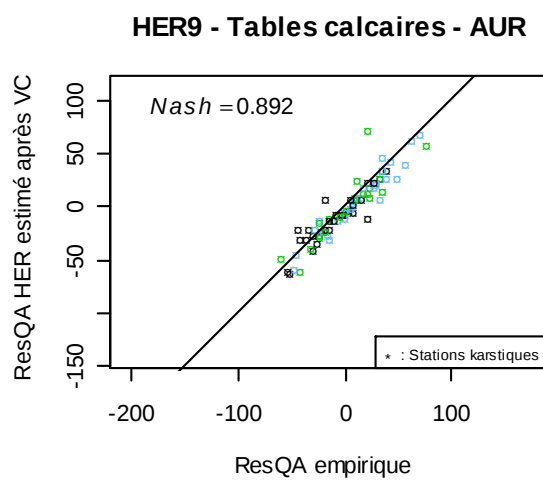
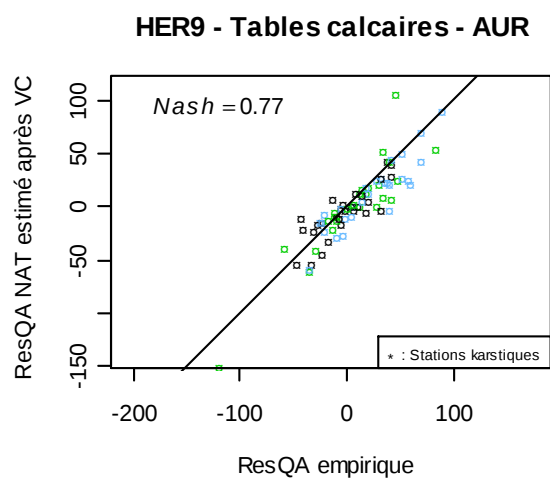
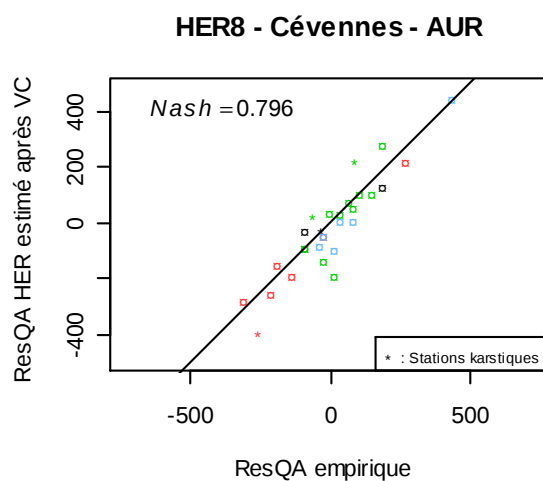
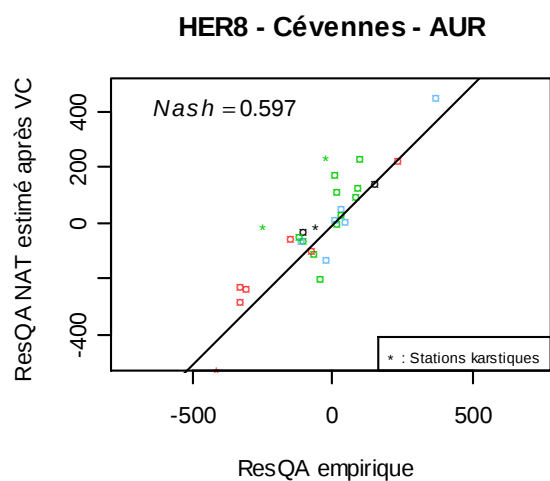
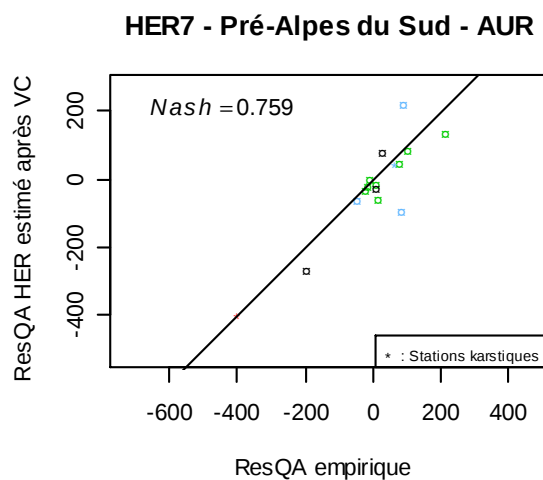
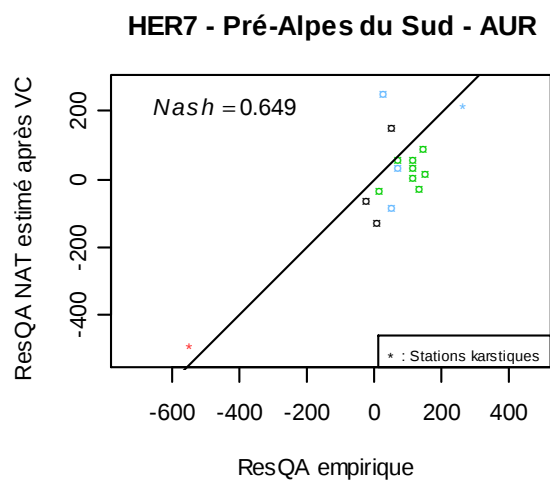


**HER6 - Méditerranée - AUR**

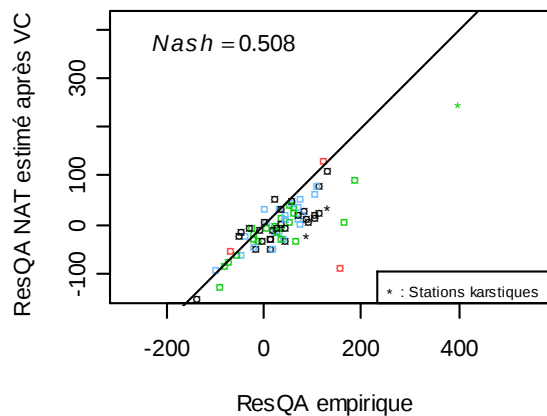


**HER6 - Méditerranée - AUR**

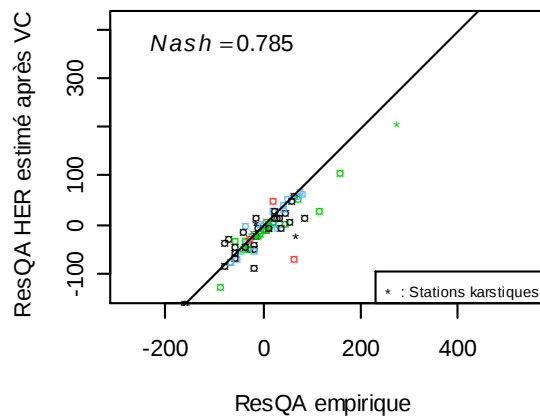




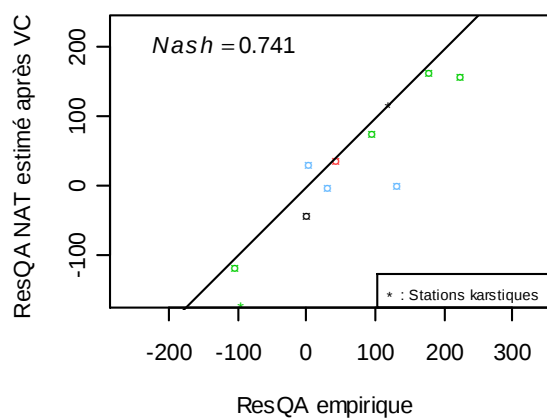
**HER10 - Côtes calcaires de l'Est - AUR**



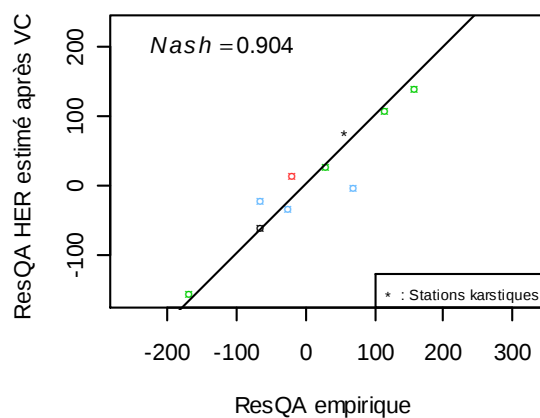
**HER10 - Côtes calcaires de l'Est - AUR**



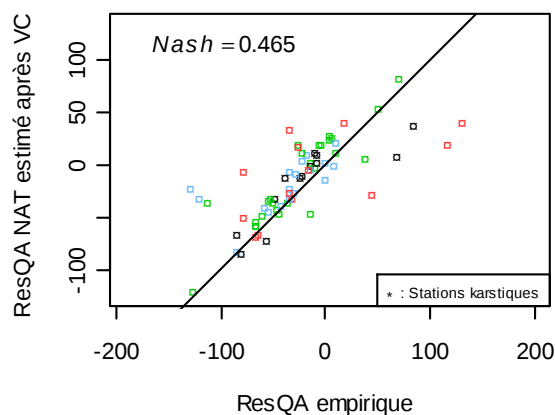
**HER11 - Causses Aquitains - AUR**



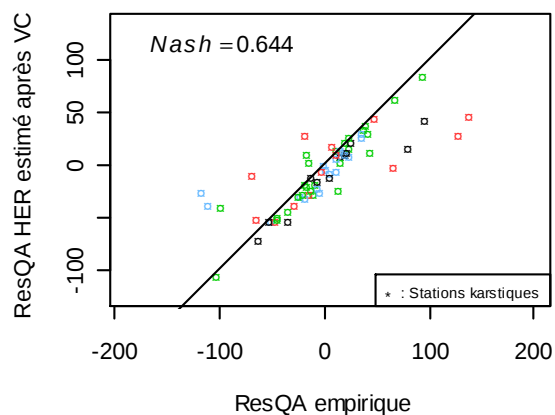
**HER11 - Causses Aquitains - AUR**



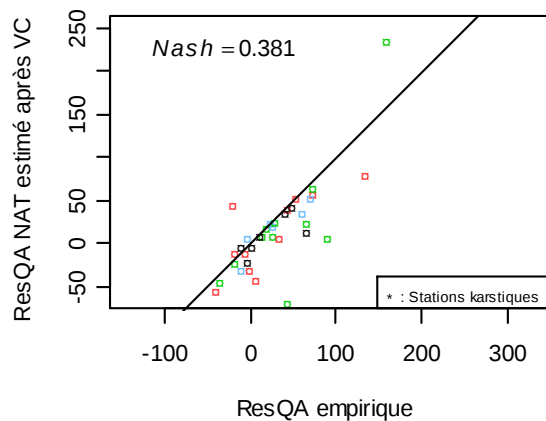
**HER12 - Massif Armoricain - AUR**



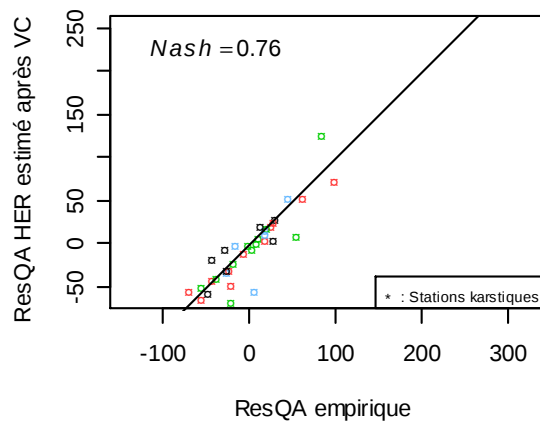
**HER12 - Massif Armoricain - AUR**



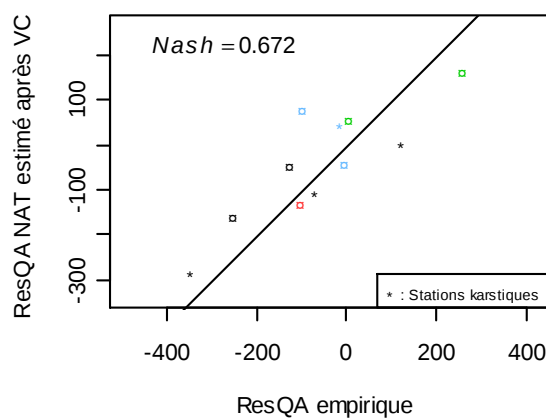
**HER13 - Coteaux Aquitains - AUR**



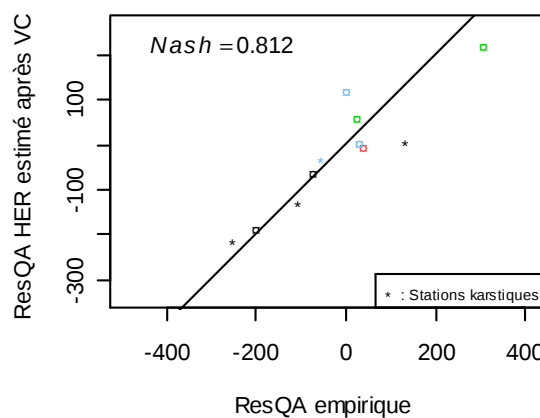
**HER13 - Coteaux Aquitains - AUR**



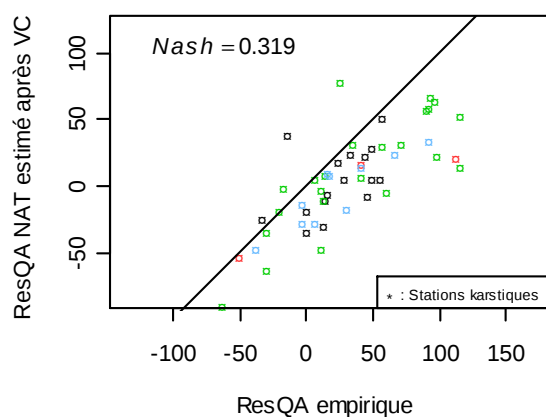
**HER14 - Grands Causses - AUR**



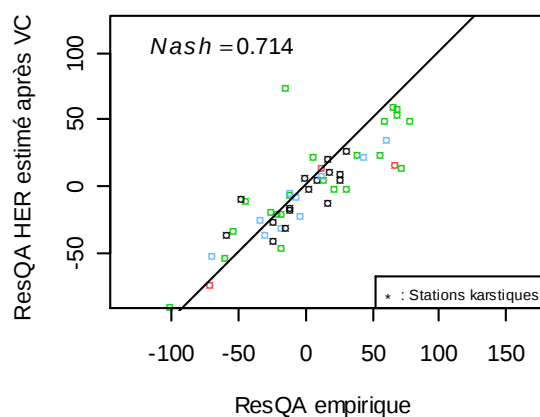
**HER14 - Grands Causses - AUR**



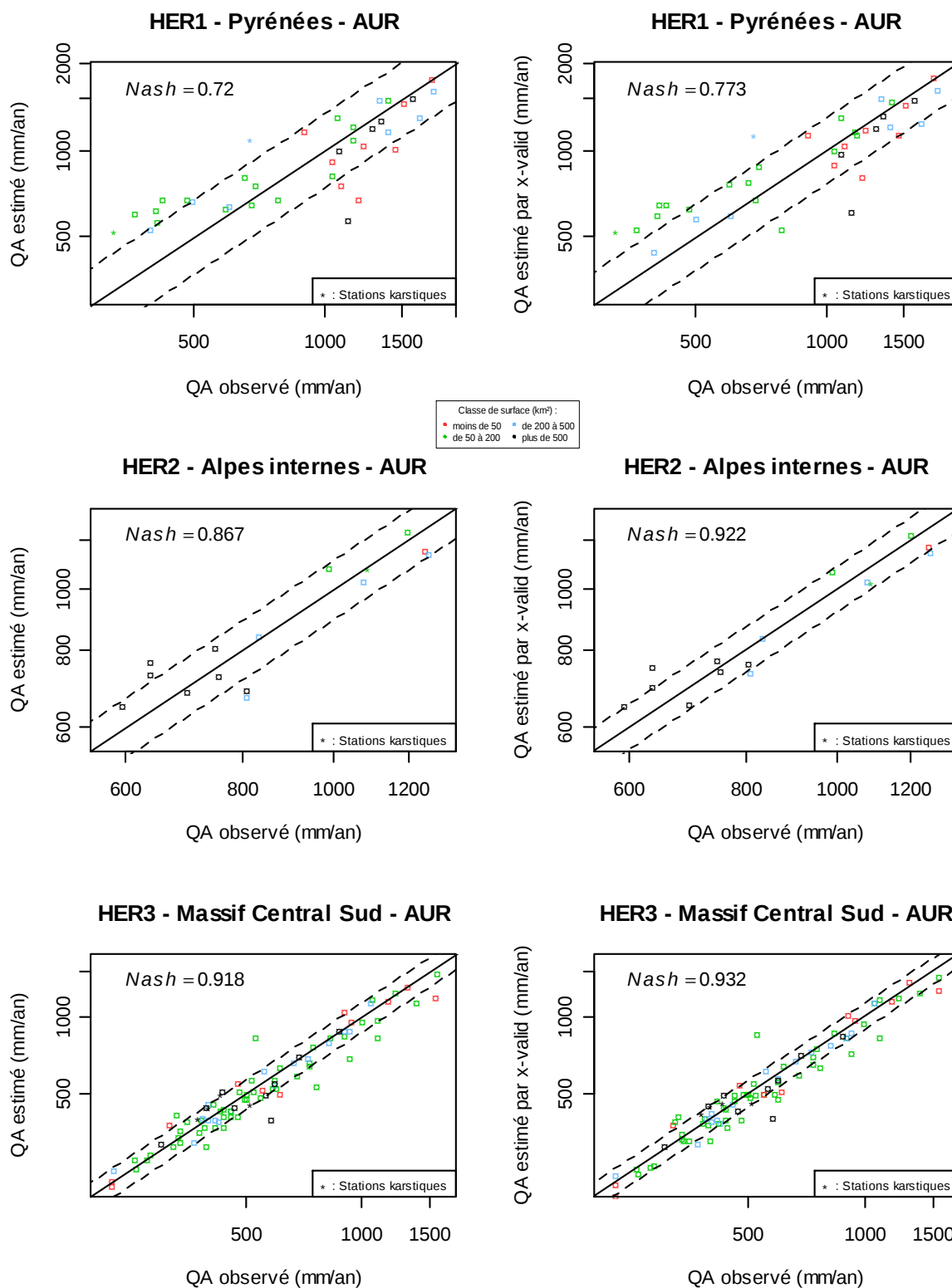
**HER15 - Massif Central Nord - AUR**



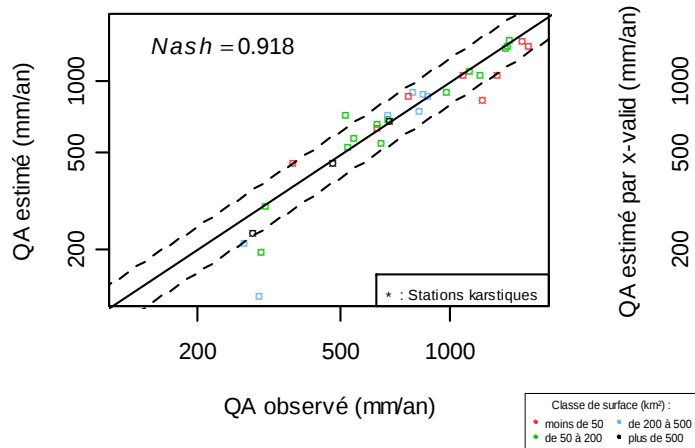
**HER15 - Massif Central Nord - AUR**



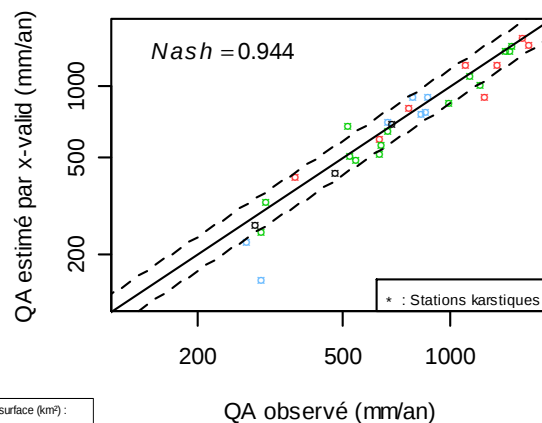
## Annexe 4 : Visualisation des ajustements initiaux par HERm - Modèle 2VRs et après re-estimation en Validation Croisée



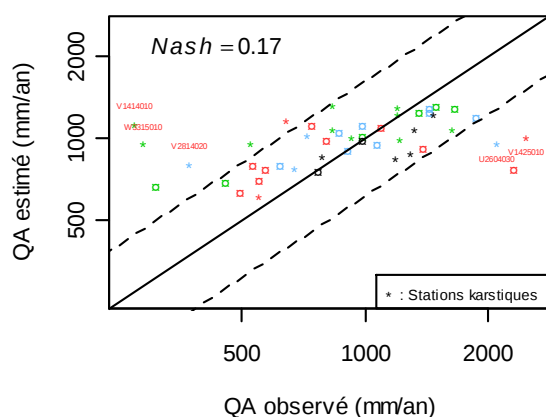
**HER4 - Vosges - AUR**



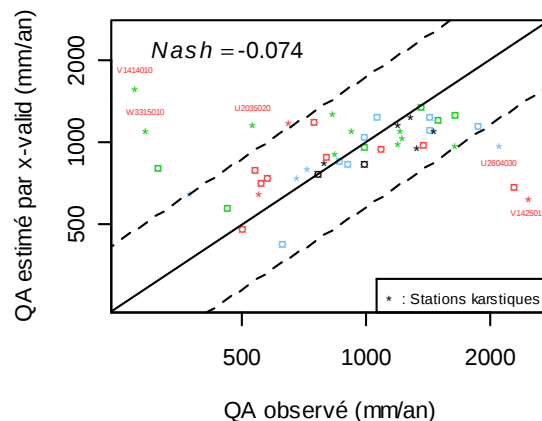
**HER4 - Vosges - AUR**



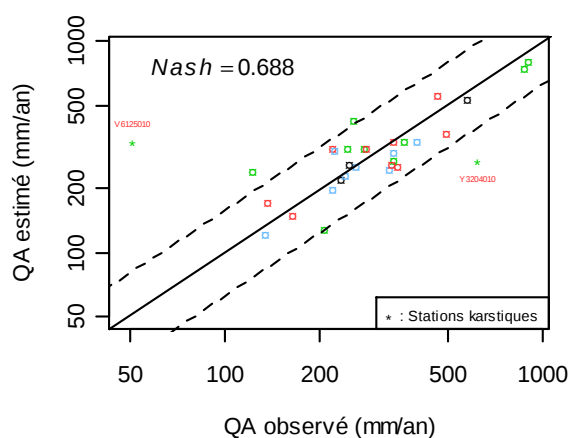
**HER5 - Jura Pré-Alpes du Nord - AUR**



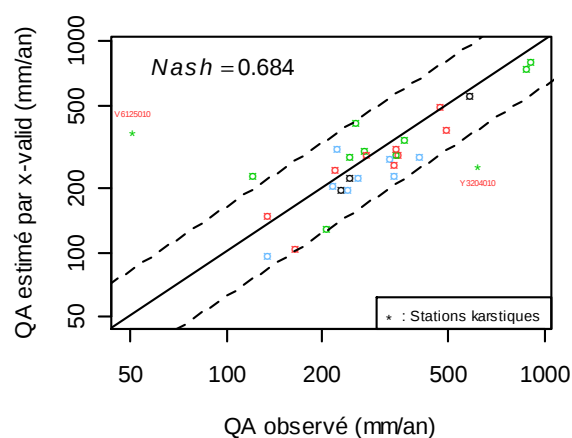
**HER5 - Jura Pré-Alpes du Nord - AUR**



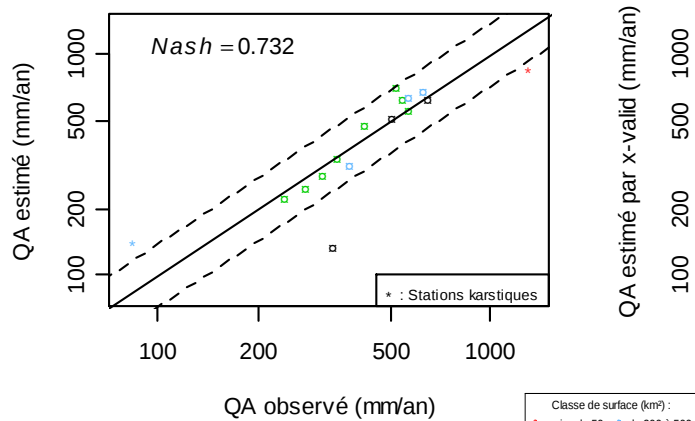
**HER6 - Méditerranée - AUR**



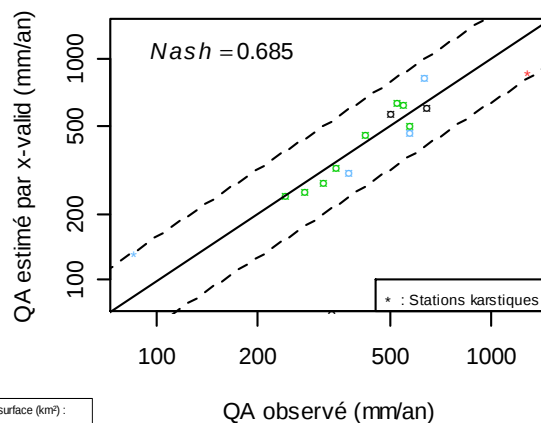
**HER6 - Méditerranée - AUR**



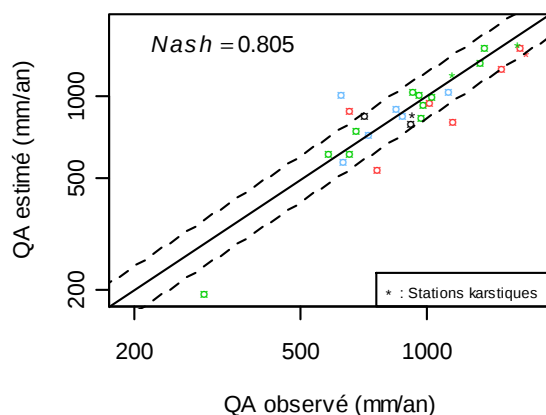
**HER7 - Pré-Alpes du Sud - AUR**



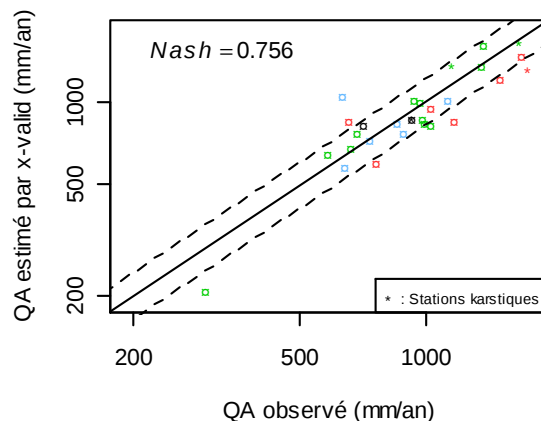
**HER7 - Pré-Alpes du Sud - AUR**



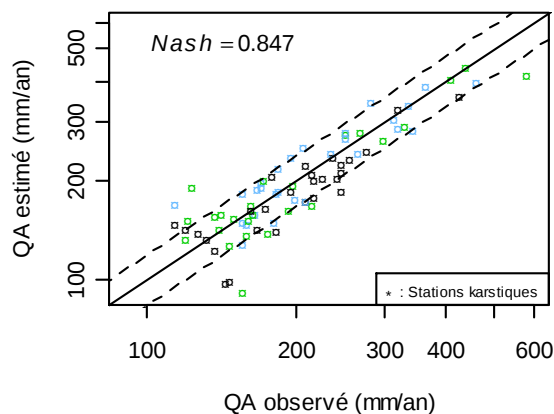
**HER8 - Cévennes - AUR**



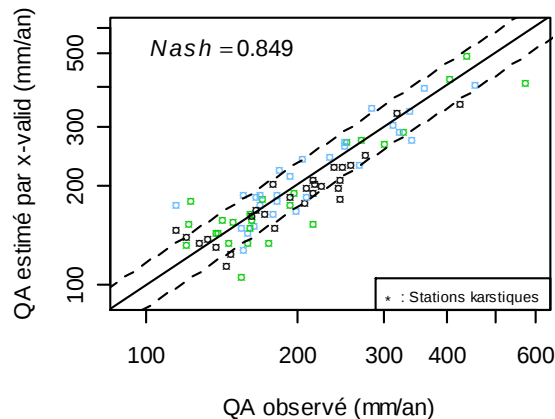
**HER8 - Cévennes - AUR**



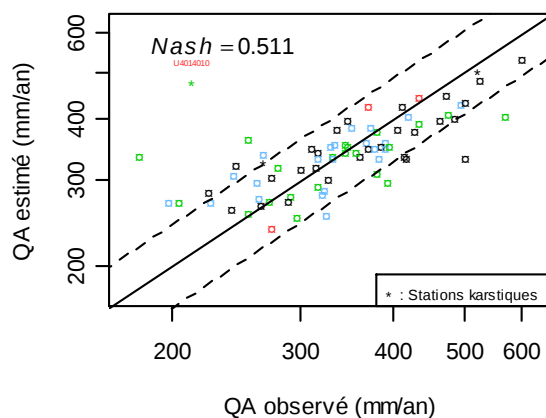
**HER9 - Tables calcaires - AUR**



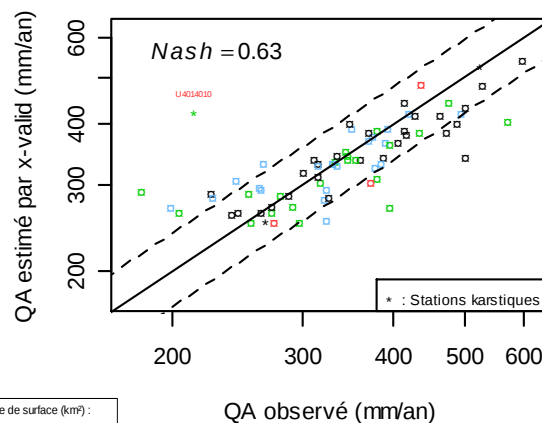
**HER9 - Tables calcaires - AUR**



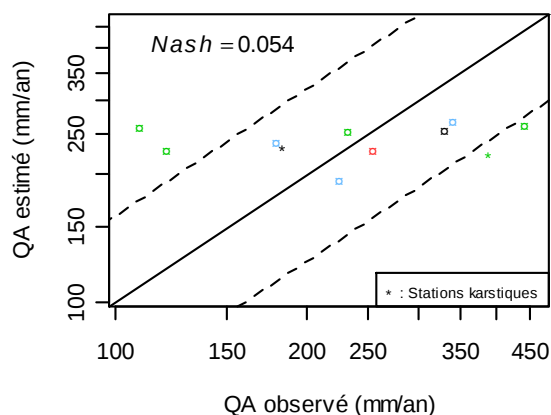
**HER10 - Côtes calcaires de l'Est - AUR**



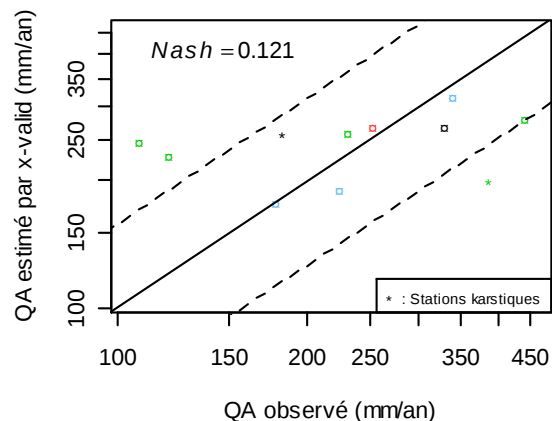
**HER10 - Côtes calcaires de l'Est - AUR**



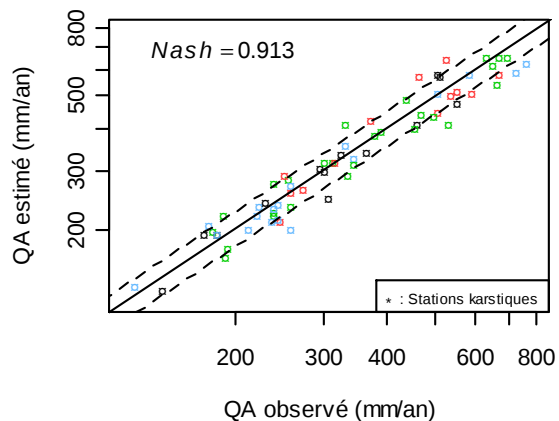
**HER11 - Causses Aquitains - AUR**



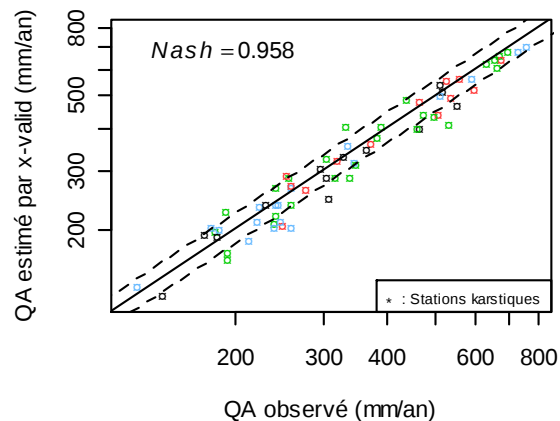
**HER11 - Causses Aquitains - AUR**



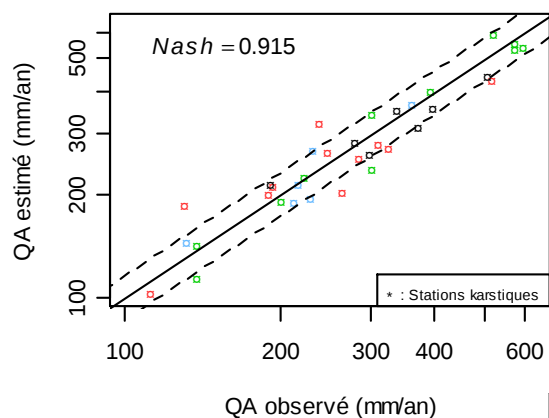
**HER12 - Massif Armoricaïn - AUR**



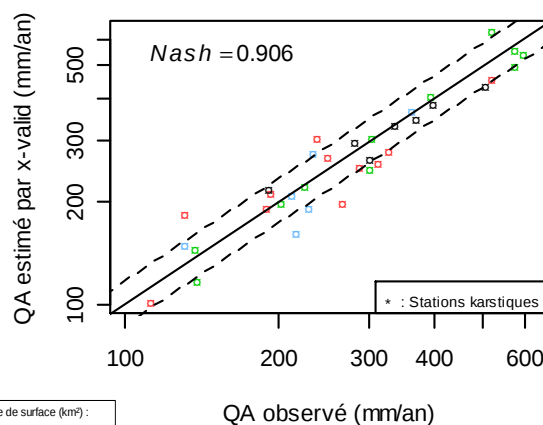
**HER12 - Massif Armoricaïn - AUR**



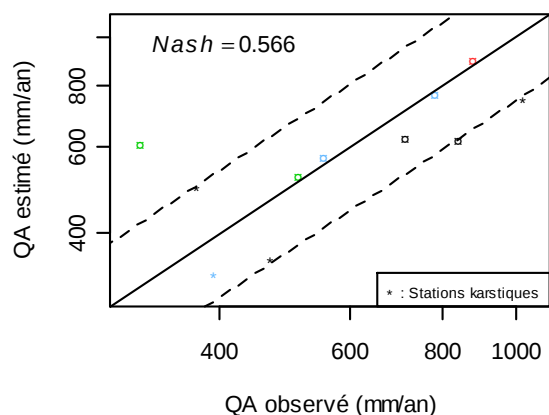
**HER13 - Coteaux Aquitains - AUR**



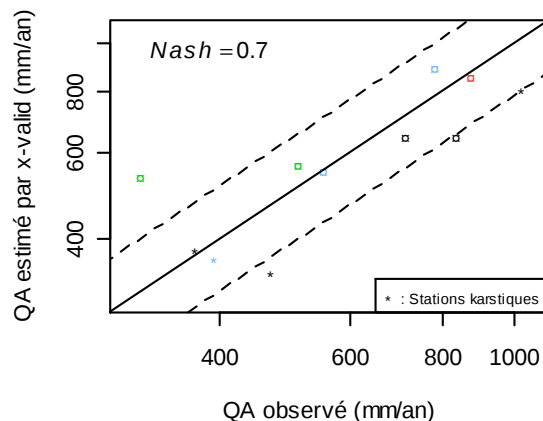
**HER13 - Coteaux Aquitains - AUR**



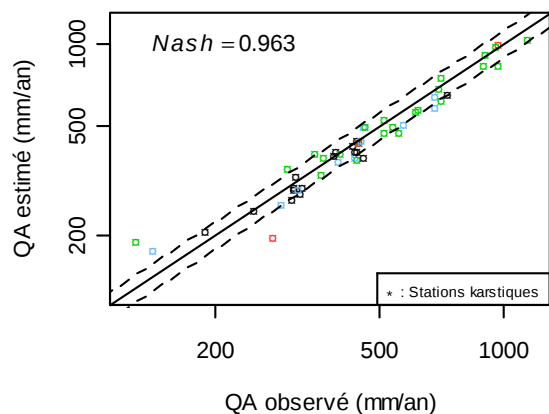
**HER14 - Grands Causses - AUR**



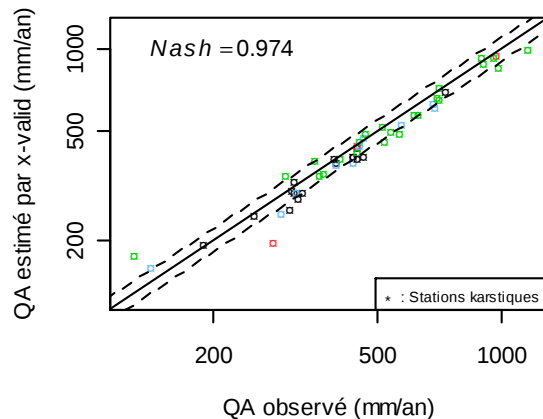
**HER14 - Grands Causses - AUR**



**HER15 - Massif Central Nord - AUR**



**HER15 - Massif Central Nord - AUR**



## Annexe 5 : Performance du modèle national avec le module exprimé en m<sup>3</sup>/s

