HAL
open science

Détermination des Ecoulements et des Phases Hydrologiques (DEPHy)

Gilles Drogue, Wiem Ben Khediri, Didier Francois, Julien Plasse

To cite this version:

Gilles Drogue, Wiem Ben Khediri, Didier Francois, Julien Plasse. Détermination des Ecoulements et des Phases Hydrologiques (DEPHy). [Rapport de recherche] CEGUM, Université de Lorraine; Agence de l'Eau Rhin-Meuse. 2016. hal-02865889

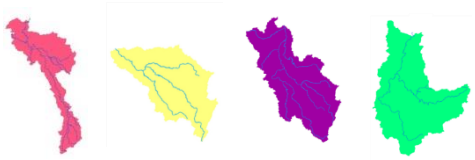
HAL Id: hal-02865889

https://hal.science/hal-02865889v1

Submitted on 12 Jun 2020

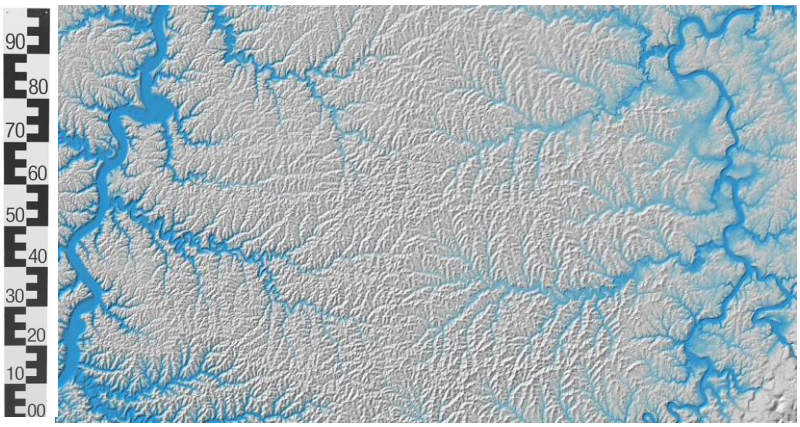
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Détermination des Ecoulements et des Phases Hydrologiques (DEPHy)

Rapport de synthèse



Chef de projet : G. Drogue, PhD (gilles.drogue@univ-lorraine.fr)
Contributeurs : Ben Khediri W., François D., Plasse J.

juin 2016

In memoriam

Ce rapport de synthèse de cinq années de recherche consacrées à la régionalisation de l'écoulement des eaux naturelles de surface dans le bassin Rhin-Meuse est dédié à la mémoire de Philippe Maire, chargé de mission relations avec les Commissions internationales Moselle-Sarre et Meuse à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse de 2002 à 2012 et initiateur de l'étude DEPHy menée en partenariat entre l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (C. Conan), l'unité hydrométrie Meuse/Moselle de la DREAL Grand Est (P. Battaglia) et les hydrologues du centre de recherches en Géographie de l'université de Lorraine (LOTERR, ex-CEGUM).

Crédits photos page de garde : DREAL Grand Est, AERM

Sommaire

Résumé 7

I. Introduction générale 8

I.1 Préambule 8

I.2 Définition du l'étude et calendrier 8

I.3 Contexte et problématiques de recherche 9

I.4 Objectifs scientifiques et opérationnels 12

II. Synthèse sur les méthodes de régionalisation de l'écoulement des eaux naturelles et principaux résultats 14

II.1 Régionalisation de l'écoulement par approche simulative pluie-débit 14

II.1.1 Combinaison de l'information hydrologique régionale et de l'information hydrologique locale 14

II.1.2 Valorisation opérationnelle des cotes à l'échelle et de l'hydrométrie ponctuelle : une voie d'amélioration possible du processus de régionalisation de l'écoulement ? 18

II.1.3 Tentative d'amélioration de l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale : analyse de sensibilité du modèle régionalisé aux entrées de précipitations et d'ETP 19

II.2 Régionalisation de l'écoulement par approche simulative débit-débit 20

III. Quelle chaîne de calcul automatique du débit au point d'intérêt d'un cours d'eau ? 22

III.1 Présentation de la chaîne de modélisation de l'information hydrologique 22

III.2 Solution informatique et cartographique pour la diffusion des simulations 30

IV. Conclusions et perspectives 32

Remerciements 34

Bibliographie (en bleu) et publications scientifiques issues de l'étude DEPHy (en noir) 34

Annexe 1 : Echantillon de bassins jaugés utilisés en validation croisée. 36

Annexe 2 : Approche multi-critères appliquée pour sélectionner une station de suivi qualité à équiper d'un suivi hydrométrique épisodique ou pérenne parmi un échantillon de 29 stations candidates. Exemple du RRP (Réseau de Référence Pérenne). 40

Annexe 3 : Note technique sur la comparaison des données de précipitations SAFRAN et E-obs. 42

Annexe 4 : Exemples d'algorithmes de calcul hydrologique transcrits dans le langage R. 50
Annexe 5 : Code Matlab de correction de la grille des directions d'écoulement issue du MNT SRTM 3.0 en fonction du réseau hydrographique de référence (BD Carthage). 58

Table des illustrations

Tableau 1 : Calendrier prévisionnel et lots de l'opération DEPHy (phase 3). 8

Figure 1 : Triangulation de Delaunay appliquée aux stations de suivi qualité des cours d'eau (a) et aux stations de suivi hydrométrique (b) dans l'espace Rhin-Meuse (partie française). 9

Figure 2 : Part en pourcentage des classes de surface de bassin couvertes par la surveillance de la qualité des cours d'eau (réseaux AERM) et par l'hydrométrie continue (réseaux d'Etat). 10

Figure 3 : Répartition de la surveillance physico-chimique et de la surveillance hydrologique le long du chevelu hydrographique dans l'espace Rhin-Meuse (partie française). L'épaisseur du chevelu est proportionnelle à l'ordre du cours d'eau (selon l'ordination de Strahler). Source du réseau hydrographique : BD Carthage. 10

Figure 4 : L'information hydrologique associée à la surveillance de la qualité des cours d'eau (In Conan et al., 2015). 11

Figure 5 : Exemple de besoin d'expertise à court terme (In Conan et al., 2015). 11

Figure 6 : Echantillon de bassins jaugés et code Hydro des stations définissant leur exutoire. 12

Figure 7 : Limites géographiques de l'étude, réseau d'observation hydro-métérologique et maillage de la climatologie SAFRAN de Météo France (partie française du bassin Rhin-Meuse). 13

Figure 8 : Exemple de fiche pdf produite automatiquement après calage du modèle pluie-débit GR4J. 15

Figure 9 : Scores de performance hydrologique de trois solutions de régionalisation des paramètres du modèle GR4J. 18

Figure 10 : Courbes de fréquence cumulée (CFC) du critère de performance hydrologique et score total pour deux solutions de régionalisation. La CFC du calage local est également fournie. Les résultats sont présentés pour les 149 bassins de notre échantillon. 21

Figure 11 : Chaîne des géotraitements et des calculs hydrologiques codée sous Matlab pour produire automatiquement l'information hydrologique associée au suivi de la qualité des cours d'eau. 22

Figure 12: Chaîne des géotraitements codée sous Matlab pour élaborer un plan de drainage en cohérence avec la BD Carthage. 23

Figure 13 : Comparaison des voisinages obtenus par distance gravitaire (a) et par distance composite (b) pour le bassin receveur de la Meuse@Chooz (code Hydro : B720000 ; 10180 km^2)... 24

Figure 14 : Schémas de deux cas où de simples distances basées sur des points de références peuvent donner des résultats incohérents : (a) deux bassins différents avec des exutoires extrêmement proches situés à leur confluence, (b) deux bassins emboités avec des centroïdes extrêmement proches (In Lebecherel, 2014). 25

Figure 15 : Relation entre la distance hydrologique et l'indice de similitude (KGE borné). Exemple de point d'intérêt : B3150020, la Meuse@Stenay. 26

Figure 16 : Corrélogramme des écoulements (lames d'eau écoulées journalières) dans l'espace Rhin-Meuse. Période 1990-2002, 149 stations hydrométriques, distance hydrologique, indice de corrélation spatiale : KGE (variante bornée entre -1 et 1). 27

Figure 17: Nuage de corrélation entre les débits journaliers de la Moselle à Toul et ceux de la Thur à Pulversheim. 27

Figure 18: Format du fichier de sortie de la chaîne de calcul hydrologique contenant les simulations de débit journalier pour un point quelconque du référentiel de surveillance de la qualité des eaux de rivière géré par l'AERM. 30

Figure 19: Application informatique de diffusion des simulations de débits. 31

Résumé

Dans le contexte de la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE) 2000/60/CE, des programmes de surveillance de l'état des eaux sont établis afin d'en dresser un tableau cohérent et complet au sein de chaque district hydrographique. Dans ce contexte, l'information hydrologique (débit continu des cours d'eau, phases d'écoulement, etc.) est primordiale pour expertiser et valoriser les données physico-chimiques collectées plusieurs fois par an par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse par échantillonnage des eaux de rivière. Ainsi, la recherche action DEPHy vise à développer des méthodes de reconstitution de chroniques hydrologiques incomplètes ou manquantes par modèles pluie-débit ou débit-débit en des points du réseau hydrographique du district Rhin-Meuse faisant l'objet d'une surveillance de la qualité des eaux de rivière mais dépourvu de suivi hydrologique. La déclinaison opérationnelle de DEPHy permet de disposer au point d'intérêt d'un cours d'eau de l'estimation optimale de débit journalier en l'état de nos connaissances hydrologiques, des données disponibles et des méthodologies testées. Outre la connaissance de la cinétique et de la valeur du débit journalier (l'hydrogramme), l'outil de calcul automatique permet de connaître l'incertitude prédictive totale des débits reconstitués. La recherche action DEPHy démontre l'apport de l'hydrologie quantitative et de l'analyse spatiale au suivi de la qualité des eaux de rivières en termes d'aide à la décision, d'analyse tendancielle et de connaissance de la pression de pollution.

I. Introduction générale

I.1 Préambule

Ce rapport final synthétise l'ensemble des développements méthodologiques et les principaux résultats obtenus dans le cadre de l'opération R&D **D**étermination des **E**coulements et des **P**hases **Hy**drologiques (DEPHy) dont la phase 3 s'achève avec la remise du présent rapport.

I.2 Définition du l'étude et calendrier

La phase 3 du projet DEPHy s'inscrit dans le cadre d'une convention (n°15C54112) passée entre l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (AERM) et l'université de Lorraine agissant en tant que tutelle du centre de recherche en géographie LOTERR (ex-Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz), équipe d'accueil 7304. Le Tableau 1 présente le calendrier prévisionnel et les lots accompagnant le dépôt de l'offre de recherche.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Lot 1 - Indice de crédibilité													
Rédaction d'une note méthodologique													
Collecte et traitement des données													
Test de l'indice de crédibilité en situation (pseudo) non jaugée													
Lot 2 - Suivi hydrométrique des sites de surveillance													
Recherche bibliographique													
Fouille dans les archives hydrométriques régionales													
Elaboration d'une méthode de valorisation des chroniques de hauteurs d'eau													
Apport de la méthode pour la simulation du débit en (pseudo) non jaugé													
Lot 3 - Nouveau référentiel climatique													
Analyse détaillée de l'existant													
Développement de nouvelles méthodes de spatialisation													
Comparaison aux produits en grille de Météo-France (Antilope)													
Production des grilles (précip, tempé, ETP)													
Pilotage/Reporting													
Réunions du comité de pilotage AERM-DREAL (suivi et restitution finale)													
Rapports intermédiaires													
Rapport final													

Tableau 1 : Calendrier prévisionnel et lots de l'opération DEPHy (phase 3).

I.3 Contexte et problématiques de recherche

L'exploitation et la valorisation des données issues des différents réseaux de surveillance, notamment les RCS (Réseau de Contrôle de Surveillance) et RCO (Réseau de Contrôle Opérationnel) mis en place dans le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE), nécessitent de disposer d'une information hydrologique au droit du site de surveillance. L'information relative au contexte hydrologique du prélèvement et au débit du cours d'eau au moment du prélèvement n'est pas toujours disponible car les points de surveillance des masses d'eau de « rivières » ne sont pas identiques à ceux du réseau de mesure hydrométrique (Figure 1).

Ainsi, dans la partie française du bassin Rhin-Meuse (≈ 31 400 km^2), **la maille de surveillance se dilate d'un facteur 4** lorsqu'on passe du réseau surveillance de la qualité physico-chimique[1] des cours d'eau au réseau de surveillance hydrologique[2] (Figure 1). De plus la surveillance qualité se focalise préférentiellement sur les petits bassins dont la surface est inférieure à 50 km^2 (Figure 2) et les petits cours d'eau, contrairement aux stations hydrométriques DREAL qui contrôlent préférentiellement des bassins de taille supérieure à 250 km^2 et des cours d'eau plus abondants (Figure 3).

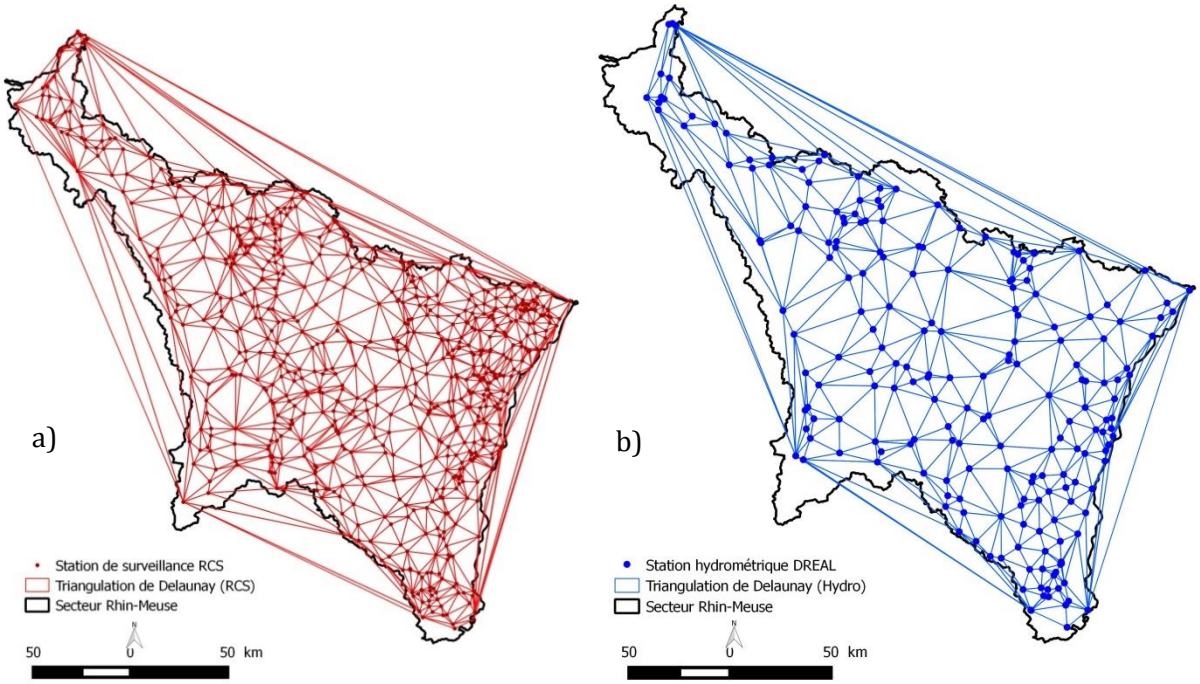


Figure 1 : Triangulation de Delaunay appliquée aux stations de suivi qualité des cours d'eau (a) et aux stations de suivi hydrométrique (b) dans l'espace Rhin-Meuse (partie française).

[1] Le référentiel de mesure de la qualité des eaux de surface géré par l'AERM comporte actuellement un peu plus de 700 stations cours d'eau soit une surface disponible par station de 40 km^2/station.

[2] Le référentiel de mesure en continu du débit géré par les DREAL Lorraine (pôle HRM) et Alsace (SPC Rhin-Sarre) comporte environ 190 stations hydrométriques soit une surface disponible par station de 160 km^2/station.

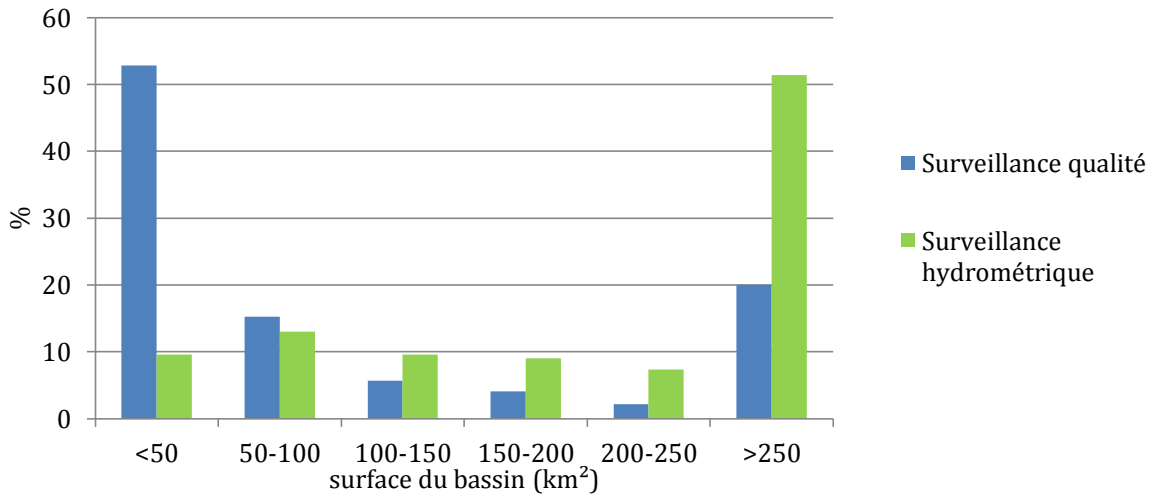


Figure 2 : Part en pourcentage des classes de surface de bassin couvertes par la surveillance de la qualité des cours d'eau (réseaux AERM) et par l'hydrométrie continue (réseaux d'Etat).

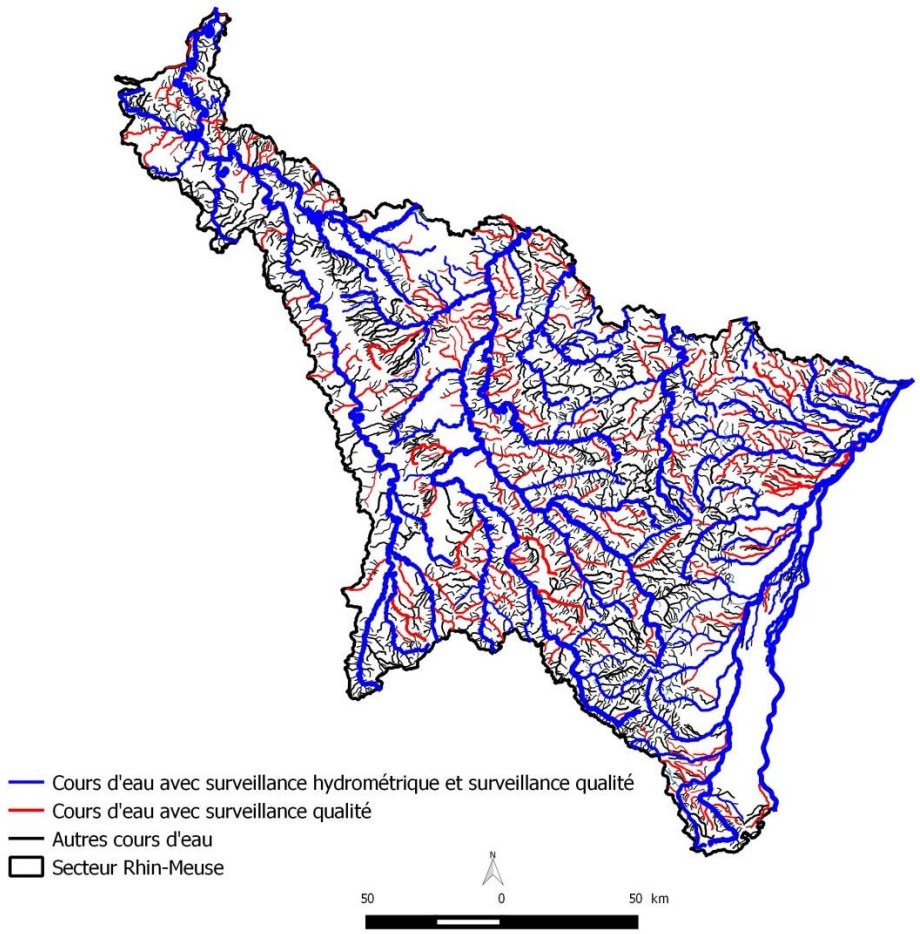


Figure 3 : Répartition de la surveillance physico-chimique et de la surveillance hydrologique le long du chevelu hydrographique dans l'espace Rhin-Meuse (partie française). L'épaisseur du chevelu est proportionnelle à l'ordre du cours d'eau (selon l'ordination de Strahler). Source du réseau hydrographique : BD Carthage.

Ce sont en effet le suivi règlementaire des phénomènes de crue et d'inondation ainsi que le suivi règlementaire des étiages sur les artères principales du réseau hydrographique qui conditionnent en premier lieu la géométrie du réseau de surveillance hydrologique (Figure 3).

L'information hydrologique **est pourtant primordiale pour expertiser** et **valoriser** par le calcul de flux de polluants par exemple**, les observations** physico-chimiques en fonction des conditions hydro-météorologiques sur les cours d'eau surveillés par l'AERM (Figure 4).

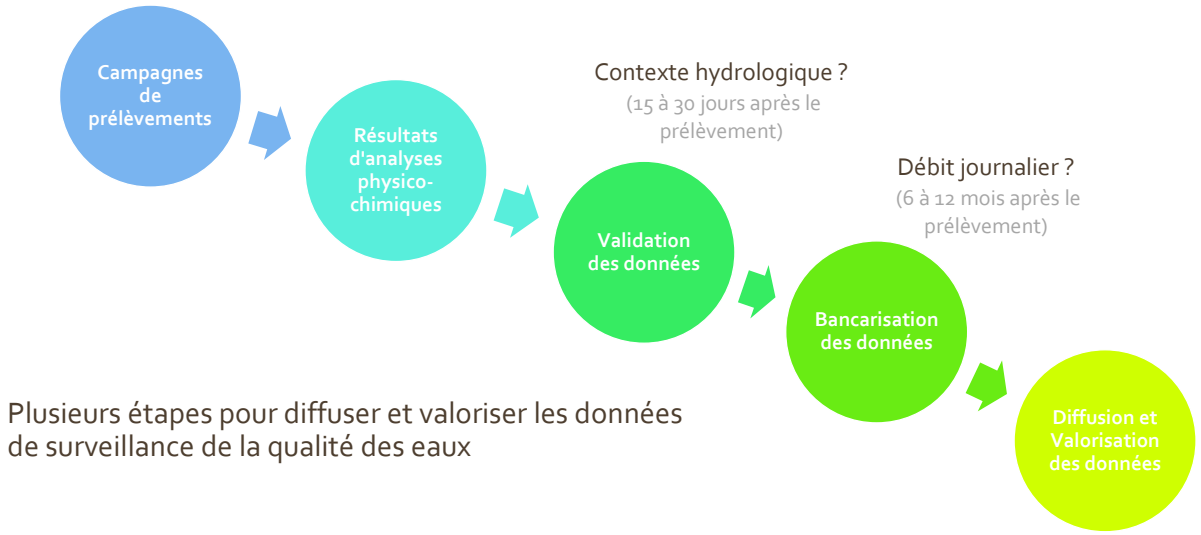


Figure 4 : L'information hydrologique associée à la surveillance de la qualité des cours d'eau (In Conan et al., 2015).

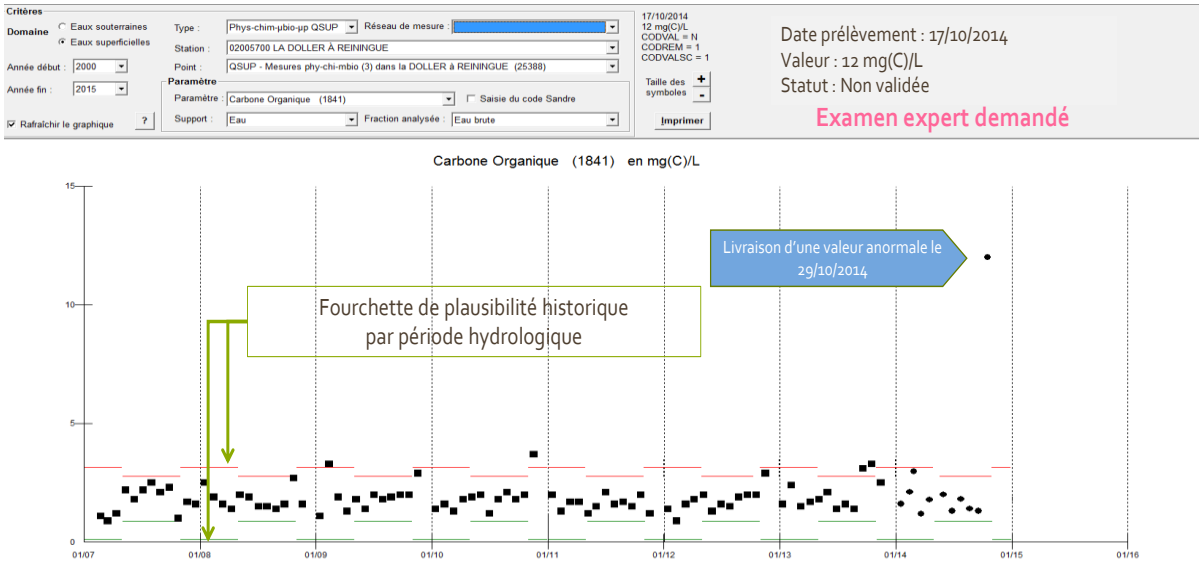


Figure 5 : Exemple de besoin d'expertise à court terme (In Conan et al., 2015).

En outre, la disponibilité de cette information hydrologique permet de mieux caractériser les tendances éventuelles en matière de qualité des eaux naturelles **et**

d'interpréter voire de filtrer les valeurs aberrantes détectées après analyse des prélèvements d'eau en laboratoire. La figure 5 montre un exemple de valeur aberrante (*horsain*) de concentration en carbone organique identifiée à la suite d'un prélèvement d'eau. Lorsqu'une valeur de concentration anormale est détectée, l'expert chargé de bancariser la donnée dans le SIERM[3] reçoit un message d'alerte du système d'information. S'enclenche alors la procédure suivante :

- Examen de cohérence avec les autres analyses réalisées sur le prélèvement
- Examen (si possible) de la cohérence amont-aval
- Examen des conditions de prélèvement
- Recherche de causes accidentelles
- **Examen de la situation hydrologique**

I.4 Objectifs scientifiques et opérationnels

Par conséquent, l'objectif général de l'opération DEPHy est de développer **une méthode de calcul efficace et robuste des débits journaliers et des phases d'écoulement** (montée de crue, descente de crue, tarissement) **des masses d'eau de rivière** sur le bassin Rhin-Meuse et **d'assurer l'entrée en production de cette méthode de calcul** aux sites de surveillance dépourvues d'information hydrologique (Figure 3).

Figure 6 : Echantillon de bassins jaugés et code Hydro des stations définissant leur exutoire.

[3] Système d'Information sur l'Eau Rhin-Meuse

La zone d'étude concernée par l'opération DEPHy correspond à la partie française du bassin Rhin-Meuse (Figure 6). Quelques bassins limitrophes tributaires de la Seine et de la Saône ainsi que des bassins allemands et belges ont été inclus dans l'étude de manière à enrichir l'échantillon de bassins donneurs (Figure 7). L'échantillon de bassins comporte **149 bassins** dont **40 % de bassins emboîtés** et **60 % de bassins adjacents** ce qui reflète **la structuration amont-aval** du réseau hydrométrique disponible (Figure 6)**.**

Deux climatologies ont été utilisées pour l'étude : **la climatologie SAFRAN de Météo France** (Quintana-Seguí et al., 2008) et **une climatologie aux postes** produite à partir de pluviomètres et de thermomètres sous abri météorologique (Figure 7). L'échantillon de bassins utilisés pour l'étude est détaillé dans l'annexe 1.

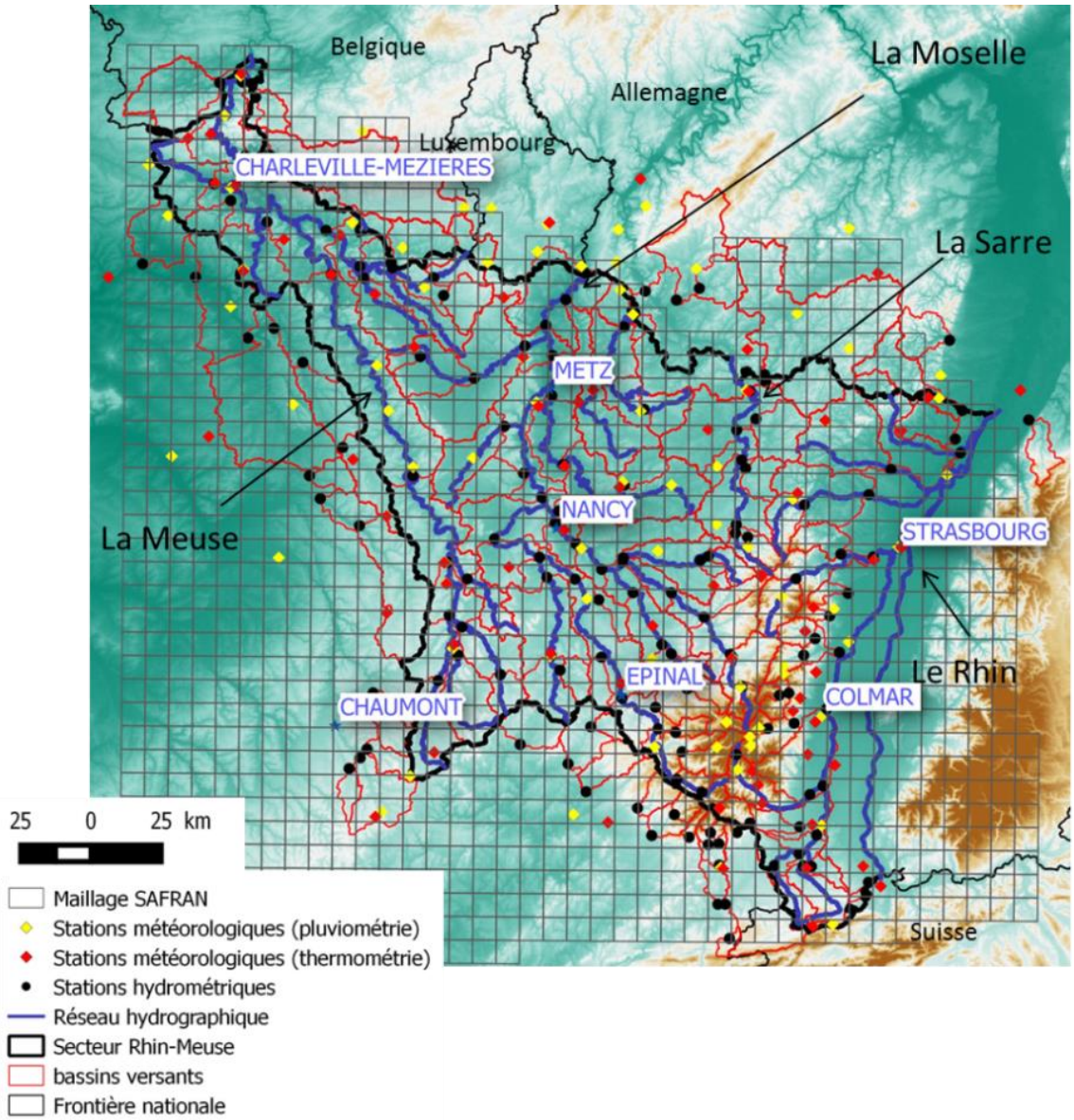


Figure 7 : Limites géographiques de l'étude, réseau d'observation hydro-métérologique et maillage de la climatologie SAFRAN de Météo France (partie française du bassin Rhin-Meuse).

II. Synthèse sur les méthodes de régionalisation de l'écoulement des eaux naturelles et principaux résultats

Le choix d'une stratégie de reconstitution de chroniques de débits journaliers manquantes ou partielles **ne peut que résulter d'un banc d'essai** appliqué à plusieurs méthodes de régionalisation. Cette partie du rapport synthétise les différentes voies de recherche explorées pour solutionner la problématique de l'étude DEPHy. L'ensemble des développements méthodologiques et des résultats résumés ci-dessous sont détaillés dans les publications suivantes : Plasse et al. (2012) ; Drogue et Plasse (2014) ; Plasse et al. (2014) ; Ben Khediri et Drogue (2015) ; Ben Khediri et Drogue (2016) ; Drogue et Ben Khediri (2016) ; Drogue et al. (2016).

La démarche de régionalisation décrite dans ce rapport est **empirique et inductive**. Elle s'appuie donc sur un corpus de données et de bassins ainsi qu'une théorisation qui laisse autant que possible **les données d'observation parler pour elles-mêmes et les bassins parler pour eux-mêmes**. En régionalisation, la démarche inductive consiste, à partir de données existantes, à inférer un modèle d'estimation régionale que l'on peut, **sous réserve d'apprentissage et de validation**, généraliser à d'autres points de l'espace avec un certain degré de confiance.

II.1 Régionalisation de l'écoulement par approche simulative pluie-débit

II.1.1 Combinaison de l'information hydrologique régionale et de l'information hydrologique locale

L'approche simulative pluie-débit s'est appuyée sur un modèle pluie-débit **empirique global faiblement paramétré** (GR4J ; Perrin et al., 2003). Celui-ci a été utilisé pour reconstituer les chroniques de débits journaliers[4]. Ce modèle **à structure fixe**, **a fait ses preuves sur un large échantillon de bassins** et se comporte aussi bien que des modèles plus complexes et à structure flexible (van Esse et al., 2013).

La figure 8 illustre un exemple de fiche synthétique produite automatiquement au format pdf après calage du modèle pluie-débit GR4J sur un bassin de notre échantillon. On y voit en outre les hydrogrammes observé et simulé, les courbes de débits classés, la dynamique et le cumul des erreurs du modèle ainsi qu'un tableau contenant les valeurs des critères de performance hydrologique.

[4] L'annexe 4 présente à titre d'exemple des algorithmes codés sous R pour simuler et régionaliser le débit journalier.

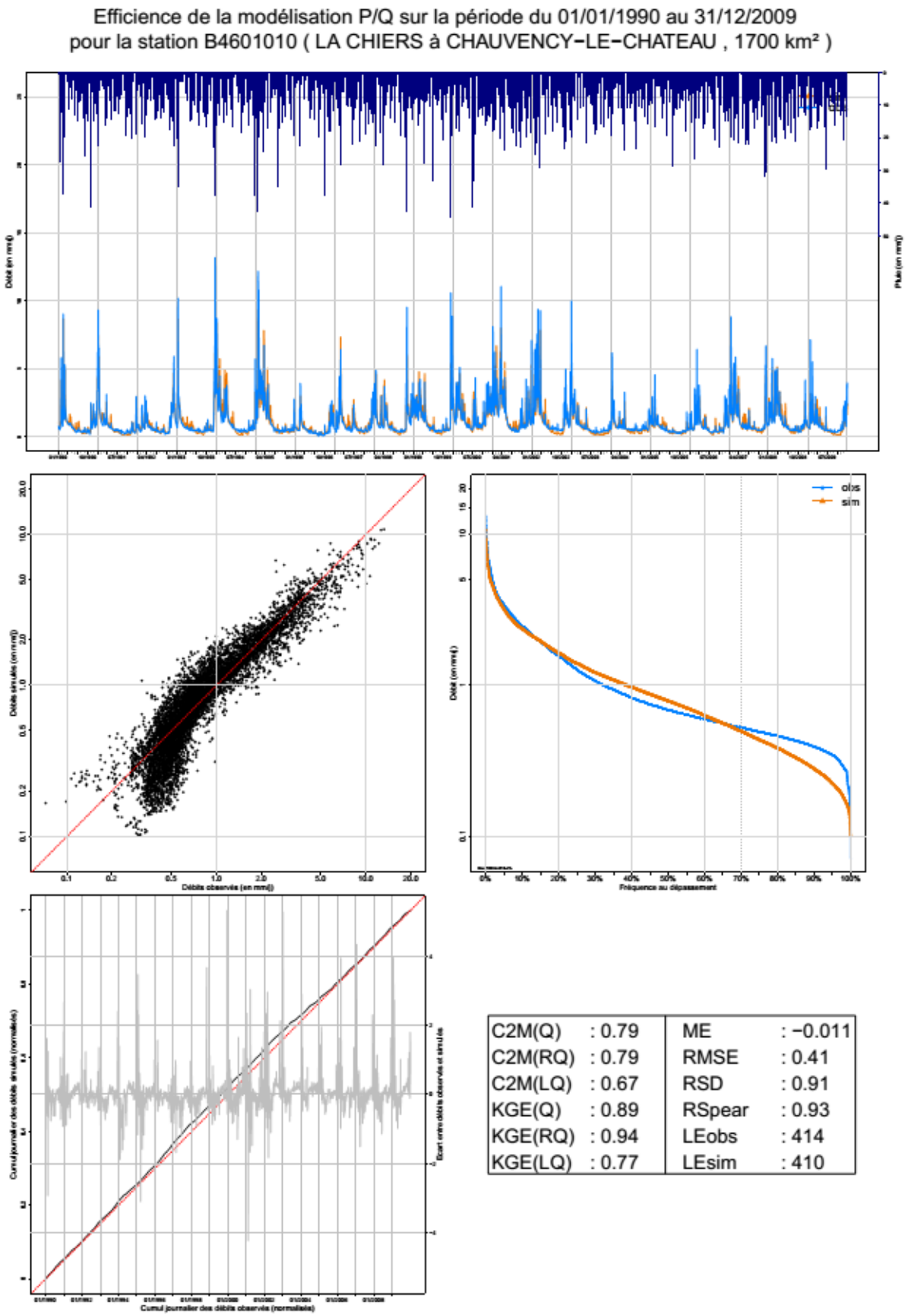


Figure 8 : Exemple de fiche pdf produite automatiquement après calage du modèle pluie-débit GR4J.

Le modèle GR4J **a été régionalisé** selon deux hypothèses de travail :

- La disponibilité au site à estimer de quelques observations de débits (**contexte partiellement jaugé**),
- L'indisponibilité au site à estimer de toute information hydrologique, observation de débit ou de hauteur d'eau (**contexte non jaugé**).

Dans les deux cas :

- Des bassins paramétrés, aussi appelés bassins donneurs, sont utilisés pour paramétrer le bassin receveur, dont l'exutoire est un site à estimer.

- Le **paramétrage** du bassin receveur est **contraint soit par la proximité spatiale** entre le(s) bassin(s) donneurs(s) et le bassin receveur lorsque le débit est inconnu au site à estimer[5] **soit par la similitude hydrologique** entre le(s) bassin(s) donneurs(s) et le bassin receveur lorsque le débit est partiellement connu au site à estimer.

- Des variantes des deux approches précitées ont été testées avec le recours par exemple **au krigeage topologique** pour interpoler les paramètres du modèle au lieu d'un transfert spatial direct de bassin donneur à bassin receveur.

- Le débit est reconstitué comme **une moyenne d'ensemble d'hydrogrammes simulés** à partir des jeux de paramètres des bassins donneurs et des entrées de précipitations et d'ETP du bassin receveur.

Il ressort des calculs hydrologiques et de **l'évaluation comparative** de la performance hydrologique de ces différentes approches **par validation croisée** sur un échantillon de **149 bassins** (Figure 3), que :

- Quand le débit n'est pas connu au site à estimer, l'approche simulative pluie-débit par krigeage topologique et par proximité spatiale sont les deux approches les plus performantes.
- Le niveau de performance optimale de ces deux méthodes de régionalisation est atteint avec quatre bassins donneurs (les quatre voisins les plus proches) et lorsque les bassins donneurs mal modélisés (C2M <0.7 en calage) sont écartés et n'interviennent pas dans le paramétrage du bassin receveur.
- Le recours à la distance de Ghosh (ou distance géostatistique) pour déterminer la proximité spatiale entre bassins ne change pas la performance hydrologique globale de la méthode par proximité spatiale par rapport à la distance euclidienne entre centre de gravité des bassins (distance gravitaire).
- La pondération des bassins donneurs au prorata de la distance qui les sépare du bassin receveur n'améliore pas significativement la performance hydrologique de la méthode de régionalisation par proximité spatiale.

[5]La sélection des bassins donneurs peut aussi résulter d'une combinaison de critères alliant proximité spatiale, connectivité hydraulique et similitude physique (Belemtougri, 2016 ; Drogue et al., 2016).

- La pondération des bassins donneurs au prorata de la performance hydrologique du modèle en validation locale n'améliore pas significativement la performance hydrologique de la méthode de régionalisation par proximité spatiale.
- Le recours à une approche multi-critères dans le paramétrage du bassin receveur permet de rendre le voisinage du bassin receveur plus homogène (*e.g.* les bassins donneurs ont des tailles moins contrastées) et de mieux prendre en compte l'information débitmétrique apportée par un bassin emboîté lorsqu'il existe.
- Le recours à une approche multi-critères n'améliore pas significativement la performance hydrologique globale de la méthode de régionalisation par proximité spatiale.
- Par conséquent la proximité spatiale peut être considérée comme un indicateur suffisant de la similitude hydrologique des bassins.
- L'approche simulative pluie-débit paramétrée à l'aide d'un suivi hydrométrique même faible du bassin receveur est plus compétitive que l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale (en particulier pour reconstituer le débit, c'est moins vrai pour la connaissance de la phase hydrologique : montée de crue, décrue, tarissement).
- Lors du paramétrage du bassin receveur, la réécriture du temps de base de l'hydrogramme unitaire (paramètre X4 de GR4J) à l'aide d'une fonction de correction faisant intervenir le rapport surface de bassin receveur/surface de bassin donneur permet d'améliorer la performance hydrologique de l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale.
- Environ 2 bassins sur 3 sont bien modélisés en conditions non jaugées par l'approche simulative pluie-débit en mode proximité spatiale. Certains bassins ont donc un comportement hydrologique atypique difficilement modélisable avec un modèle pourtant remarquablement flexible comme GR4J ce qui requiert le maintien d'une surveillance hydrométrique à l'exutoire de ces bassins.
- Les « petits » bassins (< 100 km^2) sont moins faciles à modéliser que « les grands » bassins (> 500 km^2) en conditions non jaugées par l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale.
- L'incertitude prédictive totale du débit reconstitué peut être estimée de façon fiable et robuste par transposition spatiale et moyenne d'ensemble des incertitudes prédictives totales estimées sur les quatre bassins les plus proches du bassin receveur.

La figure 9 présente les différents patterns spatiaux du critère de performance hydrologique (C2M) obtenus en calage local, en krigeant les paramètres du modèle hydrologique, en transposant les vecteurs de paramètres des quatre bassins voisins (proximité géographique) et en faisant pareil mais en modulant la sélection des bassins voisins en fonction de le similitude physique et de la connectivité hydraulique (mode multi-critères). Les résultats montrent qu'il n'y a pas de gain de performance significatif en mode multi-critères par rapport à l'approche par proximité géographique. Celle-ci est légèrement supérieure au krigeage.

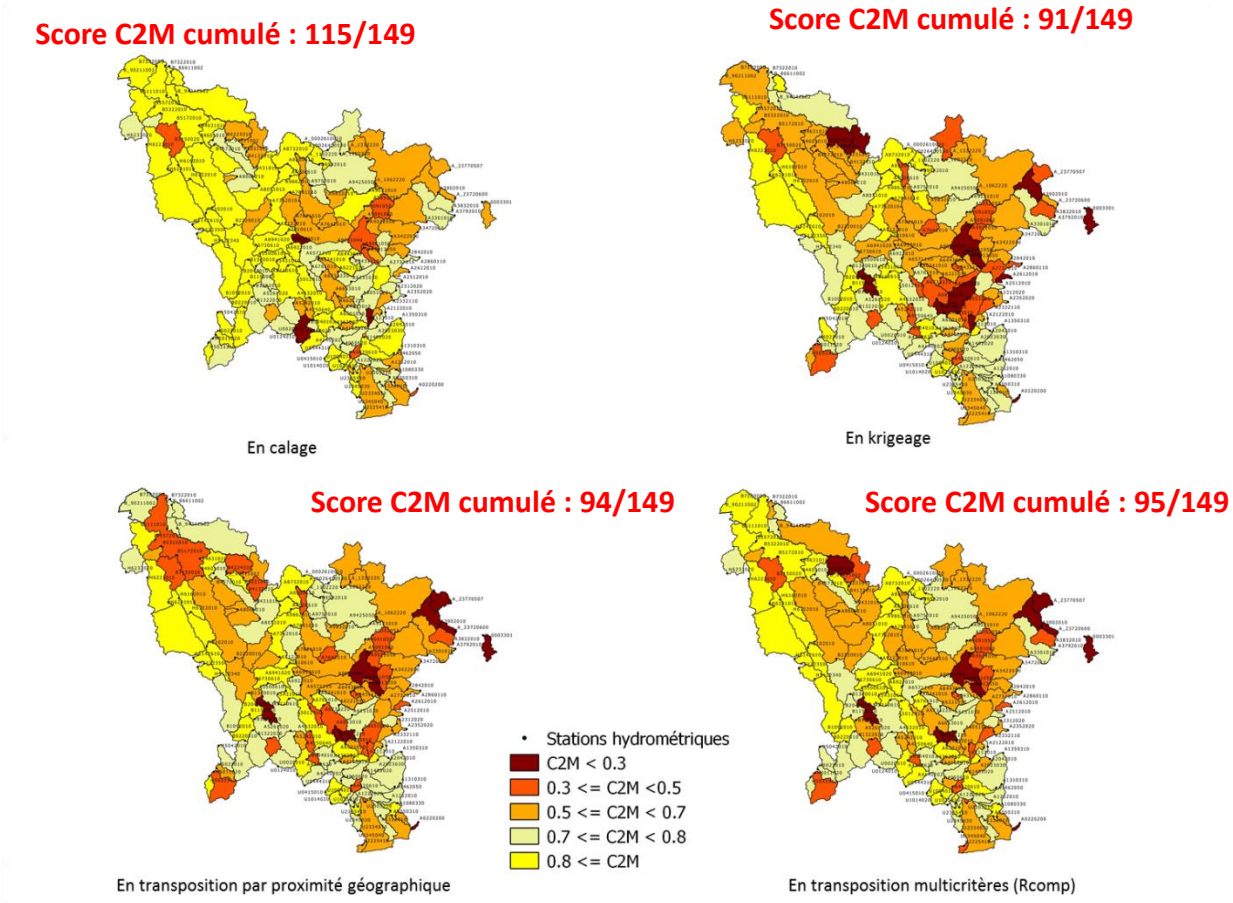


Figure 9 : Scores de performance hydrologique de trois solutions de régionalisation des paramètres du modèle GR4J.

II.1.2 Valorisation opérationnelle des cotes à l'échelle et de l'hydrométrie ponctuelle : une voie d'amélioration possible du processus de régionalisation de l'écoulement ?

La stratégie de reconstitution des chroniques de débits manquantes ou partielles fondée sur l'exploitation de chroniques de hauteurs d'eau (axe 2 de DEPHy 3) **a été abandonnée** en raison d'un **problème de faisabilité technique et financière**. En effet, l'AERM bien que poursuivant les relevés aux stations de suivi qualité possédant une échelle limnimétrique et la gestion d'une base de cotes à l'échelle, **ne possède plus la compétence hydrométrie**[6]. Les échelles ne sont plus entretenues et la géométrie des sections de prélèvement n'est plus contrôlée.

S'il est envisageable à la rigueur **qu'une ou deux stations de suivi qualité soient équipées et jaugées en continu**, il est exclu que l'AERM assure à nouveau la maîtrise

[6] Cf. circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie dans les DREAL (ex-DIREN) et les SPC (services de prévision des crues) et circulaire du 4 novembre 2010 relative à l'évolution de l'organisation pour la prévision des crues et l'hydrométrie (BO du MEEDDM n° 2010/21 du 25 novembre 2010).

d'ouvrage d'un parc d'échelles limnimétriques. La régionalisation de l'écoulement ne pourra pas non plus tirer profit de campagnes d'hydrométrie ponctuelle trop coûteuses et situées hors du champ de maîtrise d'ouvrage actuel de l'AERM.

- De fait, en l'état actuel des choses, seules les approches de régionalisation par voisinage géographique (proximité spatiale) fondées sur une information hydrologique régionale sont applicables en opérationnel pour répondre aux besoins exprimés par l'AERM.

II.1.3 Tentative d'amélioration de l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale : analyse de sensibilité du modèle régionalisé aux entrées de précipitations et d'ETP

Une autre façon d'améliorer la performance hydrologique du modèle régionalisé dans sa version classique (approche simulative pluie-débit par proximité spatiale) consiste à **rechercher la meilleure description spatiale et temporelle des entrées de précipitations et d'ETP prescrites au modèle.** En effet le paramétrage et la performance hydrologique du modèle GR4J régionalisé dépendent en partie des données d'entrée du modèle.

Dans la version initiale du modèle régionalisé implémentée dans le cadre de la phase 1 de DEPHy, celles-ci prenaient alors la forme d'entrées atmosphériques d'eau (précipitations) et d'énergie (ETP) dans un bassin déterminées à partir de chroniques de précipitations et de températures de l'air **estimées par réanalyse sur des points de grille** (climatologie SAFRAN de Météo France). Pour des raisons de délai de livraison (actualisation de la climatologie au cours de l'année n+1), la déclinaison opérationnelle de l'opération DEPHy[7] **a nécessité de prescrire au modèle GR4J régionalisé des entrées de précipitations et d'ETP différentes** de celles utilisées au cours de la phase 1 de DEPHy.

Le remplacement de la climatologie SAFRAN par des mesures issues des postes d'observation météorologique de Météo France a motivé **la réalisation d'une analyse de sensibilité** destinée à évaluer l'impact du changement de forçage climatique sur la performance hydrologique du modèle régionalisé dans sa version classique (approche simulative pluie-débit par proximité spatiale). Une autre alternative à la climatologie SAFRAN est discutée dans l'annexe 3 du présent rapport. Voici les points saillants qui se dégagent de l'analyse de sensibilité :

- Le changement de stratégie d'échantillonnage spatial des précipitations et de mode de calcul des entrées de précipitations a un effet direct sur le paramétrage du modèle GR4J et sur son niveau de performance.
- Grâce à la flexibilité que lui apportent ses quatre paramètres libres, le pouvoir prédictif du modèle régionalisé parvient à tirer parti d'une information pluviométrique mieux distribuée dans les trois dimensions de l'espace (latitude, longitude, altitude).

[7]Autrement dit l'entrée en production de l'outil de calcul hydrologique destiné à reconstituer automatiquement les chroniques de débit manquantes ou partielles au droit des stations de surveillance de la qualité des cours d'eau j-15 à j+15 ; j étant la date de prélèvement de l'échantillon d'eau de rivière.

- Quand le débit est connu, on constate que la performance hydrologique du modèle GR4J est presque systématiquement meilleure lorsque l'entrée de précipitations est calculée avec un nombre restreint de pluviomètres par rapport à l'ensemble des pluviomètres disponibles.
- Quand le débit est connu, un nombre minimal de pluviomètres est nécessaire (entre 1 et 3) pour atteindre un niveau de performance hydrologique satisfaisant et éviter de mauvaises simulations.
- Les chroniques d'ETP de bassin calculées à partir de sous-échantillons de postes météorologiques sont peu sensibles à la combinaison de postes et finalement, peu différentes les unes des autres.
- La performance hydrologique du modèle régionalisé dans sa version classique (approche simulative pluie-débit par proximité spatiale) est très peu impactée par la connaissance de l'ETP.
- La performance hydrologique du modèle régionalisé dans sa version classique ne tire pas profit d'une connaissance optimale des précipitations ni sur les bassins donneurs ni sur le bassin receveur.
- La combinaison des hydrogrammes des bassins voisins est plus compétitive que l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale ce qui avait déjà été démontré pour un échantillon de stations de suivi qualité plus restreints.

II.2 Régionalisation de l'écoulement par approche simulative débit-débit

L'alternative à l'approche simulative pluie-débit **consiste à transférer directement l'information hydrologique disponible dans le voisinage d'un site à estimer** en partant du postulat que le comportement hydrologique du bassin qu'il définit en amont de ce site est similaire à celui de ses voisins. Cela suppose également que **les hydrogrammes des bassins donneurs soient synchrones avec celui du bassin receveur et que la réponse hydrologique des bassins donneurs aux précipitations est similaire à celle du bassin receveur**. Au pas de temps journalier, cette hypothèse est réaliste tant que les bassins sont géographiquement proches et de taille similaire. Deux variantes de l'approche simulative débit-débit ont été testées :

- **L'approche par stations de référence multiples** utilisant la propriété d'auto-corrélation spatiale du débit.
- **La combinaison arithmétique simple des hydrogrammes** des bassins voisins.

Il ressort de l'analyse comparative de ces deux approches avec l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale que :

- L'approche simulative débit-débit est plus performante que l'approche simulative pluie-débit par proximité spatiale en raison du fait qu'elle n'utilise pas explicitement les observations pluviométriques pour reconstituer les chroniques de débits.

- Elle atteint son niveau de performance hydrologique optimale avec quatre bassins donneurs sélectionnés par la métrique de la distance composite[8] qu'il convient de préférer à la distance gravitaire (distance euclidienne entre centres de gravité de bassin).
- La performance de l'approche simulative débit-débit se dégrade significativement à partir d'une densité spatiale du réseau de suivi hydrométrique inférieure à 1 station pour 500 km².
- En conséquence, l'outil de calcul automatique du débit a été développé à partir des observations de débit.
- Ceci à l'avantage de le rendre indépendant de livraisons de données météorologiques ou climatiques produites par Météo France.

La figure 10 présente les courbes de fréquence cumulée du critère de performance hydrologique (C2M sur la racine des débits) en validation obtenus en calage local, par l'approche simulative pluie-débit à quatre voisins et par l'approche simulative débit-débit à quatre bassins. Les CFC et les scores montrent la supériorité de l'approche débit-débit sur l'approche pluie-débit. Pour la moitié des bassin de l'échantillon, celle-ci fait même mieux que le modèle lorsqu'il est optimisé avec les chroniques de débits disponibles à l'exutoire des bassins.

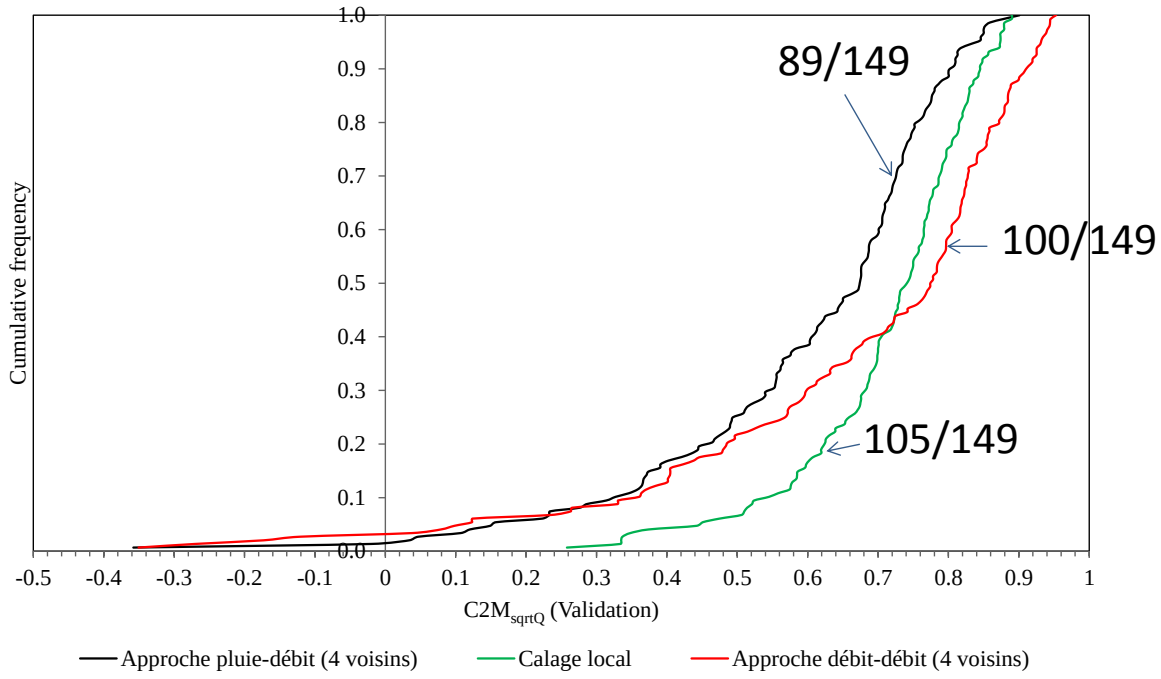


Figure 10 : Courbes de fréquence cumulée (CFC) du critère de performance hydrologique et score total pour deux solutions de régionalisation. La CFC du calage local est également fournie. Les résultats sont présentés pour les 149 bassins de notre échantillon.

[8] Voir le paragraphe III.1.

III. Quelle chaîne de calcul automatique du débit au point d'intérêt d'un cours d'eau ?

III.1 Présentation de la chaîne de modélisation de l'information hydrologique

En s'appuyant sur les éléments conclusifs de la fin du II.2, une chaîne de production automatique de l'information hydrologique associée au suivi de la qualité des cours d'eau a été élaborée (Figure 11) et sera implémentée au droit des stations du référentiel de surveillance de la qualité des eaux de rivière géré par l'AERM.

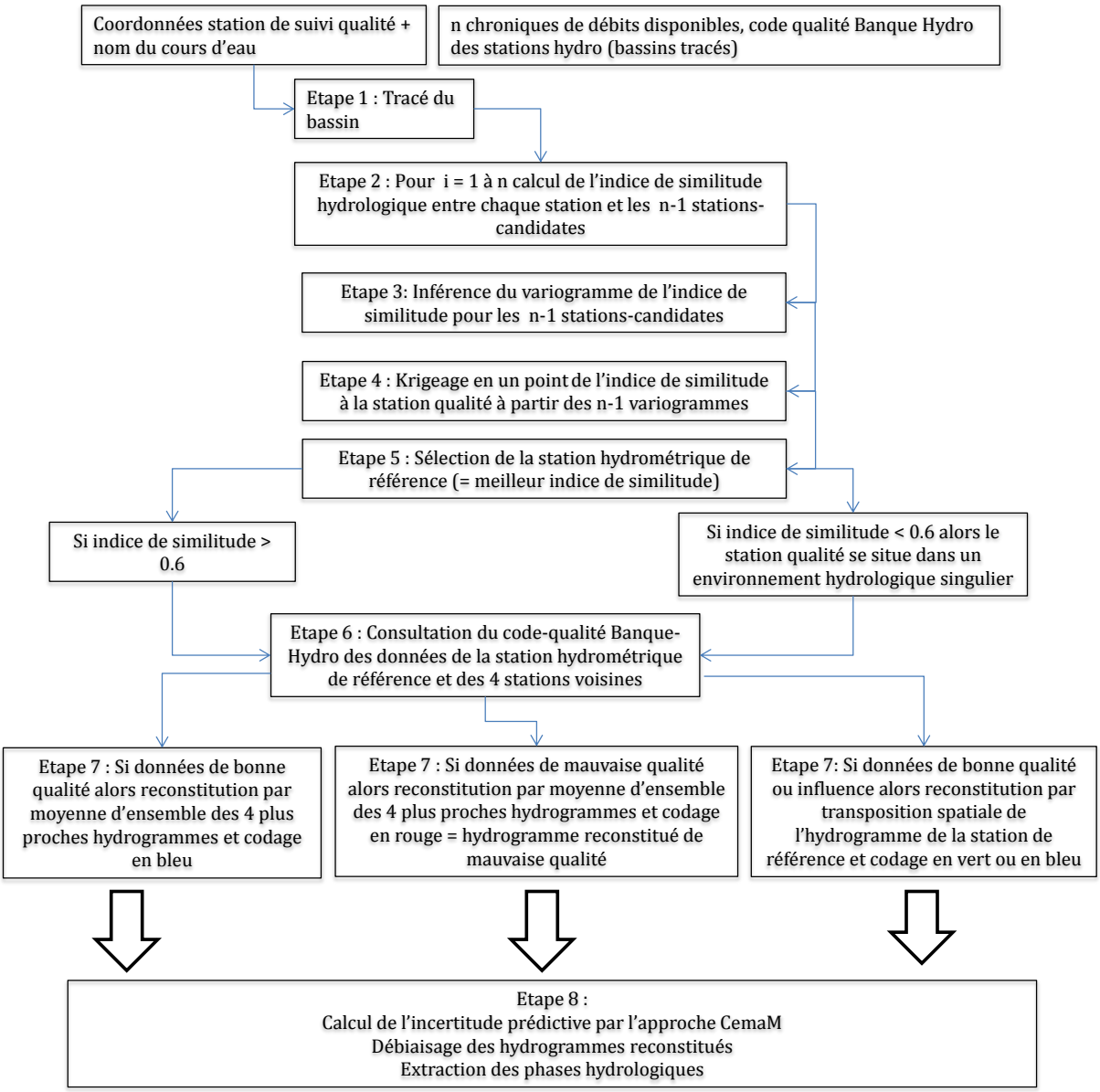


Figure 11 : Chaîne des géotraitements et des calculs hydrologiques codée sous Matlab pour produire automatiquement l'information hydrologique associée au suivi de la qualité des cours d'eau.

Ce protocole sera déployé en opérationnel pour déterminer automatiquement l'information hydrologique (débit journalier, phase d'écoulement, incertitude prédictive totale) sur un point du réseau hydrographique où elle est inconnue. Il valorise l'information hydrologique disponible dans le voisinage du point d'intérêt par le biais d'une analyse spatiale de la ressemblance hydrologique des bassins. Il appelle plusieurs remarques :

- **Etape 1 :** Les sites à estimer pouvant varier, l'outil présenté ci-dessus doit pouvoir tracer un bassin versant à la demande en fonction de coordonnées géographiques sans ajustement pour faire coïncider le site à estimer avec le talweg issu du plan de drainage. Les dalles du MNT SRTM constituent la trame du plan de drainage. Le logiciel GRASS a produit un premier plan de drainage. **Un script Matlab permet de contraindre les directions d'écoulement de cette grille en utilisant le tracé des cours d'eau de la BD CARTHAGE**. La grille de direction **ainsi corrigée**[9] doit permettre de restituer le réseau hydrographique de référence (figure 12). Cette procédure n'est en principe qu'à appliquer qu'une seule fois, sous réserve que tous les sites à estimer se situent sur des cours d'eau pris en compte.

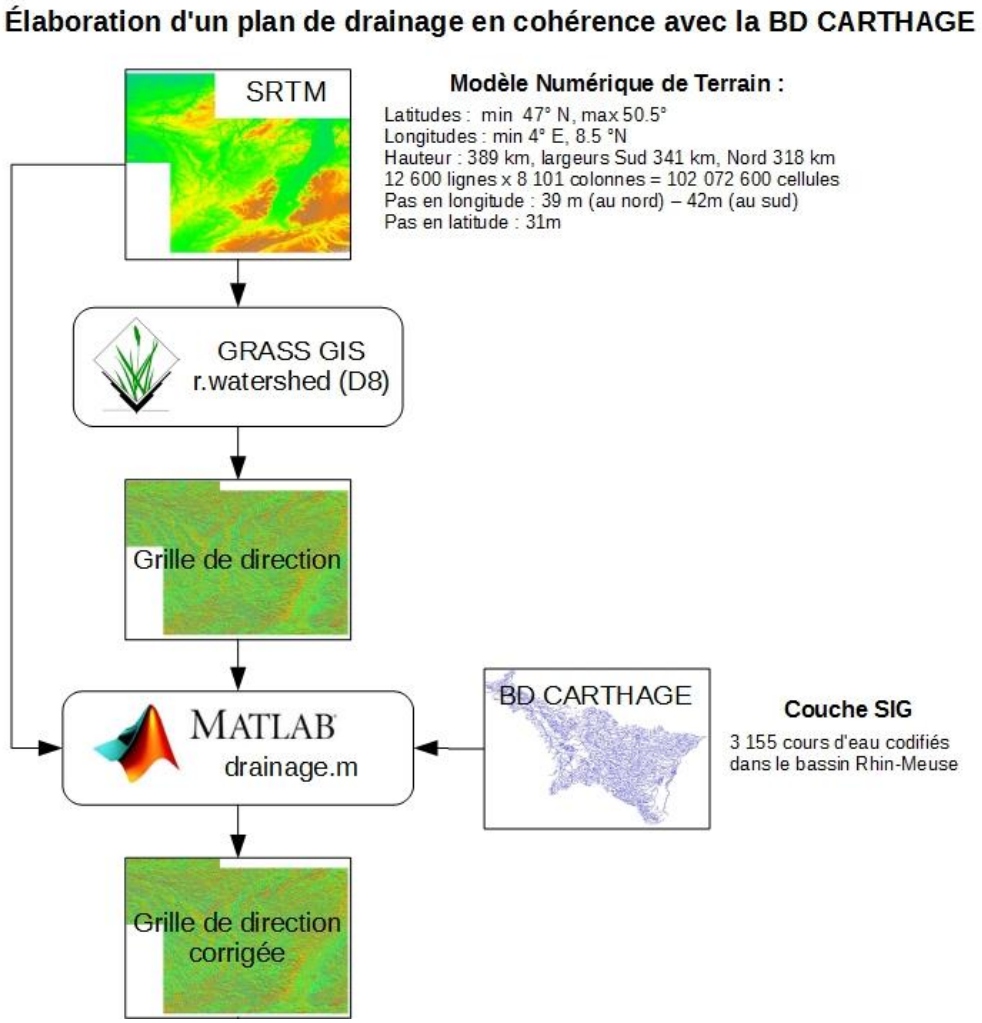


Figure 12: Chaîne des géotraitements codée sous Matlab pour élaborer un plan de drainage en cohérence avec la BD Carthage.

[9] Voir l'annexe 5 pour le code Matlab.

Etape 2 : Le choix de la distance composite[10] ou hydrologique pour mesurer la distance inter-bassins résulte d'une analyse comparative effectuée par Lebecherel (2015) sur un large échantillon de bassins situés en France. **Elle permet de transférer plus efficacement l'information hydrologique** (paramètres de modèle ou observations de débit) des bassins donneurs vers un bassin receveur et **d'obtenir des voisinages plus homogènes** du point de vue de la taille des bassins comme le montre la figure 13, ce qui améliore dans ce cas la performance de la méthode de régionalisation par proximité spatiale.

« Panier » de bassins donneurs :

1) Le Loison@Han-les-Juvigny (349 km^2)
2) Le Ruisseau_de_Vaux@Morgem. (42 km^2)
3) L'Aire@Chevieres (957 km^2)
4) L'Orne@Boncourt (414 km^2)

a)

« Panier » de bassins donneurs :

1) L'Aire@Chevieres (957 km^2)
2) La Chiers@Carignan (1978 km^2)
3) L'Aisne@Givry (2888 km^2)
4) La Chiers@Chauvency-Le-Château (1706 km^2)

b)

Figure 13 : Comparaison des voisinages obtenus par distance gravitaire (a) et par distance composite (b) pour le bassin receveur de la Meuse@Chooz (code Hydro : B720000 ; 10180 km^2).

Lebecherel (2015) discutant le type de distance à prendre en compte pour régionaliser l'écoulement note en effet que le fait de considérer la distance séparant les exutoires des bassins dans la distance hydrologique et non pas seulement la distance entre centroïdes de bassins, « *permet d'écarter des bassins donneurs très grands par rapport au bassin cible ou au contraire de sélectionner des bassins donneurs de tailles comparables au bassin cible et dont les exutoires sont très proches.* » La figure 14 montre les limites d'une sélection des bassins donneurs qui ne seraient fondées que sur la distance inter-exutoire ou inter-centroïde.

[10] Calculée comme racine($0.8d_{gravitaire} + 0.2d_{exutoire}$)

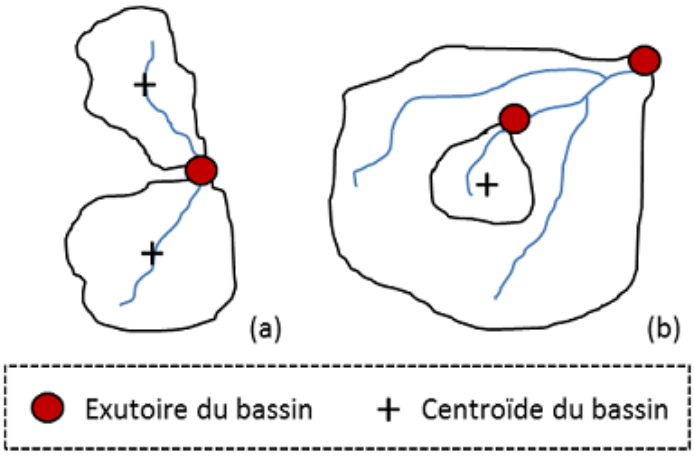


Figure 14 : Schémas de deux cas où de simples distances basées sur des points de références peuvent donner des résultats incohérents : (a) deux bassins différents avec des exutoires extrêmement proches situés à leur confluence, (b) deux bassins emboités avec des centroïdes extrêmement proches (In Lebecherel, 2014).

Notons enfin que par construction **la distance hydrologique est assez proche de la distance de Ghosh (ou distance géostatistique)** qui est une extension de la distance euclidienne à l'ensemble des paires de points (pixels) entre deux bassins. Mais comme nous l'avons déjà signalé à propos de l'approche simulative pluie-débit, il n'est pas certain que la performance hydrologique globale de la méthode simulative augmente avec la distance composite puisque les cas où un gain de performance est observé (par exemple pour la Meuse à Chooz ou la Moselle à Uckange dans notre échantillon de bassin) sont neutralisés par des cas où il se produit une baisse de performance.

Néanmoins, un test effectué sur notre échantillon de bassins en approche pluie-débit montre un léger gain de performance avec la distance hydrologique. C'est la raison pour laquelle nous l'avons adoptée dans notre démarche d'interpolation spatiale des hydrogrammes.

- **Etape 3 :** L'indice de similitude correspond à une métrique appelée KGE (pour Kling-Gupta Efficiency) qui permet selon Lobligeois (2014) *de trouver un meilleur compromis entre différentes qualités attendues sur les débits d'un bassin* donneur (*biais, variance, corrélation, relativement aux débits* d'un bassin receveur) par rapport au critère de Nash-Sutcliffe classiquement utilisé en modélisation hydrologique (Gupta et al., 2009). Il est appliqué à la racine carrée des débits **dans la mesure où nous souhaitons valoriser l'ensemble de la gamme de débits** observés aux stations hydrométriques **dans la caractérisation de la similitude hydrologique** entre stations hydrométriques. **L'indice de similitude est calculé à partir des chroniques de débits d'une longueur au moins égale à une année hydrologique**.

En cas de taux de lacunes trop élevé, le bassin donneur est abandonné. Dans le cas le plus défavorable, la reconstitution de l'hydrogramme ne se fera qu'à partir d'un seul bassin donneur parmi les quatre plus proches voisins ou à partir du voisin

suivant si les quatre plus proches voisins ne fournissent pas une chronique de débits suffisamment complète. **Le nombre et l'identité des bassins donneurs** utilisés pour reconstituer l'hydrogramme au site à estimer **devront apparaître sur le graphique de l'hydrogramme reconstitué**.

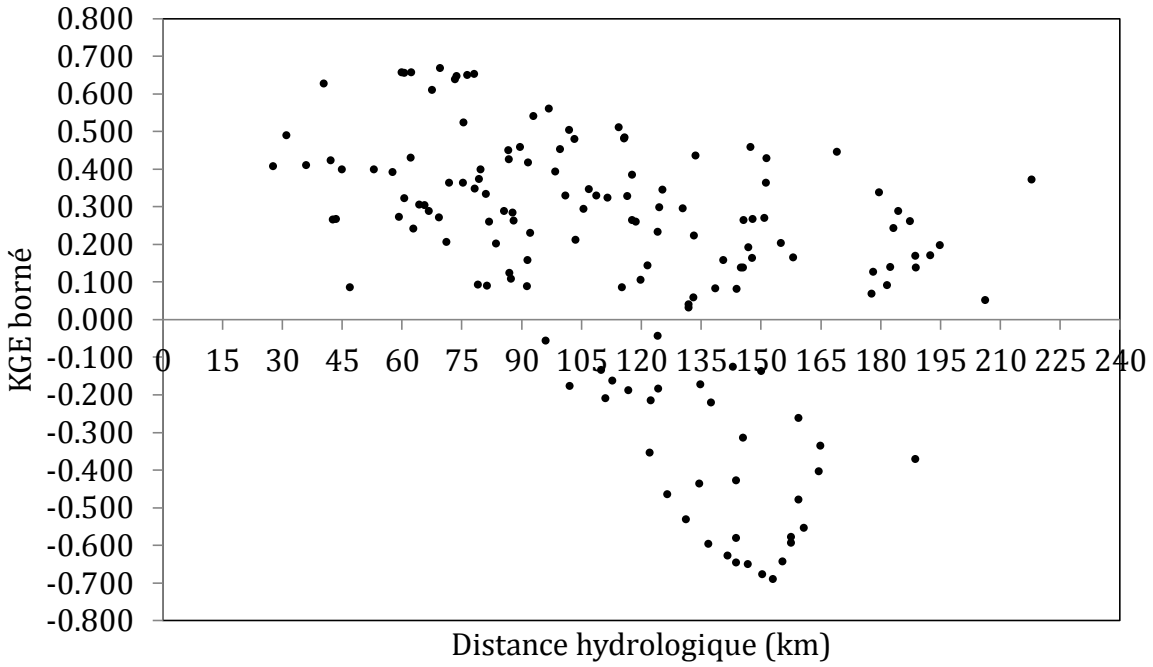


Figure 15 : Relation entre la distance hydrologique et l'indice de similitude (KGE borné). Exemple de point d'intérêt : B3150020, la Meuse@Stenay.

La figure 15 montre que le plus proche voisin au sens de la distance hydrologique **n'est pas toujours le bassin (l'Ornain@Tronville) qui a le plus d'affinité hydrologique avec le bassin receveur**. Dans le cas donné en exemple il s'agit de l'Aisne@Givry situé à plus de 60 km. Les quatre plus proches voisins ne sont donc pas toujours les bassins les mieux corrélés au point d'intérêt ! En conséquence il **vaut mieux raisonner dans l'espace du KGE que dans l'espace de la distance hydrologique** pour définir le voisinage le plus pertinent pour régionaliser le débit.

- **Etape 4 :** Le recours à la technique du krigeage ordinaire en un point **présuppose que l'indice de similitude soit structuré dans l'espace** (et donc que la variogramme ne soit pas de type pépitique).

  Cela présuppose également que le débit a une propriété d'autocorrélation spatiale (variation lente de l'écoulement de surface dans l'espace) ce qui a priori est le cas puisque **le pattern régional de l'écoulement de surface s'organise principalement en fonction de celui du soubassement géologique** des bassins conduisant à la typologie suivante: **bassins perméables calcaires** (ex. l'Esch à Jézainville), **bassins perméables gréseux** (ex. la Mortagne à Sainte-Hélène), **bassins du socle vosgien profitant d'apport gréseux** (ex. la Meurthe à Saint-Dié), **bassins imperméables du socle vosgien** (ex. la Moselle à Rupt-sur-Moselle), **bassins imperméables marneux et argileux** (ex. la Petite Seille à Château-Salins). Pour confirmer cette hypothèse, **le corrélogramme des écoulements** (lames d'eau

écoulées journalières) a été tracé sur la période 1990-2002 pour notre échantillon de bassins (figure 16) en prenant comme référence la distance hydrologique et comme indicateur de corrélation spatiale **l'indice KGE** que nous avons préféré au coefficient de corrélation de Bravais-Pearson **en raison de la prise en compte du biais sur les volumes écoulés et du biais sur la variance**. A titre d'exemple la figure 16 montre un nuage de points entre deux stations, la Moselle à Toul de code A5730610 et la Thur à Pulversheim de code A1462050, qui serait fortement corrélée au sens du r de Bravais-Pearson (r = 0.920) alors que le KGE ne vaut que 0.314 en raison **du biais de moyenne et du biais de variance** existant entre les deux distributions de débits.

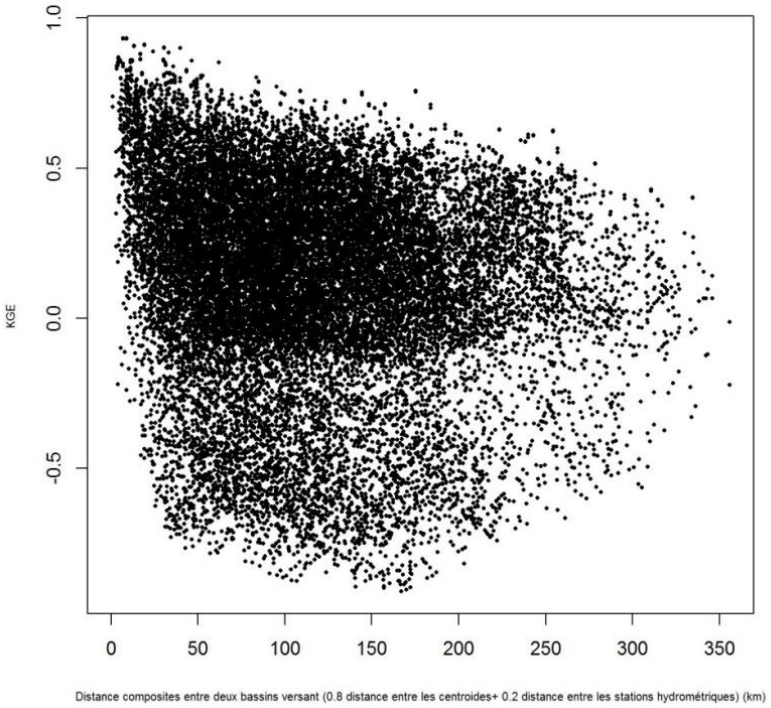


Figure 16 : Corrélogramme des écoulements (lames d'eau écoulées journalières) dans l'espace Rhin-Meuse. Période 1990-2002, 149 stations hydrométriques, distance hydrologique, indice de corrélation spatiale : KGE (variante bornée entre -1 et 1).

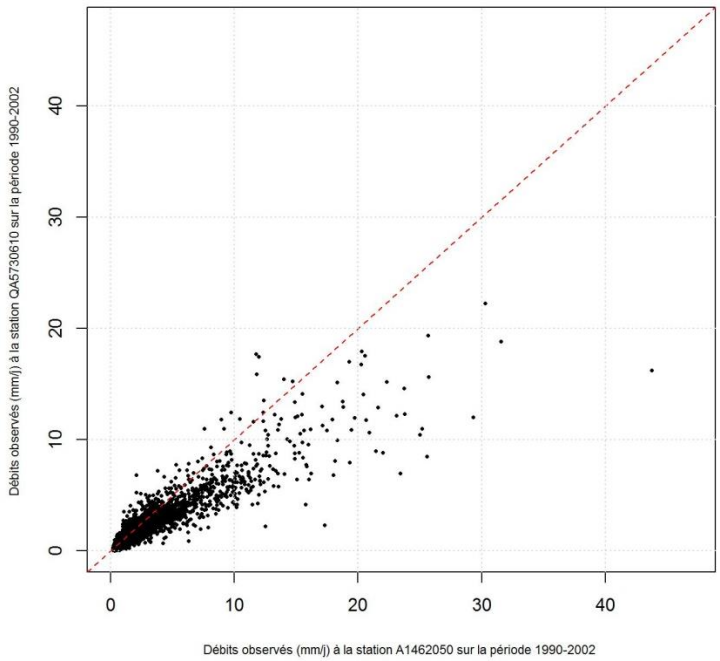


Figure 17: Nuage de corrélation entre les débits journaliers de la Moselle à Toul et ceux de la Thur à Pulversheim.

Il existe dans la classe de distance 0-50 km des paires de bassins caractérisées par **une faible corrélation spatiale tout en étant proches** (Figure 16). A l'inverse, certaines paires de bassins sont fortement corrélées tout en étant éloignées de plus de 100 km. Cela signifie **que certains bassins ont une aire d'influence élevée pouvant atteindre 100 km** (on retrouve l'idée de la généricité régionale des paramètres de certains bassins). Si on les considère comme de potentiels bassins donneurs cela signifie qu'ils peuvent apporter une information hydrologique utile à un bassin receveur malgré la « forte » distance hydrologique qui les sépare. Dans l'optique de rechercher une valeur-seuil du KGE synonyme de singularité locale (Figure 10) nous avons recherché la valeur du KGE pour laquelle 10 % des stations sont sans station de référence.

Cet effectif est atteint pour KGE = 0.6 et une distance hydrologique moyenne de 17 km. Ce seuil est **pertinent** dans la mesure où figurent dans l'échantillon de stations sans station de référence les stations suivantes : A3792010, B5172010, A9352050, A3902010, B2042010, A1252010, A9021040, A8732010, A9013050, A9001050, A_23720600, A_0003301, A_23770507, U2334010. Or **toutes ces stations** ont été identifiées dans nos précédents travaux **comme des stations singulières** ce qui valide indirectement la valeur-seuil retenue.

- **Etape 5 :** Si au site à estimer la corrélation spatiale de l'indice de similitude hydrologique est faible cela signifie que la station de suivi qualité possède dans son environnement proche une station hydrométrique faiblement corrélée aux autres. Cela peut correspondre **soit à une singularité naturelle, le cours d'eau ayant un régime atypique, soit à une station hydrauliquement mauvaise, soit à une influence anthropique** (effet d'un barrage par ex.), soit **une station isolée**. Par conséquent cela suppose d'interroger les métadonnées de la station (code qualité de la Banque Hydro et type d'influence) pour détecter un éventuel défaut sur les données ou une éventuellement influence sur le cours d'eau.

  Si c'est le cas alors on peut considérer que la faible valeur de l'indice de similitude est imputable à ce problème et coder l'hydrogramme reconstitué en rouge pour alerter l'expert en physicochimie des eaux de surface à l'Agence de l'Eau de la mauvaise qualité de l'hydrogramme reconstitué ou en vert pour indiquer qu'il s'agit d'un écoulement probablement influencé. Dans le cas contraire le codage se fait en bleu et seule la station de référence est utilisée pour reconstituer l'hydrogramme au site à estimer ce qui maximise la chance que le site à estimer ait le même comportement hydrologique que la station de référence.

- **Etape 6 :** La transposition spatiale directe du débit de la station de référence au site à estimer **suppose une normalisation préalable du débit par la surface des bassins**. En d'autres termes si l'information hydrologique à transférer s'exprime en unité de débit brut (l/s ou m^3/s) la méthode de transposition spatiale consiste à multiplier le débit du bassin receveur (non jaugé) par un rapport de surface entre le bassin donneur (jaugé) et le bassin receveur. **Cette loi de rendement pourrait ne pas être linéaire, ce point demandera quelques investigations supplémentaires**.

- **Etape 7 :** Le calcul de l'hydrogramme d'ensemble se fait par une **moyenne pondérée** des hydrogrammes individuels. Ceux-ci sont pondérés au prorata de la valeur de l'indice de similitude du bassin donneur auquel ils se rattachent. **Ainsi plus l'indice de similitude d'un bassin donneur est fort et plus le poids attribué[11] à son hydrogramme est élevé**.

- **Etape 8 :** Le calcul de l'incertitude prédictive totale est fondée sur une méthode de quantification empirique des erreurs relatives appelée CemaM (Berthier, 2005 ; Bourgin, 2014). Cette méthode fournit une description simple et globale de l'incertitude prédictive empirique de la chaîne simulative. Elle a l'avantage de quantifier avec réalisme l'écart modèle-réalité. Cette méthode repose sur deux hypothèses : i) **Hypothèse 1 :** les écarts modèle-réalité en conditions non jaugées sur les bassins voisins du bassin receveur **sont les meilleurs indicateurs** de l'écart modèle-réalité à l'exutoire du bassin receveur; ii) **Hypothèse 2 : chaque bassin donneur est traité comme un bassin non jaugé** ce qui permet de transférer l'erreur en conditions non jaugées au site à estimer.

  Le débiaisage des débits reconstitués correspond à une étape de post-traitement de la chronique de débits. Il s'effectue par classe de débits en utilisant la formule suivante :

$$Q^*_{receveuri,k} = Q_{receveuri,k} \cdot \left(\frac{Q_{voisinj,k}}{Q_{donneurj,k}}\right)_{0.5} \qquad (1)$$

où k désigne la classe de débits à laquelle appartient la valeur de $Q_{receveuri,k}$, i désigne le site à estimer (exutoire du bassin receveur), $Q^*_{receveuri,k}$ le débit corrigé au site à estimer, $Q_{receveuri,k}$, l'estimation du débit au site à estimer avant correction, j désigne le ou les bassins voisins et $\left(\frac{Q_{voisinj,k}}{Q_{donneurj,k}}\right)_{0.5}$ le rapport médian des erreurs relatives de débit déterminées aux exutoires des bassins voisins et appartenant à la classe de débits k. La variable $Q_{donneurj,k}$ désigne les débits des bassins donneurs transférés à l'exutoire du ou des bassins voisins du bassin receveur.

L'extraction des phases d'écoulement **par un protocole de séparation des écoulements et le calcul de l'incertitude prédictive totale sur le débit reconstitué** (méthode CemaM) sont automatisées. Le fichier de sortie présente la structure décrite sur la figure 18 et contient en outre la simulation déterministe du débit ainsi que l'intervalle prédictif borné par les quantiles d'ordre 5 % et 95 %.

[11] Le poids affecté au bassin donneur i se calcule comme suit : $\lambda_i = KGE_i/\sum KGE_j$ pour j variant de 1 à 4 bassins donneurs.

Entête du fichier

Date de création du fichier	1/9/2016
Créateur	Centre de recherches en Géographie (LOTERR)-Metz
Données hydrologiques	Simulations débit-débit
Fournisseur	Banque Hydro
Code station RCS	…….
Surface du bassin	…….
Coordonnées X, Y (L93 en m)	…….
Coordonnée X, Y du centroïde de bassin (L93 en m)	…….
Quantiles des altitudes	…….
Code des stations hydrométriques les plus proches	…….
Champs	
Date	…….
Qsim	Débit reconstitué par régionalisation (m3/s)
Qsim (quantile 5 %)	…….
Qsim (quantile 95 %)	…….
Code phases hydrologiques	M = montée de crue, D = décrue, T = tarissement

Chroniques

Date	Qsim	Qsim5%	Qsim95%	Code Phase
1/1/2015	2.56	1.28	3.6	C
2/1/2015	….	….	…	…

Figure 18: Format du fichier de sortie de la chaîne de calcul hydrologique contenant les simulations de débit journalier pour un point quelconque du référentiel de surveillance de la qualité des eaux de rivière géré par l'AERM.

III.2 Solution informatique et cartographique pour la diffusion des simulations

Pour mettre à disposition les simulations produites pour le référentiel de surveillance de la qualité des eaux de rivière, nous proposons **un site internet hébergé par l'université de Lorraine**. Les données seront accessibles via une interface cartographique mise au point avec l'API Géoportail (Figure 19). Les simulations sont stockées dans des fichiers textes téléchargeables à la demande. La chaîne de calcul fonctionne **en routine dès que les données hydrométriques issues des archives de la Banque Hydro sont validées**.

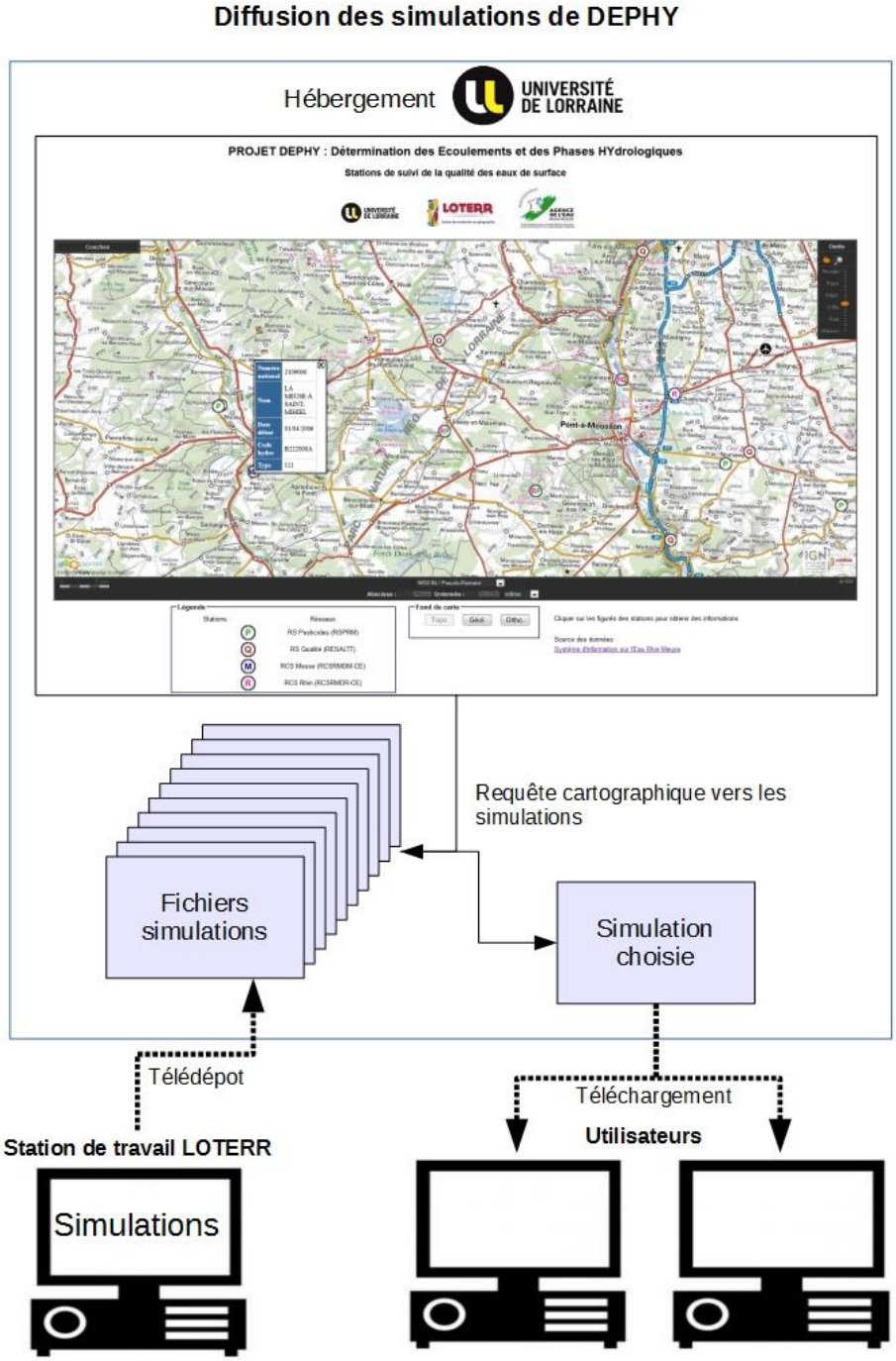


Figure 19: Application informatique de diffusion des simulations de débits.

IV. Conclusions et perspectives

Les objectifs scientifiques et opérationnels de l'étude DEPHy ont été atteints. La déclinaison technique de DEPHy permet de disposer au point d'intérêt d'un cours d'eau de l'estimation de débit journalier la plus « inattaquable » qui soit en l'état de nos connaissances hydrologiques, des données disponibles et des méthodologies testées. Outre **la connaissance de la cinétique et de la valeur du débit journalier**, l'outil de calcul automatique permet de séparer les écoulements, d'extraire les phases d'écoulement et de tracer l'intervalle prédictif associé à la simulation déterministe du débit donnant ainsi une image de **l'incertitude prédictive totale des débits reconstitués**.

Notons quand même que même si l'échantillon de bassins exploité **est représentatif de l'hydro-diversité de la région d'étude, il présente des limites indépassables** (notamment de représentativité des surfaces de drainage) **qui ne garantissent pas un rapprochement optimal des conditions réelles d'utilisation de la méthode d'interpolation spatiale du débit.** La méthode d'interpolation spatiale finalement retenue n'aura été testée que sur les lignes bleues de la figure 3…

Au terme de cette étude, fort de l'expertise apportée par nos travaux de recherche, du fonds de connaissance hydrologique acquis avant et pendant DEPHy par les hydrologues du centre de recherche en géographie (LOTERR), et l'expertise des membres du copil, il nous paraît important de formuler les préconisations suivantes :

- La surveillance hydrométrique **des bassins bien modélisés par GR4J et dont les paramètres ont une forte généricité régionale doit être pérennisée**. Ces bassins ont en effet un type de comportement hydrologique dominant dans la partie française du district Rhin-Meuse et peuvent donc servir de bassins donneurs (hydrogrammes ou paramètres) pour un grand nombre de bassin non jaugés. **Un catalogue de bassins « génériques » a été dressé** lors de la phase 3 de DEPHy.

- En raison de **leur spécificité régionale, les bassins au comportement hydrologique singulier** les plus mal modélisés par le modèle GR4J en conditions jaugées comme en conditions non jaugées en raison d'une singularité naturelle (par exemple grès, karst) ou anthropique, **doivent faire l'objet d'un suivi hydrométrique pérenne. Un catalogue de bassins atypiques a été dressé** lors des phases 2 et 3 de DEPHy.

- Au total, **la surveillance hydrométrique doit être maintenue en l'état voire légèrement amplifiée** : i) par l'implantation **de nouvelles stations hydrométriques** pour les stations de suivi qualité situées dans des zones hydrométriquement pauvres (peu de bassins voisins) ou dont le bassin est supposé avoir un comportement hydrologique atypique (grès, karst, ruisseaux phréatiques, influences anthropiques). A ce titre notons que les petits cours d'eau amont **sont souvent délaissés par la surveillance hydrométrique actuelle car considérés sans enjeu alors qu'ils constituent des tronçons importants** pour définir le bon état écologique ou physico-chimique d'un cours d'eau (cf. Figure 3). ii) **par des campagnes de jaugeages épisodiques** au point d'intérêt du cours d'eau permettant

de disposer de **quelques observations de débit qui échantillonnent les phases de hautes et de basses eaux**. L'annexe 2 présente un exemple d'approche multi-critères utilisable pour sélectionner une station de suivi qualité choisie parmi plusieurs stations candidates pour un projet d'équipement hydrométrique épisodique ou pérenne.

- Les nouvelles stations hydrométriques pourraient constituer **des sites d'intérêt commun** pour le suivi qualité des cours d'eau et pour la prévention des risques hydrologiques qui incombent aux services d'hydrométrie de la DREAL Grand-Est. Selon P. Battaglia, depuis les années 1990, le réseau hydrométrique qui était géré alors par différents organismes (SRAE, AERM, VNF, etc.) de la région Grand-Est a fait l'objet **d'une rationalisation** qui s'est traduite par le regroupement progressif des stations hydrométriques dans un service unique et à conduit à la suppression des "doublons" et aussi d'un certain nombre de stations hydrauliquement "mauvaises" et de quelques stations situées sur des cours d'eau jugés "sans enjeux". **Il y a donc moins de stations hydrométriques aujourd'hui que dans les années 1990, même si le réseau est plus rationnel** en ce qui concerne les emplacements et le choix des points de mesure. Par ailleurs, **la qualité et la fiabilité des mesures ont été renforcées** (stations à double capteur plus nombreuse, capteurs mieux situés, courbe de tarage mieux suivies avec les outils performants).

- Sur les petits cours d'eau, **les simulations effectuées au pas de temps journalier sont assez grossières** pour reconstituer le contexte hydrologique au point de prélèvement. C'est pourquoi une **expérience de régionalisation d'hydrogrammes horaires** est en cours de réalisation (Karoui, 2016).

Remerciements

Météo France (accès aux données SAFRAN et données publiques), le SCHAPI (Banque Hydro) et les DREAL Lorraine et Alsace, l'AERM (dont les financements successifs ont permis d'assurer la continuité de l'étude et l'accès au SIERM), le German Federal Waterways and Shipping Administration ainsi que le German Federal Institute of Hydrology (BfG) (accès aux données de débits allemandes), le Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle Mobilité et Voies hydrauliques, Direction de la Gestion hydrologique intégrée, Service d'Etudes Hydrologiques (SETHY) pour les données débitmétriques belges, mises à disposition gratuitement.

Bibliographie (en bleu) et publications scientifiques issues de l'étude DEPHy (en noir)

Belemtougri A., 2016. Evaluation de l'apport d'un nouveau descripteur physique dans le processus de régionalisation de l'écoulement : application au nord-est de la France. Rapport de stage de Master 2, Master Géosciences Planète Ressources Environnement (spécialité REGA), Université de Lorraine, 40 p. + annexes.

Ben Khediri W., Drogue G., 2015. Quelle est la sensibilité de la régionalisation des écoulements par voisinage géographique à la qualité de l'information météorologique ? Actes du XXVIIIème Colloque de l'AIC, Liège, 1-4 juillet, pp. 99-104. http://www.climato.be/aic2015

Wiem Ben Khediri et Gilles Drogue « Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ? », *Climatologie* [En ligne], mis à jour le : 10/03/2016, URL : http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=1095, doi:10.4267/climatologie.1095

Berthier, C.-H. Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit empirique. Mémoire de D.E.A., Université Paris-Sud 11, 2005, 55 pp.

Bourgin F. (2014). Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat IRSTEA Antony, AgroParisTech, 230 p.

Conan C., Drogue G., Ben-Khediri W., François D., Battaglia P., Birchen P., Wagner J.-P., 2015. Les données hydrologiques associées à la qualité des cours d'eau : le contexte hydrologique pour interpréter les observations de la qualité des cours d'eau en fonction des conditions hydro-climatologiques dans le bassin Rhin-Meuse. *Atelier des utilisateurs Larsim 2015*, Strasbourg, ENA, 19-20 mars.

Drogue G., Plasse J., 2014. How can a few streamflow measurements help to predict daily hydrographs at almost ungauged sites? *Hydrological Sciences Journal*, 59, 12. http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.86503

Drogue G., Ben Khediri W., 2016 (en révision). Catchment model regionalization approach based on spatial proximity : does a neighbor catchment-based rainfall input strenghten the method ? *Journal of Hydrology : Regional Studies*.

Drogue, G., Khediri, W. B., and Conan, C.: Added-value from a multi-criteria selection of donor catchments in the prediction of continuous streamflow series at ungauged pollution control-sites, *Proc. IAHS*, 373, 69-72, doi:10.5194/piahs-373-69-2016, 2016. http://www.proc-iahs.net/373/69/2016/

Gupta, H. V, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez, 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.*, 377, 80–91, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

Karoui S., 2016. Test d'un modèle hydrologique faiblement paramétré pour simuler les chroniques de débits horaires à l'échelle du bassin versant en mode jaugé et non jaugé. Application à un échantillon de stations de suivi qualité situées dans la partie française du bassin Rhin-Meuse. Rapport de stage de Master 2, Master Géosciences Planète Ressources Environnement (spécialité SEE), Université de Lorraine, 25 p. + annexes.

Lebecherel L. (2015), Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique, thèse de doctorat, 280 pp, AgroParisTech – Irstea (Antony).

Lobligeois, F. (2014), Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français, PhD thesis, 312 pp, AgroParisTech - Irstea (Antony).

Plasse J., Drogue G., François D., Battaglia P., Conan C., 2014. Using point flow measurements for guided reconstruction of daily streamflow time series through continuous flow simulation: a regional case study on the Rhine-Meuse district. *La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau*, 45-52. http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2014007

Plasse J., Lang-Delus C., Drogue G., 2012. Evaluation of three regionalization approaches for continuous streamflow simulation. Application to water quality measurements reanalysis. IAHS PUB SYMPOSIUM 2012 Theme 8: Case Studies. Delft University of Technology, The Netherlands.

Quintana-Segui P., Le Moigne, P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L., Morel S. (2008). - Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, 92-107.

NB : L'ensemble des calculs hydrologiques a été réalisé avec le langage de programmation et dans l'environnement des logiciels R (http://www.r-project.org/) et Matlab (http://fr.mathworks.com). Les cartes ont été produites à l'aide du logiciel QGIS (http://www.qgis.org/en/site).

Annexe 1 : Echantillon de bassins jaugés utilisés en validation croisée.

code HYDRO de la station	Nom du cours d'eau@nom de la station	superficie (km^2)[12]
A_0002610010	LA MOSELLE @PERL	11522
A_0003301	L'ALB @ETTLINGEN	150
A_0026400550	LA SAAR @FREMERSDORF	6983
A_1062220	LA BLIES @REINHEIM	1798
A_1092220	LA PRIMS @NALBACH	712
A_1102220	LA NIED @NIEDALTDORF	1337
A_1332220	LE THEEL @LEBACH	207
A_23720600	LA WIESLAUTER @SALMBACHER PASSAGE	345
A_23770507	LA QUEICH @SIEBELDINGEN	196
A0220200	LE LERTZBACH @HEGENHEIM	17
A1050310	L'ILL @ALTKIRCH	238
A1072010	LE THALBACH @WITTERSDORF	71
A1080330	L'ILL @DIDENHEIM	668
A1122010	LA LARGUE @DANNEMARIE	140
A1150200	LA LARGUE @SPECHBACH-LE-BAS	259
A1222020	LA DOLLER @LAUW	92
A1252010	LA DOLLER @REININGUE	182
A1310310	L'ILL @ENSISHEIM	1030
A1350310	L'ILL @COLMAR [LADHOF]	2104
A1402020	LA THUR @WILDENSTEIN	7.9
A1462050	LA THUR @PULVERSHEIM	249
A2023030	LA PETITE FECHT @STOSSWIHR [VILLAGE]	44
A2042010	LA FECHT @WINTZENHEIM [LA FORGE]	211
A2113010	LA BEHINE @LAPOUTROIE	38.7
A2122010	LA WEISS @KAYSERSBERG [FRELAND-GARE]	118
A2312020	LE GIESSEN @THANVILLÉ	113
A2332110	LA LIEPVRETTE @LIEPVRE	107
A2352020	LE GIESSEN @SELESTAT [AMONT]	277
A2512010	L'ANDLAU @ANDLAU	42.2
A2612010	L'EHN @NIEDERNAI	59.6
A2732010	LA BRUCHE @RUSS [WISCHES]	224
A2842010	LA MOSSIG @SOULTZ-LES-BAINS	167
A2860110	LA BRUCHE @HOLTZHEIM [2]	676
A3301010	LA MODER @SCHWEIGHOUSE-SUR-MODER [AVAL]	622
A3422010	LA ZORN @SAVERNE [SCHINDERTHAL]	184
A3472010	LA ZORN @WALTENHEIM-SUR-ZORN	684
A3792010	LA SAUER @BEINHEIM	502

[12] Source : http://webgr.irstea.fr/activites/base-de-donnees/. Pour les stations françaises uniquement, (hors codes U).

A3832010	LE SELTZBACH @NIEDERROEDERN	204
A3902010	LA LAUTER @WISSEMBOURG [WEILER]	275
A4020610	LA MOSELLE @FRESSE-SUR-MOSELLE	70
A4050620	LA MOSELLE @RUPT-SUR-MOSELLE	152
A4140202	LA MOSELOTTE @VAGNEY [ZAINVILLERS]	184
A4173010	LA CLEURIE @CLEURIE	65
A4200630	LA MOSELLE @SAINT-NABORD [NOIRGUEUX]	626
A4250640	LA MOSELLE @ÉPINAL	1218
A4333010	LE NEUNÉ @LAVELINE-DEVANT-BRUYERES	96
A4362030	LA VOLOGNE @CHENIMENIL	355
A4632010	L'AVIERE @FRIZON	103
A5012010	L'EURON @FROVILLE	91.9
A5110610	LA MOSELLE @TONNOY	1976
A5242010	LE GITE @VELOTTE-ET-TATIGNECOURT	115
A5261020	LE MADON @MIRECOURT [CRUES]	382
A5431010	LE MADON @PULLIGNY	948
A5500610	LA MOSELLE @PONT-SAINT-VINCENT	3074
A5730610	LA MOSELLE @TOUL	3345
A6001010	LA MEURTHE @FRAIZE	67
A6051020	LA MEURTHE @SAINT-DIE	370
A6151030	LA MEURTHE @RAON-L'ÉTAPE	727
A6221010	LA MEURTHE @AZERAILLES	964
A6341010	LA MEURTHE @LUNEVILLE	1105
A6431110	LA VEZOUZE @FREMONVILLE	108
A6443010	LE VACON @BARBAS	35.8
A6571110	LA VEZOUZE @LUNEVILLE	559
A6621210	LA MORTAGNE @SAINTE-HELENE	98.3
A6653010	L'ARENTELE @SAINT-GORGON	64.2
A6731220	LA MORTAGNE @GERBÉVILLER	498
A6761010	LA MEURTHE @DAMELEVIERES	2293
A6921010	LA MEURTHE @LANEUVEVILLE-DEVANT-NANCY	2787
A6941020	LA MEURTHE @MALZEVILLE	2922
A6953010	L'AMÉZULE @LAY-SAINT-CHRISTOPHE	84.8
A7010610	LA MOSELLE @CUSTINES	6834
A7122010	L'ESCH @JÉZAINVILLE	228
A7352010	LE RUPT DE MAD @ONVILLE	367
A7642010	LA PETITE SEILLE @CHATEAU-SALINS	150
A7821010	LA SEILLE @NOMENY	928
A7881010	LA SEILLE @METZ [PONT LOTHAIRE]	1274
A7930610	LA MOSELLE @HAUCONCOURT	9384
A8006210	LE RUISSEAU DE VAUX @MORGEMOULIN	42.5
A8071010	L'ORNE @BONCOURT	414
A8431010	L'ORNE @ROSSELANGE	1241
A8500610	LA MOSELLE @UCKANGE	10784
A8732010	LA CANNER @KOENIGSMACKER	109
A9001050	LA SARRE BLANCHE @LANEUVEVILLE-LES-	65

	LORQUIN	
A9013050	LA SARRE ROUGE @VASPERVILLER	89.8
A9021040	LA SARRE @HERMELANGE	187.9
A9072050	L'ISCH @POSTROFF	147
A9091050	LA SARRE @KESKASTEL	881
A9091060	LA SARRE @DIEDENDORF	717
A9221010	LA SARRE @SARREINSMING	1760
A9352050	L'EICHEL @OERMINGEN	280
A9425050	LA BLIES @BLIESBRUCK	1815
A9752010	LA NIED FRANCAISE @CONDE-NORTHEN [PONTIGNY]	500
A9832010	LA NIED ALLEMANDE @FAULQUEMONT	187
A9862010	LA NIED ALLEMANDE @VARIZE	367
A9942010	LA NIED @BOUZONVILLE	1150
B_86611002	LA FELENNE @HOUILLE	113
B_90211002	LE VIROIN @TREIGNES	548
B_94341002	LA SEMOIS @MEMBRE	1226
B_97411002	LA CHIERS @TORGNY	634
B0220010	LA MEUSE @GONCOURT	368
B1092010	LE MOUZON @CIRCOURT-SUR-MOUZON [VILLARS]	401
B1150010	LA MEUSE @DOMRÉMY-LA-PUCELLE	1035
B1282010	LE VAIR @SOULOSSE-SOUS-SAINT-ÉLOPHE	440
B1322010	LE VAIR @BELMONT-SUR-VAIR	137
B1340010	LA MEUSE @VAUCOULEURS [CHALAINES]	1728
B2042010	L'AROFFE @VANNES-LE-CHATEL	195
B2220010	LA MEUSE @SAINT-MIHIEL	2543
B3150020	LA MEUSE @STENAY	3914
B4031010	LA CHIERS @MONTIGNY-SUR-CHIERS	285
B4132010	LA CRUSNES @PIERREPONT	207
B4224310	LE TON @ÉCOUVIEZ	310
B4572010	LE LOISON @HAN-LES-JUVIGNY	349
B4601010	LA CHIERS @CHAUVENCY-LE-CHATEAU	1706
B4631010	LA CHIERS @CARIGNAN	1978
B5172010	LA BAR @CHEVEUGES	434
B5322010	LA VENCE @LA FRANCHEVILLE	124
B5572010	LA SORMONNE @BELVAL	367
B6111010	LA SEMOY @HAULMÉ	1339
B7200000	LA MEUSE @CHOOZ [TROU DU DIABLE]	10180
B7322010	LA HOUILLE @LANDRICHAMPS	186
H5011020	LA MARNE @MARNAY-SUR-MARNE	362
H5023010	LA TRAIRE @LOUVIERES	116
H5033310	LA SUIZE @VILLIERS-SUR-SUIZE	82.7
H5042010	LE ROGNON @BOURDONS-SUR-ROGNON [LACRETE]	168.8
H5122340	L'ORNAIN @TRONVILLE-EN-BARROIS	673
H5122350	L'ORNAIN @VAL-D'ORNAIN [VARNEY]	840
H5142610	LA CHÉE @VILLOTTE-DEVANT-LOUPPY [VILLOTTE DEVANT LOUPPY]	113.7

H6102010	L'AIRE @BEAUSITE [AMBLAINCOURT]	283
H6122010	L'AIRE @VARENNES-EN-ARGONNE	629
H6162010	L'AIRE @CHEVIERES	957
H6201010	L'AISNE @MOURON	2242
H6221010	L'AISNE @GIVRY	2888
H6233020	LA VAUX @ÉCLY	323
U0020010	LA SAONE @MONTHUREUX-SUR-SAONE	228
U0104010	LE CONEY @XERTIGNY	65
U0124010	LE CONEY @FONTENOY-LE-CHATEAU	317
U0415010	LE BREUCHIN @LA PROISELIERE-ET-LANGLE	123
U0444310	LA SEMOUSE @SAINT-LOUP-SUR-SEMOUSE	222
U1004010	L'OGNON @SERVANCE [FOURGUENONS]	73.5
U1014020	L'OGNON @MONTESSAUX	168
U1025010	LE RAHIN @PLANCHER-BAS	33
U2225410	LE GLAND @MESLIERES	39.3
U2305210	LE SAINT-NICOLAS @ROUGEMONT-LE-CHATEAU	9.0
U2334010	L'ALLAN @FESCHES-LE-CHATEL	725
U2345020	LA SAVOUREUSE @GIROMAGNY	30.5
U2345030	LA SAVOUREUSE @BELFORT	141
U2345040	LA SAVOUREUSE @VIEUX-CHARMONT	235
U2345410	LE RHOME @LACHAPELLE-SOUS-CHAUX	17.4
U2345820	LA ROSEMONTOISE @CHAUX	25.4

Annexe 2 : Approche multi-critères appliquée pour sélectionner une station de suivi qualité à équiper d'un suivi hydrométrique épisodique ou pérenne parmi un échantillon de 29 stations candidates. Exemple du RRP (Réseau de Référence Pérenne).

NB : Les critères de sélection sont identifiés en jaune dans le tableau ci-dessous. Une faible efficacité de GR4J en calage-contrôle (<0.7) peut témoigner d'une influence anthropique, d'un problème d'hydrométrie ou d'une singularité naturelle.

Num_Nat	Surface	X.L93	Y.L93	Nom.de.la.station	Date.d.ouverture.de.la.station	Nom.de.la.commune	Gabarit	voisinage hydrométrique	Nom de la station hydrométrique la plus proche	CodeHydro	surface	efficacité GR4J en calage	efficacité GR4J en validation	efficacité GR4J régionalisé	Géologie	Distance euclidienne moyenne (4 stations hydrométriques les plus proches)
2112150	50.3	863725	6908270	LE RUISSEAU DE FORGES À BETHINCOURT	01/01/2005	BETHINCOURT	Petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	L_AIRE_à_VARENNES_EN_ARGONNE	H6122010	627	0.884	0.913	0.874	formations calcaire perméables -possibles influences karstiques (bleu ciel)	20207
2109000	2536.1	886362	6866358	LA MEUSE À SAINT-MIHIEL	01/01/1967	HAN-SUR-MEUSE	Grands cours d'eau	une station hydro sur le même cous d'eau B2220010 a 700 m	LA_MEUSE_à_SAINT_MIHIEL	B2220010	2540	0.916	0.899	0.581	formations calcaire perméables -possibles influences karstiques	19472
2031650	16.1	1012262	6832404	LE NETZENBACH À LUTZELHOUSE	01/01/2005	LUTZELHOUSE	Très petits cours d'eau	station hydro A2732010 sur le même cours d'eau	LA_BRUCHE_à_RUSS_WISCHES_	A2732010	229	0.872	0.812	0.582	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	16074
2065090	19.1	1002224	6831469	LA PLAINE À RAON-SUR-PLAINE	01/01/2005	RAON-SUR-PLAINE	Très petits cours d'eau	station hydro A6232010 en aval à 19 km	LA_BRUCHE_à_RUSS_WISCHES_	A2732010	229	0.872	0.812	0.582	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	15992
2107890	47.1	891204	6840452	LA MÉHOLLE À SAUVOY (AMONT)	01/01/2010	SAUVOY	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	L_ORNAIN_à_TRONVILLE_EN_BARROIS	H5122340	672	0.857	0.879	0.81	formations calcaire perméables - possibles influences karstiques	14883
2122200	26.6	820877	6989952	L'ALYSE À FUMAY	01/01/1987	FUMAY	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_HOUILLE_à_LANDRICHAMPS	B7322010	186	0.888	0.82	0.744	formations superficielles perméables (les Ardennes)	14256
2113000	3701.8	859020	6925970	LA MEUSE À SASSEY-SUR-MEUSE	01/01/1971	SASSEY-SUR-MEUSE	Grands cours d'eau	une station hydro en aval (B3150020) à 9 km	LA_MEUSE_à_STENAY	B3150020	3904	0.899	0.899	0.531	formations calcaire perméable s -possibles influences karstiques	14078
2021700	1.3	1028425	6795136	LE BRUNNENWASSER À ILLHAEUSERN (NEULAND)	01/01/1999	ILLHAEUSERN	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau								13643
2116570	8.0	844109	6964207	LA GIVONNE À ILLY (OLLY)	01/01/2005	ILLY	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_SEMOIS_à_MEMBRE	B_94341002	1226	0.872	0.877	0.715	formations superficielles perméables (les Ardennes)	13059
2115950	98.1	867593	6948577	LA MARCHE À SAPOGNE-SUR-MARCH	01/01/1994	SAPOGNE-SUR-MARCHE	Petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LE_TON_à_ÉCOUVIEZ	B4224310	308	0.738	0.538	0.274	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	12927
2065280	71.5	992452	6825697	LA PLAINE À CELLES-SUR-PLAINE (LA SOYE)	01/01/2012	CELLES-SUR-PLAINE	Petits cours d'eau	station hydro A623010 en aval à 8 km	LA_VEZOUZE_à_FREMONVILLE	A6431110	108	0.835	0.778	0.676	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	12745
2061970	35.4	995795	6792169	LA PETITE MEURTHE À BAN-SUR-MEURTHE-CLEFCY (CLEFCY)	01/01/2009	BAN-SUR-MEURTHE-CLEFCY	Très petits cours d'eau	aucune station sur le même cours d'eau mais la station RRP se trouve sur un affluent de la Meurthe, on a une station hydro plus en aval (A6051020) à 13 km et une autre station sur un autre affluent de la Meurthe se trouve a 3 km	LA_MEURTHE_à_FRAIZE	A6001010	67	0.733	0.321	0.313	formations imperméables des massifs vosgiens et ardennais	11640
2029160	10.0	1023093	6826224	L'EHN À BOERSCH	01/01/2005	BOERSCH	Très petits cours d'eau	station hydro A2612010 en aval à 10 km	L_EHN_à_NIEDERNAI	A2612010	57.6	0.688	0.654	0.369		11579
2045283		1059307	6875019	LE HALBMÜHLBACH À HAGUENAU (CARREFOUR PARADE)	01/01/1999	HAGUENAU	Petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_SAUER_à_BEINHEIM	A3792010	541	0.794	0.759	0.718		11336
2094979	21.6	1004284	6841926	LE RUISSEAU D'ABRESCHVILLER À ABRESCHVILLER	01/01/1994	ABRESCHVILLER	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_SARRE_ROUGE_à_VASPERVILLER	A9013050	89	0.587	0.546	0.142	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	10977
2067000	959.1	973360	6826540	LA MEURTHE À AZERAILLES	01/01/1964	AZERAILLES	Grands cours d'eau	une station hydro en amont (A6311010) à 4 km	LA_MEURTHE_à_AZERAILLES	A6221010	960	0.815	0.757	0.775	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	10959
2094973	33.1	999255	6839350	LA SARRE BLANCHE À TURQUESTEIN-BLANCRUPT (AMONT STORINDAL)	01/01/2009	TURQUESTEIN-BLANCRUPT	Très petits cours d'eau	station hydro A9001050 en aval à 8 km	LA_SARRE_BLANCHE_à_LANEUVEVILLE_LES_LORQUI	A9001050	72	0.43	0.557	0.591		10404
2048960	1.4	985320	6761173	LE RUISSEAU DE LA COLLINE DE FRESSE À FRESSE-SUR-MOSELLE	01/01/1999	FRESSE-SUR-MOSELLE	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_MOSELLE_à_FRESSE_SUR_MOSELLE	A4020610	71	0.755	0.454	0.468	formations imperméables des massifs vosgiens et ardennais	9837
2018780	14.1	1002465	6780412	LA PETITE FECHT À STOSSWIHR (B)	01/01/2005	STOSSWIHR	Très petits cours d'eau	station hydro A2023030 en aval à 3 km	LA_PETITE_FECHT_à_STOSSWIHR_VILLAGE_	A2023030	45.8	0.799	0.808	0.81		9081
2067150	1035.7	965616	6830884	LA MEURTHE À SAINT-CLEMENT	01/01/2005	SAINT-CLEMENT	Grands cours d'eau	une station hydro en aval A6341010 à 10 km	LA_MEURTHE_à_AZERAILLES	A6221010	960	0.815	0.757	0.775	formations gréseuses très perméables - aquifères très capactifs	8943
2004300	9.0	991481	6751802	LA DOLLER À SEWEN (LERCHENMATT)	01/01/2005	SEWEN	Très petits cours d'eau	station hydro A1202050 en aval à 473 m	LA_DOLLER_à_LAUW	A1222020	92.5	0.852	0.798	0.78		8891
2067800	472.4	967549	6837180	LA VEZOUZE À THIEBAUMENIL	01/01/1991	THIEBAUMENIL	Cours d'eau moyens	une station hydro en aval (A6541110) à 300 m	LA_VEZOUZE_à_LUNEVILLE	A6571110	559	0.808	0.799	0.545	plateau lorrain	8666
2051820	62.2	970561	6788305	LE BARBA À DOCELLES	01/01/2008	DOCELLES	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau	LA_VOLOGNE_à_CHENIMENIL	A4362030	355	0.87	0.839	0.829	formations imperméables des massifs vosgiens et ardennais	7777
2123300	186.3	831105	7000436	LA HOUILLE À LANDRICHAMPS (LA PRÉE)	01/01/2013	LANDRICHAMPS	Très petits cours d'eau	une station hydro en amont B7322010 à 540 m	LA_HOUILLE_à_LANDRICHAMPS	B7322010	186	0.888	0.82	0.744	formations superficielles perméables (les Ardennes)	7776
2057520	766.8	933178	6828711	LE MADON À CEINTREY	01/01/2012	CEINTREY	Grands cours d'eau	une station hydro en aval A5431010 en amont à 3 km	LE_MADON_à_PULLIGNY	A5431010	943	0.843	0.822	0.798	plateau lorrain	7629
2045050	1705.3	1067674	6868324	LA MODER À AUENHEIM	01/01/1997	AUENHEIM	Grands cours d'eau	une station hydro en amont (A3501010) à 6 km	LA_SAUER_à_BEINHEIM	A3792010	541	0.794	0.759	0.718		6441
2056200	1992.0	939514	6832728	LA MOSELLE À TONNOY	01/01/1993	TONNOY	Grands cours d'eau	2 stations hydro en amont (A5110610 à 1,9 km et A5110608 à 2,3 km)	LA_MOSELLE_à_TONNOY	A5110610	1976	0.889	0.852	0.816	plateau lorrain	5782
2106900	438.2	902264	6814853	LE VAIR À SOULOSSE	01/01/1973	SOULOSSE-SOUS-SAINT-ELOPHE	Cours d'eau moyens	une station hydro sur le même cous d'eau B1282010 à 30 m	LE_VAIR_à_SOULOSSE_SOUS_SAINT_ÉLOPHE	B1282010	443	0.85	0.694	0.715	plateau lorrain	4567
2025700		1040223	6815417	LA LUTTER À BENFELD	01/01/2005	HUTTENHEIM	Très petits cours d'eau	aucune station hydro sur le cours d'eau								

Annexe 3 : Note technique sur la comparaison des données de précipitations SAFRAN et E-obs.

Auteur : D. François

Contexte et objectif : Les données de la climatologie SAFRAN utilisées lors de la première phase de DEPHY ne sont aujourd'hui pas disponibles pour la phase opérationnelle de DEPHY. Nous testons donc une climatologie alternative : les données *e-obs* du *European Climate Assessment and Dataset*.

Les données de précipitations des deux bases sont comparées :

- géométrie des grilles,
- précipitations annuelles :
  - interpolées sur une grille de 1x1 km,
  - valeur moyennes par bassin versant,
  - comparaison avec les pluies aux postes
- performance de GR4j avec les 2 climatologies

1. Les grilles

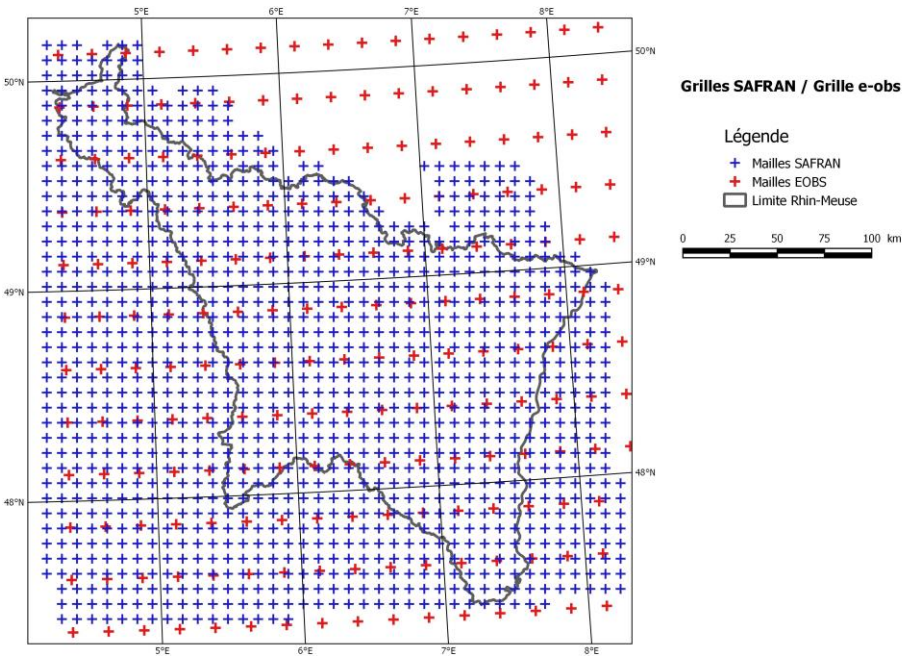


Figure n°1 : Géométrie des grilles SAFRAN et e-obs

Les méthodes d'élaboration des grilles sont décrites ici :

- Pour SAFRAN (entre autres références) : Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. and Soubeyroux, J.-M. (2010), **A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system**. International Journal of Climatology, 30 : 1627–1644. doi : 10.1002/joc.2003
- Pour e-obs : Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New (2008), A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, J. Geophys. Res.,113, D20119,doi:10.1029/2008JD010201

Géométrie des grilles (Cf. Figure n°1):

- SAFRAN : 8 x 8 km. La grille couvre la France et les parties situées à l'étranger de bassins versants de cours d'eau s'écoulant en France. Pour Rhin-Meuse les bassins versants de la Semois, la Blies, affluents de rive gauche du Rhin, etc.
- e-obs : 0.25° x 0.25°. En latitude l'écart est constant : 27.78 km. En longitude sur la zone étudiée l'écart est de 18.8 km au sud et 17.8 km au nord. La grille couvre toute l'Europe

2. Comparaison des précipitations annuelles

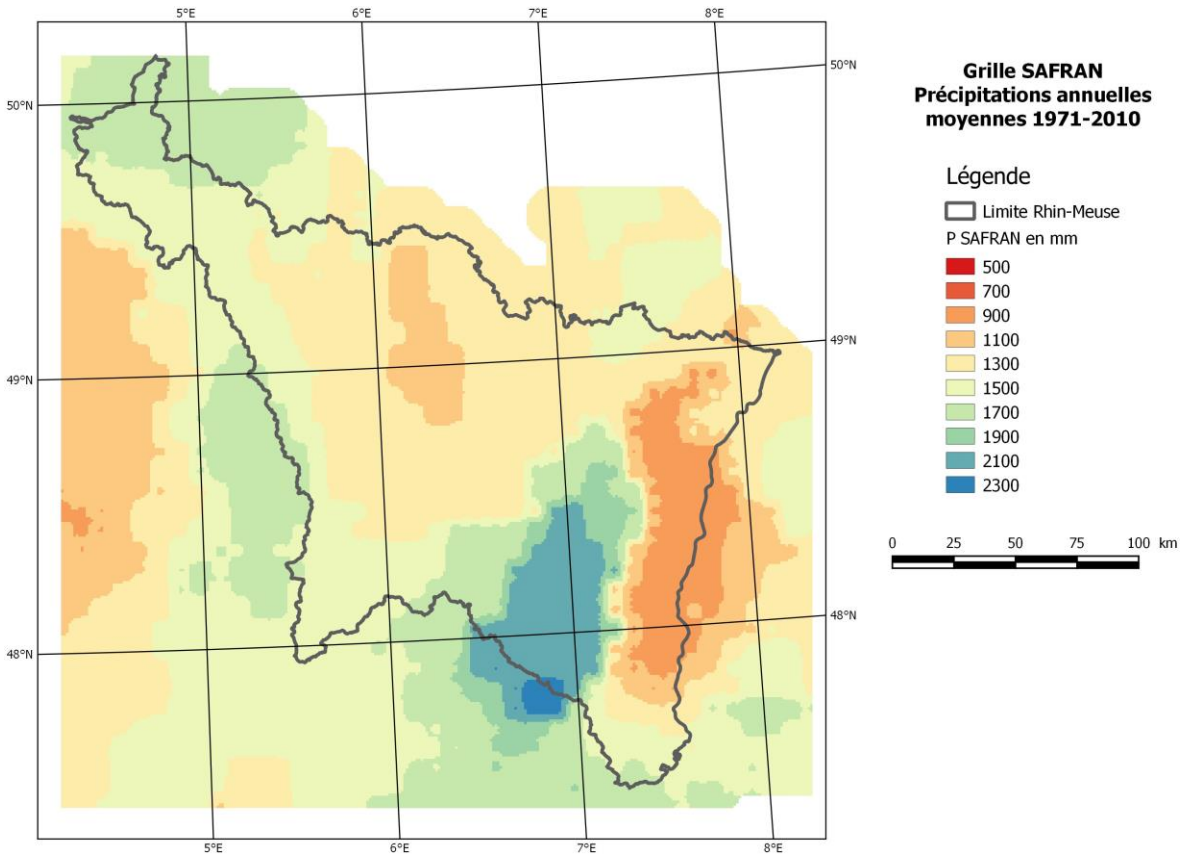


Figure n°2 : Précipitations annuelles moyennes 1971-2010, à partir des données SAFRAN, interpolées sur une grille de 1x1 km

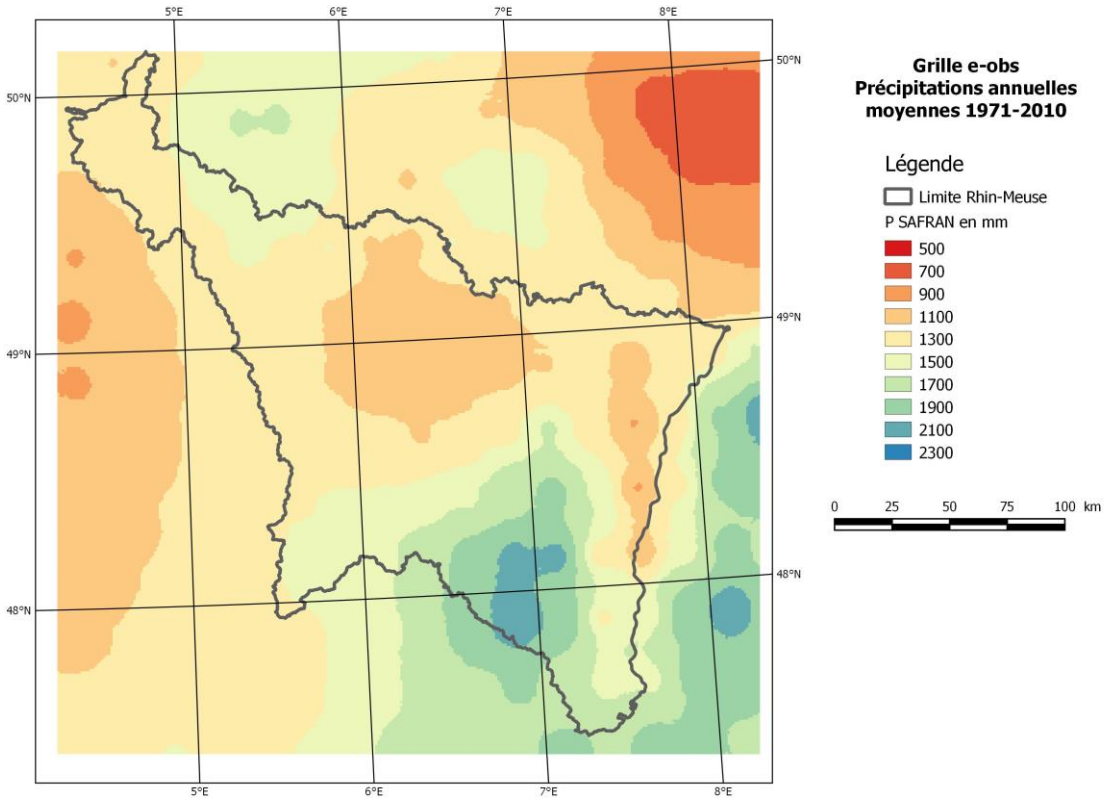


Figure n°3 : Précipitations annuelles moyennes 1971-2010, à partir des données e-obs, interpolées sur une grille de 1x1 km

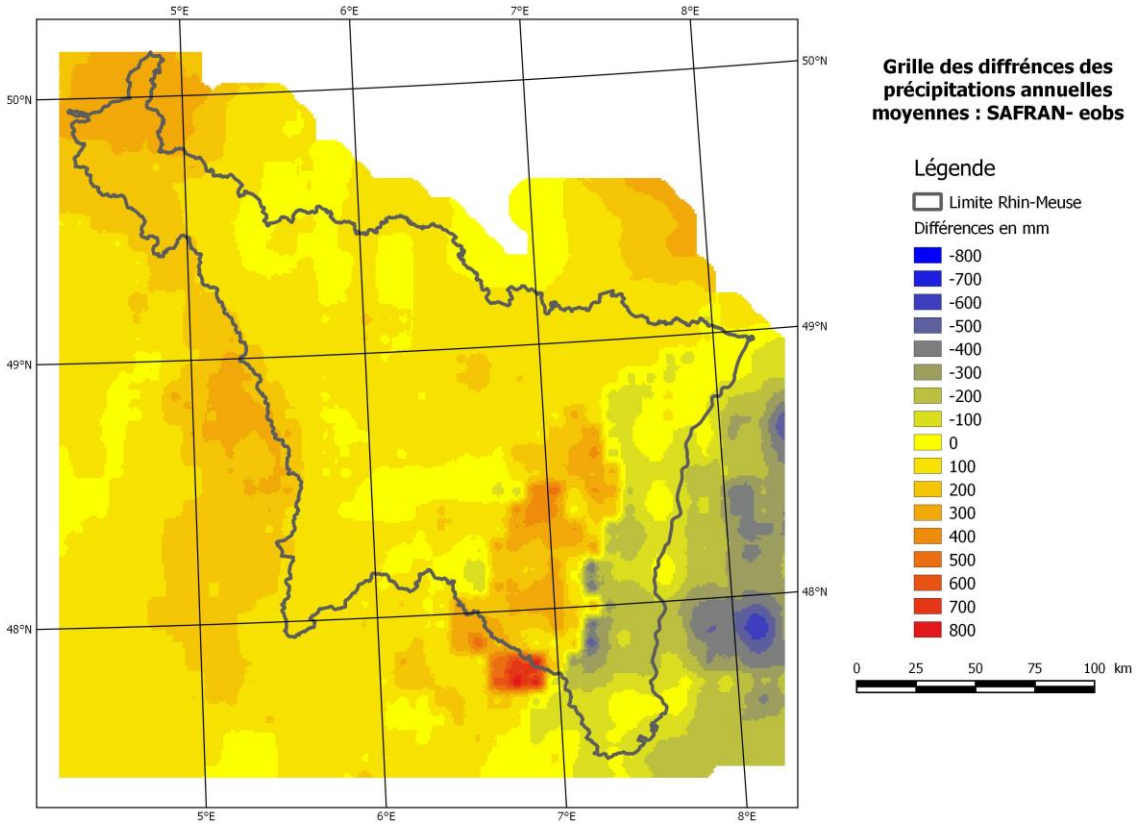


Figure n°4 : Précipitations annuelles moyennes 1971-2010, différence entre SAFRAN et e-obs, sur une grille de 1 x 1 km

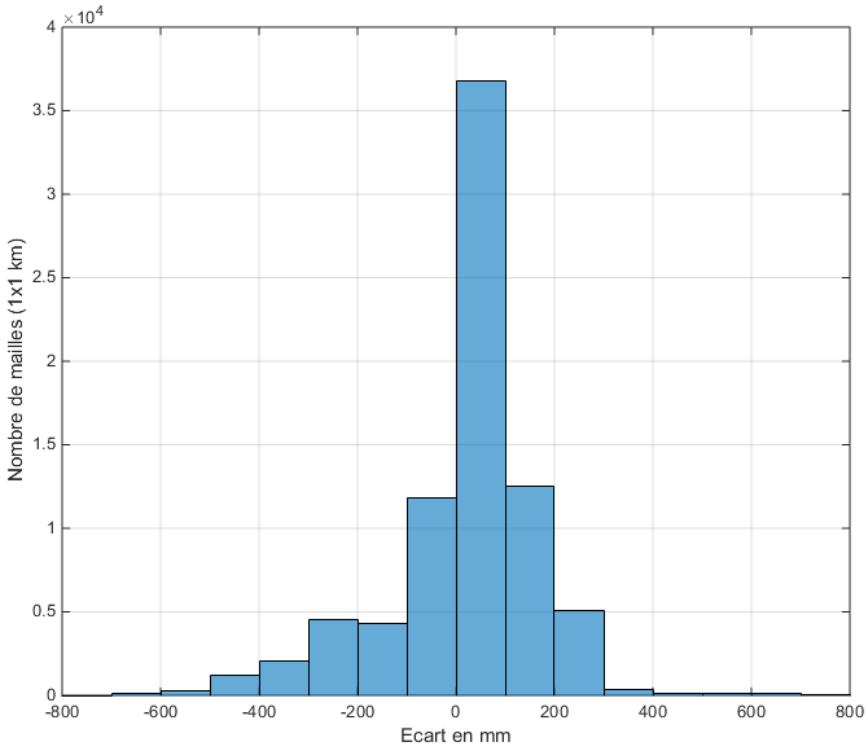


Figure n°5 : Précipitations annuelles moyennes 1971-2010, différence entre SAFRAN et e-obs, sur une grille de 1 x 1 km. Distribution

Les valeurs de SAFRAN sont en moyenne supérieures de 19 mm aux valeurs e-obs, la médiane se situe à 42 mm (Cf. Figure n°5). Les valeurs négatives concernent essentiellement la rive gauche du Rhin (hors Rhin-Meuse, Cf. Figure n°4).

Les données de e-obs « lissent » les reliefs avec des différences très élevées:

- en positif sur l'Ardenne, le Barrois et les Vosges,
- en négatif sur la Plaine d'Alsace

3. Comparaison des précipitations moyennes aux stations hydrométriques

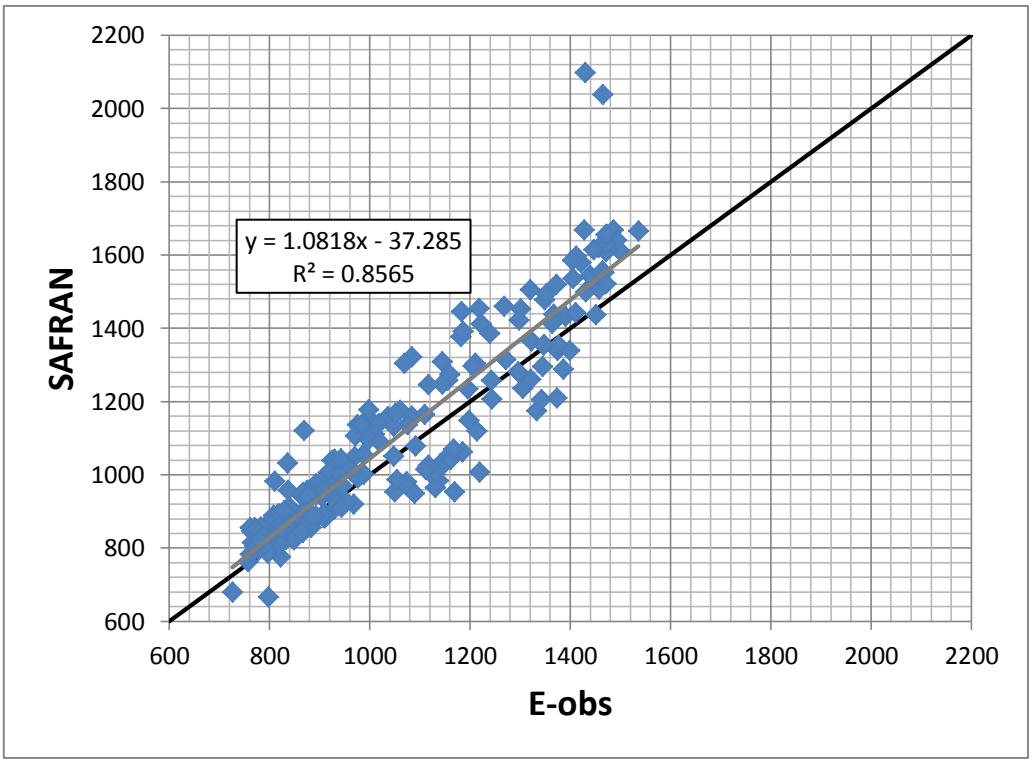


Figure n°6 : Comparaison des précipitations aux stations hydrométriques

Sur les 243 stations, SAFRAN est supérieur de ≈8 % aux valeurs d'e-obs, avec de très gros écarts (Cf.Figure n°6) sur les Hautes Vosges (P SAFRAN > 2000 mm) et dans la Plaine d'Alsace.

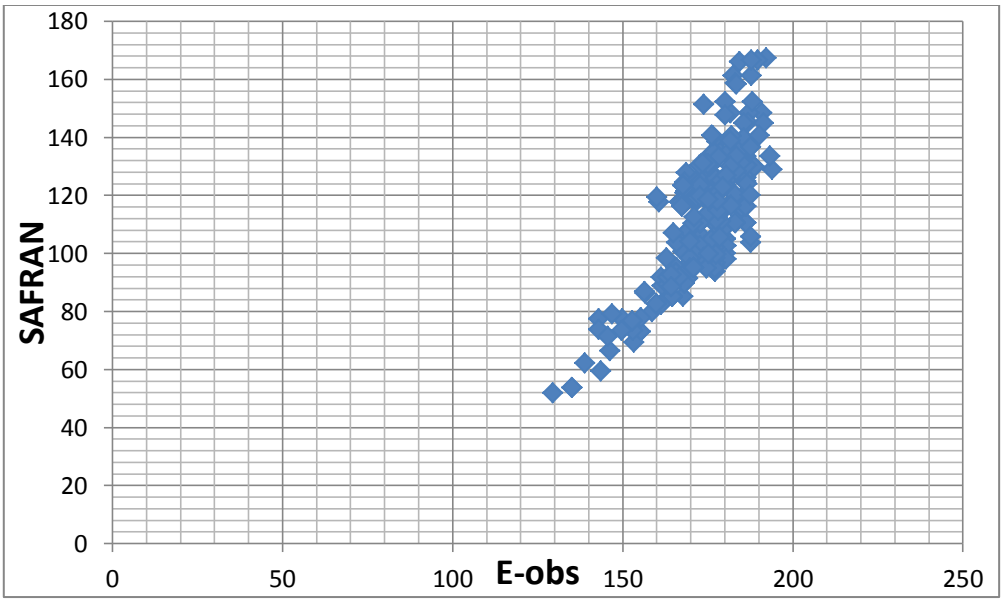


Figure n°7 : Nombre de jours sans pluie

Le nombre de jours sans pluie d'e-obs est systématiquement supérieur à celui de SAFRAN avec des écarts énormes.

4. Comparaison des grilles avec les pluies aux postes

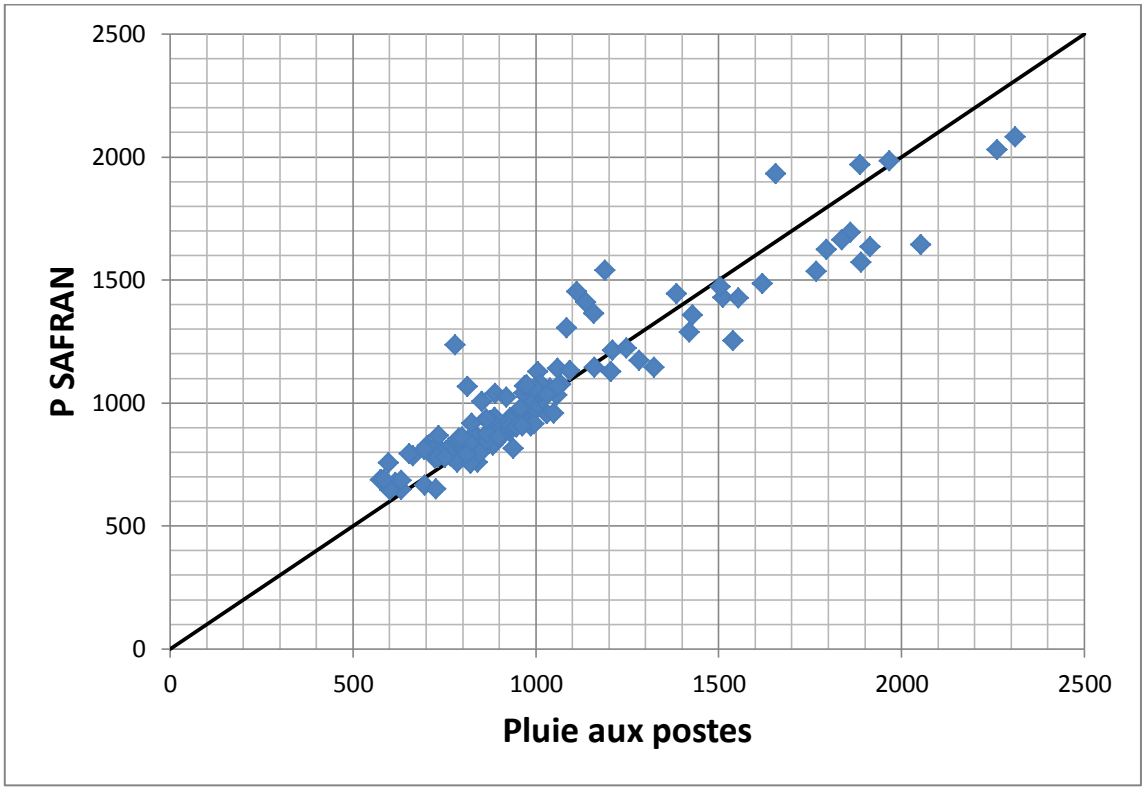


Figure n°8 : Comparaison entre les précipitations annuelles moyennes 1971-2000 de SAFRAN et des postes pluviométriques

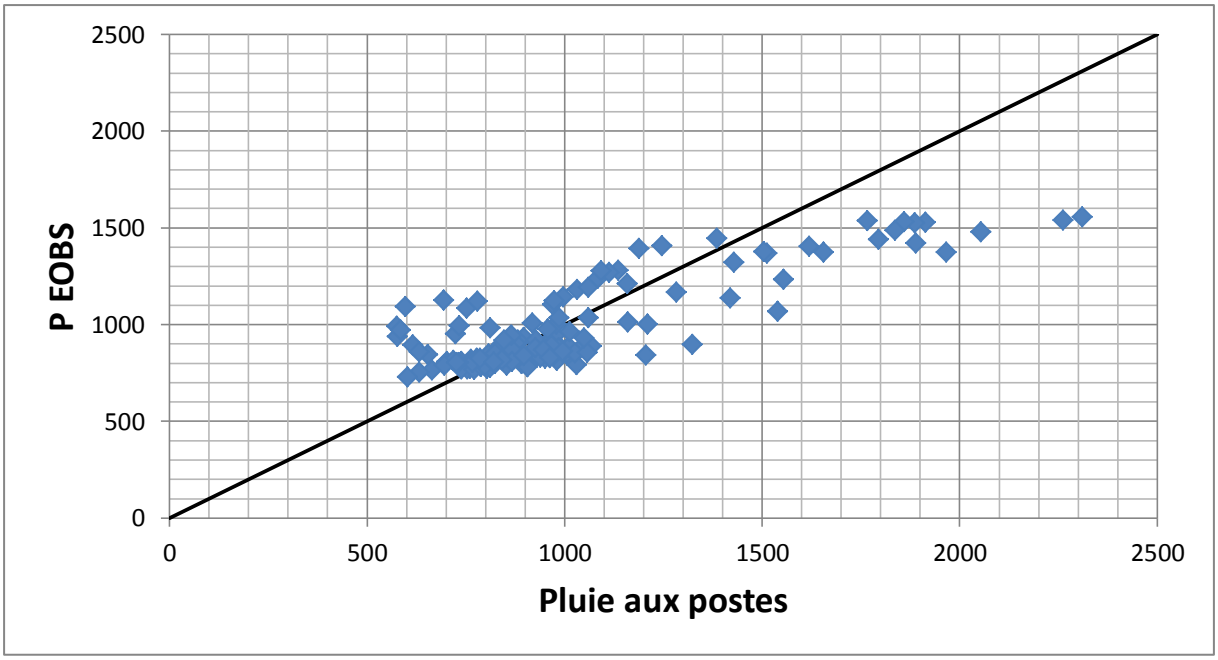


Figure n°9 : Comparaison entre les précipitations annuelles moyennes 1971-2000 d'e-obs et des postes pluviométriques

SAFRAN est bien mieux corrélé avec les pluies au postes (on s'y attendait). E-obs semble borné entre 700 et 1600 mm (Cf. Figure n°9).

5. Utilisation de SAFRAN et d'e-obs avec GR4j

Si malgré tout, on s'entête à utiliser e-obs pour une modélisation pluie-débit.

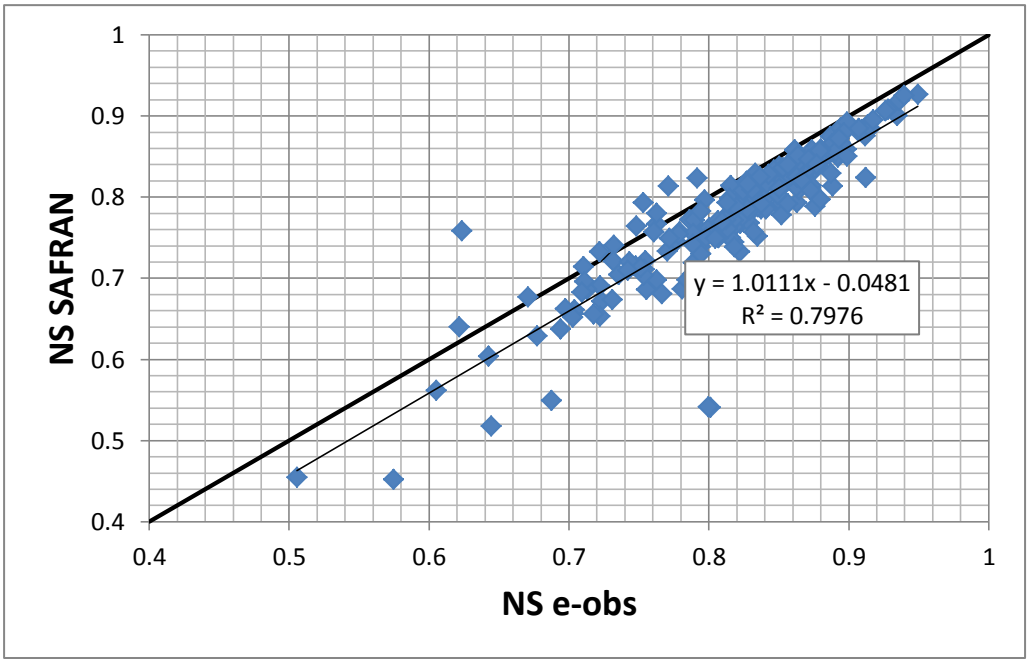


Figure n°10 : Comparaison des critères de Nash–Sutcliffe ($Q^{0.5}$) obtenus pour la calage de GR4j par SAFRAN et e-obs

Pour la quasi totalité des stations les résultats obtenus avec SAFRAN sont meilleurs avec un gain moyen de 4 points.

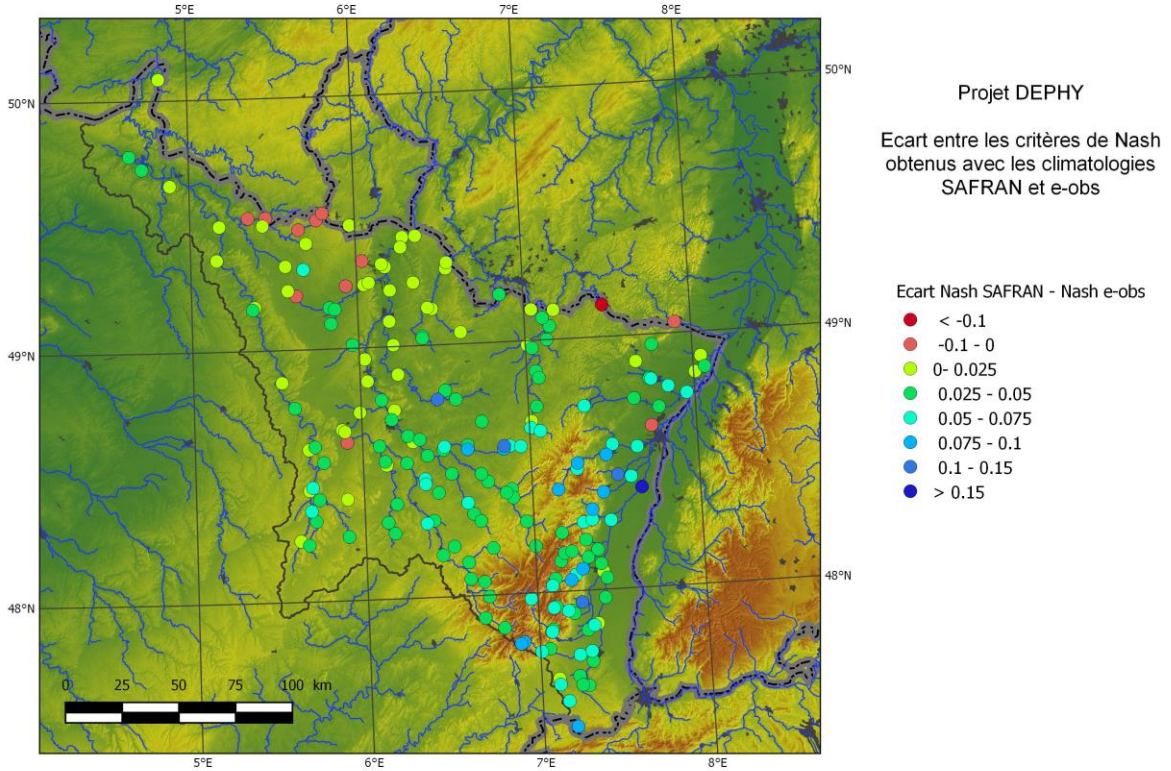


Figure n°11 : Écarts entre les critères de Nash

Les stations pour lesquelles la climatologie e-obs permet d'obtenir un meilleur critère sont situées aux marges du domaine de SAFRAN ou pour des stations très anthropisées.

Conclusion

L'utilisation d'e-obs aboutit à des simulations de moins bonne qualité que celles issues de SAFRAN. Si on ne peut obtenir SAFRAN facilement, on peut essayer de corriger les grilles e-obs à partir de ce travail.

Annexe 4 : Exemples d'algorithmes de calcul hydrologique transcrits dans le langage R.

Auteurs : J. Plasse et W. Ben Khediri

```
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------

##             Modélisation hydrologique à l'aide du modèle GR4J

##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------


#-------------------------------------------------------------------------
-----
# Modèle pluie-débit global à réservoirs au pas de temps journalier
admettant
# 4 paramètres (GR4J). Version Perrin (2002) et Perrin et al. (2003)
# X1 : capacité maximale du réservoir de production  (mm)
# X2 : coefficient d'échanges souterrains  (mm)
# X3 : capacité maximale du réservoir de routage  (mm)
# X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)
# Données necessaires (ATT: unité en mm/mois) :
#   - P   : pluie de bassin au pas de temps journalier
#   - E   : ETP de bassin au pas de temps journalier
#   - Q : débit jounalier à la station
# Critère choisi : Nash sur les racines du débit (ici 1-critere -> à
minimiser)
#-------------------------------------------------------------------------
-----

  rm(list=ls())
  gc()

 # définition des repertoires
     ## Rep input
   REP= "C:\\Users\\BEN KHEDIRI\\Desktop\\final"                    # Rep
principal
     ## Rep output
   Sortie_bassin=paste(REP,"\\resultats_SAFRAN/ResuSAFRAN_CalP2ValP1",
sep="")

##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------
##-------------------------------     Chargement des fonctions ------------
-------------------------------------

 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/validGR4j.r"))
```

```
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/calibrGr4j.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/modelPQ.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/recupInfoBdHydro.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions//lireData.R"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions//graphEfficacite.r"))

##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##-------------------------------     Input                    ------------
-------------------------------------

 ListeHydro=
read.table(file=paste(REP,"\\model\\input/codeStat149.txt",sep=""),
header=FALSE, as.is=TRUE)

##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##-------------------------------     préparation de fichiers de sortie
------------------------

  ## fichiers de sortie (un fichier par BV)
  OPT_PARAM=matrix(NA,ncol= 5, nrow= 149)
  colnames(OPT_PARAM)=c("CodeStat","x1","x2","x3","x4")

  EFFICACITE=matrix(NA, ncol=26, nrow=149)

colnames(EFFICACITE)=c("CodeStat","C2MQ_CAL","C2MQ_VAL","C2MRQ_CAL","C2MRQ_
VAL","C2MLQ_CAL","C2MLQ_VAL","KGEQ_CAL","KGEQ_VAL","KGERQ_CAL","KGERQ_VAL",
"KGELQ_CAL","KGELQ_VAL","ME_CAL","ME_VAL", "RMSE_CAL","RMSE_VAL",
"RSD_CAL", "RSD_VAL","RSpear_CAL", "RSpear_VAL", "LEobs_CAL","LEobs_VAL",
"LEsim_CAL"," Esim_VAL","Surface")


 for (SS in 1 : nrow(ListeHydro)) ## boucle sur tous les bassins

 {  CodeStat=ListeHydro[SS,1]

##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##---------------     lecture du fichier de P, ETP et Q de chaque station
-----------------------



donnees=read.table(paste(REP,"\\input\\RESTRUCT_SAFRAN/",CodeStat,".txt",se
p=""), header=TRUE)
  donnees[,1]=as.Date(as.character(donnees[,1]),"%Y%m%d")
  donnees[donnees==-999]=NA
  donnees=donnees[donnees[,1]>=as.Date("1990-01-01") &
donnees[,1]<=as.Date("2002-12-31"),] # restriction sur la peroriode 90-2002

  ## definition des periodes 'initialisation, et de calage ...
     ## calage 90-96 et validation 97 2002
     debInit=as.Date("1990-01-01")
     deb=as.Date("1993-01-01")  ## date de début de calage = date
d'initialisation + nAnnees Chauff 3 annees
     fin=as.Date("2002-12-31")
  ## tableau final de données de forçage du modèle data_fin

data_fin=lireData(CodeStat,jourDeb=debInit,jourFin=fin,donnees,vChoix=c(T,T
,F,T,F),suppQdout=T,QmmjOK=T) ## date[[1 (Q)ou2(P)ou3(ETP)]][date, BV=1]
```

```
 ##-------------------------------------------------------------------------
---------------------------------------
 ##------------------------------------------- modélisation       --------
---------------------------------------

## CALAGE/Validation
  ## la fonction modelPQ fait appel à la fonction de calage et de
validation
  ## output: les critères de performance calculés sur la période de
validation
  ##         les paramètres optimaux calés sur 90-96
  ##         les débits simulés sur la période de validation (1997-2002)

## Fichier : calibrGr4j.R
#-------------------------------------------------------------------------
-----
# Fonction de calage du modèle GR4J : On utilise les pluie, l'ETP et le Q
afin de
# caler le modèle sur la période debCalibr->finCalibr. debInit correspond à
# la date de début de chauffe (ici 3 années civiles avant debCalibr).
# Le calage s'opère aprés pré-filtrage dans l'espace des paramètres. On
fixe les
# rails sur les quantiles 1/6, 1/2 et 5/6 des 4 paramètres (valeur de
C.PERRIN
# sur 1000 bassins) et on fait tourner le GR sur ces combinaisons et on
garde
# comme point de départ de l'optimisation le jeu de paramètre ayant la plus
forte
# efficience.
#-------------------------------------------------------------------------
-----
# La fonction de validation du modèle GR4J :Les paramètres d'entrées sont
les mêmes
# que pour la fonction calibrGr4j mais avec le jeu de paramètres optimisé
en plus
#-------------------------------------------------------------------------
-----

resuBEST=modelPQ(CodeStat,deb,fin,data_fin,nAnneesChauff=3,splitSampleTestO
K=T,matParamExt=NULL,calcCritEff=T)      ## validation croisée
Xopt=resuBEST[[1]][[1]] [1:4]    ## les paramètres x1:x4 optimaux
## calcul de critères de performance sur la période de calage P1 90-96
criteff_calage=
modelPQ(CodeStat,deb,fin,data_fin,nAnneesChauff=3,splitSampleTestOK=F,matPa
ramExt=Xopt,calcCritEff=T)

##-------------------------------------------------------------------------
---------------------------------------
##------------------------ Mise en forme des RESULTATS       --------------
----------------------------------

## le tableau de critères de performance  (EFFICACITE)
resuCRIT=  rbind(criteff_calage[[2]]$ValidationParamExt, resuBEST[[2]]
[[1]]) ## 1er ligne les parametres calculés sur la période de calage et la
2eme ligne les paramètres calculés sur  la période de validation
EFFICACITE[SS,1]=CodeStat
o=1
for (pm in seq(2,25,by=2))
{
    EFFICACITE[SS,pm]  =   resuCRIT[1,o]
```

```
    EFFICACITE[SS,pm+1]=   resuCRIT[2,o]
     o=o+1
}
EFFICACITE[SS,26]=recupInfoBdHydro(CodeStat,2)[,2]  ## surface

## le tableau avec les meilleurs jeux de paramètres
                 XX=   Xopt
                 OPT_PARAM[SS,1]=CodeStat
                 OPT_PARAM[SS,2]= round(XX[1,1],3)
                 OPT_PARAM[SS,3]= round(XX[1,2],3)
                 OPT_PARAM[SS,4]= round(XX[1,3],3)
                 OPT_PARAM[SS,5]= round(XX[1,4],3)

## un fichier pdf avec les graphiques
  ## les chroniques de débits simulés et observés sur P2 (1997-2002)
  ## nuage de points de débits simulés (mm/j) en fonction de débits
observés (mm/j)
  ## la fréquence au dépassement de débits
  ## le cumul journalier des débits simulés (normalisés) et observés

pdf(file=paste(file=paste(Sortie_bassin,"/",CodeStat,".pdf",sep=""),sep='')
,width=26,height=38)
graphEfficacite(DATA=
dataBEST,resQsim=resuBEST[[3]][[1]],resCrit=resuBEST[[2]][[1]],iStatRestric
t=1,prefixExport="mettre le dossier de sortie des dichiers
pdf",interactivPlot=F)
dev.off()

 } # fin du boucle sur ls stations

 ##-------------------------------------------------------------------------
---------------------------------------
 ##--------------------------------------------    ecriture de fichiers de
sortie      ----------------------------------------------

 write.table(EFFICACITE, file=paste(Sortie_bassin,"/EFFICACITE.txt",
sep=""), , sep="\t", eol="\n", row.names=FALSE, col.names=TRUE,
quote=FALSE)
 write.table(OPT_PARAM, file=paste(Sortie_bassin,"/OPT_PARAM.txt", sep=""),
, sep="\t", eol="\n", row.names=FALSE, col.names=TRUE, quote=FALSE)

  rm(resu, data_fin,debInit,
fin,deb,donnees,GPp,P_BV,mat_pluvio,resuCRIT,resuIND,EFFICACITE,OPT_PARAM,P
LUVIO_BEST,IND_PLUIE)
  gc()
```

```
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------

##            Régionalisation des paramètres du modèle GR4J

##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------------------------------
#-------------------------------------------------------------------------
-----
#Réginalisation par voisinage géographique :cette méthode consiste à
transposer
#les paramètres du modèle GR4J calé sur des bassins-donneurs (jaugés) vers
un
#bassin-receveur (considéré comme non-jaugé).
#Nombre de bassins donneurs: 4
#-------------------------------------------------------------------------
-----

  rm(list=ls())
  gc()

 # définition des repertoires
     ## Rep input
   REP= "C:\\Users\\BEN KHEDIRI\\Desktop\\final"                    # Rep
principal
     ## Rep output
   Sortie_bassin=paste(REP,"\\resultats_SAFRAN/ResuSAFRAN_CalP2ValP1",
sep="")

##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------
##-------------------------------     Chargement des fonctions ------------
-------------------------------------

 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/validGR4j.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/calibrGr4j.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/modelPQ.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions/recupInfoBdHydro.r"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions//lireData.R"))
 source(paste(REP,"\\model\\fonctions//graphEfficacite.r"))

##-------------------------------------------------------------------------
-------------------------------------
##-------------------------------     Input                     ------------
-------------------------------------

 ListeHydro=
read.table(file=paste(REP,"\\model\\input/codeStat149.txt",sep=""),
header=FALSE, as.is=TRUE)

OPT_PARAM=read.table(file=paste(REP,"\\resultats_SAFRAN/OPT_PARAM_SAFRAN.tx
t",sep=""), header=TRUE, as.is=TRUE)             ## Paramètres optimaux
 efficacite= read.table(file=paste(REP,
"\\resultats_SAFRAN/EFFICACITE_CAL_VAL_SAFRAN.txt", sep=""), header=TRUE,
as.is=TRUE)## critères d'éfficacité en calage
```

```
##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##-------------------------------     préparation de fichiers de sortie
------------------------

  EFFICACITE=matrix(NA, ncol=26, nrow=149)

colnames(EFFICACITE)=c("CodeStat","C2MQ_CAL","C2MQ_VAL","C2MRQ_CAL","C2MRQ_
VAL","C2MLQ_CAL","C2MLQ_VAL","KGEQ_CAL","KGEQ_VAL","KGERQ_CAL","KGERQ_VAL",
"KGELQ_CAL","KGELQ_VAL","ME_CAL","ME_VAL", "RMSE_CAL","RMSE_VAL",
"RSD_CAL", "RSD_VAL","RSpear_CAL", "RSpear_VAL", "LEobs_CAL","LEobs_VAL",
"LEsim_CAL"," Esim_VAL","Surface")


 for (SS in 1 : nrow(ListeHydro)) ## boucle sur tous les bassins

 {  CodeStat=ListeHydro[SS,1]        ## BV receveur


 ##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
 ##---------------     selection des bassins versansts donneurs
------------------------

 ## critères de selection:
 ## 1- les 4 BV les plus proches en terme de distance entre les centroides
 ## 2- Ayant un CR2M > 0.7 en calage

   C2Mcal=matrix(NA, nrow=148, ncol=1)
   BVdonnTOT=
read.table(file=paste(REP,"\\Distance_BV/",CodeStat,".txt",sep=""),
header=TRUE, as.is=TRUE)
   l=1
   v=c(0,0,0,0)
   for (mm in 1 : nrow(BVdonnTOT))
   { BVdonnTOT[mm,2]=ID_stations_BV[BVdonnTOT[mm,2],2]
     C2Mcal[mm,1]=efficacite[which(efficacite[,1]==BVdonnTOT[mm,2]),4]
     if( l < 5 & C2Mcal[mm,1]> 0.7)  { v[l]=mm ;l=l+1}
    }
    BVdonn=BVdonnTOT[c(v),][,c(2,3)]
   # selection des paramètres optimisés
   vv=c(0,0,0,0)
   for (uu in 1 : 4) {  vv[uu]=which(OPT_PARAM[,1]== BVdonn[uu,1])}
   Param_ext= OPT_PARAM[vv,]
##-------------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##---------------     lecture du fichier de P, ETP et Q de chaque station
------------------------


donnees=read.table(paste(REP,"\\input\\RESTRUCT_SAFRAN/",CodeStat,".txt",se
p=""), header=TRUE)
  donnees[,1]=as.Date(as.character(donnees[,1]),"%Y%m%d")
  donnees[donnees==-999]=NA
  donnees=donnees[donnees[,1]>=as.Date("1990-01-01") &
donnees[,1]<=as.Date("2002-12-31"),] # restriction sur la peroriode 90-2002

  ## definition des periodes 'initialisation, et de calage ...
     ## calage 90-96 et validation 97 2002
     debInit=as.Date("1990-01-01")
```

```
     deb=as.Date("1993-01-01")  ## date de début de calage = date
d'initialisation + nAnnees Chauff 3 annees
     fin=as.Date("2002-12-31")
  ## tableau final de données de forçage du modèle data_fin

data_fin=lireData(CodeStat,jourDeb=debInit,jourFin=fin,donnees,vChoix=c(T,T
,F,T,F),suppQdout=T,QmmjOK=T) ## date[[1 (Q)ou2(P)ou3(ETP)]][date, BV=1]
 ##-----------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
 ##------------------------------------------- Régionalisation       -----
-----------------------------------------
    ## simulation des débits sur le BV receveur avec les 4 jeux de
paramètres optimaux des BV donneurs
       X=Param_ext
       Qtot=matrix(NA, ncol=4, nrow=  1826)
       colnames(Qtot)= BVdonn[1:4,1]
       Qk=matrix(NA, ncol=1, nrow=1826)
       colnames(Qk)=CodeStat

       for ( BVi in 1: 4)
       { Qi=
modelPQ_REGIO(CodeStat,deb,fin,data_fin,nAnneesChauff=3,splitSampleTestOK=F
,matParamExt=X[BVi,2:5, drop=FALSE],calcCritEff=T)[[3]][1]
         Qtot[,BVi]=Qi$ValidationParamExt[[1]]
        }
     ## moyenne des 4 hydrogrammes
     Qk[,1]=round(rowMeans(Qtot),3)
 ##-----------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
 ##------------------------------------------- Calcul des critères de
performance       ----------------------------------------------
   ## en transposition

lCritEff=list("ValidationParamExt"=data.frame(matrix(NA,1,14),row.names=Cod
eStat))
    lQobs=subset(data_fin[[1]],subset=as.Date(rownames(data_fin[[1]])) %in%
as.Date(rownames(Qk)))
    lCritEff[[1]]=calcEfficacite(Qcalc=Qk,Qobs=data_fin[[1]])
    RESU=list("CritEff"=lCritEff,"Qsim"=Qk,"Qobs"=lQobs) # 1 efficacité, 2
sim, 3 obs
   ##en calage
    CriCAL=      efficacite[j,4]
   ##en validation
    CriVAL=efficacite[j,5]
##-----------------------------------------------------------------------
--------------------------------------
##-------------------------------------------    Mise en forme des
RESULTATS       ----------------------------------------------
  EFFICACITE[j,1]=CodeStat                          ## BV receveur
  EFFICACITE[j,2]=recupInfoBdHydro(CodeStat,2)[,2] ## Surface
  EFFICACITE[j,3]= round(CriCAL,3)                  ## C2MRQ en calage
  EFFICACITE[j,4]= round(CriVAL,3)                  ## C2MRQ en calage

  EFFICACITE[j,5]=round(RESU[[1]][[1]][1,2],3)     ## C2MRQ en
transposition

  EFFICACITE[j,6]=  BVdonn[1,1]                     ## 1er voisin
  EFFICACITE[j,7]=round(BVdonn[1,2]/1000,1)         ## distance

  EFFICACITE[j,8]=  BVdonn[2,1]                     ## 2eme voisin
  EFFICACITE[j,9]= round(BVdonn[2,2]/1000,1)        ## distance
```

```
  EFFICACITE[j,10]=  BVdonn[3,1]                    ## 3eme voisin
  EFFICACITE[j,11]= round(BVdonn[3,2]/1000,1)     ## distance

  EFFICACITE[j,12]=  BVdonn[4,1]                   ## 4eme voisin
  EFFICACITE[j,13]=  round(BVdonn[4,2]/1000,1)     ## distance
 } # fin du boucle sur ls stations

 ##-------------------------------------------------------------------------
---------------------------------------
 ##-------------------------------------------    Ecriture de fichiers de
sortie      ----------------------------------------------
write.table(EFFICACITE, file=paste(Sortie_bassin,"/EFFICACITE.txt",
sep=""), , sep="\t", eol="\n", row.names=FALSE, col.names=TRUE,
quote=FALSE)
```

Annexe 5 : Code Matlab de correction de la grille des directions d'écoulement issue du MNT SRTM 3.0 en fonction du réseau hydrographique de référence (BD Carthage).

Auteur : D. François

Nom du programme : CorDir.m

```
%Correction des grilles de direction à partir du réseau hydro
clear

%lecture des grilles
load('R_CDO.mat');%Ref réseau hydro
load('Z_CDO.mat');%Matrice réseau hydro
load('R_Dir_SRTM.mat');%Ref direction
load('Z_Dir_SRTM.mat');%Matrice direction
load('R_SRTM.mat');%Ref MNT
load('Z_SRTM.mat');%Matrice MNT

%lecture du reseau en vecteur
ResVec=shaperead('CDO_Nat.shp');
DebFinCDO=NaN(length(ResVec),7);
for i=1:length(ResVec)
    DebFinCDO(i,1)=ResVec(i).id;
    DebX=ResVec(i).X(1);
    DebFinCDO(i,2)=round((DebX-R_CDO(3,1))/R_CDO(2,1));
    FinX=ResVec(i).X(end-1);
    DebFinCDO(i,3)=round((FinX-R_CDO(3,1))/R_CDO(2,1));
    DebY=ResVec(i).Y(1);
    DebFinCDO(i,4)=round((R_CDO(3,2)-DebY)/R_CDO(2,1));
    FinY=ResVec(i).Y(end-1);
    DebFinCDO(i,5)=round((R_CDO(3,2)-FinY)/R_CDO(2,1));
end

ZC=NaN(size(Z_Dir_SRTM));%grille des directions corrigées
ZR=NaN(size(Z_CDO));%grille du réseau reconstitué
Z_SRTMA=NaN(size(Z_CDO));%grille de marche arrière

IndRes=find(~isnan(Z_CDO));%selectionne les cellules du réseau
Codeclic=unique(Z_CDO(IndRes));%gaR_CDOe les codes declic
reload=0;
%correction des directions
i=1;
while i<=length(Codeclic)

    disp(Codeclic(i))

    %récupère les extrémités du cours d'eau
    IndDebFin=find(DebFinCDO(:,1)==Codeclic(i));
    R_CDOeb=DebFinCDO(IndDebFin,4);
    CDeb=DebFinCDO(IndDebFin,2);
```

```
    RFin=DebFinCDO(IndDebFin,5);
    CFin=DebFinCDO(IndDebFin,3);

    %affecte source et confluence
    AltDeb=Z_SRTM(R_CDOeb,CDeb);
    AltFin=Z_SRTM(RFin,CFin);
    if AltDeb>AltFin
        RSource=R_CDOeb;
        CSource=CDeb;
        RConf=RFin;
        CConf=CFin;
    else
        RConf=R_CDOeb;
        CConf=CDeb;
        RSource=RFin;
        CSource=CFin;
    end

    %marque la source
    R=RSource;
    C=CSource;

    ZR(R,C)=Codeclic(i);%marque la cellule source

    %réoriente les cellules
    if reload==1
        reload=0;%flag de charge du réseau si marche arrière trop longue
    end
    conf=0;%flag de confluence
    NbMailleCDO=0;
    while conf==0
        for j=-1:1
            desc=0;%flag de descente
            for k=-1:1
                if j==0 && k==0
                   continue %si j et k =0 pas de direction
                end
                H=Z_CDO(R+j,C+k);%cellule du réseau hydro
                HR=ZR(R+j,C+k);%cellule du réseau en construction
                if H==Codeclic(i) && isnan(HR)%si le code correspond au cdo
en cours et si on n'est pas déjà passé par cette cellule
                    ZC(R,C)=CodeDir(j,k);%donne la direction
                    ZR(R,C)=Codeclic(i);%marque la cellule
                    R=R+j;%cooR_CDO de la nouvelle cellule
                    C=C+k;
                    desc=1;%si la cellule est marquée on descend et on sort
de la 2ème boucle
                    NbMailleCDO=NbMailleCDO+1;
                    MarchA=0;%flag de marche arrière
                    break
                end
            end
            if desc==1
                break
            end
        end

        if desc==0% si on ne descend pas

            if conf==0 && C==CConf && R==RConf %l'extrémité aval est
atteinte
```

```
                conf=1;
            end

            for j=-1:1
                for k=-1:1
                    H=Z_CDO(R+j,C+k);% on examine les cellules alentour
pour trouver une confluence
                    if H~=Codeclic(i) %si on trouve un autre cdo  =>
confluence
                        ZC(R,C)=CodeDir(j,k);
                        conf=1;%flag de confluence passe à 1 si pas de
confluence => sortie du MNT
                        break
                    end
                end
                if H<Codeclic(i)
                    break %si confluence sortie de la deuxième boucle
                end
            end

            if conf==0 %pas de confluence, pas de sortie du MNT, pas
d'altitide min => marche arrière
                %marche arrière
                MarchA=MarchA+1;
                if MarchA>50%si trop de marche arrière
                   if reload>1 %abandon pour ce cours d'eau
                       IndZ_Dir_SRTMirCor=find(ZR==Codeclic(i));
                       ZC(IndZ_Dir_SRTMirCor)=NaN;
                       conf=1;
                       reload=0;
                   elseif reload>0% si il y a déjà eu un marche arrière
mais l'altitude de confluence non atteinte => retour vers la source
                       IndZ_Dir_SRTMirCor=find(ZR==Codeclic(i));
                       ZC(IndZ_Dir_SRTMirCor)=NaN;
                       i=i-1;%repart à la source
                       conf=1;
                       reload=2;
                   elseif reload==0
                       load('Z_CDO.mat'); %recharge le réseau et repart
                       IndZ_SRTMA=find(Z_SRTMA==Codeclic(i));
                       ZR(IndZ_SRTMA)=NaN;
                       MarchA=0;
                       reload=1;
                   end
                else
                    ZC(R,C)=NaN;
                    Z_CDO(R,C)=NaN;
                    Z_SRTMA(R,C)=Codeclic(i);
                    NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    if ZC(R-1,C-1)==7
                        ZC(R-1,C-1)=NaN;
                        Z_CDO(R-1,C-1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R-1,C-1)=Codeclic(i);
                        R=R-1;
                        C=C-1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R-1,C)==6
                        ZC(R-1,C)=NaN;
                        Z_CDO(R-1,C)=NaN;
                        Z_SRTMA(R-1,C)=Codeclic(i);
                        R=R-1;
```

```
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R-1,C+1)==5
                        ZC(R-1,C+1)=NaN;
                        Z_CDO(R-1,C+1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R-1,C+1)=Codeclic(i);
                        R=R-1;
                        C=C+1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R,C+1)==4
                        ZC(R,C+1)=NaN;
                        Z_CDO(R,C+1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R,C+1)=Codeclic(i);
                        C=C+1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R+1,C+1)==3
                        ZC(R+1,C+1)=NaN;
                        Z_CDO(R+1,C+1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R+1,C+1)=Codeclic(i);
                        R=R+1;
                        C=C+1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R+1,C)==2
                        ZC(R+1,C)=NaN;
                        Z_CDO(R+1,C)=NaN;
                        Z_SRTMA(R+1,C)=Codeclic(i);
                        R=R+1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R+1,C-1)==1
                        ZC(R+1,C-1)=NaN;
                        Z_CDO(R+1,C-1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R+1,C-1)=Codeclic(i);
                        R=R+1;
                        C=C-1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    elseif ZC(R,C-1)==8
                        ZC(R,C-1)=NaN;
                        Z_CDO(R,C-1)=NaN;
                        Z_SRTMA(R,C-1)=Codeclic(i);
                        C=C-1;
                        NbMailleCDO=NbMailleCDO-1;
                    end
                end
            end
        end

    end
    i=i+1;
end

IndCor=find(~isnan(ZC));
Z_Dir_SRTM(IndCor)=ZC(IndCor);
```