

Typologie des bassins versants de la Bourgogne et modélisation hydrologique globale

Projet HYCCARE-Bourgogne
(HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne)

Rapport final

BRGM/RP-65188-FR
mars 2016

Typologie des bassins versants de la Bourgogne et modélisation hydrologique globale

Projet HYCCARE-Bourgogne
(HYdrologie, C Changement Climatique, A Adaptation, R Ressource en Eau en Bourgogne)

Rapport final

BRGM/RP- 65188-FR
Mars 2016

S. PINSON, P. STOLLSTEINER

Vérificateur :

Nom : N. Amraoui

Fonction : Responsable de
programme

Date : 25/05/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : L. CHERY

Fonction

responsable unité D3E /EVE :

Date : 28/06/2016

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : bassins versants, typologie, modélisation, Gardénia

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Pinson S, Stollsteiner P. (2016) – Typologie des bassins versants de la Bourgogne et modélisation hydrologique globale - Projet HYCCARE Bourgogne. Rapport final BRGM/RP-65188-FR, 136 p., 76 ill., 2 Ann.

Synthèse

Les premières analyses du changement climatique montrent la complexité du phénomène tant au niveau de l'équilibre du cycle de l'eau que des répercussions à moyen et long terme. Le sujet est vaste et il reste encore beaucoup de questions non résolues. Néanmoins, de nombreux travaux ont été menés ces dernières décennies, notamment les conséquences du changement climatique sur un ou plusieurs paramètres comme le régime des pluies, la hausse du niveau marin,...

L'objectif général du projet Hyccare consiste à mettre à disposition des décideurs locaux les outils qui leur permettront de mieux prendre en compte le risque lié aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau. L'élaboration de connaissances locales permettra de construire avec les différents acteurs des territoires des pistes d'adaptation.

Pour ce projet, la contribution du BRGM proposée s'applique à l'échelle de l'ensemble des bassins versants de la région Bourgogne, et se décompose du point de vue hydrologique en trois phases : l'amélioration d'un modèle de bilan hydrique spatialisé grâce à une typologie et un calcul de recharge sur l'ensemble du territoire bourguignon, la mise en place de la modélisation hydrologique qui simulera les débits à l'exutoire d'une vingtaine de bassins versants et l'extension de ces résultats à l'ensemble du territoire à partir des cartes de recharge et des différents indicateurs.

Le calcul des indicateurs morphologiques, a permis de réaliser une typologie des 283 bassins versants correspondant pour certains aux stations de la banque Hydro. Cette approche a pour but d'identifier les différentes classes de bassins versants en fonction de leur caractérisation et de définir des types de comportements.

En parallèle la modélisation, avec le logiciel Gardénia des relations pluie/débit, pluie/niveau ou pluie/niveau/débit fait intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant.

Les différentes modélisations ont permis de simuler les débits et niveaux piézométriques sur une période minimale de 30 ans (hors période d'initialisation). Les résultats montrent que sur 20 stations modélisées :

- Les écarts sur les modules sont relativement faibles ;
- Les écarts sur le QMNA5 ou sur le VCN10 sont nettement plus conséquents. Ils varient entre 0 et 1400% avec une moyenne de 13%. Il convient toutefois de relativiser cette notion de pourcentage notamment pour les faibles valeurs d'étiage qui sont associées aux plus fortes incertitudes.
- Les valeurs du VCN10 de période de retour 5 ans sont légèrement inférieures, d'environ 20%, aux valeurs du QMNA5.

Un des objectifs de cette étude était de spatialiser les données hydrologiques simulées à l'ensemble de la zone d'étude en utilisant des corrélations avec les indicateurs hydro-géomorphologiques.

La spatialisation des résultats simulés a reposé uniquement sur la période actuelle limitant les possibilités de corrélation et ne permettant pas d'aboutir même par classe de typologie de fonctionnement de couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Sommaire

1. Contexte et objectifs	10
1.1. LE PROJET HYCCARE	10
1.2. OBJECTIFS DU PROJET HYCCARE	11
1.2.1. Objectif général.....	11
1.2.2. Objectif de l'axe 1 et contribution du BRGM au projet Hyccare	11
1.2.3. Les partenaires du projet HYCCARE	12
1.3. LA NOTION DE CHANGEMENT CLIMATIQUE	13
1.3.1. Une notion globale	13
1.3.2. Les effets potentiels du changement climatique sur les eaux souterraines	14
1.3.3. Le changement climatique en Bourgogne	15
1.4. ZONE D'ETUDE	15
2. Contexte géologique et hydrogéologique de la Bourgogne.....	17
2.1. GENERALITES.....	17
2.1.1. Les paysages.....	17
2.1.2. Le relief.....	17
2.1.3. Le climat	19
2.1.4. L'hydrographie	19
2.2. GEOLOGIE.....	21
2.2.1. Histoire géologique	21
2.2.2. Les grandes formations géologiques.....	22
2.3. HYDROGEOLOGIE	24
2.3.1. Le référentiel hydrogéologique BD Lisa	24
2.3.2. Localisation des principaux aquifères.....	29
2.3.3. Caractéristiques – productivité et extension.....	30
3. Etude qualitative - Typologie des bassins versants	32
3.1. ZONE D'ETUDE ET CHOIX DES BASSINS VERSANTS A MODELISER	32
3.2. LITHOLOGIE SIMPLIFIEE DES BASSINS VERSANTS	35
3.3. ANALYSE DE LA FRACTURATION ET DE LA KARSTIFICATION.....	36
3.3.1. La densité de fracturation.....	36
3.3.2. Analyse de la fracturation.....	38
3.3.3. Les karsts et les sources.....	43
3.4. LES INDICATEURS HYDRO-MORPHOLOGIQUES.....	46
3.4.1. L'indice de compacité	46

3.4.2. La densité de drainage	47
3.4.3. La densité du réseau hydrographique « intermittent ».....	49
3.4.4. L'indice topographique d'humidité du sol	51
3.4.5. L'indice de rugosité	53
3.4.6. La teneur en eau moyenne du sol.....	54
3.4.7. L'épaisseur de la zone non saturée	56
3.4.8. L'IDPR	58
3.5. CALCUL DE LA RECHARGE (PERIODE 1981 – 2010).....	61
3.6. CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE.....	64
3.6.1. Choix des indicateurs.....	64
3.6.2. Classification.....	66
3.6.3. Analyse des résultats.....	68
4. Etude quantitative - Modélisation des bassins versants	71
4.1. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE GENERALE POUR L'ETUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	71
4.2. LE MODELE GARDENIA DU BRGM.	72
4.3. COLLECTE, CONTROLE ET MISE EN FORME DES DONNEES	72
4.3.1. Pas de temps.....	73
4.3.2. Données nécessaires pour la modélisation.....	73
4.8.2. Méthodologie de la démarche d'évaluation	91
5. Analyses et spatialisation.....	93
5.1. ANALYSES DES DONNEES DE DEBITS.....	93
5.1.1. Les débits moyens	93
5.1.2. Le QMNA5.....	95
5.2. SPATIALISATION.....	98
5.2.1. Les bassins versants de classe 1.....	98
5.2.2. Les bassins versants de classe 2-1	100
5.2.3. Les bassins versants de classe 2-2	101
5.2.4. Les bassins versants de classe 4.....	101
5.2.5. Les bassins versants de classe 5.....	103
6. Conclusion.....	104
7. Bibliographie	106

Liste des illustrations

Illustration 1 – Fonctionnement de la recharge d'un aquifère – source JJ. Collin.....	14
Illustration 2 – Localisation de la zone d'étude du projet Hyccare	16
Illustration 3 – Carte du relief en Bourgogne (Modèle numérique de terrain – IGN au pas de 25 m)	19
Illustration 4 – Cadre géographique et géologique du Jurassique de Bourgogne (P. Rat 1986, guides géologiques régionaux. Bourgogne – Morvan – Masson ed.).....	22
Illustration 5 – Coupe géologique au niveau du seuil de Bourgogne.	23
Illustration 6 – Ordonnancement des entités BDLISA.....	24
Illustration 7 – Référentiel hydrogéologique BDLISA - Entités de niveau national (niveau 1) et à l'affleurement (ordre relatif 1) dans la zone d'étude.	25
Illustration 8 – Nature des entités BDLisa – Lexique	27
Illustration 9 – Carte de la nature des entités de niveau 3 à l'affleurement dans la zone d'étude.....	27
Illustration 10 – Carte du type de porosité (milieu) des entités de niveau 3 à l'affleurement dans la zone d'étude.	28
Illustration 11 – Carte de la fracturation (failles observées) et des sources dans la zone d'étude.....	30
Illustration 12 - Carte des 20 bassins versants sélectionnés pour la modélisation avec les niveaux de priorité 1 et 2.	33
Illustration 13 - Caractéristiques des 20 bassins versants sélectionnés pour la modélisation avec les niveaux de priorité 1 et 2	34
Illustration 14 - Carte de la lithologie simplifiée pour les 283 bassins versants	35
Illustration 15 - Extrait de la densité de fracturation calculée par maille de 500 m.	36
Illustration 16 - Carte de la densité moyenne de fracturation par bassin versant	37
Illustration 17 – Schéma récapitulatif pour les indices de conformité et non-conformité entre le réseau hydrographique et la fracturation.	38
Illustration 18 - Exemple de résultats des indicateurs IC et INC	39
Illustration 19 - Exemple de résultats des indicateurs IC et INC	40
Illustration 20 – Analyse de la fracturation - exemple de résultats.....	41
Illustration 21 – Lien entre la fracturation et le réseau hydrographique.	42
Illustration 22 – QMNA5 en fonction du pourcentage du linéaire du réseau hydrographique (en lien avec la fracturation)	43
Illustration 23 – Localisation des karsts et des pertes dans la zone d'étude.	44
Illustration 24 – Tableau récapitulatif sur les sources et leurs distances par rapport	44
Illustration 25 – Localisation des sources et distance avec les failles les plus proches	45
Illustration 26 – Carte de l'indice de compacité pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.	47
Illustration 27 – Carte de la densité de drainage pour les 283 bassins versants	48
Illustration 28 – Extraits de réseau hydrographique permanent et intermittent.....	49
Illustration 29 – Carte de la densité moyenne du réseau hydrographique intermittent.....	50
Illustration 30 – Extrait de la grille de calcul du TWI (50X50 m).....	51
Illustration 31 – Carte de l'indice d'humidité du sol pour les 283 bassins versants	52

<i>Illustration 32 – Corrélation entre l'indice d'humidité du sol et la réserve utile du sol.</i>	52
<i>Illustration 33 – Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM.</i>	53
<i>Illustration 34 – Carte de l'indice de rugosité (médiane) pour les 283 bassins versants</i>	54
<i>Illustration 35 – Carte de la réserve utile du sol pour les 283 bassins versants</i>	55
<i>Illustration 36 – Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée</i>	57
<i>Illustration 37 – Graphe Indice d'humidité du sol en fonction de l'épaisseur moyenne de la ZNS pour les bassins versants sédimentaires.</i>	57
<i>Illustration 38 – Extrait de la Grille du calcul de l'IDPR au pas de 50 m.</i>	58
<i>Illustration 39 – Carte de l'IDPR médian pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.</i>	59
<i>Illustration 40 – Corrélation entre IDPR, densité de drainage et indice d'humidité du sol.</i>	60
<i>Illustration 41 – Répartition de la pluie efficace moyenne (mm)</i>	61
<i>Illustration 42 – Tableau des classes IDPR – Pourcentages retenus pour le calcul du ruissellement et de l'infiltration.</i>	62
<i>Illustration 43 – Carte de l'infiltration calculée (en mm) par la méthode IDPR à partir de la pluie efficace moyenne par bassin versant.</i>	63
<i>Illustration 44 – Corrélations entre les différents indicateurs</i>	65
<i>Illustration 45 – Tableau des résultats de la classification issus de l'analyse des « K moyennes »</i>	66
<i>Illustration 46 – Carte des résultats de la classification par bassin versant</i>	67
<i>Illustration 47 – Synthèse par classe de la lithologie et du QMNA5 spécifique (en m³/s/km²)</i>	68
<i>Illustration 48 – Classe 2 - Synthèse des indicateurs pour le pôle « sableux » et le pôle « calcaires »</i>	69
<i>Illustration 49 – Carte des différents comportements de bassins versants après analyse de la classification.</i>	70
<i>Illustration 50 – Principe général d'une étude d'impact du changement climatique (J. Boé 2007)</i>	71
<i>Illustration 51 – Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant.</i>	72
<i>Illustration 53 – Informations de base et caractéristiques d'étiage collectées auprès de la banque « Hydro » aux différentes stations en m³/s.</i>	75
<i>Illustration 54 – Débits moyens mensuels interannuels observés en m³/s au droit des différentes stations (source Banque Hydro).</i>	76
<i>Illustration 55 – Lames d'eau moyennes mensuelles interannuelles aux différentes stations des différents départements de la zone d'étude.</i>	77
<i>Illustration 56 – Coefficient moyen annuel de ruissellement au droit des stations hydrométriques (Ecoulement moyen banque hydro/Pluie Aurelhy)</i>	77
<i>Illustration 57 – Comparaison des lames d'eau moyennes mensuelles interannuelles minimales et maximales aux différentes stations des différents bassins versants.</i>	78
<i>Illustration 58 - Localisation des bassins versants et des piézomètres sélectionnés pour la modélisation</i>	79
<i>Illustration 59 – Valeurs moyennes interannuelles de l'ETP Penman Monteith au droit des stations Météo France collectées. Données climatiques fournies par l'UMR Dijon</i>	80
<i>Illustration 60 – Stations pluviométriques ayant servi à la détermination des précipitations journalières moyennes sur les différents bassins versants modélisés.</i>	81

Illustration 61 - Coefficients d'ajustement ($Nash=R^2$) des calages réalisés avec les deux jeux de données climatiques sur la période 1981-2010.....	83
Illustration 63 - Cartographie de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle calculée par modélisation au pas de temps journalier sur la période 1981-2010.....	85
Illustration 64 - Cartographie de la pluie efficace moyenne interannuelle calculée par modélisation au pas de temps journalier sur la période 1981-2010.	86
Illustration 62 - Bilans en mm des modélisations sur la période 1981-2010.....	88
Illustration 65 - informations de base et caractéristiques d'étiage collectées auprès de la banque « Hydro » et comparaison avec les valeurs des séries simulées sur 1981-2010 aux différentes stations en m^3/s	90
Illustration 66 – Débits moyens interannuels spécifiques pour les 43 bassins versants retenus	94
Illustration 67 – Q_{moyen} spécifique en fonction de la pluie efficace moyenne (Safran) et par classe de typologie de fonctionnement.	95
Illustration 68- Répartition des Q_{MNA5} spécifiques (en $m^3/s/km^2$) par bassin versant.	96
Illustration 69 – Q_{MNA5} spécifique en fonction de la pluie efficace moyenne (Safran) et par classe de typologie de fonctionnement.	97
Illustration 70 – Relation entre le Q_{MNA5} spécifique et la pluie efficace moyenne Safran pour les bassins versants de classe 1.	98
Illustration 71 – Recherche de corrélations entre débits modélisés et indicateurs spatiaux.....	99
Illustration 72 - Relation entre le Q_{MNA5} spécifique et le pourcentage de linéaire hydrologique affecté par de la fracturation pour les bassins versants de classe 1.	100
Illustration 73 – Relation entre l'épaisseur de la zone non saturée moyenne (en m) et le Q_{MNA5} spécifique pour les bassins versants de classe 2-1	101
Illustration 74 – Relation entre la rugosité médiane et le Q_{MNA5} spécifique pour les bassins versants de classe 4.	102
Illustration 75 – Graphique mettant en relation pluie efficace moyenne et Q_{MNA5} spécifique pour les bassins versants de classe 4.	102
Illustration 76 – Graphique mettant en relation la rugosité médiane en fonction du Q_{MNA5} spécifique pour les bassins versants de classe 5.	103

Liste des annexes

Annexe 1 - Fiches des modélisations	
Calages et simulations de référence	
Période 1981-2010	
(logiciel GARDENIA)	110
Annexe 2...Logiciel Gardénia.....	131

1. Contexte et objectifs

1.1. LE PROJET HYCCARE

Face au changement climatique, les politiques publiques se doivent de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation. Cela implique que les effets du changement climatique soient clairement identifiés à l'échelle des territoires. Or, en l'état actuel, les données locales sont trop peu nombreuses ou pas toujours accessibles pour les décideurs. Une démarche d'action suppose de mieux caractériser localement les impacts du changement climatique et de développer des synergies entre chercheurs et acteurs du territoire pour préparer la décision publique.

Le projet s'articule autour de deux axes :

- l'un, sur la construction de connaissances relatives aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau d'une dizaine de bassins versants et sur les vulnérabilités qui en découlent. Des simulations climatiques, effectuées avec un Modèle de Climat Régional (MCR) à hautes résolutions spatiales, seront effectuées sur le XXI^e siècle. Leurs sorties serviront de données d'entrée pour des modèles hydrologiques. Les résultats attendus sont une meilleure connaissance des évolutions probables de l'aléa climatique, et une estimation de la sensibilité des bassins versants au travers de l'évolution de la capacité de la ressource à se régénérer. L'échelle spatio-temporelle fine de ces résultats contribuera à rendre lisible le risque pour les acteurs du territoire. Des échanges, à différentes phases de ces travaux, entre chercheurs et parties prenantes (institutionnels et gestionnaires de la ressource) permettront de sélectionner les critères de simulations en fonction des attentes et des besoins et de favoriser l'appropriation des résultats.
- l'autre, sur le jeu des acteurs qui se construit autour des modes d'adaptation et de gestion de la ressource. L'analyse des dynamiques collectives autour des vulnérabilités et des pistes d'adaptation permettra de discerner où sont les leviers pour qu'émerge une politique publique autour des questions du changement climatique et de ses impacts.

Le projet est porté par un collectif de chercheurs et de partenaires préoccupés par la gestion de l'eau, réuni par Alterre Bourgogne. Agence de l'environnement et du développement soutenable, Alterre joue un rôle reconnu de plateforme d'échanges et de concertation autour des questions de l'environnement pour assurer une de ses missions, « favoriser le passage à l'action ».

Ce projet fait suite à des premiers travaux sur «l'impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne», menés en 2009 par une partie de ce même collectif de chercheurs. Ces premiers travaux ont permis d'étudier l'impact de l'année 2003 sur les réserves hydriques des sols, mais n'intégraient ni des simulations sur des décennies futures ni les échanges avec les nappes souterraines.

Les modes de construction de l'interdisciplinarité entre chercheurs et de partenariat entre chercheurs et acteurs seront analysés pour dégager les conditions d'une concertation réussie : à partir de cet exemple de co-construction d'une question climatique concernant la gestion de la ressource en eau, comment peut s'organiser dans un territoire (région administrative, bassin versant...) pour mettre en place une politique d'adaptation qui réponde au mieux aux enjeux locaux ?

L'originalité de ce projet réside tant par le mode de concertation au fil des travaux que par le rapprochement des échelles spatio-temporelle et décisionnelle.

1.2. OBJECTIFS DU PROJET HYCCARE

1.2.1. Objectif général

L'objectif général du projet consiste à mettre à disposition des décideurs locaux les outils qui leur permettront de mieux prendre en compte le risque lié aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau. L'élaboration de connaissances locales permettra de construire avec les différents acteurs des territoires des pistes d'adaptation.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs questions seront traitées. En amont du projet, les chercheurs rencontreront les décideurs et parties prenantes des territoires afin d'échanger sur les attentes et les besoins de ces derniers en ce qui concerne les types d'outils qui faciliteraient la compréhension des enjeux. Puis, un important travail de modélisations emboîtées sera réalisé par les équipes de chercheurs.

La modélisation de l'aléa climatique à différents horizons ou échéances (2030-2050, 2050-2070, ...) alimentera la modélisation hydrologique : **étude de la sensibilité à la variabilité climatique d'environ 10 bassins versants type en Bourgogne**. Les cartes et données ainsi produites à une échelle spatio-temporelle proche de l'échelle de décision, seront les supports de débats pour identifier les vulnérabilités des territoires et les pistes d'adaptations possibles.

1.2.2. Objectif de l'axe 1 et contribution du BRGM au projet Hyccare

Le projet s'articule autour de 2 axes, l'un relatif à la construction de connaissance, l'autre, plus sociologique, sur les leviers d'actions. Dans l'axe 1, des simulations ont permis de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur l'évolution des ressources en eau d'une part, et les vulnérabilités socio-économiques qui en résulteraient d'autre part. Les simulations fines portent sur un nombre limité de bassins versants (une vingtaine).

Le travail du BRGM s'inscrit totalement dans l'axe 1 et s'est déroulé selon les étapes suivantes :
Au niveau du fonctionnement hydrologique, le travail est décomposé en deux temps :

1) l'amélioration d'un modèle de bilan hydrique spatialisé (Ubertosi et al., 2009 ; Lamy et al., 2009) tenant compte des spécificités précises du territoire (occupation du sol, pédologie, sensibilité au ruissellement) et permettant de simuler la distribution spatiale de la réserve utile et des pluies efficaces ;

2) la mise en place de modélisations hydrologiques pour simuler les débits à l'exutoire d'une dizaine de bassins versants représentatifs des différents contextes hydrogéologiques bourguignons. Dans cette phase, les modèles non-distribués GR4J (Cemagref, Perrin et al., 2003) et Gardenia (BRGM, Thiéry, 2003) seront utilisés.

On dispose alors pour chaque contexte hydrogéologique d'un bassin versant de référence permettant d'évaluer précisément les impacts du changement climatique et la vulnérabilité de chacun de ces contextes.

Une extension de ces résultats à l'ensemble du territoire a été cherchée à partir des cartes de recharge et des différents indicateurs développés récemment par le BRGM (cf. modèle IDPR).

1.2.3. Les partenaires du projet HYCCARE

Les organismes et les laboratoires impliqués dans le projet sont :

- **UMR 6282 Biogéosciences**

(Équipes **CRC** (Centre de Recherches de Climatologie) et **SEDS** (Systèmes, Environnement et Dynamiques Sédimentaires)), CNRS / Université de Bourgogne ;

- **UMR Agroécologie** INRA / AgroSup-Dijon / Université de Bourgogne ;

- **UR 718 LISTO-D**

(Laboratoire de recherche sur les innovations socio-techniques et organisationnelles en agriculture de Dijon), INRA / AgroSup-Dijon ;

- **UMR CESAER**

(Centre d'Economie et Sociologie Appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux), INRA /AgroSup-Dijon ;

- **BRGM**

DAT/ Direction Régionale Bourgogne Franche-Comté (Dijon) Direction D3E (Eau, Environnement et Ecotechnologies) - Orléans

1.3. LA NOTION DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

1.3.1. Une notion globale

Ce paragraphe portant sur la définition du climat et la notion du changement climatique est extrait de la revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. Rapport EDE no 95-2. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada (p. 13-18).

« Le climat est la moyenne, sur un certain nombre d'années, des variations quotidiennes de la température, des précipitations, de la nébulosité, des vents et d'autres conditions atmosphériques qui caractérisent un point quelconque de la surface de la Terre. Il englobe aussi la variabilité de chacun de ses éléments, comme la température et les précipitations, ainsi que la fréquence de divers phénomènes météorologiques. En d'autres termes, le climat représente une combinaison des conditions météorologiques moyennes et de leurs configurations, au cours d'une certaine période, en un lieu particulier.

Le climat est un système équilibré, composé d'éléments inter reliés et en interaction, régi par l'apport énergétique du soleil.

Les principaux facteurs influant sur le climat sont des processus soit internes soit externes. Parmi les processus internes, mentionnons la circulation de l'air et les courants océaniques, les effets des nuages et des importantes masses de neige et de glace, l'influence de la topographie, celle des sols et de la végétation de surface, les effets des processus et des activités dans la biosphère et les différences régionales, saisonnières et quotidiennes du rayonnement solaire. Les processus externes sont l'énergie dispensée par le soleil, la composition de l'atmosphère ainsi que les caractéristiques des terres et des océans.

Les changements climatiques à l'échelle planétaire surviennent quand l'équilibre entre le rythme auquel l'énergie entre dans le système climatique de la Terre et celui où elle en sort est perturbé par des variations d'un ou plusieurs de ses principaux éléments. Les principales causes possibles de tels changements englobent les variations de la teneur en aérosols et en gaz de l'atmosphère, des changements de la réflectivité de la surface de la Terre et des modifications de l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface.

Des réactions complexes au sein d'autres facteurs risquent de survenir à mesure que le système se réadapte pour établir un nouvel équilibre entre l'absorption et la réflexion de l'énergie. La rétroaction positive s'applique aux réactions des variables climatiques qui accentuent le changement initial, comme un réchauffement de surface supplémentaire provoqué par une diminution de la réflexion du rayonnement, elle-même entraînée par une réduction de l'étendue de la couverture nivale. Une rétroaction négative s'oppose au changement et y fait partiellement contrepoids; à ce titre, mentionnons le stockage par les océans de la chaleur atmosphérique en excès imputable à l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre.

Les changements climatiques prévus au cours des quatre ou cinq prochaines décennies seraient surtout le produit des activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère (accroissement des gaz à effet de serre et de aérosols) et les caractéristiques du terrain (réduction de l'étendue de la végétation naturelle)».

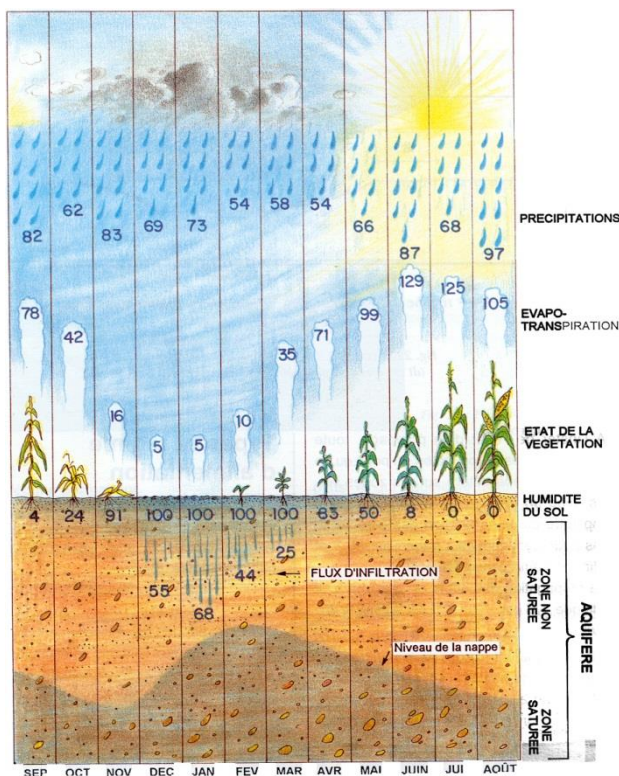
1.3.2. Les effets potentiels du changement climatique sur les eaux souterraines

Les premières analyses du changement climatique montrent la complexité du phénomène tant au niveau de l'équilibre du cycle de l'eau que des répercussions à moyen et long terme. Le sujet est vaste et beaucoup de questions restent encore non résolues.

Néanmoins, il existe des approches et des réflexions pour recenser les conséquences du changement climatique sur un ou plusieurs paramètres comme le régime des pluies, la hausse du niveau marin,...

Si on envisage un changement dans le régime des pluies combiné à des changements thermiques, les répercussions sont nombreuses

- Des modifications des niveaux des nappes libres avec de nouvelles amplitudes de fluctuation ;
- Au niveau des rivières, les hautes eaux plus hautes, entraînant des étiages tardifs si les nappes sont plus hautes, débits d'hiver variable (plus ou moins ?)
- Evolution du régime des sources (lignes de sources) ;
- Redistribution des zones humides avec l'apparition de nouvelles zones humides si les nappes sont plus hautes ;
- Evolution des bilans des échanges surface - sous-sol : recharge, évaporation
- Evolution de l'état de surface des sols / sols plus secs l'été, sols plus humides l'hiver, refus d'infiltration, ruissellement accru ;
- Evolution du couvert végétal naturel avec des modifications des pratiques culturales ;
- Incertitudes sur la disponibilité d'eau potable à faible coût.



Ainsi dans le cas d'un accroissement des pluies hivernales, il y aura une augmentation de la recharge des aquifères mais probablement pas de façon linéaire, le ruissellement pouvant être plus important face à une intensité plus forte des épisodes pluvieux. Cela peut entraîner des risques de débordements localisés ou d'inondation pour certaines nappes (ex: Somme).

Le niveau moyen des nappes les plus étendues (et particulièrement celles de plus grande inertie) devrait monter avec augmentation consécutive du débit des sources, notamment si les épisodes hivernaux de ce type (accroissement des pluies hivernales) se multiplient.

L'irrégularité accentuée des apports entre les saisons et les années se répercuterait sensiblement sur le régime des nappes à faible réserve.

Illustration 1 – Fonctionnement de la recharge d'un aquifère – source JJ. Collin

1.3.3. Le changement climatique en Bourgogne

En Bourgogne, plusieurs questions se posent quant aux effets du changement climatique sur les ressources hydriques des différents territoires :

Il est probable, avec des températures plus élevées, que la longueur moyenne de **la période de recharge des aquifères se rétracte au profit de celle de vidange**. Mais ces périodes moyennes sont à préciser bassin par bassin. Cela se fera selon les nouveaux scénarios RCP (Representative Concentration Pathway), décrits et utilisés dans l'exercice 5 du GIEC (Moss *et al.*, 2010) et des échéances (2030-2050, 2050-2070, 2080-2100?) à déterminer en concertation avec les acteurs du territoire.

Il est également probable que **l'intensité de la période de vidange soit accrue**, ne serait-ce qu'en raison de la hausse de la température (évolution déjà observée (1961-2010) en Bourgogne : plus de 1°C tandis que les précipitations de saison chaude sont restées stationnaires). Cette intensification se doit également d'être quantifiée, bassin par bassin, selon la trajectoire et l'échéance.

- Les incertitudes prévalent concernant **l'intensité de la recharge**, qui dépend beaucoup de l'évolution des précipitations de saison froide. En Bourgogne, l'évolution observée du climat depuis 50 ans (1961-2010) atteste d'une légère augmentation des précipitations de saison froide, en particulier en automne. Celle-ci compense-t-elle le raccourcissement de la saison de recharge? Et si oui à quelle échéance cette compensation ne sera plus effective?

1.4. ZONE D'ETUDE

Elle s'étend sur 31 582 km² et a une population de 1,6 millions d'habitants. C'est une région assez faiblement peuplée (51 habitants / km²). Elle est composée de 4 départements (La Côte d'or, la Saône et Loire, la Nièvre et l'Yonne). Le réseau hydrographique s'étend sur plus de 12000 km de cours d'eau et il existe une hétérogénéité tant du point de vue géologique que géomorphologique.

La zone d'étude se localise sur toute la région Bourgogne élargie en fonction des limites des bassins versants. Le découpage de la zone d'étude en bassin versant, à partir de stations hydrologiques pour certains, a permis d'identifier 283 secteurs de superficie hétérogène comme le montre l'illustration 2.

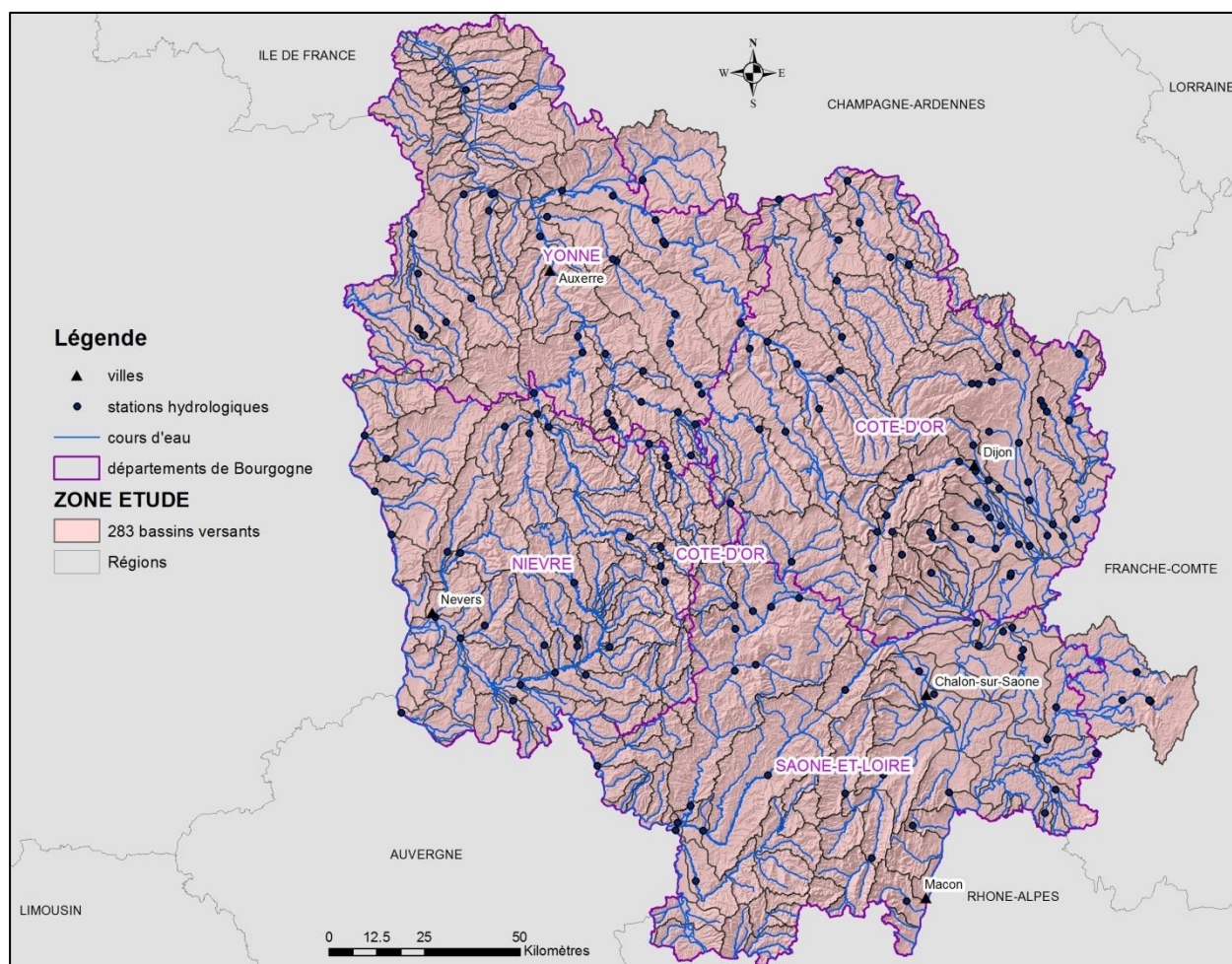


Illustration 2 – Localisation de la zone d'étude du projet Hyccare

2. Contexte géologique et hydrogéologique de la Bourgogne

2.1. GENERALITES

La Bourgogne est une région historique et administrative située au centre-est de la France. Elle est constituée de quatre départements : l'Yonne, la Côte-d'Or, la Nièvre et la Saône-et-Loire.

C'est la 6^{ème} région la plus vaste de France avec ses 31582 km² de superficie. Cette surface est principalement utilisée pour l'agriculture (terres cultivées, prairies, pâturages et jachères), soit environ 59 % de la superficie du territoire en 2002. La Bourgogne a donc une forte tradition agricole.

Les principales productions agricoles sont les céréales, les vins, de renommée internationale, et l'élevage (charolais).

On y trouve également une activité industrielle importante. Elle repose sur quatre principales activités que sont la métallurgie et la transformation des métaux, les industries agricoles et alimentaires, la chimie, le caoutchouc, les plastiques et les industries des équipements mécaniques.

Cependant, la majorité des emplois se situe dans le tertiaire. Les services contribuent à 70 % de la valeur ajoutée et des emplois.

L'ensemble des informations générales permettant de caractériser la zone d'étude est principalement issu du SIGES Bourgogne.

2.1.1. Les paysages

Les paysages bourguignons offrent une image variée, notamment grâce au relief vallonné et au passage incessant de points hauts à des points bas. On peut y observer :

- des paysages de forêts, principalement au niveau des plateaux (Châtillonnais, le Nivernais, le Morvan) ;
- des paysages de bocage ceinturant le massif du Morvan ;
- des paysages de cultures localisés principalement dans la plaine dijonnaise, sur les plateaux de l'Yonne et au nord de la Nièvre ;
- des paysages composites (un contraste de forêts et grandes cultures) occupant une superficie importante en périphérie Nord et Est de la Bourgogne (les plateaux du nord de l'Yonne, l'Auxois, la Bresse et la plaine de la Saône) ;
- des paysages de vignobles, de faible superficie, mais qui permettent à la région d'être identifiée et reconnue de tous.
- des paysages de vallées alluviales qui se présentent sous la forme de grands couloirs encadrés de versants dissymétriques : les plaines de la Saône, de la Loire et de la basse vallée de l'Yonne.

2.1.2. Le relief

La Bourgogne présente un relief très variable (illustration 3) allant de la « montagne » (Morvan) à la plaine alluviale (Yonne), ainsi on distingue :

- Montagnes granitiques : Le Morvan est un massif granitique où se situe le point culminant de la Bourgogne (Haut-Folin : 901 m). Il fait figure de montagne. Cependant, les formes sont douces à cause de la couverture d'arène qui provient de l'altération des granites.
- Seuil de Bourgogne : C'est une grande voûte calcaire orientée SO-NE, dessinant un vaste col entre les Vosges et le Massif Central. Il est constitué de plateaux calcaires pierreux et secs de 500 à 600 m d'altitude. Les abrupts rocheux des rebords de plateau dominant les vallées qui ont été creusées par les cours d'eau dans les formations calcaires.
- Buttes et dépressions autour du Morvan : Il s'agit d'un pays de tables calcaires, très découpées, détachées des grands plateaux (buttes de l'Auxois, vers 500 m). Elles ceinturent une région plus basse : collines argileuses, bas plateau (la Terre Plaine, 300 m). C'est dans cette partie basse, près de Pouilly-en-Auxois, qu'est situé, à 450 m d'altitude seulement, le "point triple" d'où les eaux partent vers la Manche, l'Atlantique et la Méditerranée.
- Le versant « parisien » : Le flanc nord-ouest du seuil de Bourgogne s'abaisse doucement en s'intégrant dans les auréoles Est du Bassin Parisien, jusqu'à atteindre le point le plus bas de la région (56 m). Dans ces terrains, où alternent calcaires et marnes, les calcaires donnent plusieurs lignes de côtes tourné vers le sud-est :
 - La côte de l'Avallonnais fermant la dépression péri-morvandelle ;
 - La côte du Châtillonnais ;
 - La côte du Tonnerrois, du vignoble de Chablis et de l'Auxerrois ;
 - La côte de la craie (ou de la Puisaye) ;
 - Les Plateaux du Nivernais : Ici, la pente vers la région parisienne est contrariée par des failles qui découpent les plateaux du Nivernais. L'ossature calcaire est souvent masquée par un manteau d'argiles rouges émoussant les reliefs, en panneaux légèrement inclinés vers le nord-ouest.

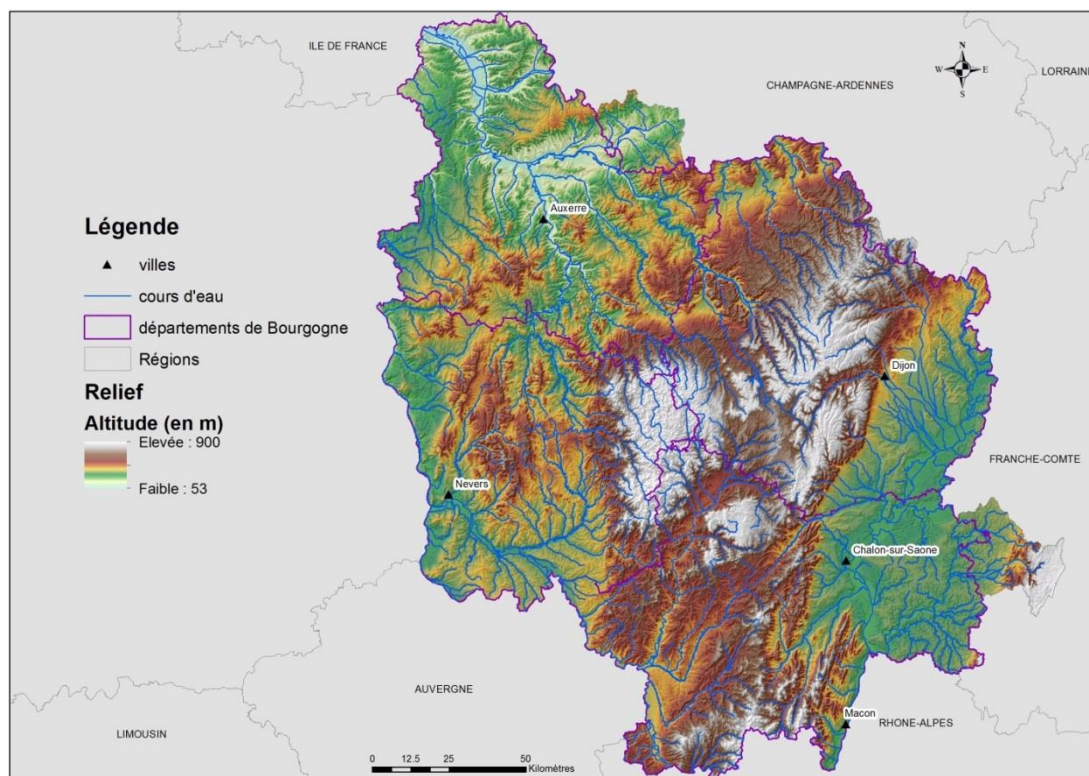


Illustration 3 – Carte du relief en Bourgogne (Modèle numérique de terrain – IGN au pas de 25 m)

2.1.3. Le climat

La Bourgogne présente un climat typique d'une organisation en carrefour. En effet, son versant occidental présente un climat océanique alors que son versant oriental présente à la fois un climat continental et méridional. La position du versant oriental, en retrait des côtes mais à distance raisonnable (moins de 500 kilomètres) et l'organisation des reliefs (en particulier l'axe nord-sud de la Saône), lui donne une influence continentale (originaire du nord-est), et une influence méditerranéenne (originaire du Sud).

L'influence méditerranéenne ne provoque pas seulement une augmentation des températures, elle peut aussi apporter des masses d'air maritime très humide. Quant à l'influence continentale, elle se manifeste particulièrement lors d'épisodes froids où souffle le vent du nord-est.

Enfin, le rôle de ces masses d'air varie selon la saison: en hiver, le froid continental est conquérant, en été c'est la chaleur originaire du sud. Les masses d'air sont donc très contrastées et sont donc responsables, avec l'air atlantique tropical, de la plupart des excès de températures ou de précipitations.

2.1.4. L'hydrographie

Une part importante des grands cours d'eau bourguignons prend sa source dans le Morvan : Yonne, Cure, Serein, Arroux... Ce massif est à l'origine du «point triple» de la ligne de partage des eaux des 3 bassins hydrographiques majeurs : la Seine (44% du territoire régional), la Loire (28%) et le Rhône (28%).

La région Bourgogne présente donc un réseau hydrographique relativement bien développé avec 12 400 km de rivières. Le linéaire est important, mais inégalement réparti et se traduit par:

- Une densité du linéaire modulée en fonction de la géologie régionale : au chevelu dense du Morvan ou de l'Auxois, lié à des substrats géologiques peu perméables, que l'on peut opposer à la rareté des rivières des plateaux calcaires de l'Yonne ou du Nord de la Côte-d'Or.
- Des variations très importantes de débits à l'échelle de la saison ou des années.

2.2. GEOLOGIE

La Bourgogne s'étend de part et d'autre de la ligne de partage des eaux (majeure en Europe) entre, d'une part le versant de la Manche et de l'Atlantique par la Seine et la Loire et, d'autre part le versant méditerranéen par la Saône. Cette ligne de partage des eaux orientée Nord-Est / Sud-Ouest qui scinde la Bourgogne en deux, résulte d'une **structure géologique** bien typée :

- côté Seine et Loire, la région occupe la bordure Sud-Est du bassin de Paris,
- côté Saône, la région occupe le fossé bressan,
- entre ces deux parties, s'étend une vaste zone d'altitude élevée (plus de 500 m d'altitude) sur la ligne de partage des eaux elle-même et ses abords : le seuil de Bourgogne (coupe illustration 5), prolongé au Sud-Ouest par le Morvan et le Charolais.

2.2.1. Histoire géologique

L'âge des formations géologiques qui constituent le sous-sol de la Bourgogne est particulièrement étendu puisque l'on peut y observer des roches de l'ère primaire ou plus anciennes encore (âgées d'au moins 250 millions d'années) jusqu'aux dépôts de l'ère quaternaire (moins de 2 millions d'années) en passant par les formations secondaires (250 à 65 millions d'années) et tertiaires (65 à 2 millions d'années).

Un bref rappel de la succession des événements géologiques anciens permet de comprendre l'agencement du sous-sol bourguignon :

- Au début du Paléozoïque, création de la chaîne montagneuse hercynienne par convergence de plaques, chaîne qui disparaîtra avec les processus d'érosion. La dernière des phases hercyniennes au permio-carbonifère (300 à 250 millions d'années) ayant contribué à former le fossé houiller de Blanzay.
- Au Trias, début d'une submersion marine avec des dépôts plutôt marneux et gréseux et présence d'évaporites (gypse, anhydride).
- Durant le Jurassique, la transgression marine continue, déposant des formations marneuses devenant progressivement carbonatées. Les épaisseurs et la nature des dépôts sédimentaires diffèrent dans la région suivant la bathymétrie.
- A la fin du Jurassique supérieur, le retrait de la mer (entrecoupé par une petite transgression) va permettre le dépôt de marnes, sables et craie.
- Le soulèvement du seuil de Bourgogne va alors accélérer la régression marine, entraînant un épisode d'érosion sur les reliefs.

Les structures bourguignonnes résultent essentiellement de la tectonique tertiaire qui, par contrecoup de l'orogénèse alpine, a formé les grandes failles limites des fossés (failles du fossé bressan, failles du fossé de la Loire) et le bombement bourguignon (Seuil de Bourgogne, et Morvan).

2.2.2. Les grandes formations géologiques

Les formations géologiques les plus anciennes forment le **socle de l'ensemble de la région**. Elles sont constituées de roches cristallines et métamorphiques (granites, gneiss, schistes) datant de l'ère primaire ou d'âges plus anciens, qui n'affleurent que dans les massifs cristallins du Morvan et du Charolais (zones rouges, oranges et brunes sur l'illustration 4) ainsi qu'en quelques petits « pointements » tout le long du seuil de Bourgogne.

Ces massifs appartiennent à un ensemble plus vaste englobant le Massif Armoricaire, le Massif Central (incluant le Morvan et le Charolais), le Massif Vosgien et celui de la Forêt Noire en Allemagne, reliquat visible de l'ancienne chaîne montagneuse hercynienne qui s'est formée en plusieurs phases à l'ère primaire ; la dernière de ces phases au permo-carbonifère (300 à 250 millions d'années) ayant contribué à former le fossé houiller de Blanzay.

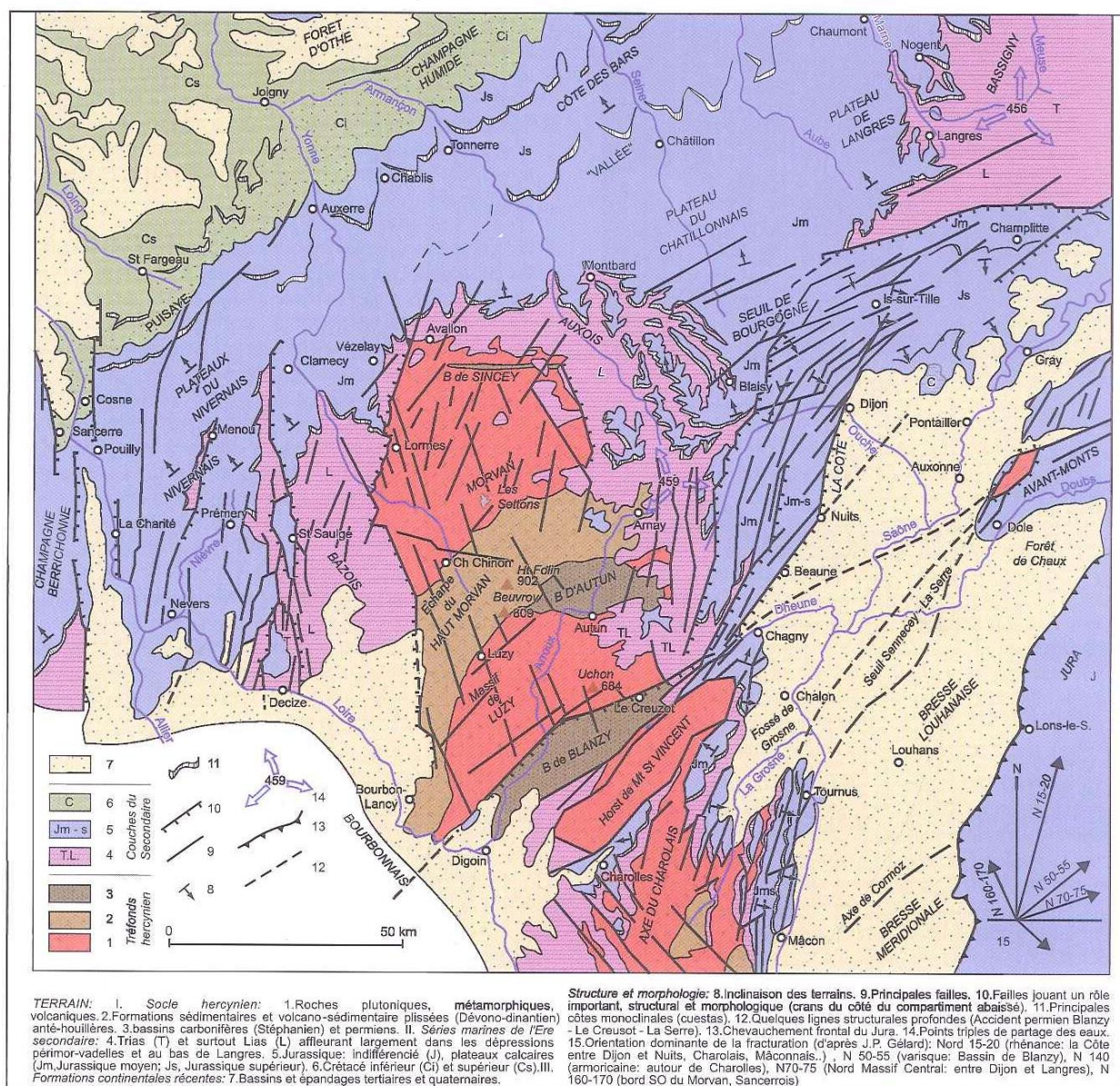


Illustration 4 – Cadre géographique et géologique du Jurassique de Bourgogne (P. Rat 1986, guides géologiques régionaux. Bourgogne – Morvan – Masson ed.).

Vers le Nord-Ouest et l'Ouest, le socle cristallin et primaire, s'enfonçant sous le **Bassin de Paris** est recouvert par l'ensemble des formations secondaires, de plus en plus récentes en approchant du centre du bassin (nord-ouest de l'illustration 4). Ainsi, les argiles, les marnes et les calcaires marneux du Lias bordent le pourtour du massif ancien du Morvan et de ses annexes (Charolais et pointements divers). Puis, en se dirigeant vers le centre du Bassin parisien, on rencontre :

- les formations des calcaires du jurassique (calcaires du Châtillonnais, largement exploités pour les roches ornementales : zones violettes) et qui constituent, entre le Morvan et les Vosges, le **Seuil de Bourgogne** proprement dit,
- les formations d'argiles et de sables (sables et argiles de la Puisaye et du pays de Saint-Florentin) du sommet du Crétacé inférieur (zones vertes),
- les formations de craie (alentours de Sens) du Crétacé supérieur.

A l'Ouest et au Sud-Ouest du Morvan, l'enfoncement des couches du Bassin de Paris se fait moins régulièrement que vers le Nord-Ouest du fait de la présence de grandes failles Nord-Sud qui, parfois, remontent leur compartiment Ouest mais, surtout, qui déterminent un grand fossé d'effondrement, le **fossé de la Loire**, rempli de formations tertiaires (zones de couleur jaune, beige ou pâle sur la carte).

A l'Est du Seuil de Bourgogne, la structure est différente, les formations secondaires du Seuil de Bourgogne s'enfonçant rapidement à grande profondeur du fait de grandes failles Nord-Sud, pour former le **fossé bressan** (ou fossé de la Saône).

Les formations secondaires y sont recouvertes d'une grande épaisseur (plusieurs centaines à un millier de mètres, voire plus) de formations tertiaires constituées d'argiles avec quelques niveaux de sables (zones de couleur jaune ou beige). Cette structure résulte essentiellement de la tectonique tertiaire qui, par contrecoup de l'orogénèse alpine, a formé les grandes failles limites des fossés (failles du fossé bressan, failles du fossé de la Loire) et le bombement bourguignon (Seuil de Bourgogne et Morvan).

La coupe géologique au niveau du seuil de Bourgogne schématise la structure profonde des ensembles géologiques (illustration 5). Elle montre, en particulier, la voûte dissymétrique du socle qui descend en escaliers abrupts de failles vers le fossé bressan au sud-est et en pente douce régulière vers le Bassin parisien au nord-ouest.

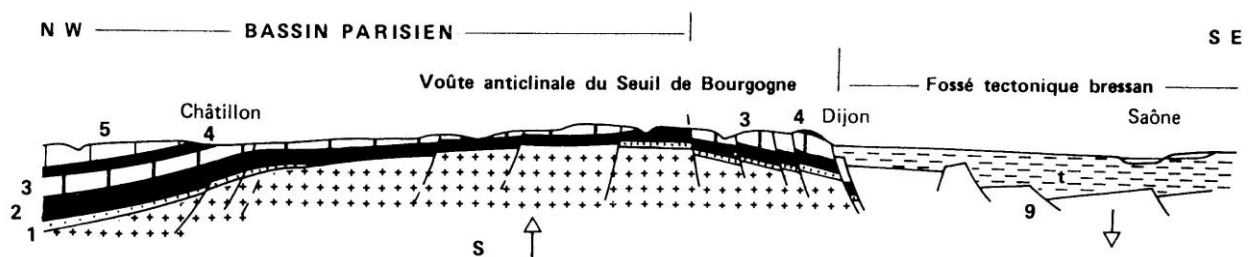


Illustration 5 – Coupe géologique au niveau du seuil de Bourgogne.

2.3. HYDROGEOLOGIE

2.3.1. Le référentiel hydrogéologique BD Lisa

La Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères est un découpage du territoire en entités hydrogéologiques, réalisé selon des règles communes, permettant de traiter et d'échanger les informations intégrées dans une base de données associée à un référentiel cartographique partagé à une échelle de travail au 1/50 000.

La délimitation des **entités hydrogéologiques, aquifères et non aquifères**, correspond à **3 périmètres géographiques différents (= niveaux)** : local, régional et national.

La prise en compte des **entités profondes**, fait de BDLISA un référentiel hydrogéologique quasi tridimensionnel mais les épaisseurs ne sont pas prises en compte et seul un empilement de couches sans indication de valeur de profondeur est actuellement proposé).

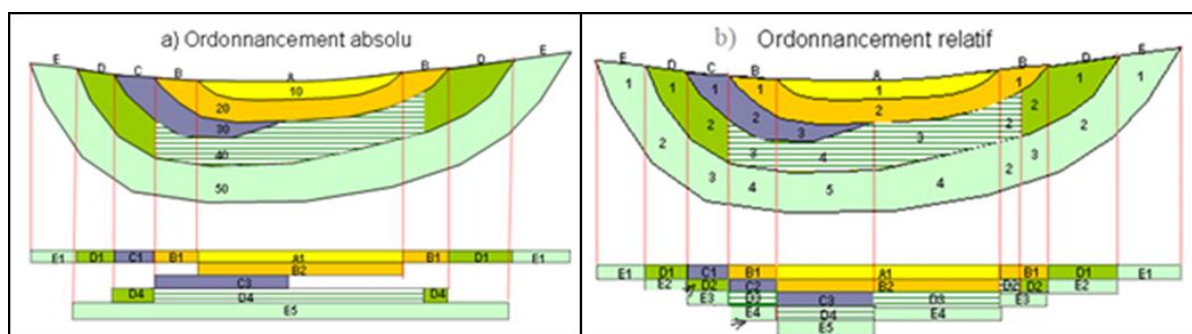


Illustration 6 – Ordonnancement des entités BDLISA.

Dans le cas de la région Bourgogne, la carte ci-après (illustration 7) présente le découpage des entités BD Lisa au niveau 1 (national) et à l'affleurement (ordre relatif 1). Les grands systèmes (dégradé de bleu) présentent les principaux aquifères de la zone d'étude qui sont localisés principalement au nord alors que les grands domaines (dégradé de rose et violet) correspondent aux zones peu ou pas aquifères. Des nappes de faible amplitude sont présentes en domaine de socle (dégradé marron) et les zones alluviales productives sont représentées en jaune. La plaine de la Bresse (en vert sur la carte) se découpe en différentes formations tertiaires, détritiques et très argileuses.

Les entités BDLISA sont caractérisées par quatre principaux attributs : le thème, l'état, la nature et le type de milieu (porosité).

- **Le « thème »** qualifie les grands types de formations géologiques : Alluvial, Sédimentaire, Socle, Intensément plissé de montagne, Volcanisme. Les règles de découpage des entités sont différentes par thème.

- **« L'état »** qualifie la présence ou non d'une nappe, qui peut être libre et/ou captive.

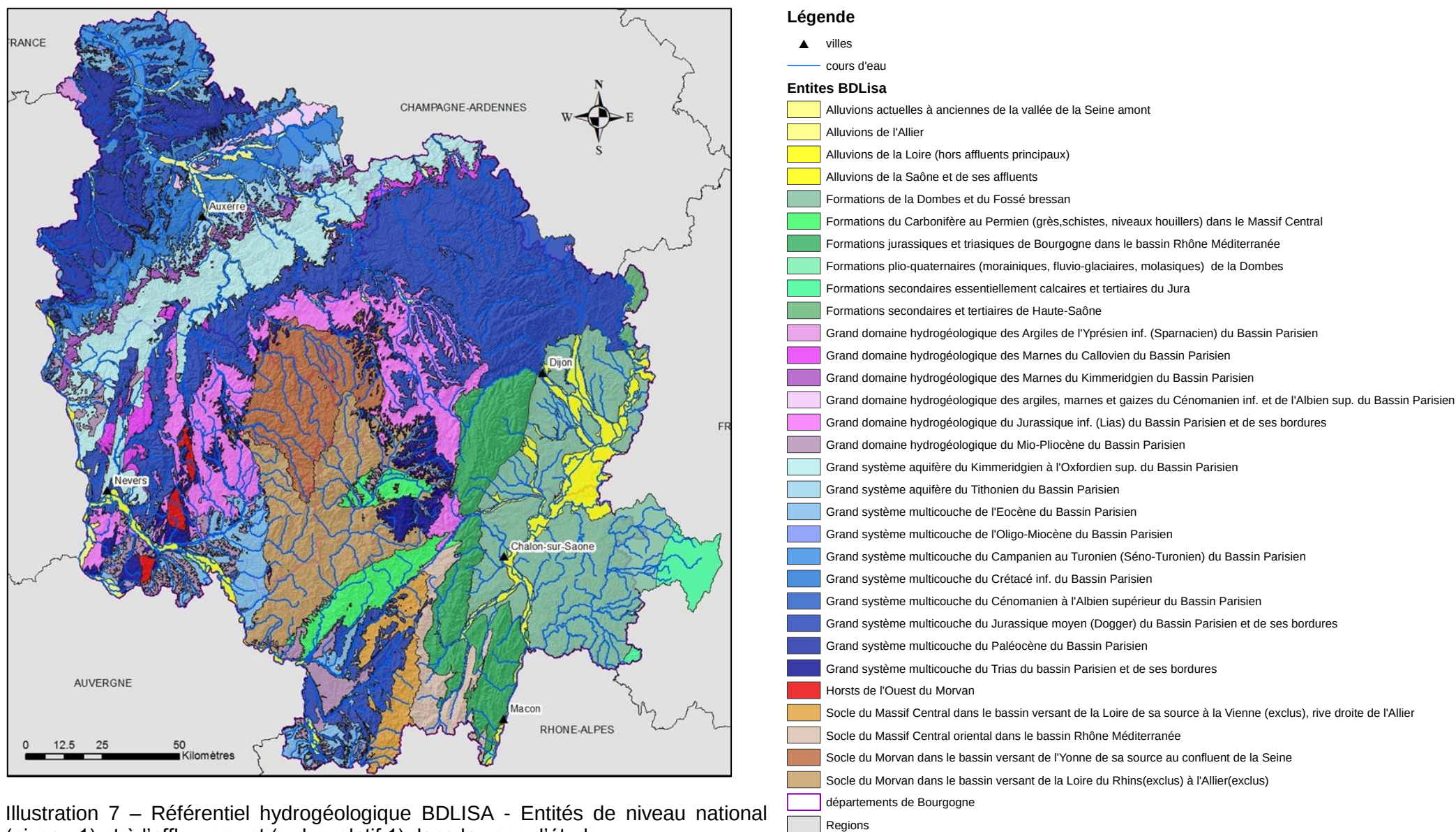


Illustration 7 – Référentiel hydrogéologique BDLISA - Entités de niveau national (niveau 1) et à l'affleurement (ordre relatif 1) dans la zone d'étude.

- Les potentialités aquifères : la « **nature** » permet de qualifier un niveau de perméabilité des entités hydrogéologiques comme le montrent les illustrations 8 et 9.

	Aquifère	Peu ou pas aquifère
Niveau national (NV1)	Grand système aquifère	Grand domaine hydrogéologique
	Grand système multicouche	
Niveau régional (NV2)	Système aquifère	Domaine hydrogéologique
Niveau local (NV3)	Unité aquifère	Unité semi-perméable
		Unité imperméable

Illustration 8 – Nature des entités BDLisa – Lexique

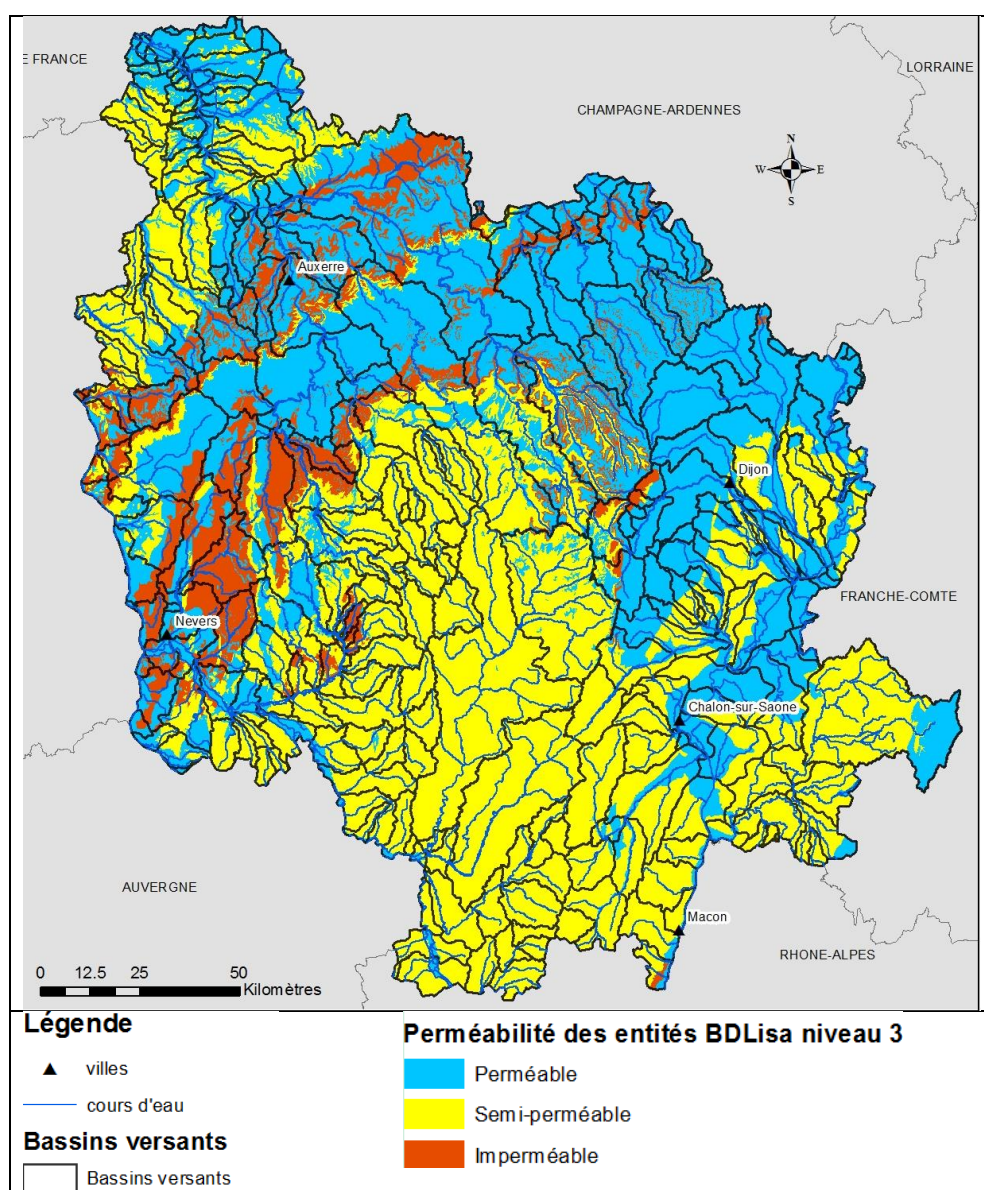


Illustration 9 – Carte de la nature des entités de niveau 3 à l'affleurement dans la zone d'étude.

- Le type de porosité appelé le **"milieu"** : poreux, fissuré, karstique, double porosité, triple porosité (cf. illustration n°10).

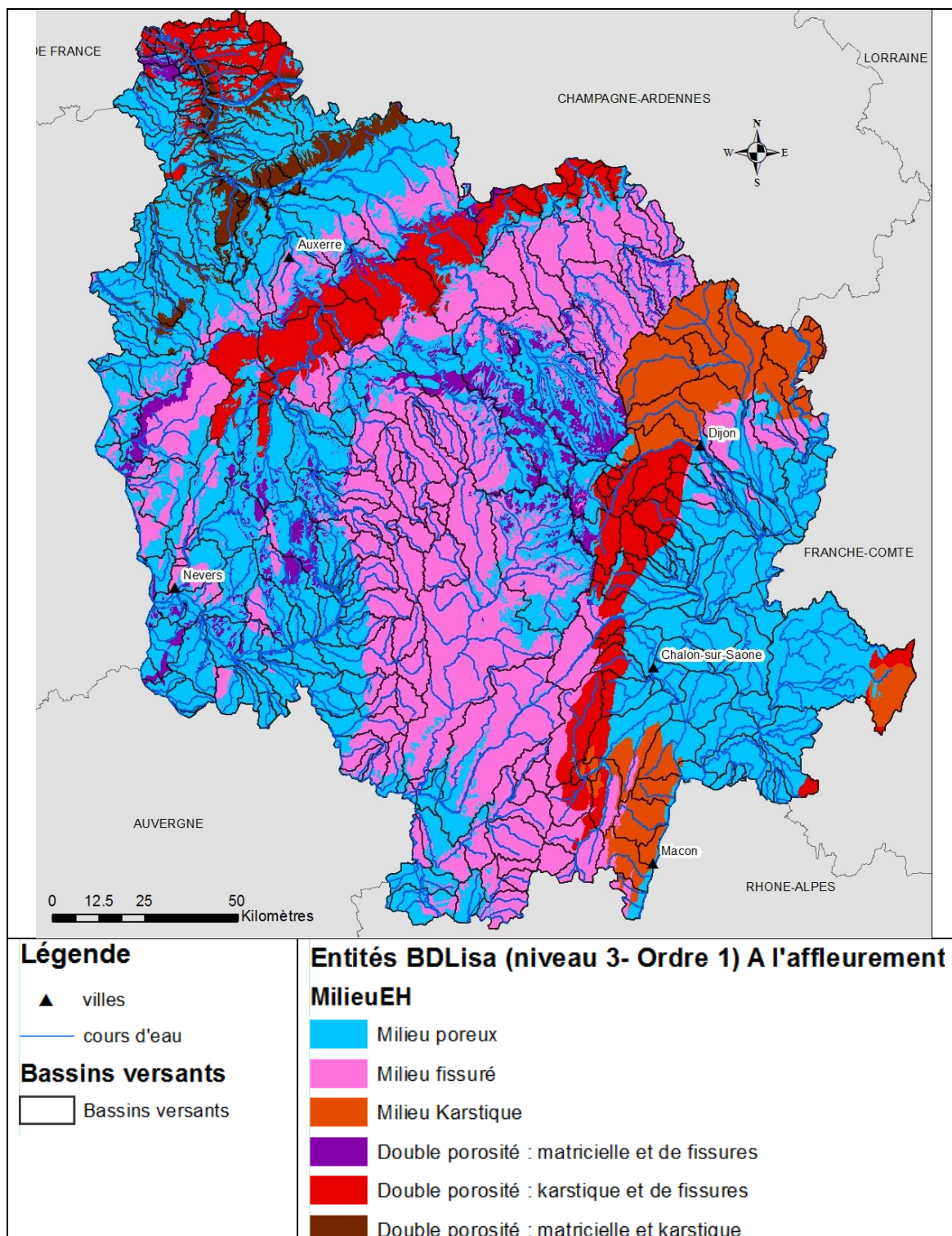


Illustration 10 – Carte du type de porosité (milieu) des entités de niveau 3 à l'affleurement dans la zone d'étude.

2.3.2. Localisation des principaux aquifères

Les ressources en eau en Bourgogne sont relativement importantes, en partie mal connues et de répartition non équitable. De grands ensembles peuvent cependant être définis, présentant chacun différentes particularités dans leur mise en place. Les données sur les aquifères sont issues de l'ouvrage «aquifères et eaux souterraines en France».

- Le nord du bassin Parisien bourguignon : au nord-est de la région, la craie du Cénomanién présente des aquifères profonds et compliqués.

Légèrement plus au sud, les sables du Crétacé moyen présentent de bons aquifères à nappes libres ou captives). Ces nappes sont en général proches de la surface et présentent de nombreux exutoires (particulièrement à l'est d'Auxerre).

- Les plateaux calcaires de Nevers à Dijon en passant par Auxerre : les calcaires du Jurassique (essentiellement du Jurassique moyen et supérieur) peuvent être subdivisés en différents plateaux rocheux :

- le plateau du Nivernais,
- le plateau de Langres,
- et le plateau du Seuil de Bourgogne.

- Le bassin houiller d'Autun : au sein de ce bassin permo-carbonifère, le Trias, essentiellement argileux, peut être considéré comme perméable à l'échelle de la région. Des aquifères locaux existent dans les karsts calcaires.

- Le massif du Morvan : par sa composition granitique, le socle du Morvan permet une circulation d'eau uniquement à la faveur de fractures. Des aquifères locaux, dans des arènes granitiques de faibles puissances donnent naissance à de nombreuses sources, permettant l'émergence de zones humides.

- Le fossé d'effondrement de la Loire : composé de matériaux meubles, il présente de grands aquifères dans des alluvions (sables, graviers) souvent semi-captifs de par le recouvrement par des sédiments plus fins.

- La dépression du Bazois : La dépression du Bazois, composée de dépôts marneux possède un système d'aquifères karstiques sous des niveaux argileux.

- Le fossé Bressan : une étude du BRGM en 2008 (rapport RP-56 538-FR) a permis de préciser le potentiel aquifère du fossé Bressan en Bourgogne. Neuf zones de ressources potentiellement intéressantes pour alimentation AEP ont été mises en évidence :

- les niveaux de calcaires tertiaires (Oligocène et Eocène) de l'Est Dijonnais,
- les graviers profonds de la Tille,
- les graviers profonds de Dijon Sud,
- les formations profondes (graveleuses ou calcaires) de la plaine de Nuits et de Beaune (nappes de Vignoles),
- les calcaires jurassiques sous couverture plio-quadernaire en pied de la Côte chalonnaise,
- les calcaires jurassiques sous couverture plio-quadernaire et tertiaire des abords de Cuisery (rive gauche de la Saône),
- les calcaires oligocènes et éocènes des environs de Louhans,
- et le faciès particulier du Miocène entre la Dôle et la plaine Saône/Doubs (formations grossières en pied du massif de la Serre).

2.3.3. Caractéristiques – productivité et extension

La variété des formations géologiques rencontrées en Bourgogne va entraîner une hétérogénéité des aquifères d'un point de vue de leurs caractéristiques, de leur productivité et de leur extension mais également au regard de leur sensibilité face aux pollutions de surface.

En Bourgogne, les réservoirs aquifères affleurant ou peu profonds, se répartissent en six grands types :

- **les aquifères alluviaux associés aux grands cours d'eau** (Yonne, Loire, Saône, etc ...) : ces alluvions, de nature sableuse ou graveleuse, constituent un réservoir aquifère facile à capter (puits de 5 à 12 m de profondeur le plus souvent) et, en général productif;
- **les aquifères calcaires** : aquifères très fracturés (failles, diaclases). Des circulations karstiques souvent importantes s'y développent, au détriment du réseau de surface. La fracturation guide les circulations des eaux. La vulnérabilité de ces aquifères est importante du fait notamment de l'absence de filtration des eaux lors de leur circulation dans les fissures.

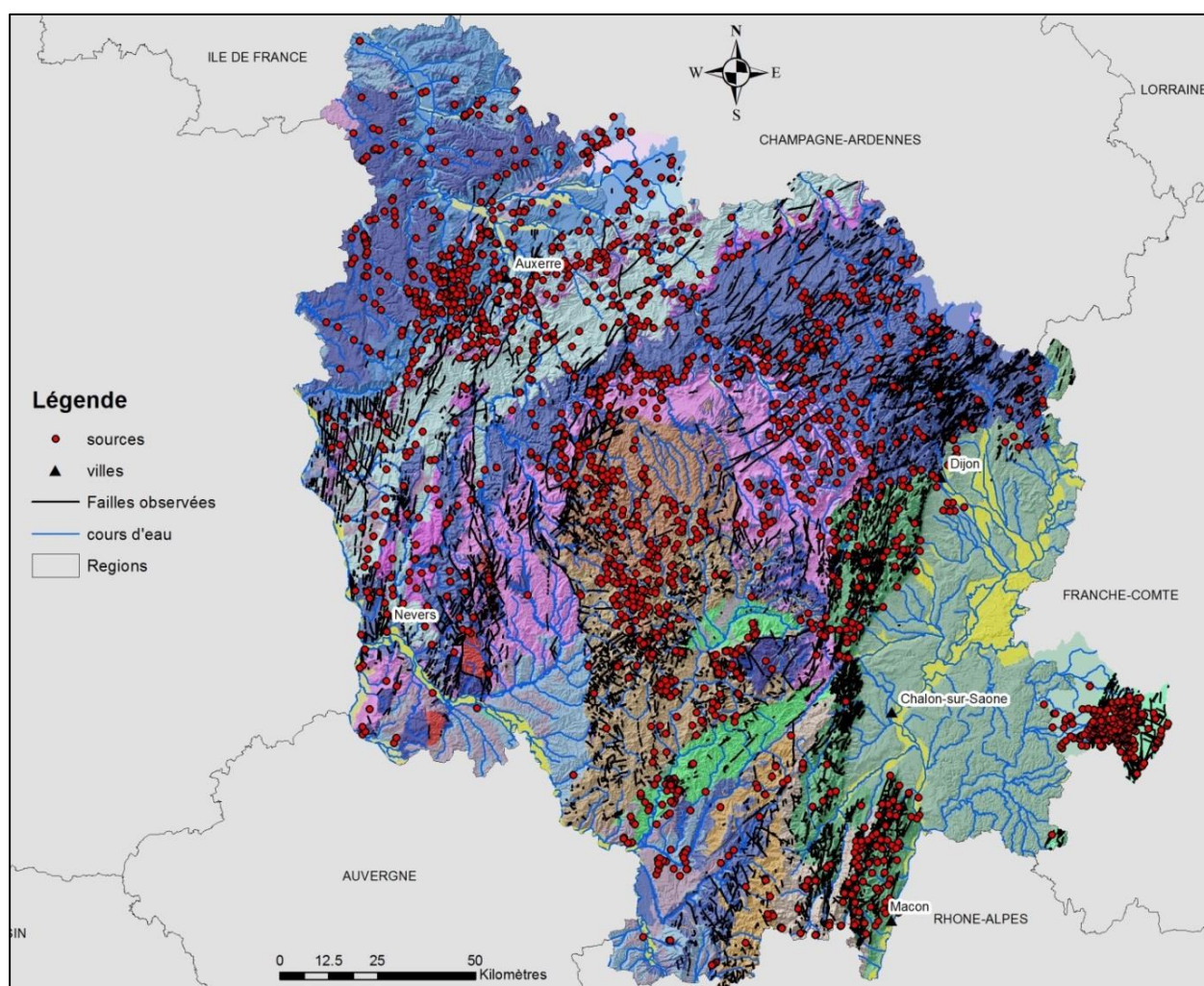


Illustration 11 – Carte de la fracturation (failles observées) et des sources dans la zone d'étude

Dans ces formations calcaires prennent naissance plusieurs nappes :

- La nappe du Jurassique moyen (Bajocien, Bathonien) qui correspondent à des calcaires plus ou moins karstifiés.
- La nappe du Jurassique supérieur (Oxfordien) est composée de calcaires peu karstifiés avec des niveaux marneux importants.
- La nappe du Jurassique supérieur (Kimméridgien, Portlandien) est une zone plus ou moins karstifiée, pouvant générer la création de nappes importantes.

- **Les aquifères crayeux du Crétacé** : Elle occupe tout le Nord du département de l'Yonne et forme un aquifère important. On y observe deux types de circulations, la circulation dans les fissures (un peu moins développées que dans les calcaires) et les circulations à faible vitesse dans la matrice crayeuse (la craie étant un matériau poreux). Cette circulation à deux vitesses, qui étale la restitution de l'eau dans le temps, fait que les sources présentent des fluctuations de débit plus faibles que dans les calcaires, mais elles restent tout aussi sensibles aux pollutions de surface. Les nappes prenant naissance dans ces formations sont la nappe du Turonien et la nappe du Cénomani.

- **L'aquifère sableux du Crétacé** : La formation la plus importante est celle des "sables verts" de l'Albien que l'on observe à l'affleurement au Nord-Ouest de l'Yonne. Ces sables contiennent une nappe qui devient captive en allant vers le Nord-Ouest (alimente des sondages artésiens à Paris). Les eaux sont en général bien filtrées et de bonne qualité bactériologique, quelquefois légèrement ferrugineuses, dans les sables verts.

- **Les aquifères de socle (Morvan)** : la ressource en eau souterraine y est partout présente à faible profondeur mais, à priori, en faible quantité ; la ressource y est exploitée pour l'eau destinée à la consommation humaine par captage de sources et exceptionnellement (à la différence d'autres régions de socle) par forages.

- **Les arènes granitiques** : la couverture d'altération des roches cristallines du Morvan (granite, gneiss, essentiellement) est formée de sables quartzeux à matrice plus ou moins argileuse (arène). Elle renferme des nappes de faible puissance (quelques mètres), donnant naissance à des sources ou à des suintements diffus. La qualité de l'eau de ces nappes présente un pH acide, une faible minéralisation et de manière générale une bonne qualité bactériologique et chimique, compte tenu de la faible pression anthropique en surface.

Il existe aussi en Bourgogne des aquifères profonds, c'est à dire des réservoirs recouverts de formations peu perméables leur assurant une bonne protection contre les pollutions de surface. Ces aquifères profonds sont actuellement encore assez peu connus mais quelques forages profonds indiquent des potentialités notables. Parmi ces aquifères profonds, on peut mentionner :

- les différents aquifères calcaires signalés ci-dessus lorsqu'ils s'enfoncent progressivement en se rapprochant des limites Ouest, Nord et Est de la région (fossé de la Loire, Nord du département de l'Yonne) ;

- et plusieurs niveaux sableux dans les mêmes zones que les aquifères calcaires profonds, notamment l'aquifère des sables Albien (Nord du département de l'Yonne).

3. Etude qualitative - Typologie des bassins versants

L'analyse de la première réponse de l'ensemble « sol + sous-sol », est basée sur une approche qualitative qui se fonde sur une démarche d'analyse aisément transposable en tout lieu du territoire, en réalisant une typologie des bassins versants pour mieux comprendre leur fonctionnement.

Cette phase de l'étude va nous permettre d'estimer la perméabilité verticale des terrains, de distinguer les zones les plus infiltrantes des zones les plus ruisselantes, et de caractériser les bassins versants grâce au développement d'indicateurs spatiaux ou cartographiques. C'est aussi un préalable pour spatialiser les données issues des modélisations climatiques et hydrologiques.

3.1. ZONE D'ETUDE ET CHOIX DES BASSINS VERSANTS A MODELISER

La zone d'étude se localise sur toute la région Bourgogne élargie en fonction des limites des bassins versants. Le découpage de la zone d'étude en bassins versants, à partir de stations hydrologiques pour certains, a permis d'identifier 283 secteurs de superficie hétérogène.

Dans le cadre de l'approche méthodologique, un pool de 20 bassins versants a été choisi pour réaliser des modélisations hydrologiques avec deux niveaux de priorité : 1 (bassins versants à modéliser en priorité) et 2 (bassins versants à modéliser en réserve).

Ces bassins versants ont été choisis par l'ensemble des partenaires du projet Alterre en plusieurs étapes avec le souci constant de la qualité des données, la diversité des contextes hydrogéologiques, la présence d'enjeux liés à la ressource en eau sur le bassin...

Première étape et critères de présélection :

- Des stations à signification hydrologique (différentes des stations privées), en activité sur la région bourgogne depuis au moins 10 ans ;
- une durée de chronique de débits journaliers au minimum de 10 ans, de préférence même 20 ans sur la période 1981-2010;
- une taille de bassin versant comprise entre 10 km² (nécessité du modèle) et 5000 km² (pertinence par rapport à la ressource en eau).

Les stations hydrométriques présélectionnées ne doivent pas être influencées par une activité humaine (type barrage) et doivent avoir des mesures de débits fiables ainsi qu'une bonne représentativité pour l'ensemble des trois grands bassins hydrologiques (Seine, Loire-Bretagne et Rhône Méditerranée-Corse).

Deuxième étape et un choix définitif avec les critères suivants :

- Eliminer les bassins versants dont l'hydrologie est influencée par les activités humaines (barrages et expertise DREAL Bourgogne) ;
- Privilégier les bassins sur lesquels la disponibilité de la ressource pose problème (expertise DREAL, Agences de l'Eau)
- Des mesures piézométriques pour la modélisation GARDENIA qui permettent la prise en compte de l'influence du réservoir souterrain sur les débits des rivières.
- Privilégier les bassins versants déjà ciblés par les acteurs locaux (présence d'un syndicat mixte gestionnaire, SAGE, Contrat de Rivière, Zone de Répartition des Eaux,...).

L'ensemble des bassins versants retenus pour les modélisations sont présentés dans les illustrations 12 et 13. Ils sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude ainsi que sur les différents grands bassins hydrographiques avec une géologie représentative de la Bourgogne.

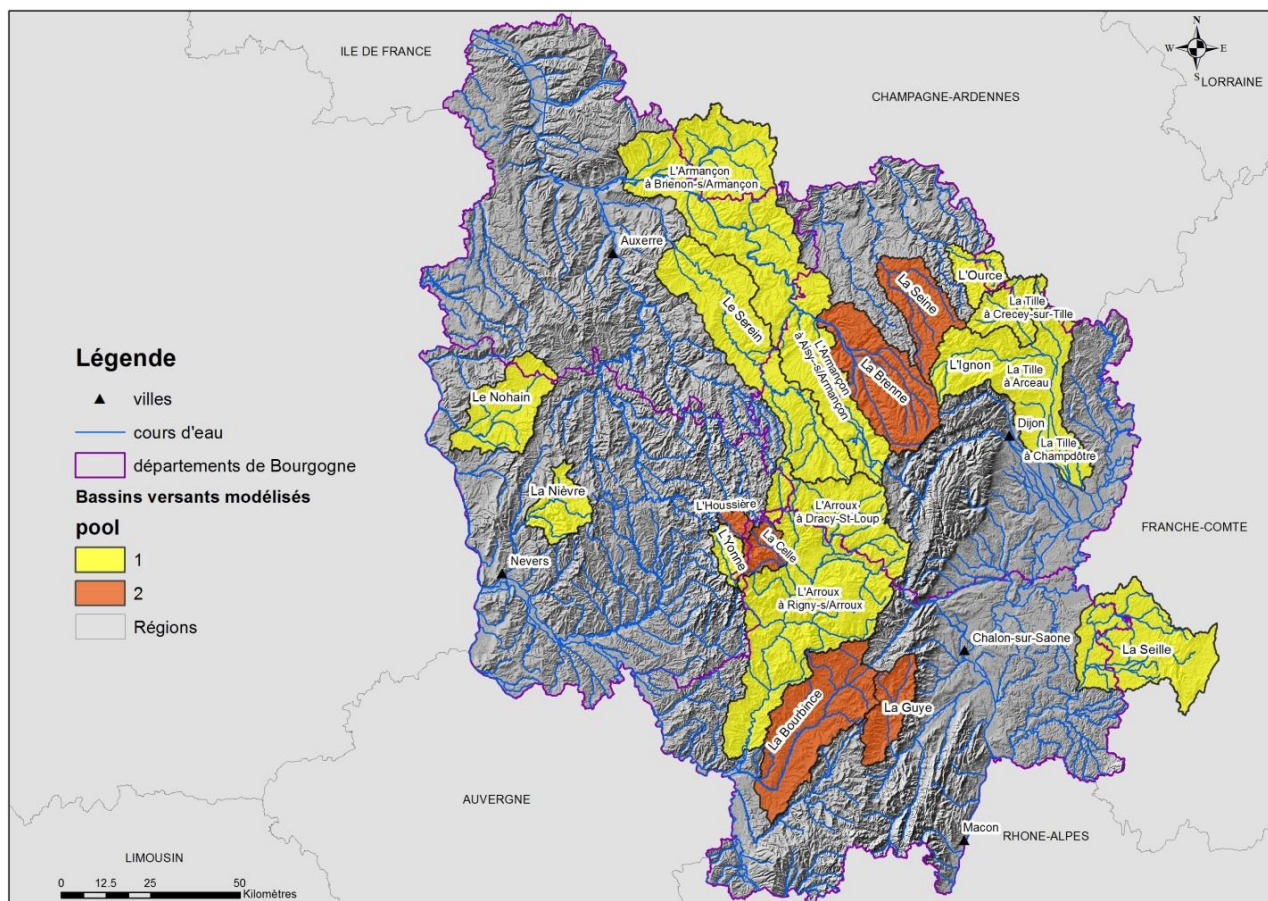


Illustration 12 - Carte des 20 bassins versants sélectionnés pour la modélisation avec les niveaux de priorité 1 et 2.

Dept.	Bassin Versant	Station	Superficie km2	Géologie	Lithologie	Priorité
21	L'Ignon	Villecomte	304	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	2
21	La Brenne	Montbard	729	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	2
21	La Seine	Nod sur Seine	392	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	2
21	La Tille	Crecey	230	calcaires jurassiques (situation karstique)	calcaires, marnes	1
21		Champdotre	1260	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	1
21		Arceau	230	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	1
21	L'Ource	Leuglay	178	Calcaires jurassiques moyens karstifiés	calcaires, marnes	1
58	Le Nohain	Saint Martin	478	Calcaires jurassiques supérieurs	marnes, calcaires, argiles et sables	1
58	La Nièvre d'Arzembouy	Poiseux	237	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	1
58	L'Houssière	Chaumard	61	socle métamorphique	monzogranites, granodiorites	2
58	La Guye	Sigy le Chatel	274	calcaires jurassiques socle métamorphique	monzogranites, granodiorites	2
58	L'Yonne	Corancy	106	socle métamorphique et plutonique	rhyodacites, tuffites acides, ignimbrites	1
71	La Celle	Celle en Morvan	135	permien et socle granitique	rhyodacites, andésites,	2
71	La Seille	Saint Usage	887	sédiments récents	sables, cailloutis et argiles	1
71	L'Arroux	Dracy	775	socle métamorphique, grès triasiques et calcaires jurassiques	argiles, grès, marnes et dolomies	1
71		Rigny	2267	socle métamorphique, grès triasiques et calcaires jurassiques	argiles, grès, marnes et dolomies	1
71	Bourbince	Vitry en Charollais	829	calcaires jurassiques socle métamorphique	grès, conglomérats, schistes, charbons	2
89	L'Armançon	Aisy	1355	calcaires jurassiques inférieurs	calcaires, marnes, grès, argiles et	1
89		Brienon	2984	Calcaires jurassiques moyens	calcaires, marnes	1
89	Le Serein	Chablis	1120	Calcaires jurassiques supérieurs karstifiés	marnes, calcaires, argiles et sables	1

Illustration 13 - Caractéristiques des 20 bassins versants sélectionnés pour la modélisation avec les niveaux de priorité 1 et 2

3.2. LITHOLOGIE SIMPLIFIEE DES BASSINS VERSANTS

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique des bassins versants de la zone d'étude, une lithologie simplifiée a été réalisée à partir de deux sources de données du BRGM : la carte géologique au 1/1 000 000^{ème} et la carte de la lithologie simplifiée au 1/2 000000^{ème} de la France.

Ces deux couches d'informations ont été croisées avec les bassins versants et une analyse statistique a permis d'identifier pour chaque bassin la lithologie dominante c'est-à-dire celle qui représente plus de 50 % de sa surface.

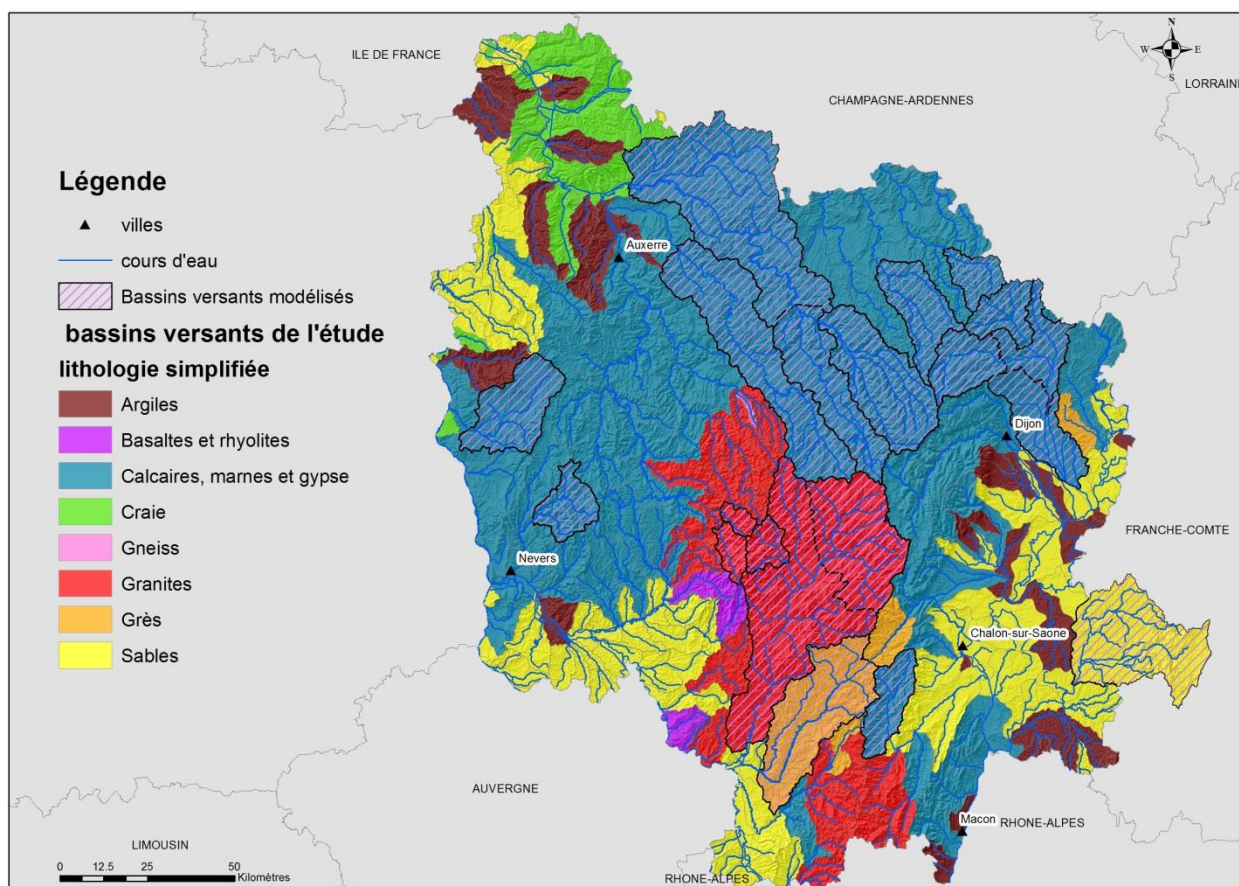


Illustration 14 - Carte de la lithologie simplifiée pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

Les résultats ont permis de réaliser une carte (illustration 14) qui fait apparaître les grandes lithologies ainsi qu'une première approche de la perméabilité par bassin versant. Le socle, à savoir les formations magmatiques et métamorphiques (représenté par la zone du Morvan), a une perméabilité bien inférieure à celles des aquifères des grands bassins comme le bassin parisien correspondant ici à la partie nord de la Bourgogne.

Dans les paragraphes suivants cette lithologie sera comparée aux résultats de la typologie des bassins versants.

3.3. ANALYSE DE LA FRACTURATION ET DE LA KARSTIFICATION

La densité de fracturation et la karstification jouent un rôle dans la distribution des débits des rivières ainsi que sur les niveaux des aquifères. Avec le souci constant d'une meilleure connaissance du fonctionnement des relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines, l'analyse de la fracturation a permis de créer plusieurs indicateurs comme la densité de fracturation, la conformité ou non des failles avec le réseau hydrographique, la densité de sources à proximité de failles et du réseau hydrographique et le traitement du type de karst à l'échelle de chaque bassin versant de la zone d'étude.

Ces indicateurs ont été calculés à partir des failles identifiées sur les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} du BRGM.

3.3.1. La densité de fracturation

La densité de fracturation a été calculée à partir des failles dites « observées » et répertoriées sur les cartes géologiques du BRGM au 1/50 000^{ème}.

Les lignes de failles sélectionnées ont été transformées en points puis grâce à un outil de Spatial Analyst (ARCGIS ©), un raster de densité de points a été produit par maille de 500 m. Les valeurs de densité s'échelonnent entre 0 et 50. Pour faciliter l'utilisation de cet indicateur, les valeurs ont été redistribuées entre 0 et 100 comme le montre l'illustration 15.

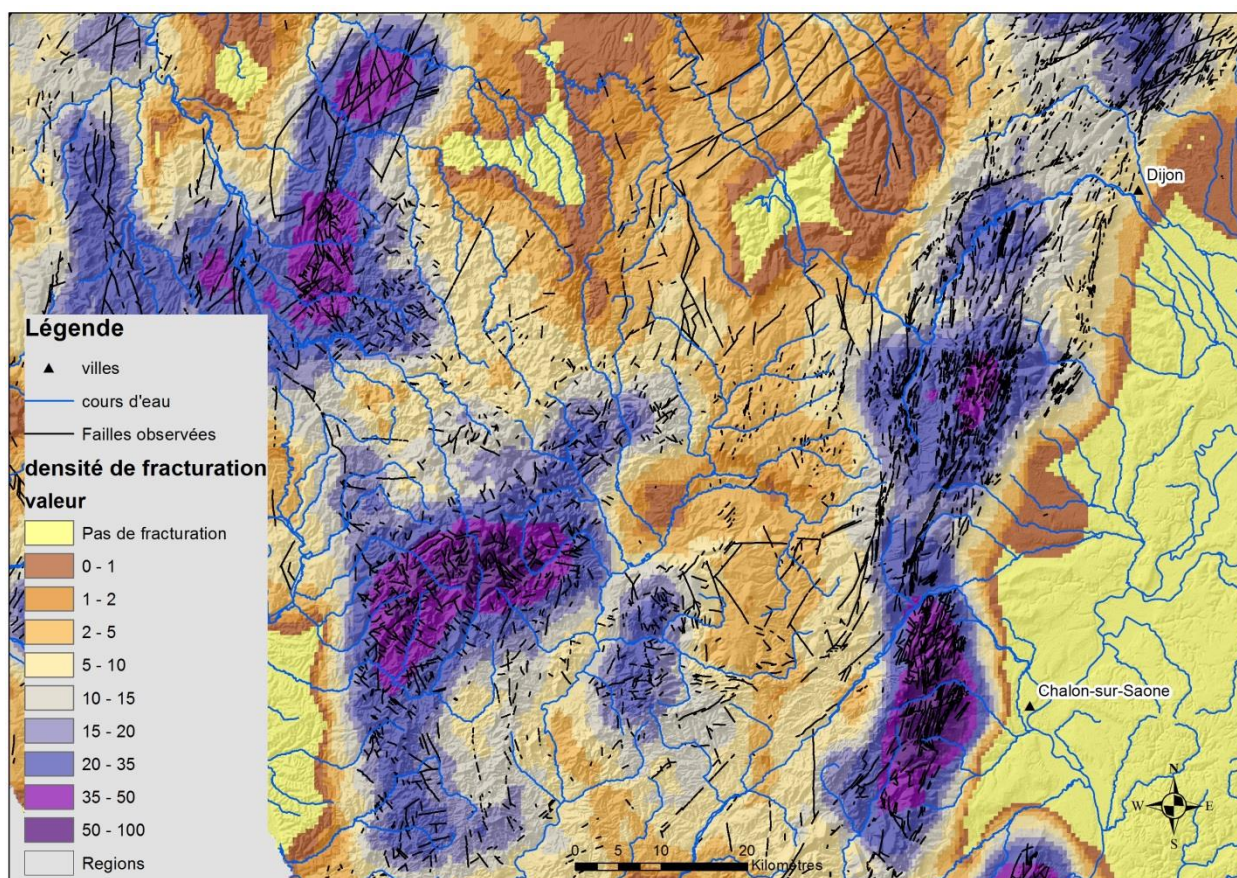


Illustration 15 - Extrait de la densité de fracturation calculée par maille de 500 m.

Pour comparer les bassins versants de l'étude entre eux, cette densité de fracturation a été agrégée, selon leurs contours, en prenant la valeur moyenne. Les résultats de l'agrégation sont présentés dans l'illustration 16 ci-dessous.

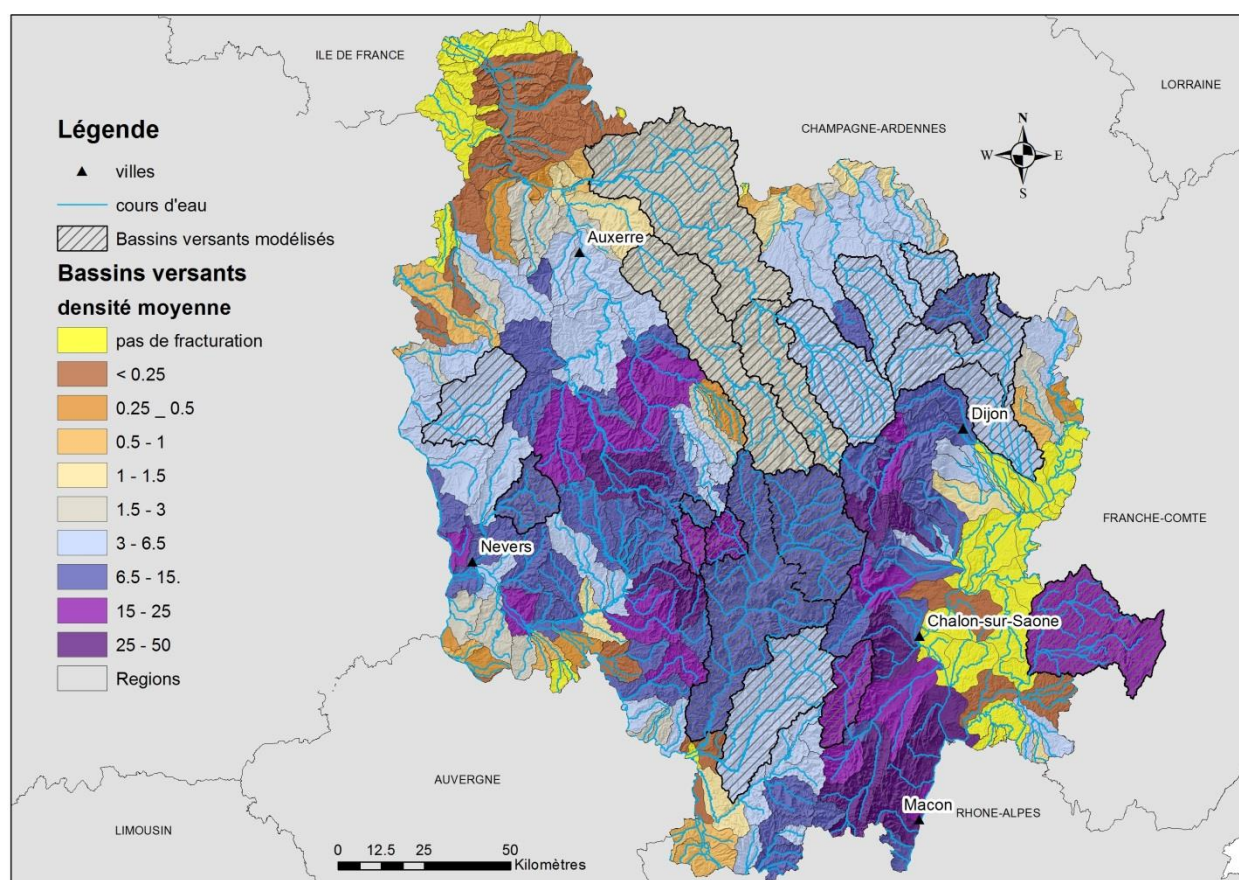


Illustration 16 - Carte de la densité moyenne de fracturation par bassin versant

Sur les 283 bassins versants traités, la valeur moyenne de la densité de fracturation est de 6.5. Globalement les bassins versant les plus fracturés (valeur de densité moyenne supérieure ou égale à 6.5) sont localisés au sud d'une ligne Auxerre-Dijon en suivant le seuil de Bourgogne. Ils représentent près de 33 % des bassins de la zone d'étude à l'exception de la plaine de la Bresse où les failles sont inexistantes.

Les bassins versants les plus fracturés représentent trois lithologies :

- les granites comme le bassin versant de l'Arroux,
- les calcaires/marnes et gypse (exemple le bassin versant de L'Ouche),
- et une lithologie à dominante sableuse, le bassin versant de la Seille, très fracturé dans sa partie amont.

A l'inverse les zones les moins fracturées sont principalement localisées au Nord et sur les bordures de la zone d'étude avec des bassins versants sableux (à l'exception de la Seille), crayeux et d'une lithologie dominante décrite comme étant calcaires/ marnes/gypse (cette zone particulière correspond en partie à la plaine du Châtillonnais).

Dans un second temps cette densité de fracturation pourra être combinée avec les résultats issus de la modélisation afin de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de certains bassins versants (cf. chapitre suivant).

3.3.2. Analyse de la fracturation

Les indices de conformité et de non-conformité des failles au réseau hydrographique

Une faille normale, décrochante ou encore oblique, peut être considérée comme une faille ouverte et, si cette faille est perpendiculaire au réseau hydrographique, elle peut alors avoir une influence sur le débit des rivières (apport ou pertes d'eau). A partir de ce constat, pour chaque point du réseau hydrographique de la zone d'étude, une méthode a été mise en place pour comparer : sa distance à une faille, son orientation et la différence d'angles avec les failles présentes à proximité.

Cette analyse a permis d'identifier des failles conformes (parallèles au réseau hydrographique) qui joueraient sur la distribution du tracé de la rivière et des failles non conformes (perpendiculaires au réseau hydrographique) qui seraient susceptibles de contribuer aux variations des débits des rivières.

Les informations associées au descriptif des failles observées ne permettent pas de manière homogène de qualifier le caractère normal, inverse, oblique et décrochant.

Ces indicateurs qualifient essentiellement la distance de la faille au cours d'eau et la différence d'orientation entre ces deux linéaires.

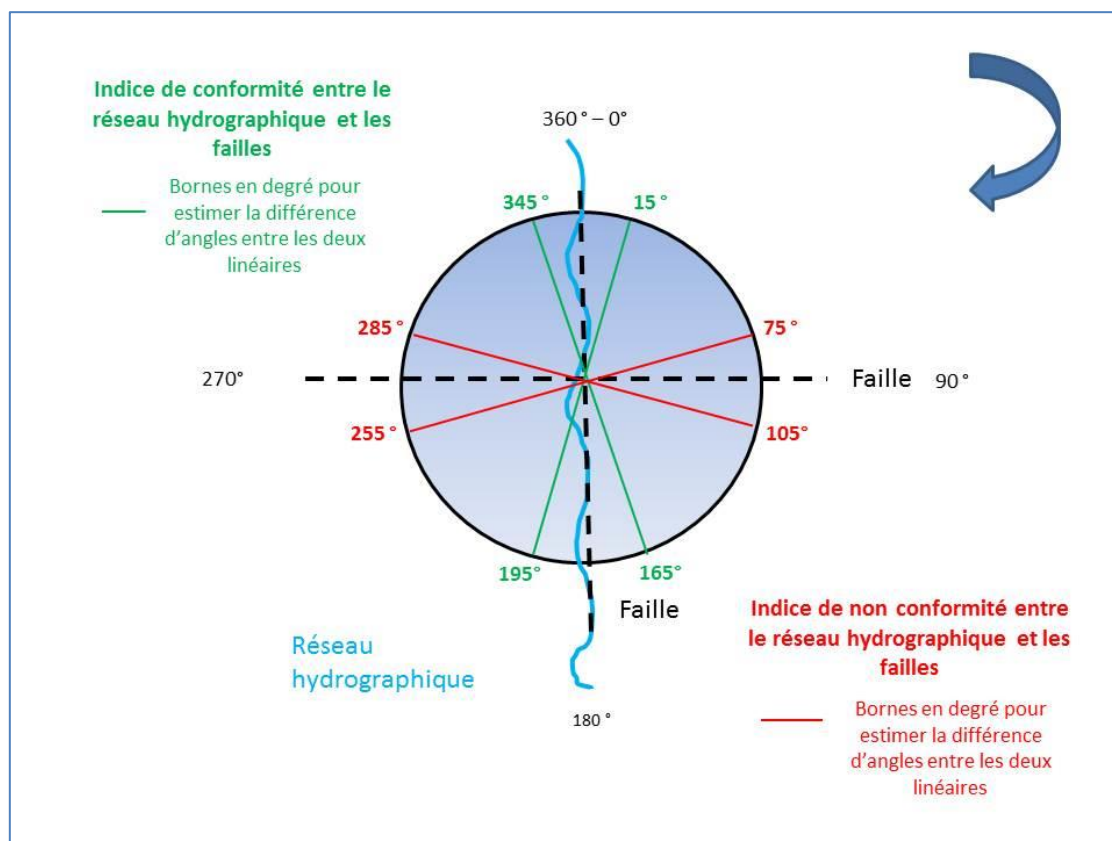


Illustration 17 – Schéma récapitulatif pour les indices de conformité et de non-conformité entre le réseau hydrographique et la fracturation.

Pour appliquer cette méthodologie, les critères suivants ont été appliqués :

- L'indice de conformité du réseau hydrographique avec les failles permet de déterminer les failles dans une zone d'influence inférieure à 150 m d'un cours d'eau et dont les différences d'orientation (angles) sont inférieures à plus ou moins 15°.

Les failles sont parallèles au cours d'eau et l'indicateur est nommé IC.

Ces secteurs correspondent le plus souvent à des couloirs de fracturation où la perméabilité des terrains encaissants est affectée et donc à des zones qui peuvent potentiellement influencer les débits des rivières.

- l'indice de non-conformité du réseau hydrographique avec les failles permet de déterminer les failles dans une zone d'influence inférieure à 150 m d'un cours d'eau et dont les différences d'orientation (angles) sont inférieures à plus ou moins 15°. **Les failles sont perpendiculaires au cours d'eau et l'indicateur est nommé INC.**

Cela correspond à des secteurs où les débits des cours peuvent être influencés.

Les valeurs des bornes utilisées pour calculer ces deux indicateurs sont présentées dans l'illustration 17 et des résultats de l'application de cette méthodologie dans les illustrations 18 et 19.

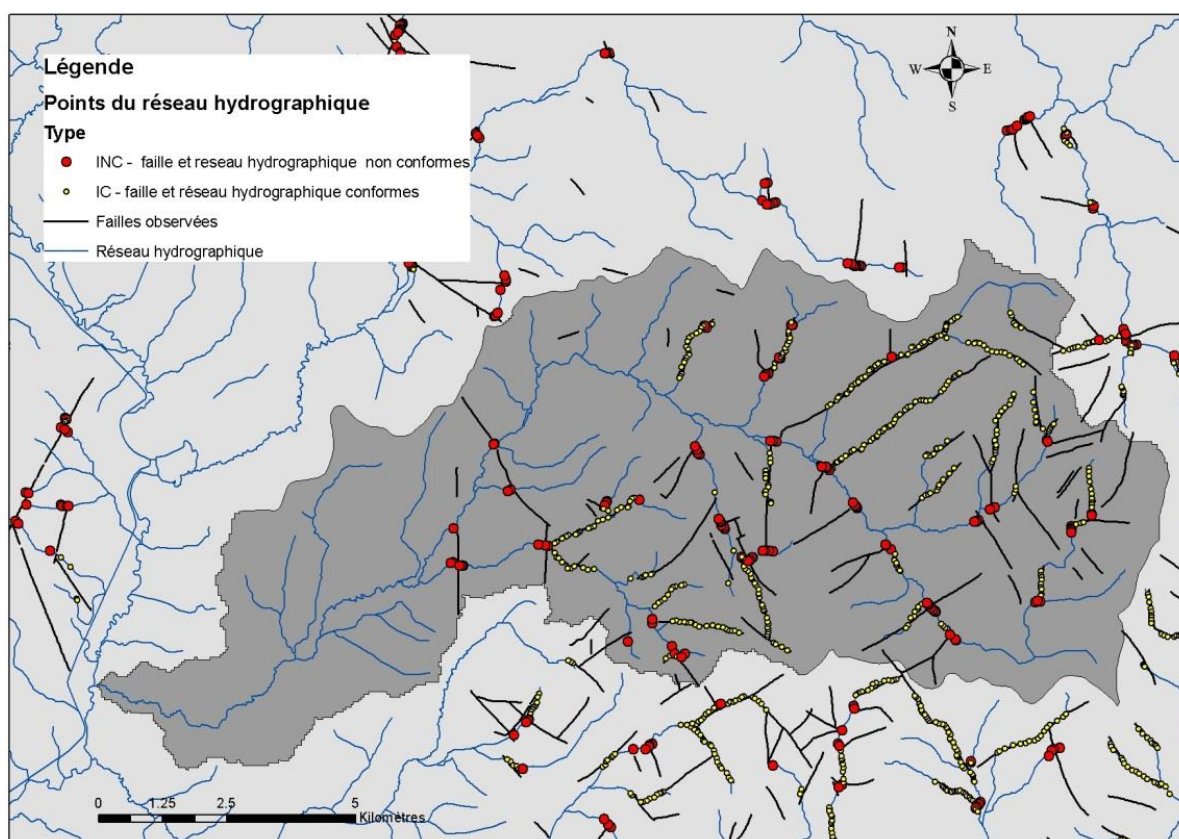


Illustration 18 - Exemple de résultats des indicateurs IC et INC pour le bassin de l'Aron du Guignon.

La lithologie dominante du bassin versant de l'Aron du Guignon est composée principalement de basaltes et de rhyolites. La fracturation est localisée sur la partie amont (illustration 18). En terme de débit, le QMNA5 * à l'exutoire est assez élevé ($0.144 \text{ m}^3/\text{s}$). En agrégeant par bassin versant le linéaire des cours d'eau concernés par ces deux indicateurs (IC et INC), on obtient respectivement comme pourcentage de linéaire 2.37 % pour INC et 12.6 % pour IC.

Le bassin versant de la Tille à Crécey-sur-Tille (illustration 19) est constitué en grande majorité de calcaires, de marnes et de gypse. Les failles sont présentes sur l'ensemble du bassin versant, le QMNA5 est aussi élevé que celui de l'Aron du Guignon avec $0.148 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre les pourcentages de linéaires concernés par les indicateurs IC et INC sont inversés (6.11 % pour INC et 3.4 % pour IC).

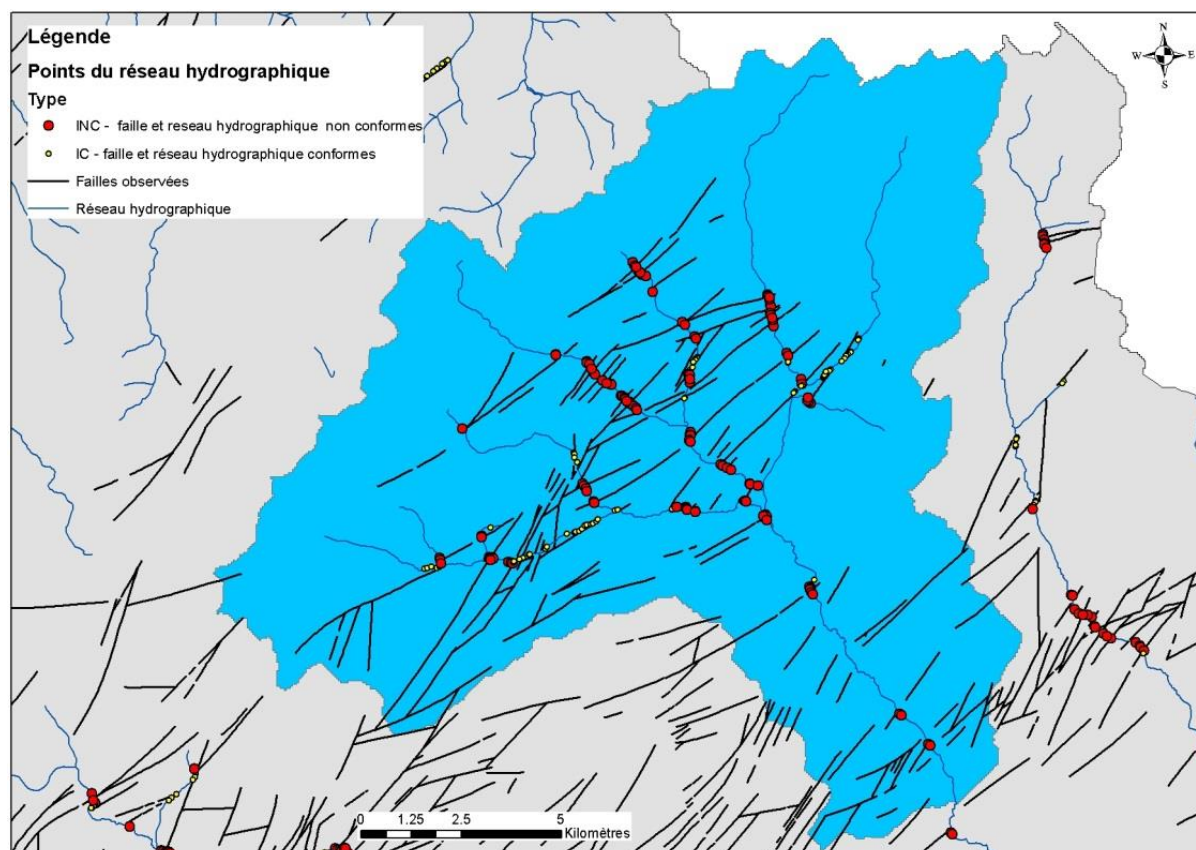


Illustration 19 - Exemple de résultats des indicateurs IC et INC pour le bassin de la Tille à Crécey-sur-Tille.

Pour toutes les autres failles observées qui ne rentent pas dans les critères décrits par les deux indicateurs (IC et INC), elles ont été prolongées de 150 m et une recherche des intersections avec le réseau hydrographique a été réalisée. On considère que toute faille, quelque soit son orientation, lorsqu'elle recoupe un cours d'eau, peut avoir une influence sur son débit.

L'analyse de la fracturation sur la zone d'étude repose sur les trois approches décrites précédemment, un exemple de résultat est présenté dans l'illustration 20.

* Le QMNA le **débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A)** se calcule, par définition, à partir d'un mois calendaire : le QMNA 5 ans est le « débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée ». Le QMNA5 a une valeur réglementaire : c'est le débit de référence (défini au titre 2 de la nomenclature figurant dans les décrets n°93-742 et 93-743 du 29 mars 1993 pris en application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992).

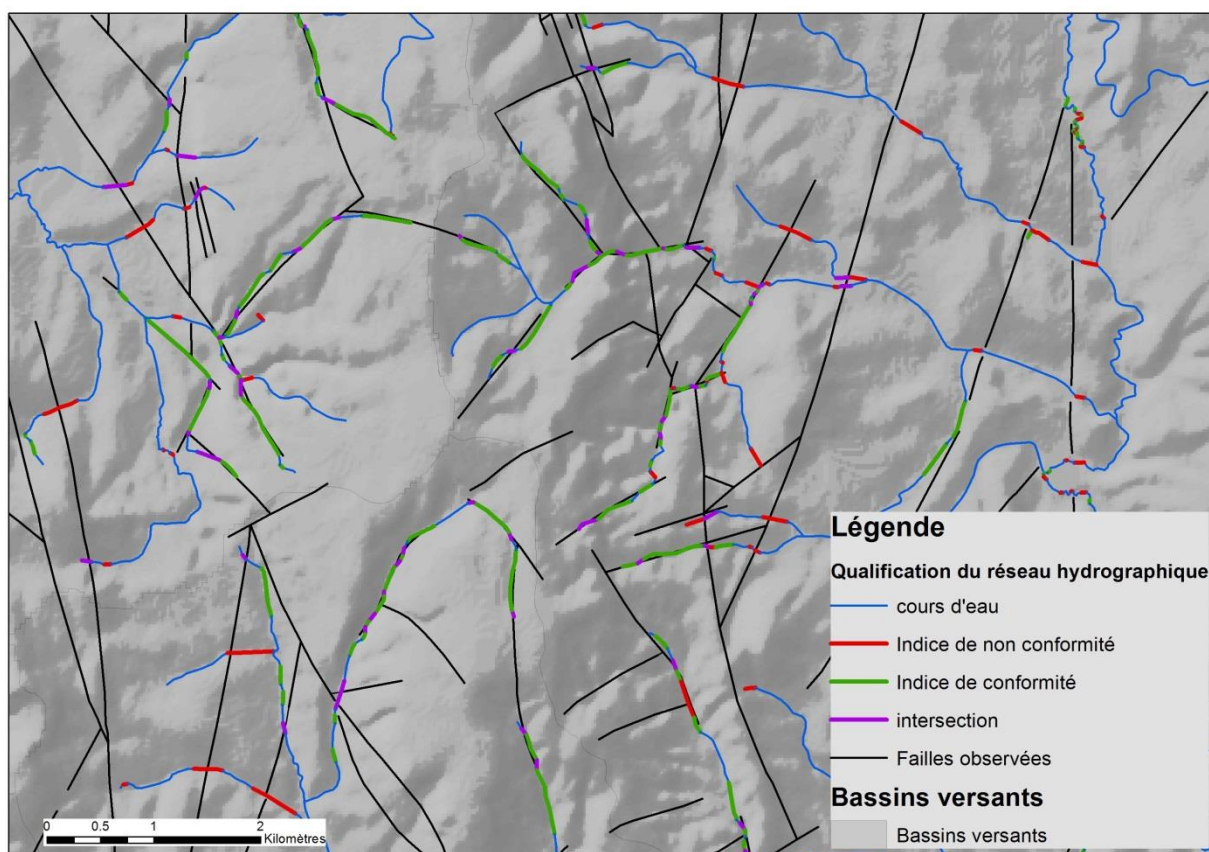


Illustration 20 – Analyse de la fracturation - exemple de résultats.

Pour comparer les bassins versants de la zone d'étude, un pourcentage de linéaire de cours d'eau en lien avec la fracturation a été calculé de la manière suivante :

Pourcentage de linéaire de cours d'eau affecté par la fracturation par bassin versant = (somme des linéaires de cours d'eau en lien avec la fracturation dans le bassin versant / somme totale des linéaires de cours d'eau dans le bassin versant) *100.

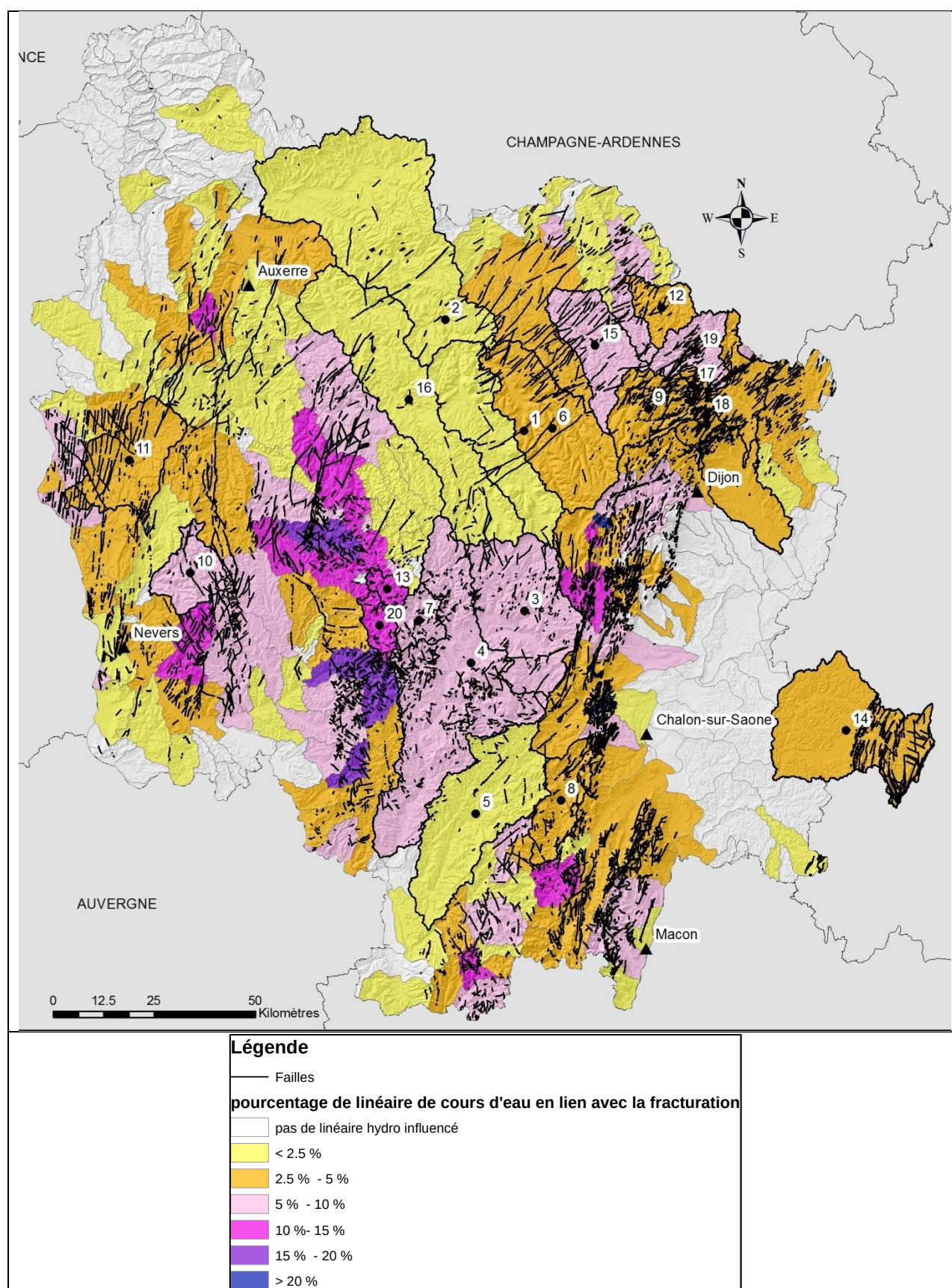


Illustration 21 – Lien entre la fracturation et le réseau hydrographique.

Le linéaire du réseau hydrographique affecté par de la fracturation (supérieur à 5 %) est principalement localisé sur le Morvan et son pourtour, l'est et le sud de la zone d'étude avec par exemple les bassins versants comme celui de l'Arroux, du Cousin, de la Guye, de l'IGNON ou encore de l'Alène. Les calcaires constituent la lithologie majoritaire de ces bassins versants, avec 36 bassins concernés, suivis des granites avec 14 bassins versants répertoriés.

La répartition et les valeurs de ces indices développés avec cette méthode ont été croisées avec les valeurs du QMNA5 de différents bassins (illustration 22).

Les résultats de ce croisement montrent que les débits (QMNA5) sont plus élevés lorsque la fracturation en lien avec le réseau hydrographique est faible et inversement pour les débits les plus faibles. On peut donc supposer ainsi que les failles agissent plutôt comme des drains potentiels des eaux souterraines.

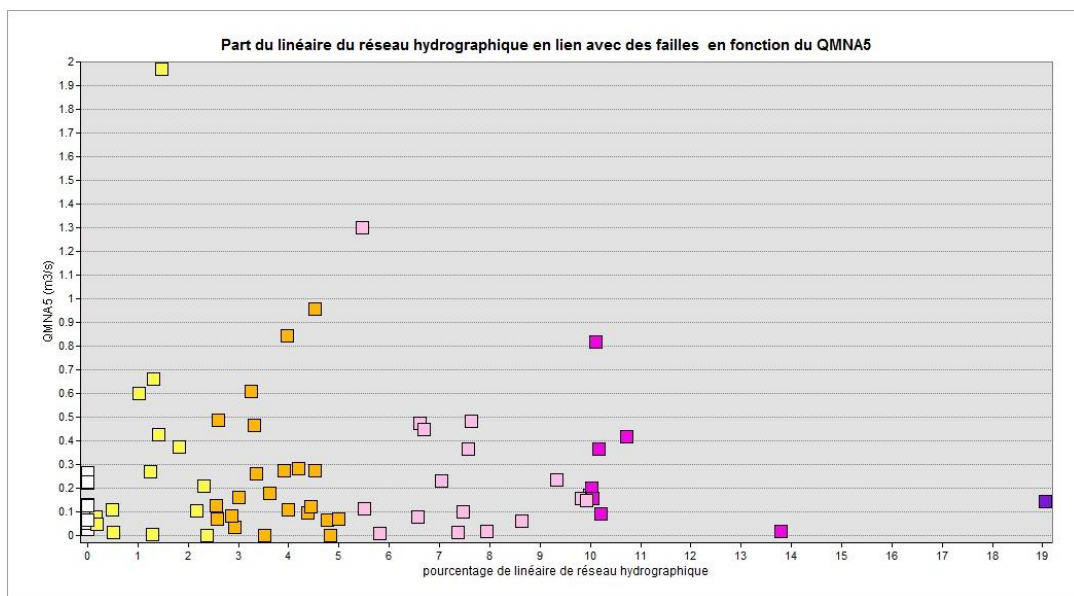


Illustration 22 – QMNA5 en fonction du pourcentage du linéaire du réseau hydrographique (en lien avec la fracturation)

3.3.3. Les karsts et les sources

La karstification

Dans les aquifères calcaires, il se développe souvent des circulations karstiques importantes, au détriment du réseau de surface. La base de données nationale sur les cavités (gérée par le BRGM), a permis d'identifier 2837 karsts présents sur la zone d'étude. Il s'agit de morphologies de type gouffre, aven, grotte, doline ...comme le montre l'illustration 23.

La grande majorité des karsts est localisée dans les bassins versants de lithologie dominante de type « calcaires, marnes et gypse », dans la craie ainsi que dans quelques bassins versants à dominante sableuse. Ils jouent un rôle non négligeable sur les écoulements souterrains et de surface.

En parallèle un recensement des pertes (source BD Carthage) affectant le réseau hydrographique a permis d'identifier 27 pertes localisées dans la partie sud et à l'Ouest de la zone d'étude. Les bassins versants concernés sont ceux de la Saône, la Dheune, la Grosne, la Seille, l'Aron et le Nohain.

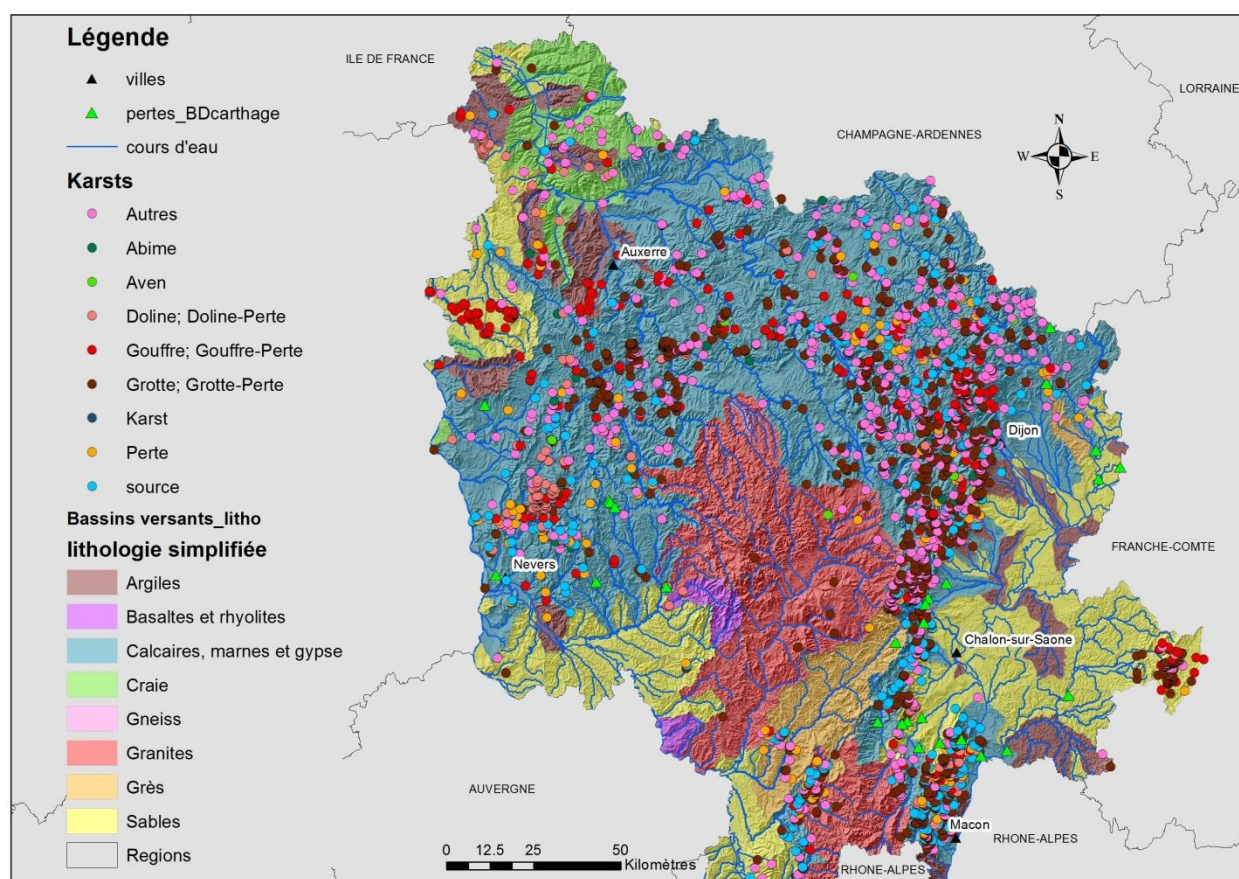


Illustration 23 – Localisation des karsts et des pertes dans la zone d'étude.

Les sources

Sur l'ensemble de la zone d'étude, on dénombre près de 2150 sources, réparties de manière assez homogène à l'exception de la plaine de la Bresse constituée principalement de sables et d'argiles, moins riche en sources. Comme le montrent les illustrations 24 et 25, les zones calcaires sont très propices au développement des sources avec près de 1449 sources.

Lithologie	Nombre de sources	Minimum distance source / cours d'eau	Maximum distance source / cours d'eau	Distance moyenne source / cours d'eau	Minimum distance source / faille	Maximum Distance source / faille	Distance moyenne source / faille
Argiles	156	1.9	2728.1	422.1	2.8	18779.5	1999.9
Basaltes et rhyolites	10	43.0	705.7	265.4	88.5	921.1	393.8
Calcaires, marnes et gypse	1449	0.1	6558.7	491.5	0.1	16476.3	1581.9
Craie	80	6.0	3343.0	410.8	10.4	16925.5	2797.5
Granites	438	0.0	3610.0	399.0	0.4	4707.3	1004.0
Grès	31	0.2	1275.3	246.2	159.4	11095.6	3852.8
Sables	330	0.9	7090.8	726.9	0.1	19281.8	2395.9

Illustration 24 – Tableau récapitulatif sur les sources et leurs distances par rapport aux failles et aux cours d'eau les plus proches.

Sans la connaissance du régime de contraintes, il est difficile d'évaluer les effets de la fracturation sur le comportement hydraulique des formations affectées. Néanmoins si on compare simplement la position des sources à celle des failles (illustration 25), la distance moyenne est de l'ordre de 1000 m pour les granites et 1600 m pour les calcaires. Dans le cas des calcaires, la karstification joue un rôle important dans la circulation des eaux souterraines et dans les résurgences. Dans ces zones calcaires où la karstification est prépondérante, les failles semblent moins impacter la distribution des sources que dans les formations granitiques.

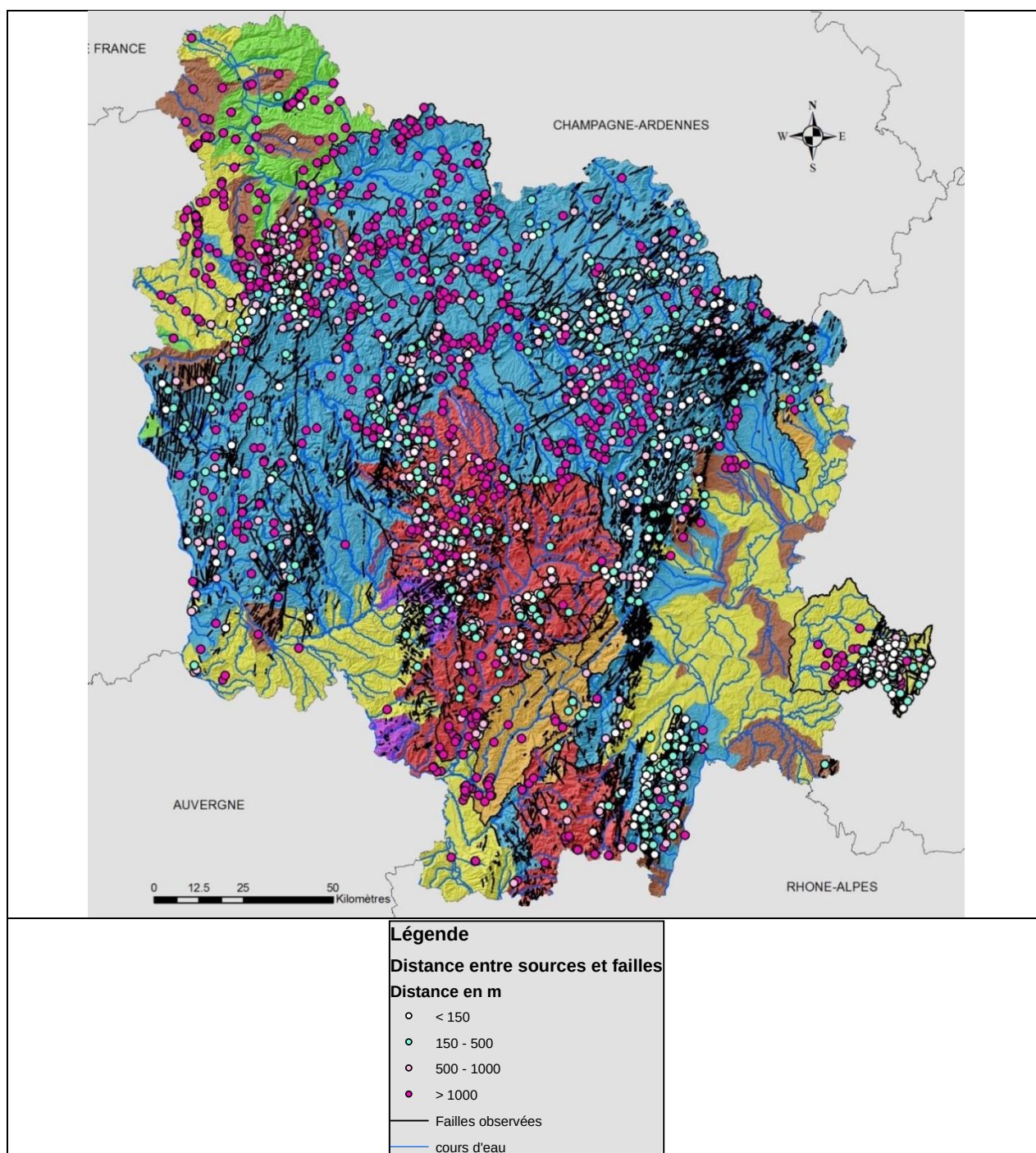


Illustration 25 – Localisation des sources et distance avec les failles les plus proches dans la zone d'étude.

3.4. LES INDICATEURS HYDRO-MORPHOLOGIQUES

3.4.1. L'indice de compacité

La forme d'un bassin versant influence celle de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, un bassin versant de forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de *temps de concentration*.

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'*indice de compacité de Gravelius* (1914) K_G , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle de même surface.

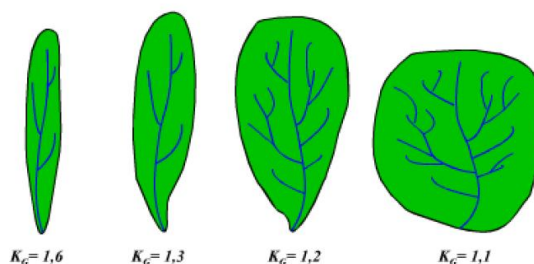
K_G est l'indice de compacité de Gravelius,

A est la surface du bassin versant [km^2],

P est le périmètre du bassin [km].

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface.



Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée, tel qu'illustré par le schéma ci-dessus.

L'indice de compacité permet l'évaluation globale du réseau de drainage. Plus l'indice de Gravelius est faible, plus le temps de concentration des eaux vers l'exutoire sera court.

En Bourgogne, l'indice de compacité calculé varie de 1.2 à 3.85. Les bassins versants dont les indices de compacité sont les plus faibles ont principalement une lithologie sédimentaire (craie, calcaires et marne, sables, ...) comme ceux de La Vanne et de La Grosne.

A l'opposé, les écoulements les plus étalés sont produits dans les bassins versants de fort indice de compacité comme par exemple les bassins versants de l'Arroux et du Cousin en domaine cristallin et dans les bassins versants de l'Armançon, du Serin et de la Seille en domaine sédimentaire.

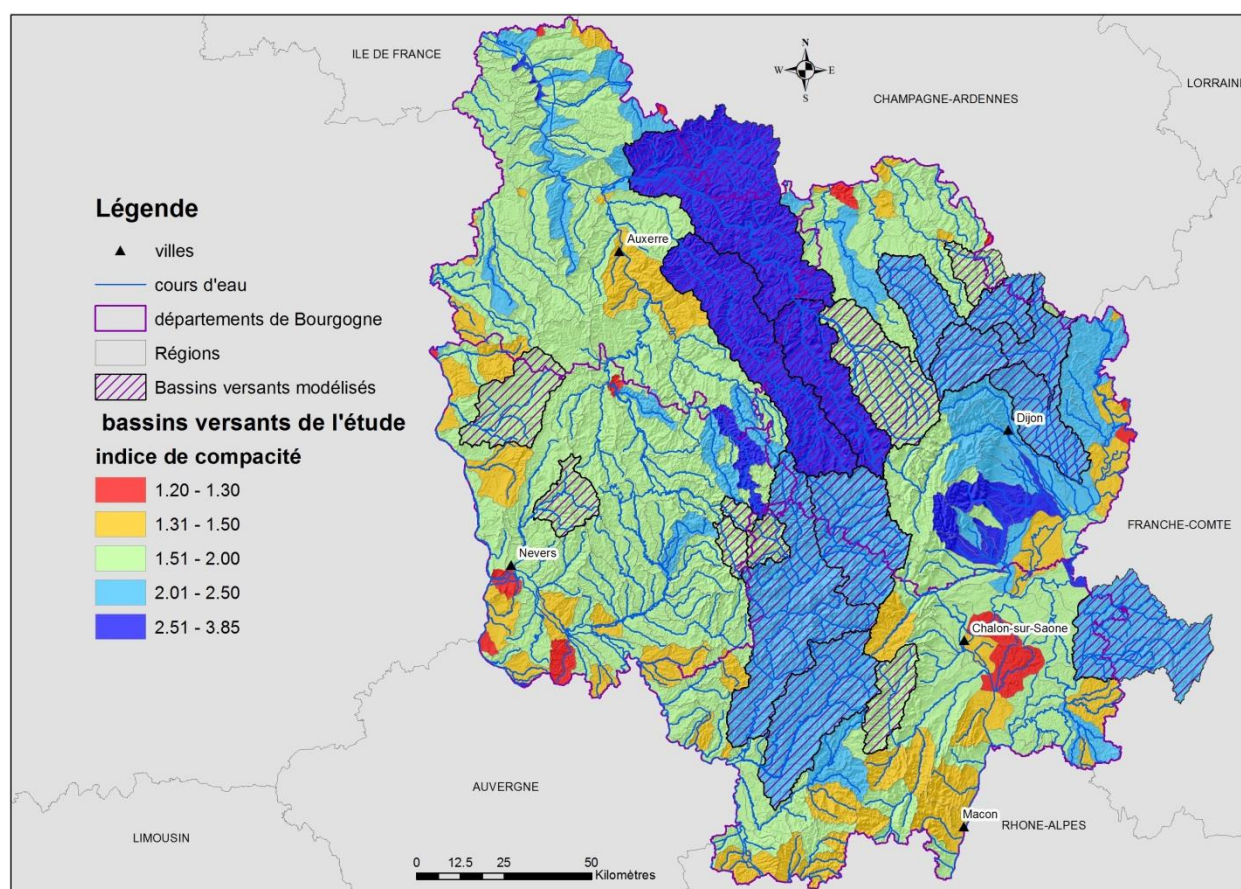


Illustration 26 – Carte de l'indice de compacité pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

3.4.2. La densité de drainage

La densité de drainage (le rapport des linéaires de cours d'eau à la surface considérée) est un indicateur du rôle des couches géologiques superficielles sur l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol, et par voie de conséquence sur le ruissellement de l'eau qui ne s'est pas infiltrée.

Avec :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

D_d : densité de drainage [km/km^2] ;

L_i : longueur de cours d'eau [km] ;

A : surface du bassin versant [km^2].

L'analyse de la densité du réseau sur la zone d'étude montre qu'il y a une certaine concordance entre les grands axes hydrographiques et la géologie. A l'échelle des bassins versants où la densité de drainage est un paramètre essentiel du fonctionnement hydrologique, on constate qu'il est largement conditionné par la nature des roches (cf. Illustration 27). En effet, aux densités élevées supérieures à $0.75 \text{ km}/\text{km}^2$ dans les terrains cristallins du Morvan s'opposent les densités faibles, inférieures à $0.75 \text{ km}/\text{km}^2$ des zones sédimentaires.

En revanche la densité de drainage traduit bien les variations de relief entre les zones de plaines et les zones d'altitudes plus marquées, ces dernières favorisant la multiplication du réseau hydrographique.

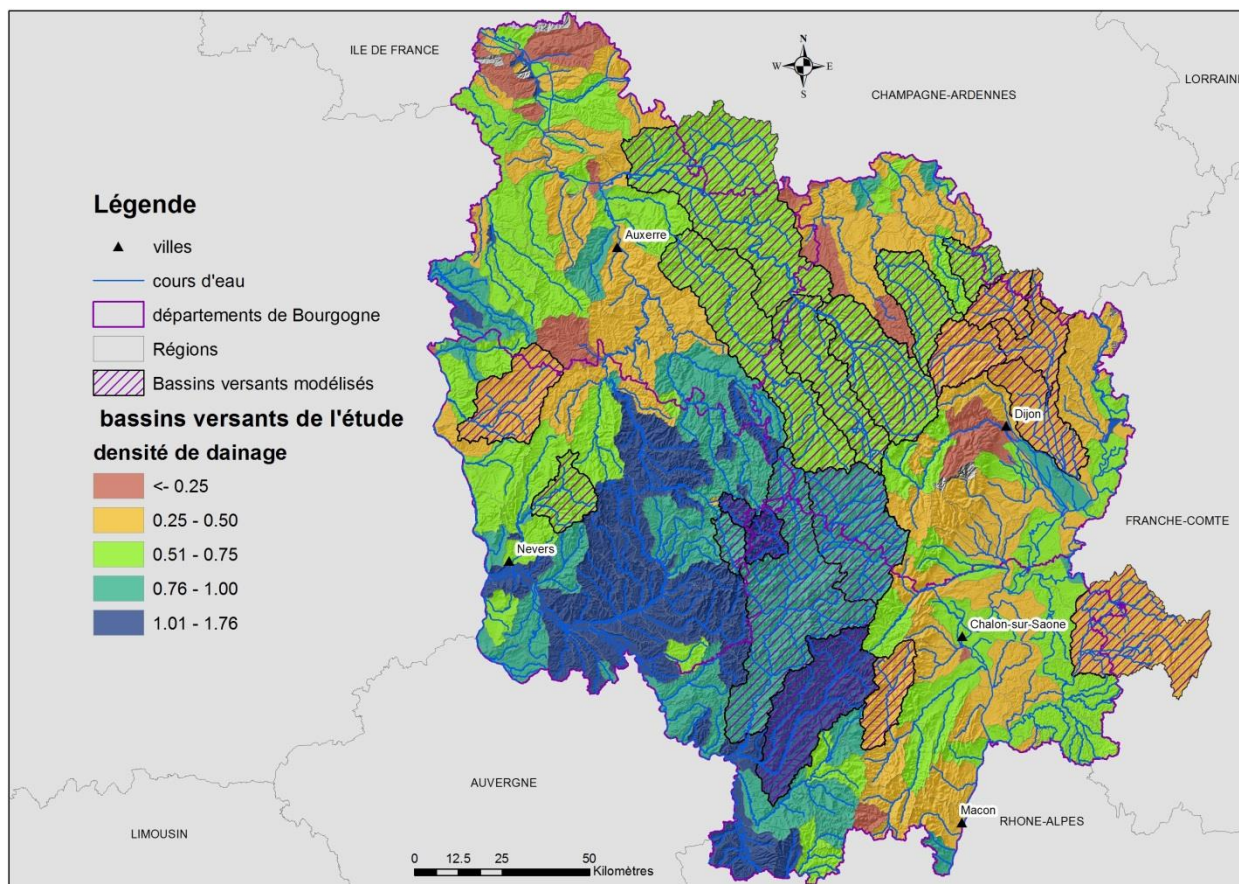


Illustration 27 – Carte de la densité de drainage pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

3.4.3. La densité du réseau hydrographique « intermittent »

La variabilité climatique pourrait sensiblement influencer sur le réseau hydrologique et au-delà sur la réponse IDPR déduite de ce dernier. En altérant le caractère pérenne ou temporaire des écoulements de surface, le changement climatique pourrait avoir des conséquences sur la recharge potentielle des aquifères ainsi que sur le fonctionnement de leurs exutoires naturels.

En parallèle de l'étude des zones potentielles de débordement, un travail sur la BD CARTHAGE a été mené. Il s'agit de caractériser le réseau de surface, notamment de qualifier l'ensemble du territoire vis-à-vis d'une densité de réseaux hydrographiques « intermittents ».

Il est possible de caractériser un objet hydrographique en fonction du régime de ses eaux : permanent (présence permanente ou quasi-permanente d'eau) ou intermittent (présence temporaire).

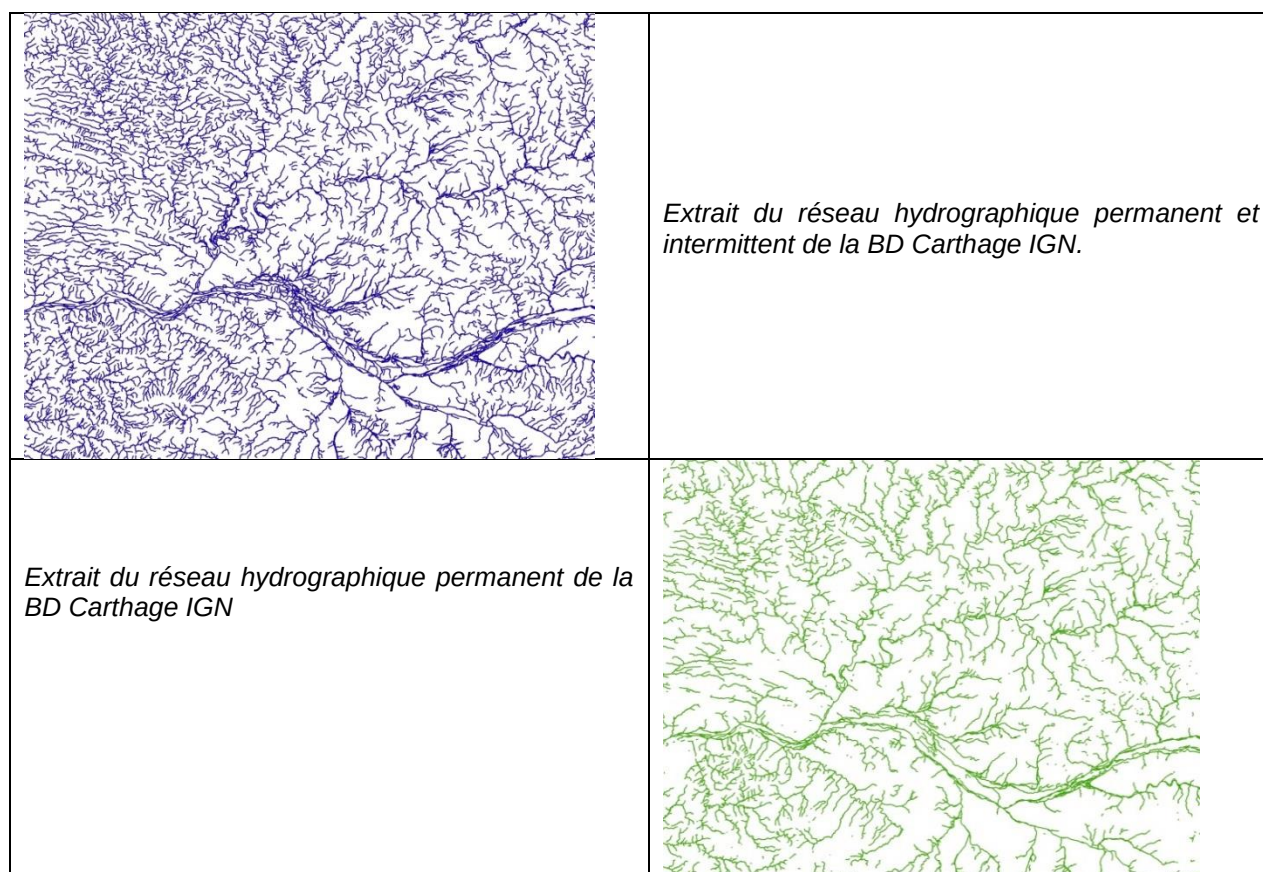


Illustration 28 – Extraits de réseau hydrographique permanent et intermittent.

Le choix d'utiliser cet indicateur repose sur le fait que le réseau hydrographique qualifié « d'intermittent » s'exprime plus ou moins selon les conditions climatiques, l'état quantitatif des nappes (exutoires) et la saturation des sols. **C'est donc une des premières variables d'ajustement si les conditions climatiques changent. Cet indicateur permet donc d'approcher une certaine sensibilité du réseau hydrographique aux variations des apports en eau souterraine.**

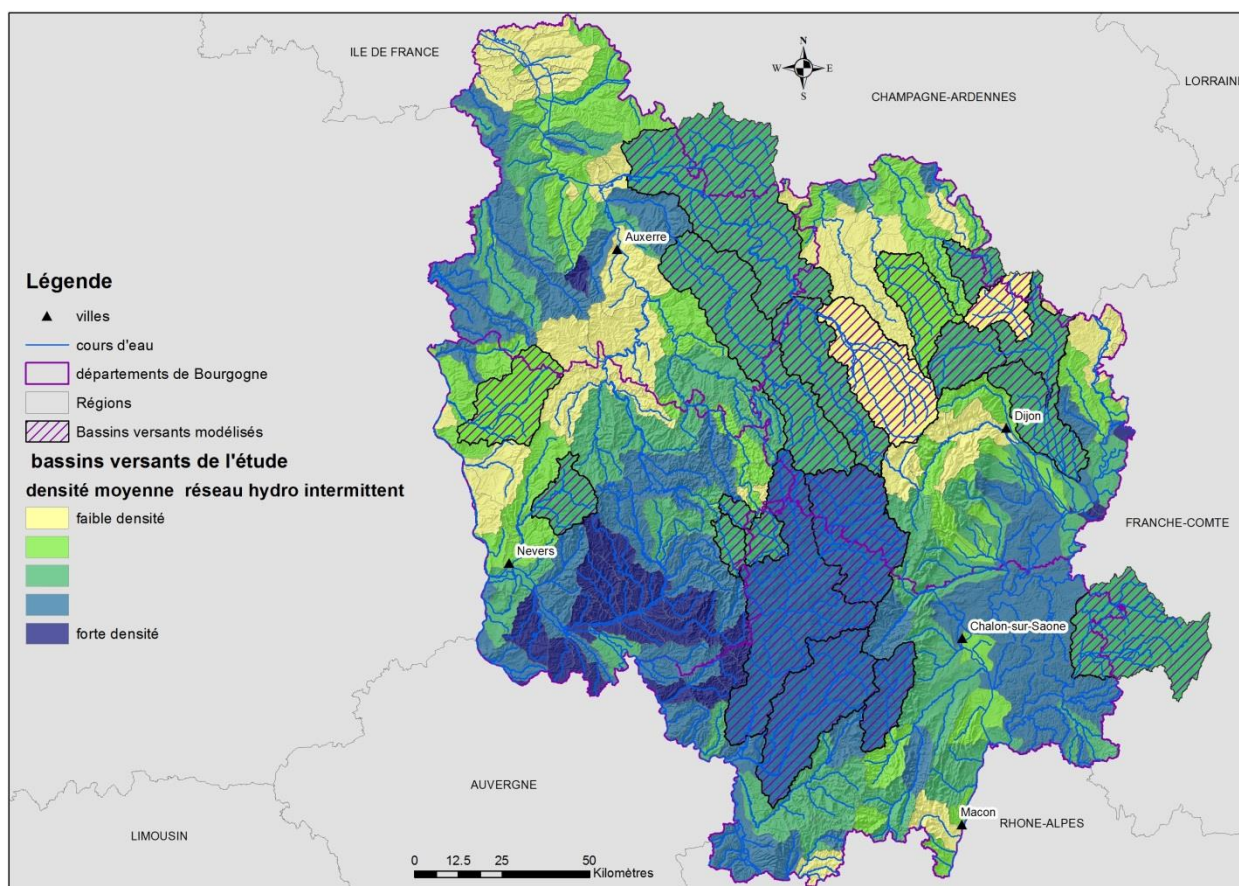


Illustration 29 – Carte de la densité moyenne du réseau hydrographique intermittent pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

3.4.4. L'indice topographique d'humidité du sol

Ce que l'on appelle « l'index topographique d'humidité du sol » (TWI Topographic Wetness Index)), combine le secteur de contribution amont local et la pente. Il est utilisé généralement pour mesurer l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques.

Il est employé couramment pour mesurer/évaluer la distribution spatiale des états d'humidité et exige seulement que les données d'altitude utilisées soient bien réparties sur l'aire d'étude.

Le modèle calculé est indépendant du temps et compose une représentation statique du paysage.

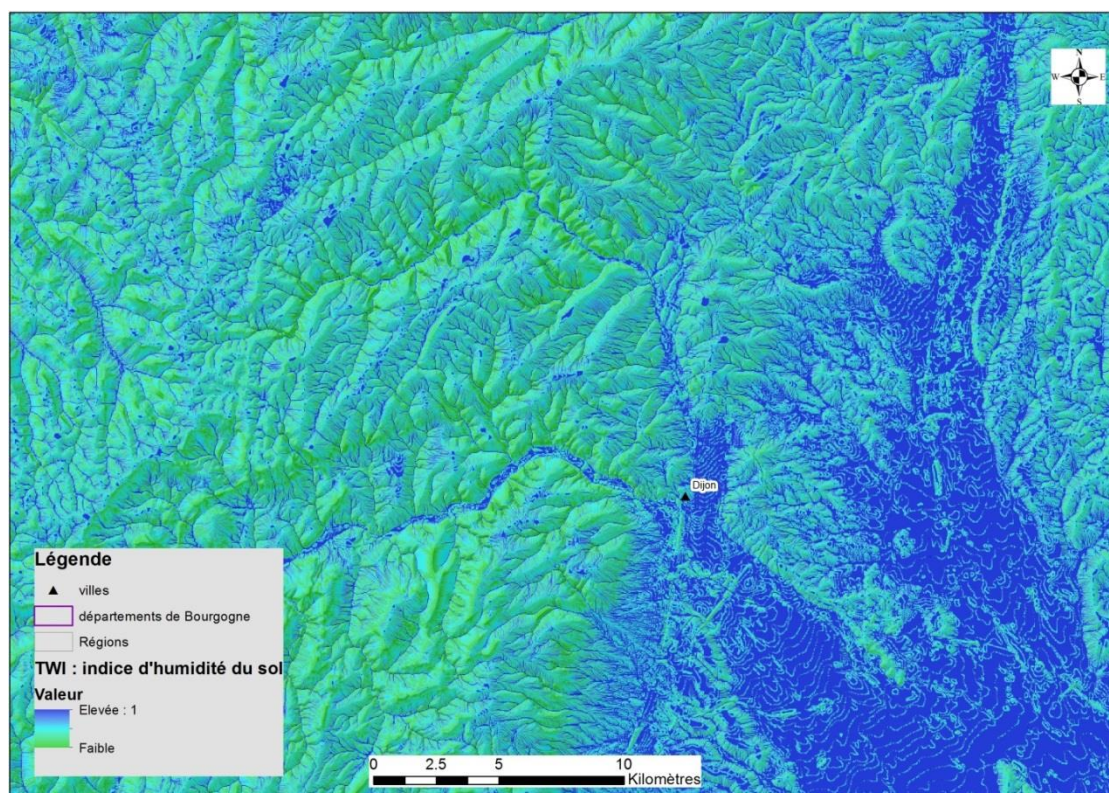


Illustration 30 – Extrait de la grille de calcul du TWI (50X50 m).

Le TWI est un calcul d'humidité du sol réalisé par des traitements automatiques sous ARCGIS. Il est basé sur deux paramètres essentiels, déduits du Modèle Numérique de Terrain : i) la pente et ii) les zones d'accumulation.

La gamme de valeurs du TWI est comprise entre 0 (moins humide) et 1000 (plus humide).

Le calcul de l'indice d'humidité du sol (TWI) sur la zone d'étude (illustration 31) montre que :

- les secteurs les plus humides sont localisés majoritairement dans le domaine sédimentaire,
- les nappes alluviales associées aux différents cours d'eau, ou les grandes zones de marécages, sont bien marquées et correspondent à un indice potentiel d'humidité du sol du même ordre que ceux calculés dans le domaine sédimentaire.
- la plaine de la Bresse correspond à une très forte zone d'accumulation, ce qui explique la forte valeur du TWI.
- le Morvan est globalement plus sec que l'ensemble de la zone d'étude (fortes pentes).

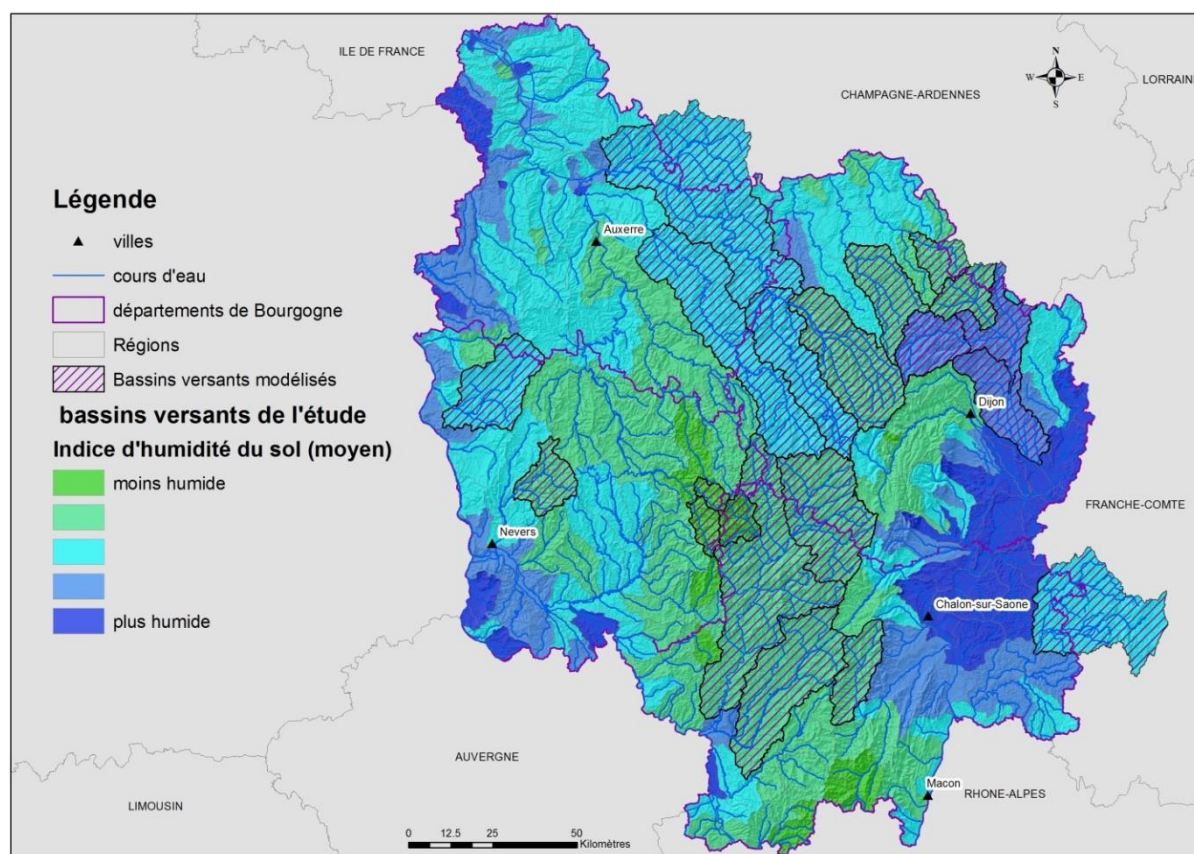


Illustration 31 – Carte de l'indice d'humidité du sol pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

Si on rapporte les valeurs moyennes de l'Indice Potentiel d'humidité du sol (TWI) ainsi que celles de la réserve utile des sols (source INRA) aux bassins versants, on constate une corrélation entre les deux paramètres, qui se répartissent globalement de la même manière sur le territoire d'étude, comme le montre l'illustration 32.

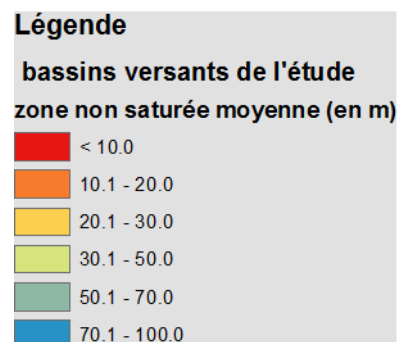
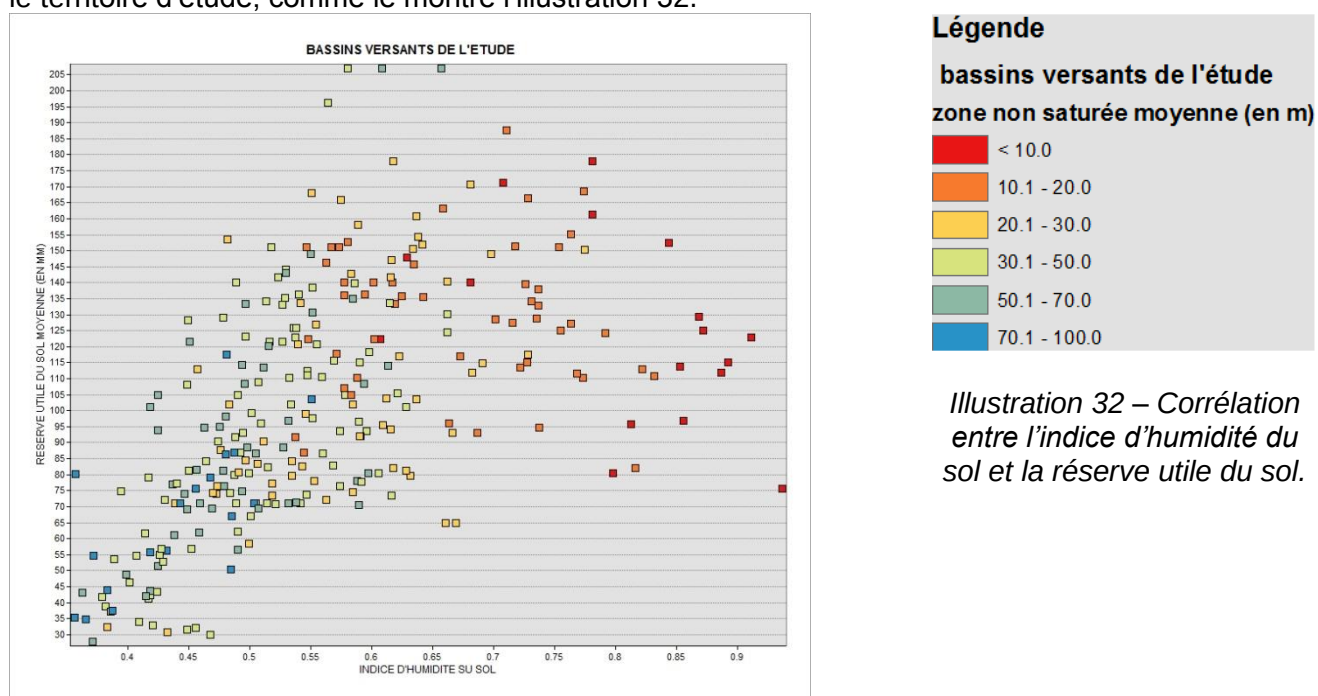


Illustration 32 – Corrélation entre l'indice d'humidité du sol et la réserve utile du sol.

3.4.5. L'indice de rugosité

Le calcul de « l'indice de rugosité » permet de caractériser les différents types de reliefs.

La notion qualitative de rugosité des terrains est difficile à appréhender (un terrain inégal, raide rocheux, rocheux cassé et raide, etc.). Il existe différentes méthodes de calcul de rugosité, deux sont courantes (LSRI : Land Surface Ruggedness Index et TRI : Terrain Ruggedness Index), la troisième - VRM (Vector Ruggedness Measure) - retenue dans le cadre de cette étude a été développée en 2005 selon une approche naturaliste récente¹.

La première (LSRI) exploite la densité des courbes isohypses dans un secteur donné. Les valeurs d'index sont basses dans les secteurs plats (**a**), tandis que les valeurs d'index sont hautes dans les secteurs où les courbes sont rapprochées les unes des autres, fortes pentes homogènes **b** (d'orientations similaires) et hétérogènes **c** (d'orientations variées).

La seconde (TRI) utilise la somme des variations d'altitude dans un secteur donné comme index de la rugosité de terrain. De la même manière que précédemment, les valeurs d'index sont basses dans des secteurs plats (**a**) mais plus importantes dans les deux secteurs de fortes pentes homogène **b** (d'orientations similaires) et hétérogènes **c** (d'orientations variées).

Les méthodes LSRI et TRI ont donc pour inconvénient d'être fortement corrélées avec la pente ; de sorte qu'ils ne peuvent pas clairement distinguer des terrains de pente forte mais homogène (glacis) des terrains de pente forte et de direction hétérogène.

Une mesure idéale de rugosité devait incorporer la variabilité à la fois dans l'aspect et la direction de la pente. C'est la solution proposée par la troisième méthode (VRM pour Vector Ruggedness Measure) qui emploie la dispersion dans les trois dimensions des vecteurs orthogonaux aux facettes du Modèle Numérique du Terrain (MNT).

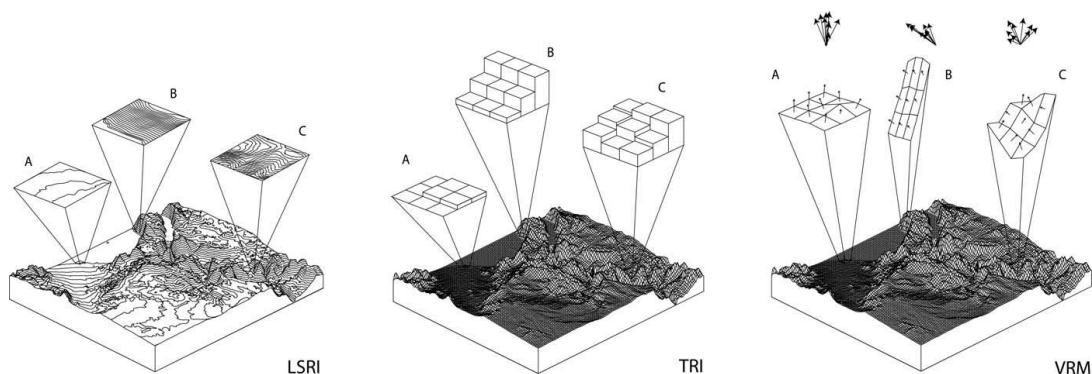


Illustration 33 – Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM.

¹ Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat

Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert J. MARK SAPPINGTON,^{1,2} Department of Biological Sciences, 4505 Maryland Parkway, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, NV 89154-4004,

USA ; KATHLEEN M. LONGSHORE, United States Geological Survey, Western Ecological Research Center, 160 N. Stephanie Street, Henderson, NV 89074, USA ; DANIEL B. THOMPSON, Department of Biological Sciences, 4505 Maryland Parkway, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, NV 89154-4004, USA

La mesure de rugosité par les vecteurs (VRM) est basée sur la mesure de la dispersion des vecteurs orthogonaux sur la surface de terrain.

Les valeurs de VRM sont basses dans les secteurs plats (a) et dans les zones à la fois de pentes élevées mais de directions homogènes. Elles sont élevées dans les secteurs qui sont raides et « rugueux » à fortes pentes et d'orientations variées.

L'application du calcul de la rugosité (Méthode VRM) à la zone d'étude donne les résultats bruts suivants (illustration 34).

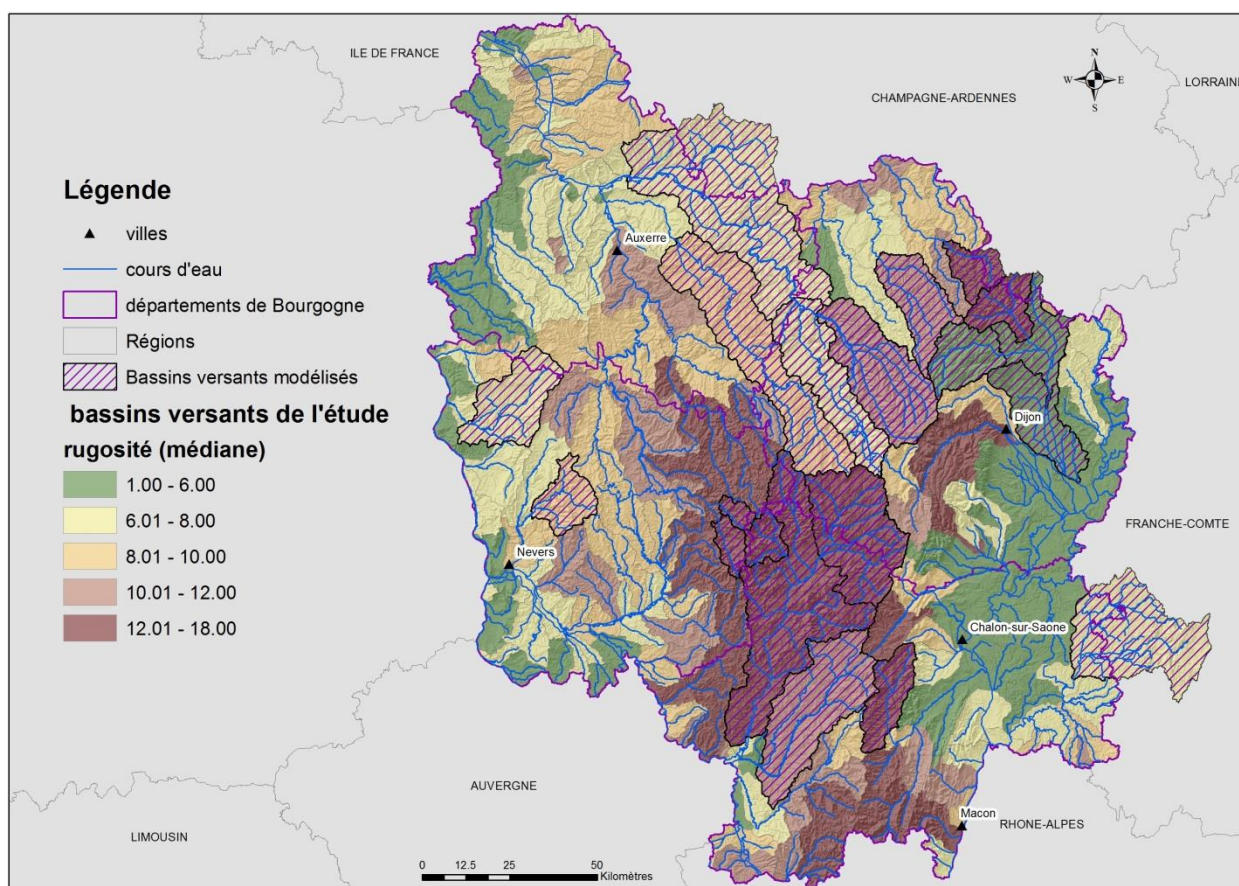


Illustration 34 – Carte de l'indice de rugosité (médiane) pour les 283 bassins versants de la zone d'étude

Comme le montre l'illustration 34, le calcul de rugosité permet de bien reproduire la répartition du relief ainsi que le degré d'encaissement des vallées sur l'ensemble de la zone d'étude.

3.4.6. La teneur en eau moyenne du sol

La réserve utile du sol correspond à la quantité maximale d'eau que le sol peut stocker et qui est facilement utilisable par les plantes. Cette réserve utile dépend directement de la texture du sol.

Cette quantité d'eau pour un horizon (exprimée en mm) est calculée de la manière suivante :

(Teneur en eau à la capacité du champ – Teneur en eau au point de flétrissement) X épaisseur de l'horizon

Les teneurs en eau sont estimées par le biais d'une fonction « pédotransfert » qui tient compte de la texture du sol. Pour le sol, on somme cette quantité par horizon pour tous les horizons situés entre la surface et la profondeur maximale d'enracinement.

La profondeur maximale d'enracinement est égale à 140 cm si le sol ne présente pas d'obstacle à l'enracinement, sinon elle est égale à la profondeur de l'obstacle. Ce calcul tient aussi compte de la présence importante de cailloux qui limite le volume et donc diminue la réserve utile.

La réserve utile du sol (RFU) est une donnée calculée par UTS (unités typologiques des sols) de la carte des sols de France au 1/ 1 000 000^{ème} par l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). Cette donnée a été ensuite agrégée sous forme de moyenne à l'échelle de chaque bassin versant de la zone d'étude.

Dans ce type d'approche, il n'y a pas de notion de moyenne, ni de période puis qu'elle ne tient pas compte de données climatiques. C'est essentiellement une caractéristique du sol. Pour connaître la quantité présente dans un sol à un instant t, il faut combiner cette donnée avec les données climatiques par un bilan hydrique où le réservoir maximal du sol correspond à la réserve utile.

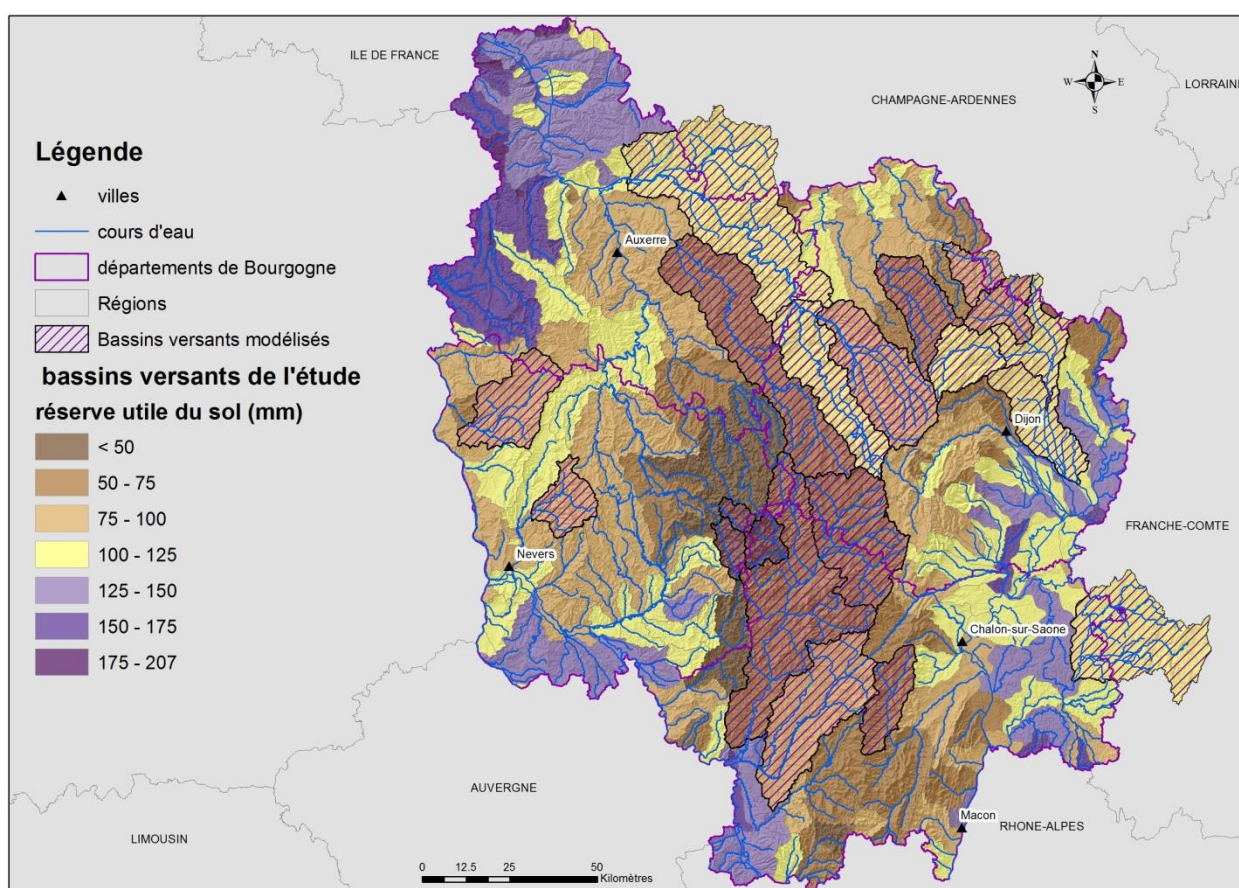


Illustration 35 – Carte de la réserve utile du sol pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

L'analyse de la répartition de la RFU sur l'ensemble de la zone d'étude (illustration 35), montre que les valeurs sont les plus élevées (supérieures à 100 mm) dans les sols des zones à dominante sédimentaire, avec une réserve utile importante dans les secteurs crayeux et sableux. A l'inverse, la réserve utile du sol est relativement faible en zone granitique et dans les zones calcaires où le relief est plus marqué.

3.4.7. L'épaisseur de la zone non saturée

Le changement climatique a un impact direct sur la quantité de précipitations météoriques et par voie de conséquence sur l'infiltration de l'eau météorique via la zone non saturée et donc le niveau des nappes d'eau souterraine.

Dans la partie souterraine du cycle de l'eau, on distingue dans un aquifère libre, trois zones superposées distinctes (du haut vers le bas) :

- une zone non saturée entre le sol et la nappe, au sein de laquelle se produit l'infiltration des eaux de pluies qui alimentent l'aquifère. C'est aussi une zone qui est le siège des racines des végétaux et constitue surtout une limite supérieure importante des nappes (alimentation, évaporation) ; elle est également le lieu de transit de matières et de substances.
- une zone intermédiaire de battement de nappe, temporairement saturée, limitée par la surface piézométrique en condition de « hautes eaux » ;
- et une zone saturée d'eau en permanence, qui correspond à un système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.

Le calcul de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) s'est effectué en deux étapes et est issu d'une étude nationale sur les remontées de nappe (Rapport BRGM BRGM/RP-59890-FR 2011) :

1^{ère} étape : une carte des niveaux moyens des eaux souterraines a été réalisée, sur l'ensemble du territoire d'étude ² Ces niveaux sont exprimés en altimétrie NGF³.

2^{ième} étape : l'épaisseur de la zone non saturée a été calculée par différence entre ces niveaux moyens et l'altitude du sol (obtenue par le Modèle Numérique de Terrain).

Le niveau moyen des nappes s'exprime en cote (altitude, par rapport au niveau de la mer, du toit de la nappe) ou en profondeur (distance entre le sol et le toit de la nappe). Ce niveau d'eau moyen, calculé sur tout le territoire, ne se réfère bien sûr pas à une seule nappe d'eau, mais à plusieurs nappes d'eau libre superficielle.

Ce niveau moyen a été déterminé par croisement des données fournies par les cartes piézométriques, les profondeurs d'eau de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et des données issues des piézomètres de la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES).

Le résultat de cette approche est une grille d'épaisseur de la ZNS au pas de 50 m. Les données sont ensuite agrégées sous forme de moyenne pour chaque bassin versant de la zone d'étude (cf. illustration 36).

² Ce ne sont pas des cartes piézométriques au sens strict, car l'interpolation des niveaux d'eau est effectuée sur la totalité du territoire d'étude, sans distinction des différentes nappes existantes.

³ Nivellement Général de la France

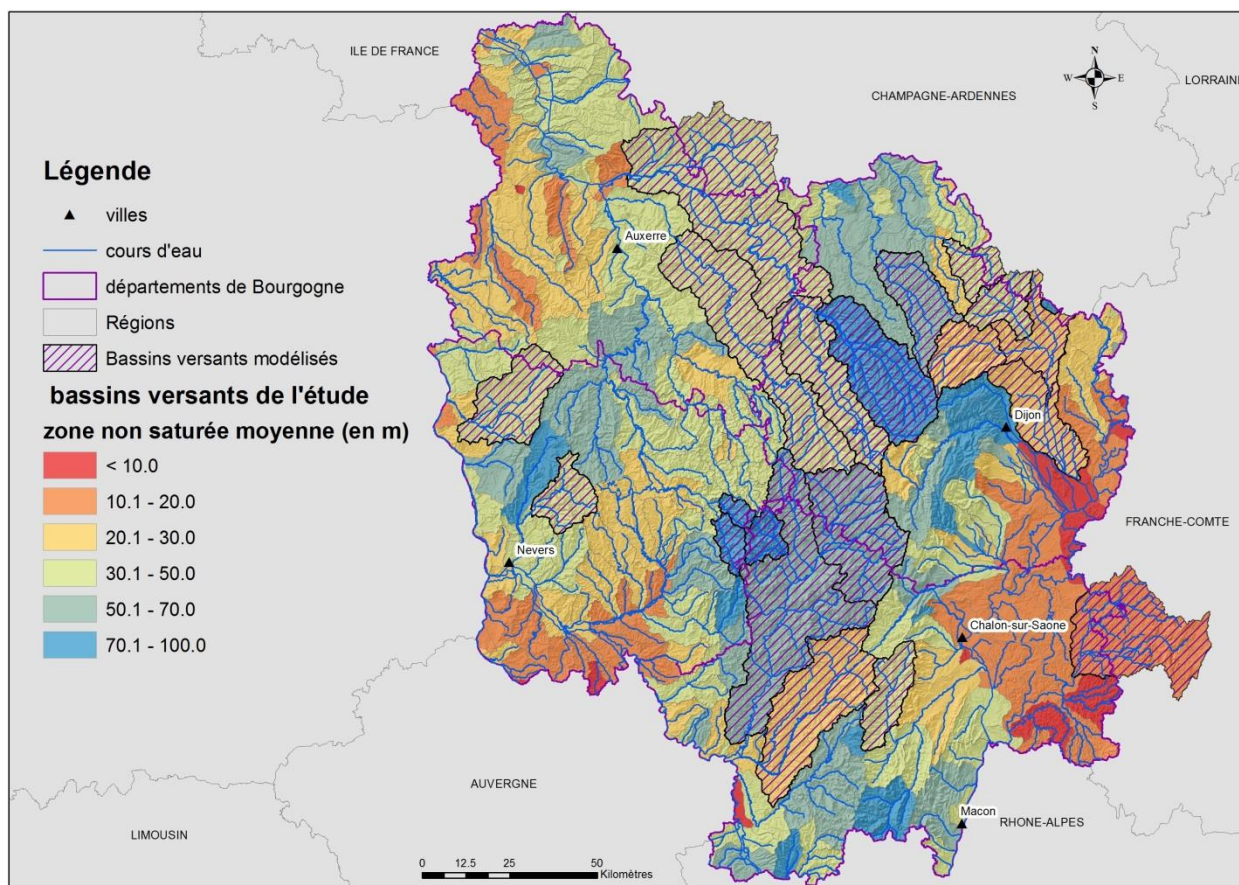


Illustration 36 – Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

Il existe une relation entre l'épaisseur moyenne de la zone non saturée et l'indice potentiel d'humidité du sol dans les bassins versants de type «sédimentaire».

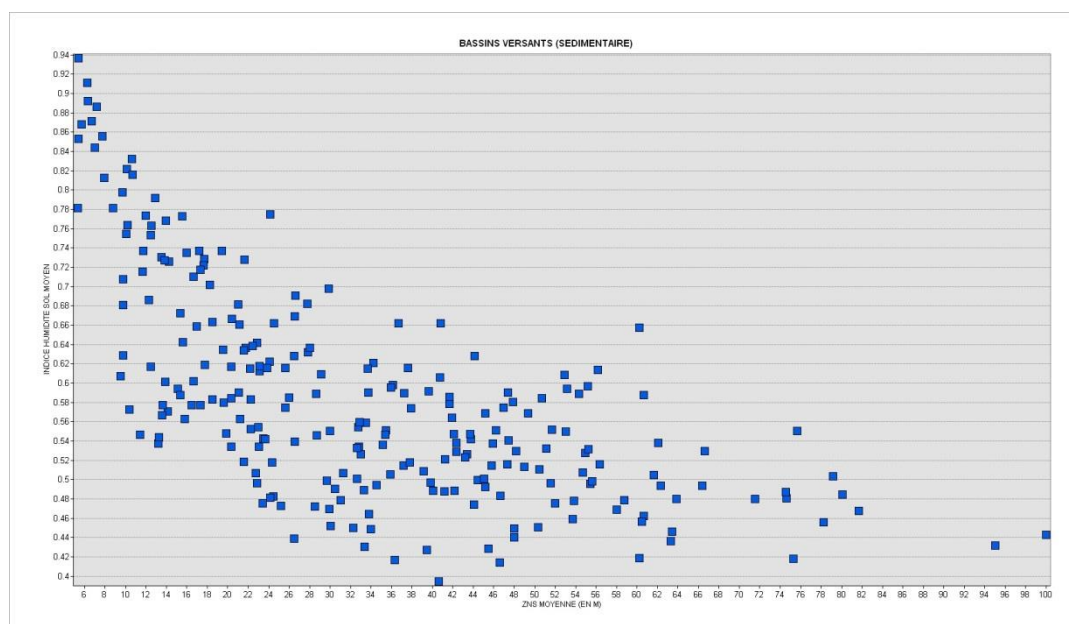


Illustration 37 – Graphe Indice d'humidité du sol en fonction de l'épaisseur moyenne de la ZNS pour les bassins versants sédimentaires.

3.4.8. L'IDPR

L'indice de persistance et de développement des réseaux (IDPR) a été créé par le BRGM (V. Mardhel en 2004) pour qualifier un territoire en termes de "chemins empruntés" par les eaux météoriques. L'eau qui se répand à la surface des terrains naturels (qui n'est pas absorbée par les plantes ou soumise à une évaporation directe), quitte son bassin versant de deux manières distinctes :

- elle ruisselle à la surface, se concentre dans les ruisseaux et les rivières et quitte le bassin en faveur d'un exutoire de surface ;
- elle s'infiltre dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère et quitte ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau des rivières.

L'IDPR permet une approche qualitative du rapport entre ces deux "chemins", il donne une indication quant à l'aptitude des formations du sol et sous-sol à laisser s'infiltrer et/ou ruisseler les eaux de surface vers/depuis le milieu souterrain. L'idée qui sous-tend l'IDPR découle de l'observation suivante : l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent.

Le calcul de l'IDPR est basé sur la comparaison entre un réseau hydrographique fictif qui considère la présence d'une rivière dans chaque fond de vallée (Indice de Développement) et un réseau hydrographique existant (Persistance des Réseaux). Cela permet de faire ressortir les zones à faible réseau hydrographique (zones d'infiltration forte) et celles où le ruissellement est important (réseau hydrographique dense).

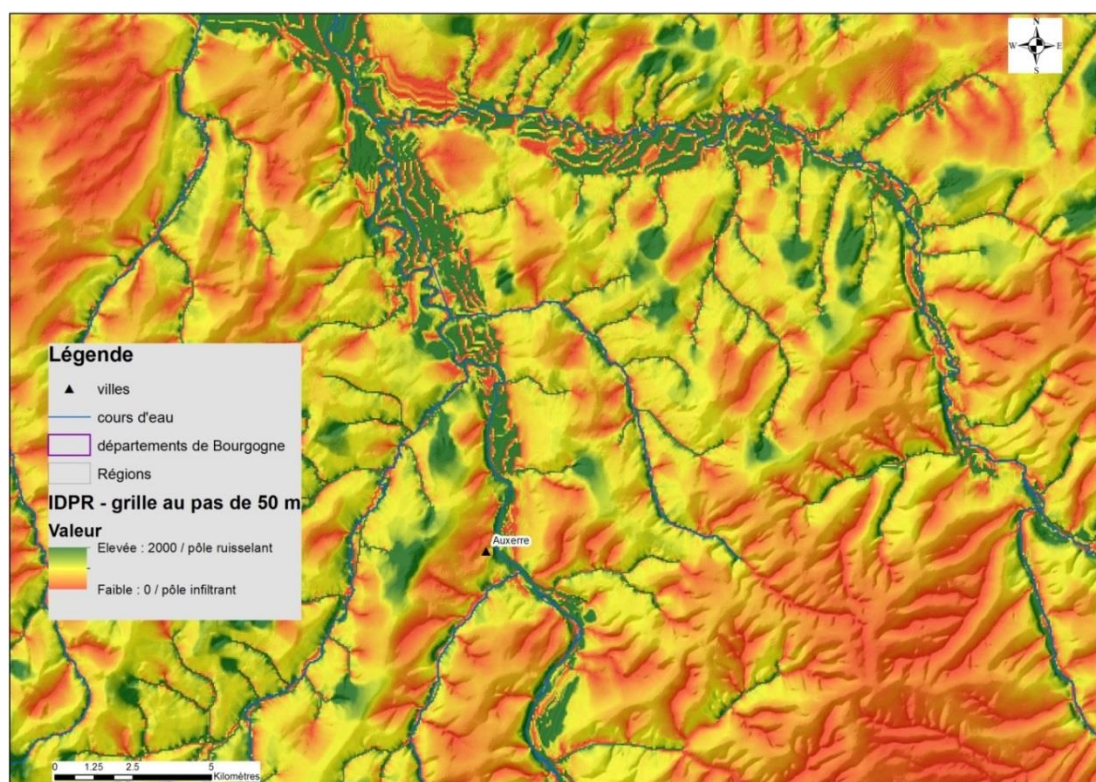


Illustration 38 – Extrait de la Grille du calcul de l'IDPR au pas de 50 m.

Les résultats

L'IDPR résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé, il varie selon une échelle comprise entre 0 et n, et est arbitrairement ramené à une gamme de 0 à 2000.

- IDPR < 1000 : Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel.

- IDPR = 1000 : Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place.

- IDPR > 1000 : Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg.

Un IDPR voisin ou égal à 2000 traduit une stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltre pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides.

A partir de la grille de calcul au pas de 50 m, la valeur médiane de l'IDPR a été calculée pour chaque bassin versant et présentée dans la carte de l'illustration 39.

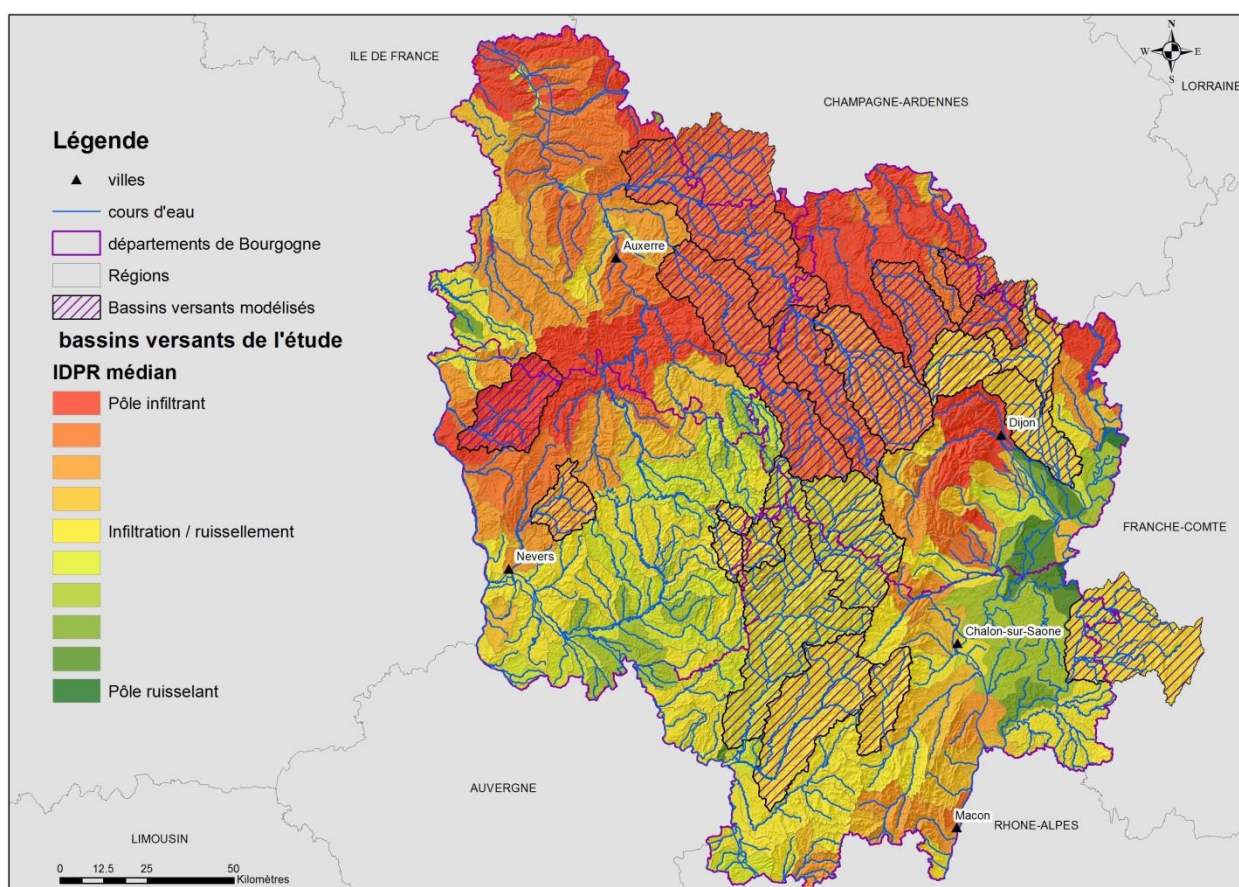


Illustration 39 – Carte de l'IDPR médian pour les 283 bassins versants de la zone d'étude.

Corrélation entre IDPR et densité de drainage

Pour améliorer la compréhension des relations nappe-rivière, nous avons utilisé des indicateurs tels que la densité de drainage et l'IDPR, deux approches bien distinctes pour qualifier la capacité ou non d'infiltration.

En effet, la densité de drainage des bassins versants de surface s'évalue en faisant le rapport entre la longueur des cours d'eau et la surface du bassin versant. L'IDPR quant à lui, est basé sur une métrologie des écarts entre le réseau de thalwegs et le réseau naturel.

Pour les comparer, on a affecté à chaque bassin versant de surface la moyenne des valeurs de l'IDPR issues de la grille au pas de 50 m.

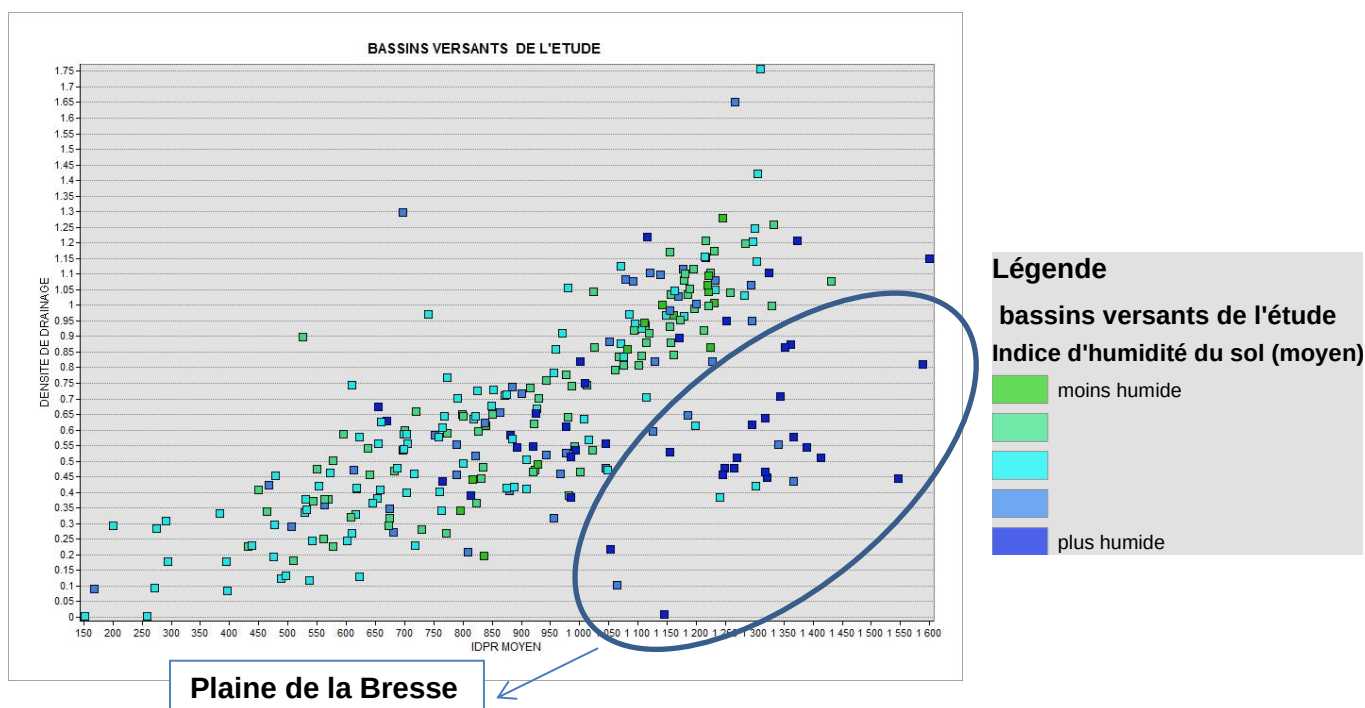


Illustration 40 – Corrélation entre IDPR, densité de drainage et indice d'humidité du sol.

L'illustration 40 montre que les deux indicateurs sont bien corrélés à l'exception des bassins versants localisés dans la plaine de Bresse où les lithologies dominantes sont composées de sables et d'argiles. Les valeurs de l'IDPR dans ce secteur indiquent un pôle largement ruisselant, confirmé par la présence notamment de zones humides.

3.5. CALCUL DE LA RECHARGE (PERIODE 1981 – 2010)

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), développé par le BRGM dans le cadre d'études de vulnérabilité des nappes, est utilisé ici pour évaluer le fractionnement de la pluie efficace entre ruissellement et infiltration.

Les pluies efficaces sont issues du modèle Safran de Météo-France par maille de 8km x 8km pour la période 1981- 2010. Elles sont agrégées par bassin versant sous forme de moyenne et présentées sur l'illustration 41.

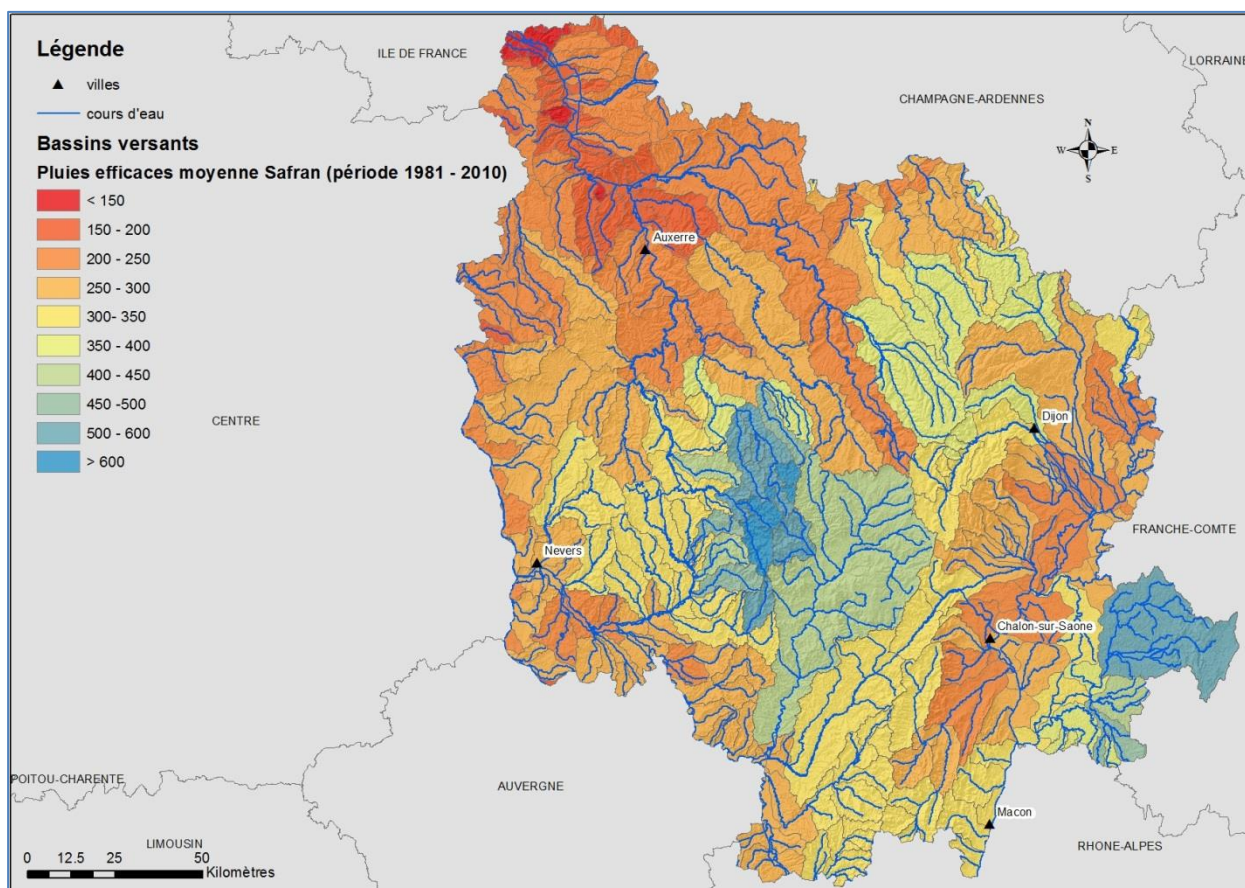


Illustration 41 – Répartition de la pluie efficace moyenne (mm) issue de SAFRAN (période 1981 – 2010).

La distribution des pluies efficaces par bassin versant dans la zone d'étude montre que :

- les valeurs sont faibles sur la partie Nord crayeuse et calcaire au-dessus du seuil de Bourgogne et sur presque l'ensemble du pourtour de la zone d'étude à l'exception du bassin de la Seille au Sud-Est,
- la plaine de la Bresse au Sud enregistre aussi des valeurs inférieures à la moyenne de la zone d'étude (287 mm)
- des valeurs légèrement supérieures à la moyenne de la zone d'étude sur les bassins calcaires entourant les bassins versants de socle (zone de transition),

- et des valeurs élevées sur le socle du Morvan, dues principalement aux pluies plus importantes dans ces zones de relief.

Cette méthode des pourcentages a été utilisée et validée sur le Modèle Turonien-Coniacien avec le calage du modèle hydrodynamique en régimes permanent et transitoire (Putot et Thinon-Larminach, 2010). Ces valeurs de % d'infiltration (ou de ruissellement) ont été utilisées notamment sur le bassin Loire-Bretagne dans la cadre d'une étude exploratoire (Pinson et al., 2010).

Diverses études en cours donneront des éléments complémentaires pour permettre de valider la pertinence de l'utilisation des proportions infiltration/ruissellement selon les valeurs de l'IDPR dans divers contextes.

La répartition de la pluie efficace entre infiltration et ruissellement se fait en fonction de la classe IDPR des zones, selon les pourcentages présentés dans le tableau de l'illustration 42.

Valeur de l'IDPR	Signification	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de l'infiltration	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation du ruissellement
0 – 200	Infiltration très majoritaire	95 %	5 %
200 - 400		85 %	15 %
400 - 600	Infiltration Moyenne	75 %	25 %
600 -800		65 %	35%
800 -1000		55 %	45 %
1000 – 1200		45 %	55 %
1200 - 1400		35 %	65 %
1400 - 1600	Ruissellement moyen	25 %	75 %
1600- 1800		15 %	85 %
1800 -2000	Ruissellement majoritaire	5 %	95 %

Illustration 42 – Tableau des classes IDPR – Pourcentages retenus pour le calcul du ruissellement et de l'infiltration.

Ainsi selon la valeur de l'IDPR de chaque bassin versant de la zone d'étude et la pluie efficace (en mm), nous avons appliqué le pourcentage correspondant pour la partie infiltrante ou la partie ruisselante. Nous avons évalué ainsi pour chaque bassin une lame d'eau ruisselante et une autre infiltrante. Les résultats concernant l'évaluation de l'infiltration sont présentés dans l'illustration 43.

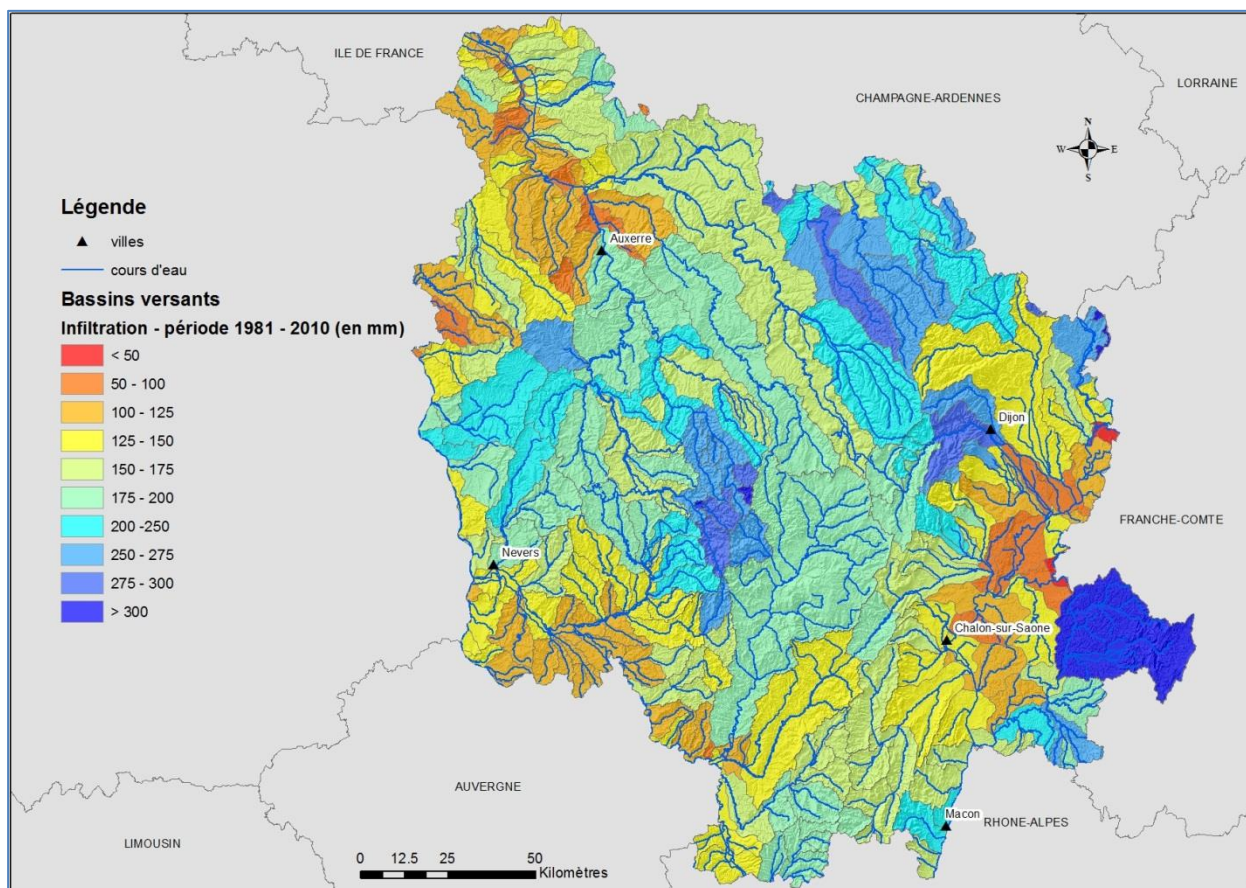


Illustration 43 – Carte de l'infiltration calculée (en mm) par la méthode IDPR à partir de la pluie efficace moyenne par bassin versant.

3.6. CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE

La transformation de la pluie en écoulement (aussi bien superficiel que souterrain) s'effectue au sein d'un bassin versant, dont le fonctionnement dépend de conditions climatiques locales, de ses caractéristiques physiques propres (topographie, géologie, nature et occupation du sol), mais aussi de sa forme, qui influence les caractéristiques des écoulements.

Le calcul des indicateurs morphologiques décrits dans les paragraphes précédents, ont permis de réaliser une typologie des 283 bassins versants correspondant pour certains aux stations de la banque Hydro. Cette approche a pour but d'identifier différentes classes de bassins versants en fonction de leurs caractéristiques et de définir des types de comportements.

3.6.1. Choix des indicateurs

Avant de réaliser la typologie des bassins versants, il est nécessaire de choisir les indicateurs qui seront utilisés dans la classification en réalisant une analyse des corrélations entre les différents paramètres disponibles. Cette analyse a pour objectif d'éviter la redondance des indicateurs et trouver ceux qui sont les plus discriminants pour comprendre le fonctionnement des différents bassins versants.

Pour chaque bassin versant, les valeurs des indicateurs sont issues soit de grilles de calcul au pas de 50 m, soit de polygones. Ils ont été utilisés sous forme de moyenne ou de médiane en fonction de chaque indicateur.

Le choix s'est effectué parmi les indicateurs décrits dans les paragraphes précédents que sont :

- la densité de drainage qui est une première approche du niveau d'infiltration ;
- l'indice de compacité qui permet d'appréhender les temps de concentration ;
- la densité du réseau hydrographique intermittent permet d'approcher une certaine sensibilité du réseau hydrographique aux variations des apports en eaux souterraines ;
- l'altitude permet de décrire le relief qui joue un rôle sur la distribution des pluies ;
- la réserve utile du sol ;
- la zone non saturée donne une évaluation de la proximité des nappes par rapport au sol ;
- l'IDPR qualifie la capacité des sols à s'infiltrer ou à ruisseler ;
- l'indice potentiel d'humidité du sol permet d'appréhender les zones d'accumulation des eaux ;
- la rugosité permet d'appréhender indirectement le relief et les pentes ;
- la pluie efficace moyenne SAFRAN et l'infiltration calculée par la méthode IDPR.
- la densité de fracturation joue un rôle dans la distribution des débits des rivières ainsi que sur les niveaux d'eau au sein des aquifères.

L'analyse de ces indicateurs ainsi que les différentes corrélations présentées dans l'illustration 44 montrent que la densité de drainage et l'IDPR représentent le même phénomène. On constate aussi l'existence d'une relation entre l'épaisseur moyenne de la zone non saturée et l'indice potentiel d'humidité du sol notamment dans les bassins versants de type «sédimentaire». Les corrélations les plus marquantes sont celles entre l'indice humidité du sol avec la réserve utile du sol, la rugosité et la zone non saturée.

Comme les pluies efficaces et l'infiltration sont des termes surtout utilisés pour les bilans hydrologiques (débits,...), ils ne seront pas pris en compte dans cette approche basée uniquement sur les caractéristiques hydro-géomorphologiques des bassins versants.

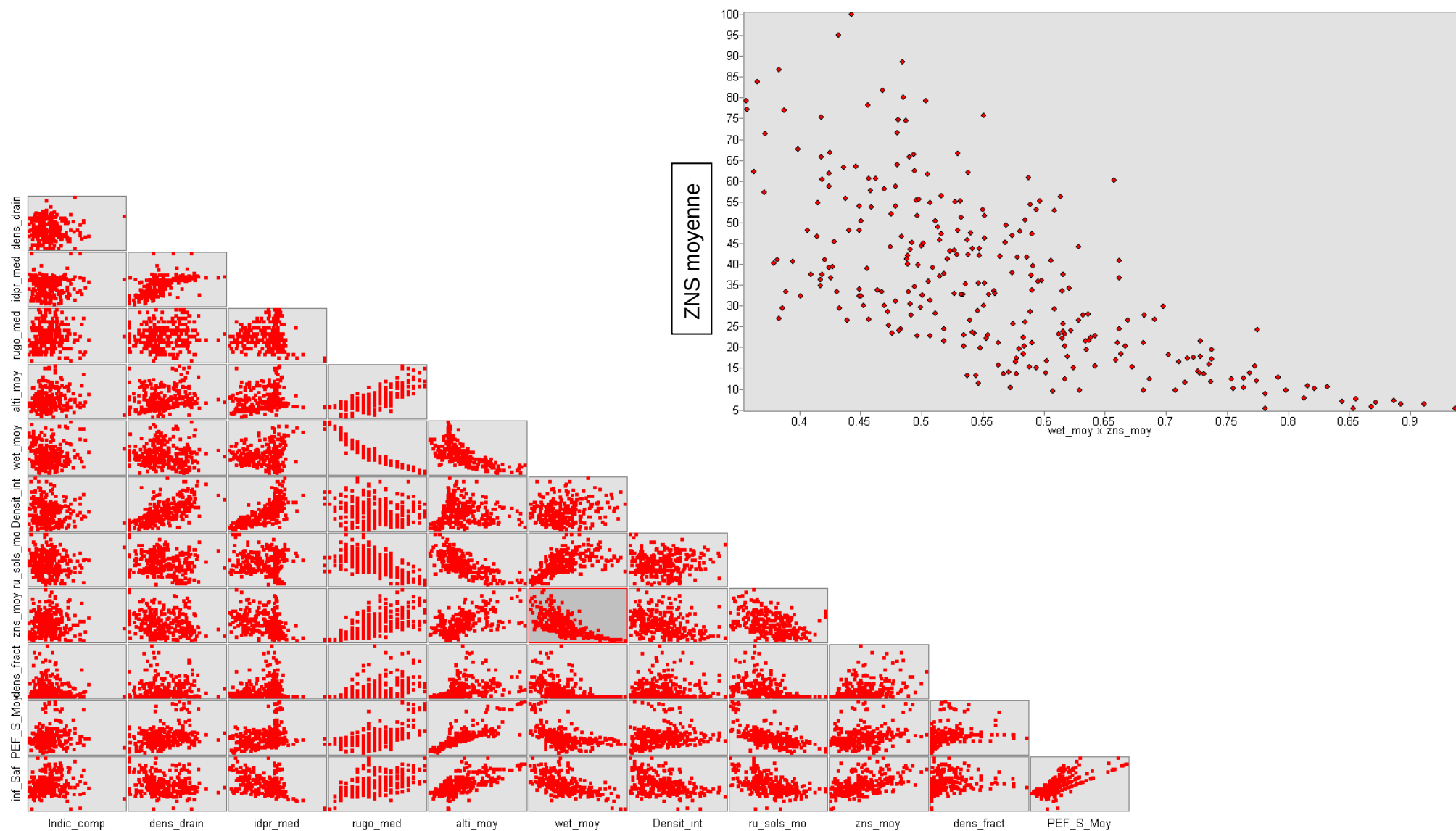


Illustration 44 – Corrélations entre les différents indicateurs

3.6.2. Classification

Pour améliorer la compréhension du fonctionnement des bassins versants, une typologie a donc été développée, basée uniquement sur des indicateurs hydrologiques et géomorphologiques. Cette approche a pour but d'identifier différentes classes de bassins versants en fonction de leur caractérisation et d'améliorer leur compréhension en définissant des types de comportements similaires.

A partir de ces valeurs pour chaque bassin versant, une classification a été réalisée grâce à la méthode d'analyse statistique du k-means *(XLSTAT) avec les conditions suivantes :

- Le critère d'optimisation de classification est la méthode du Déterminant (W) qui permet de supprimer les effets d'échelle des variables ;
- Les paramètres retenus, suite à l'analyse de la pertinence des indicateurs et leurs éventuelles corrélations, pour cette classification sont les suivants :

L'indice de compacité – Indic_comp
 L'IDPR (médian) – idpr_med
 La rugosité (médiane) - rugo-med
 L'altitude (médiane)
 La densité de fracturation
 La réserve utile du sol
 La densité d'intermittent
 L'épaisseur de la zone non saturée (moyenne)

L'analyse aboutit ainsi à 5 classes réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, et les résultats sont présentés dans les illustrations 45 et 46.

Classe	Indic_comp	idpr_med	ru_med	alti_med	Densit_int	ru_sols_mo	zns_moy	dens_fract
1	1.791	980.366	14.268	441.293	0.244	55.749	54.712	12.106
2	1.718	1024.884	7.876	228.967	0.351	110.337	25.495	7.291
3	1.814	1685.714	3.429	203.286	0.410	112.625	11.314	0.028
4	1.748	336.000	8.689	240.115	0.087	110.303	46.877	3.717
5	1.790	668.264	8.528	222.264	0.166	108.566	35.632	4.583

Illustration 45 – Tableau des résultats de la classification issus de l'analyse des « K moyennes »

** Principe de la classification par la méthode des nuées dynamiques ou méthode k-means (XLStat)*

« La classification par la méthode des nuées dynamiques (classification k-means) est une méthode itérative qui, quel que soit son point de départ converge vers une solution. La solution obtenue n'est pas nécessairement la même quel que soit le point de départ. Pour cette raison, on répète en général plusieurs fois les calculs pour ne retenir que la solution la plus optimale pour le critère choisi. Pour la première itération on choisit un point de départ qui consiste à associer le centre des k classes à k objets (pris au hasard ou non). On calcule ensuite la distance entre les objets et les k centres et on affecte les objets aux centres dont ils sont les plus proches. Puis on redéfinit les centres à partir des objets qui ont été affectés aux différentes classes. Puis on réaffecte les objets en fonction de leur distance aux nouveaux centres. Et ainsi de suite jusqu'à ce que la convergence soit atteinte.»

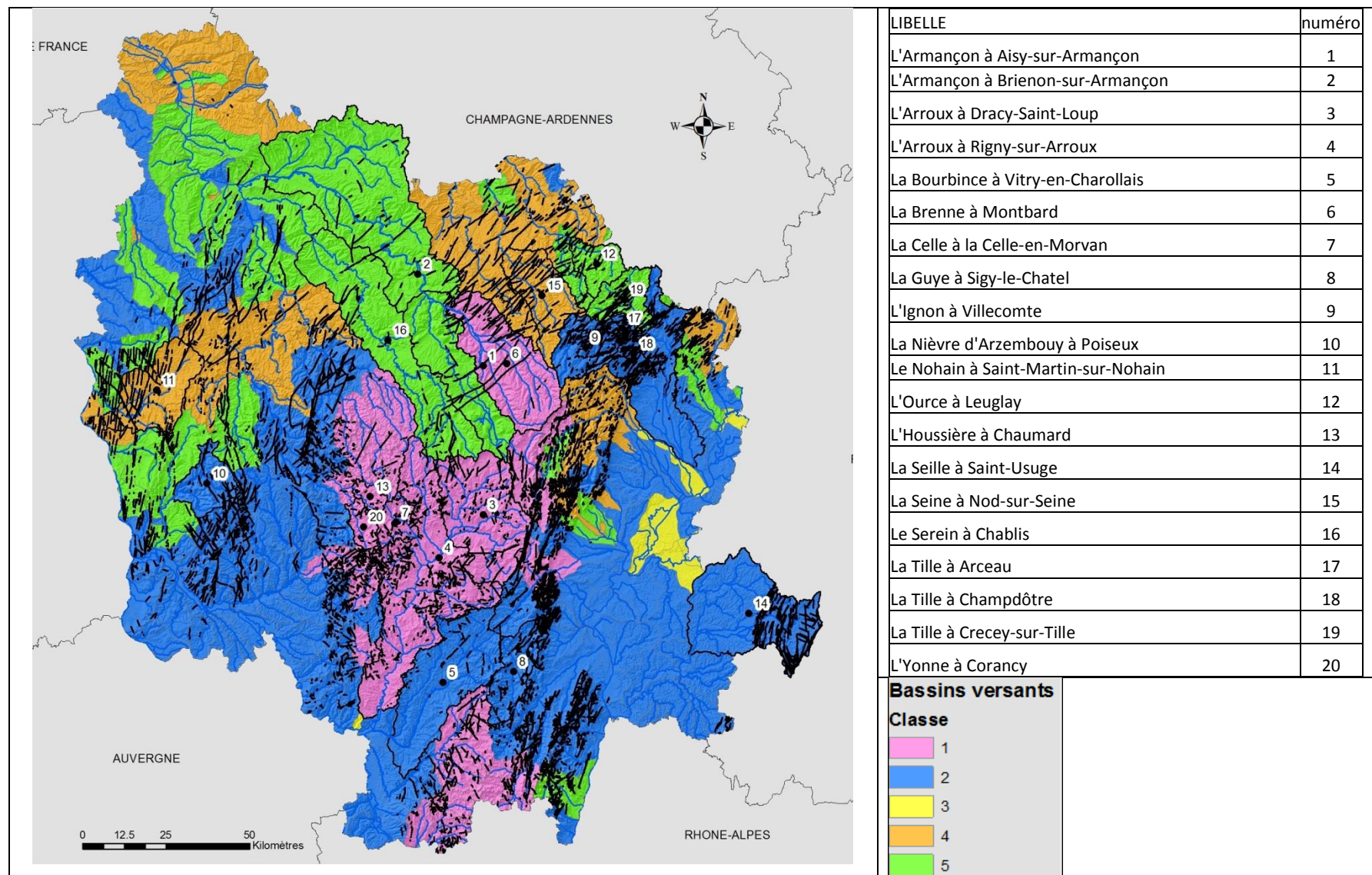


Illustration 46 – Carte des résultats de la classification par bassin versant

3.6.3. Analyse des résultats

Pour chaque classe, une synthèse sur la lithologie dominante et sur les valeurs du QMNA5 a été réalisée afin de mieux analyser cette classification et préparer dans un second temps la spatialisation des résultats après la phase de modélisation hydrologique (paragraphe 5).

Le QMNA5 représente le débit des rivières à l'étiage et il permet d'évaluer indirectement le niveau de soutien des eaux souterraines. Le QMNA5 spécifique permet de comparer les débits des bassins versants les uns aux autres en s'affranchissant de leur taille et s'exprime en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$).

Les lithologies dominantes, le minimum, le maximum et la moyenne des QMNA5 spécifiques ont été concaténés pour chaque classe et présentés dans l'illustration 47. On constate que les classes 2 et 5 ont des QMNA5 spécifiques du même ordre de grandeur alors que la classe 4 est associée aux valeurs les plus faibles, et la classe 1 représente un niveau intermédiaire.

Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
Lithologie	nbre	Lithologie	nbre	Lithologie	nbre	Lithologie	nbre	Lithologie	nbre
Argiles	1	Argiles	20	Argiles	1	Argiles	7	Argiles	10
Basaltes et rhyolites	2	Basaltes et rhyolites	2	Sables	6	Calcaires, marnes et gypse	34	Calcaires, marnes et gypse	24
Calcaires, marnes et gypse	11	Calcaires, marnes et gypse	30			Craie	15	Craie	12
Gneiss	1	Craie	5			Sables	5	Sables	7
Granites	24	Granites	8						
Grès	1	Grès	3						
Sables	1	Sables	53						
Total	41	Total	121	Total	7	Total	61	Total	53
QMNA5 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	19 BVs	QMNA5 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	26 BVs	QMNA5 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	0 BVs	QMNA5 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	13 BVs	QMNA5 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	16 BVs
Moyenne	1.1910E-03	Moyenne	1.2760E-03	Moyenne		Moyenne	1.01E-03	Moyenne	1.2720E-03
Min	9.5000E-05	Min	3.0200E-04	Min		Min	7.0000E-06	Min	3.3500E-04
Max	3.9790E-03	Max	4.3740E-03	Max		Max	3.1100E-03	Max	4.7320E-03

Illustration 47 – Synthèse par classe de la lithologie et du QMNA5 spécifique (en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)

Classe 1 – 41 bassins versants (14.5 % de la zone d'étude)

Les bassins versants appartenant à cette classe sont majoritairement localisés en zone de socle (Le Morvan) avec des lithologies de granites, de basaltes... Ils représentent près de 58 % de la classe. Les autres bassins sont tous localisés en bordure de la zone de socle, ils correspondent à des secteurs où il y a une transition avec des lithologies de calcaires, marnes et gypses et dans une moindre mesure avec des sables et du grès.

Cette classe 1 est caractérisée par une rugosité et des reliefs élevés combinés à la densité de fracturation la plus importante des cinq classes. Il s'agit aussi de bassins versants où les précipitations sont les plus fortes (impact du relief dans la distribution des pluies). Les capacités de ruissellement et d'infiltration de ces bassins versants sont équivalentes avec une infiltration moyenne calculée à partir de l'IDPR de l'ordre de 200 mm pour la période 1981-2010 (l'infiltration moyenne pour l'ensemble de la zone d'étude est de 165 mm).

La réserve utile du sol est la plus faible alors que l'épaisseur de la zone non saturée est la plus importante entraînant un soutien d'étiage par les eaux souterraines faible qui est confirmé par des valeurs de QMNA5 spécifique et une densité du réseau hydrographiques intermittent peu élevées. Dans ce cas, on peut considérer qu'il n'y a pas ou peu d'apport des eaux souterraines aux droit des systèmes étudiés, les failles agissant plutôt comme des pertes non observables.

Classe 2 – 121 bassins versants (43 % de la zone d'étude)

La classe 2 s'articule autour de trois lithologies avec des bassins versants à dominante sableuse (44 %), un pôle caractérisé par des calcaires, des marnes, des gypses (25 %), et des secteurs composés d'argiles, de sables et de cailloutis (16.5 %).

Pour l'ensemble des bassins versants l'infiltration (méthode IDPR) est inférieure à la moyenne.

Après analyse des différents indicateurs, il apparaît que cette classe regroupe deux comportements distincts comme le montre l'illustration 48 :

- un comportement d'aquifères sableux avec un ruissellement important dans le secteur de la Bresse, une réserve utile plus importante, une zone non saturée moins épaisse ;
- une fracturation élevée dans les bassins « calcaires », un relief plus marqué et une densité du réseau hydrographique intermittent plus faible ;

Valeurs moyennes	Indic_comp	Idpr_med	rugeo-med	Alti_med	Dens_int	Ru_sols	zns_moy	Dens_fract
Pôle sableux 73 bassins	1.66	1050	6.45	212	0.38	125	19	3.5
Pôle calcaires 48 bassins	1.79	985	3.03	254	0.3	87	35	13

Illustration 48 – Classe 2 - Synthèse des indicateurs pour le pôle « sableux » et le pôle « calcaires »

Dans les zones calcaires, les valeurs du QMNA5 spécifique ($1.36E^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ en moyenne) sont supérieures aux bassins versants sableux ($1.16E^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ en moyenne), indiquant un soutien des eaux souterraines grâce au réseau de failles. Cela est confirmé par le pourcentage de linéaire du réseau hydrographique en lien avec la fracturation qui est de l'ordre de 5 % pour les calcaires et de 1.2 % pour les bassins sableux.

Pour la compréhension du fonctionnement de cette classe on pourrait envisager dans le cadre de la spatialisation de diviser cette classe 2 en deux entre un pôle « sableux » (classe 2.1) et un pôle « calcaires » (classe 2.2).

Classe 3 – 7 bassins versants (2.5 % de la zone d'étude)

La classe 3 est la plus petite des classes avec seulement 7 bassins versants localisés au nord de la plaine de la Bresse. Ils sont caractérisés par un IDPR très ruisselant, une densité d'intermittents et une réserve utile les plus élevées des cinq classes, une zone non saturée et une densité de fracturation les plus faibles de l'ensemble des classes. Des zones « humides » sont cartographiées sur cette zone. Il n'existe pas de valeurs de QMNA5 pour cette classe.

Classe 4 – 61 bassins versants (21.5 % de la zone d'étude) et Classe 5 – 53 bassins versants (18.5 % de la zone d'étude)

Ces deux classes ont la particularité d'avoir des bassins versants avec les mêmes lithologies : « calcaires, marnes, gypse » et « craie ». Ils sont principalement localisés au Nord du seuil de Bourgogne. Les deux classes sont caractérisées par : une forte infiltration, une rugosité moyenne, une réserve utile du même ordre que les classes 2 et 3, une épaisseur de la zone non saturée relativement élevée et une densité du réseau hydrographique « intermittent » faible.

L'infiltration est le paramètre principal qui différencie ces deux classes, la classe 4 étant plus infiltrante que la classe 5. Cette capacité d'infiltration ne se retrouve pas dans les valeurs du QMNA5 spécifique, puisque les débits à l'étiage de la classe 5 sont supérieurs à ceux de la classe 4.

Cela s'explique en partie par des bassins versants en classe 5 qui sont plus fracturés avec un réseau hydrographique intermittent plus développé permettant un apport plus important des eaux souterraines. A l'inverse, la karstification des bassins versants de classe 4 s'exprime par la présence de gouffres et d'avens qui fonctionnent plus comme des pertes.

Une classification plus affinée des bassins versants, résumant l'analyse de la distribution des classes est présentée sur l'illustration 49.

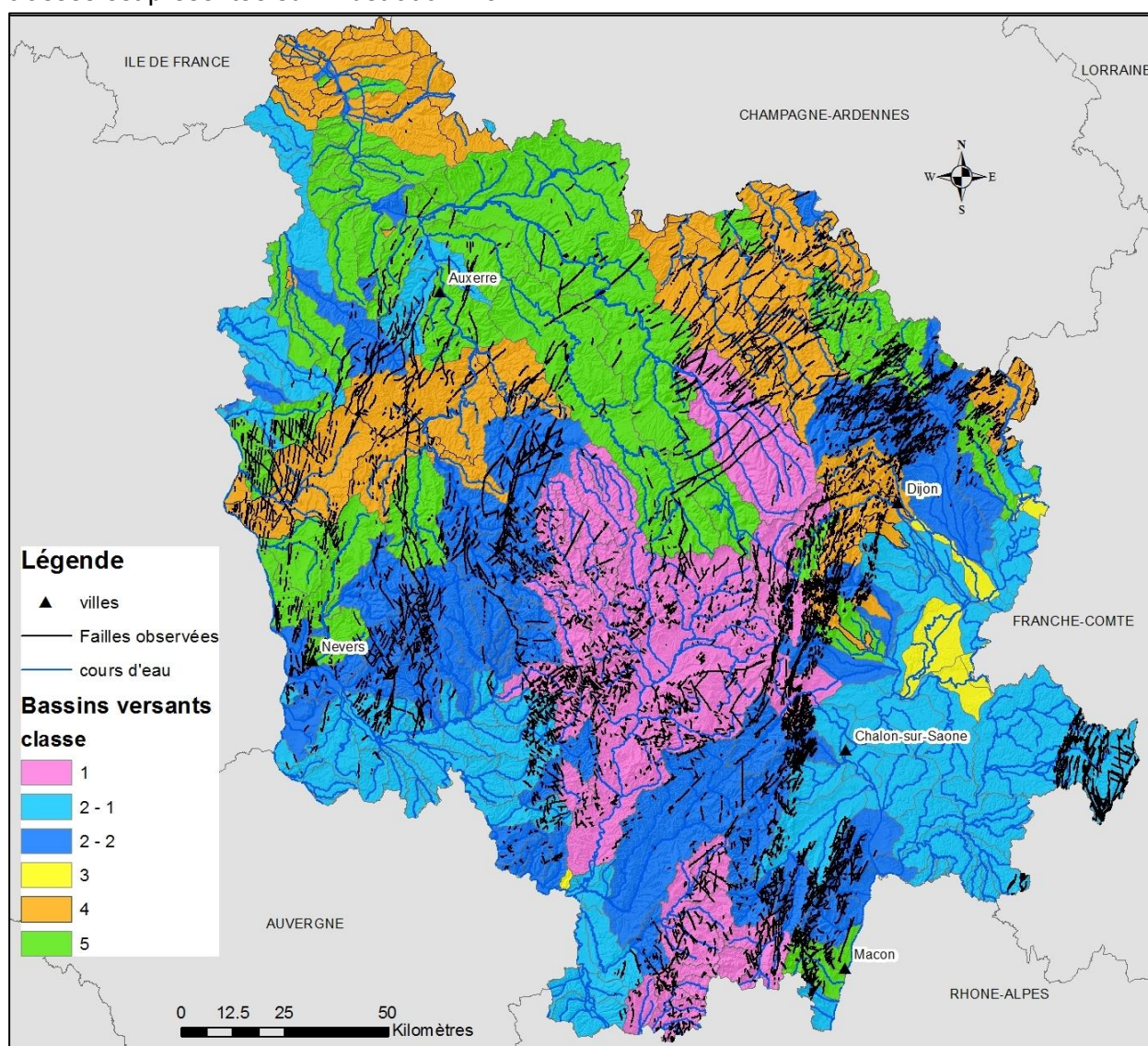


Illustration 49 – Carte des différents comportements de bassins versants après analyse de la classification.

4. Etude quantitative - Modélisation des bassins versants

4.1. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE GENERALE POUR L'ETUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La méthodologie généralement utilisée pour étudier l'impact du changement est présentée sur l'illustration 50.

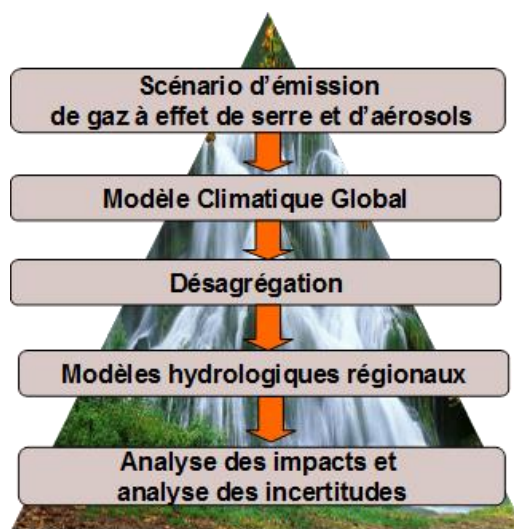


Illustration 50 – Principe général d'une étude d'impact du changement climatique (J. Boé 2007)

La première étape consiste à estimer les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces émissions sont utilisées par les modèles de climat pour en déduire l'évolution du climat dans le futur. Ces simulations sont ensuite désagrégées (ou régionalisées) pour obtenir une meilleure estimation de l'évolution du climat à plus grande échelle. Ces données climatiques régionales sont ensuite utilisées dans des modèles hydrologiques régionaux pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits des rivières et le niveau des nappes phréatiques. Chacune de ces opérations conduit à une forme de simplification de la réalité qui génère une part d'incertitude sur le résultat obtenu.

Les modèles de climat utilisent différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols pour réaliser des projections sur l'évolution du climat jusqu'en 2100. Dans le cadre du projet « Hyccare », ce sont les scénarii RCP 2.6 et RCP 8.5 qui ont été retenus.

L'impact du changement climatique se quantifie en comparant les résultats obtenus avec les données fournies par chaque scénarii climatique et chaque bassin versant sur la période future (2011-2100) à ceux obtenus sur la période de référence (1981-2010) en considérant que les autres paramètres (prélèvements par exemple, couvert végétal etc.) restent constants.

Les modélisations hydrologiques permettant de déterminer l'évolution quantitative de la ressource en eau ont été réalisées avec deux types de modèles :

- le modèle pluie-débit journalier global GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres) qui a été utilisé par l'UMR Dijon et
- le modèle GARDENIA du BRGM

4.2. LE MODELE GARDENIA DU BRGM.

Description du logiciel de modélisation (cf. annexe 2)

La compréhension d'un hydrosystème peut être facilitée par la mise en place d'un modèle représentant de manière schématisée la réalité.

Le logiciel de modélisation GARDENIA, développé par le BRGM, est utilisé dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et éventuellement prévoir des **niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant**. Il permet de modéliser le fonctionnement d'un hydrosystème, tel que celui schématisé sur l'illustration 51.

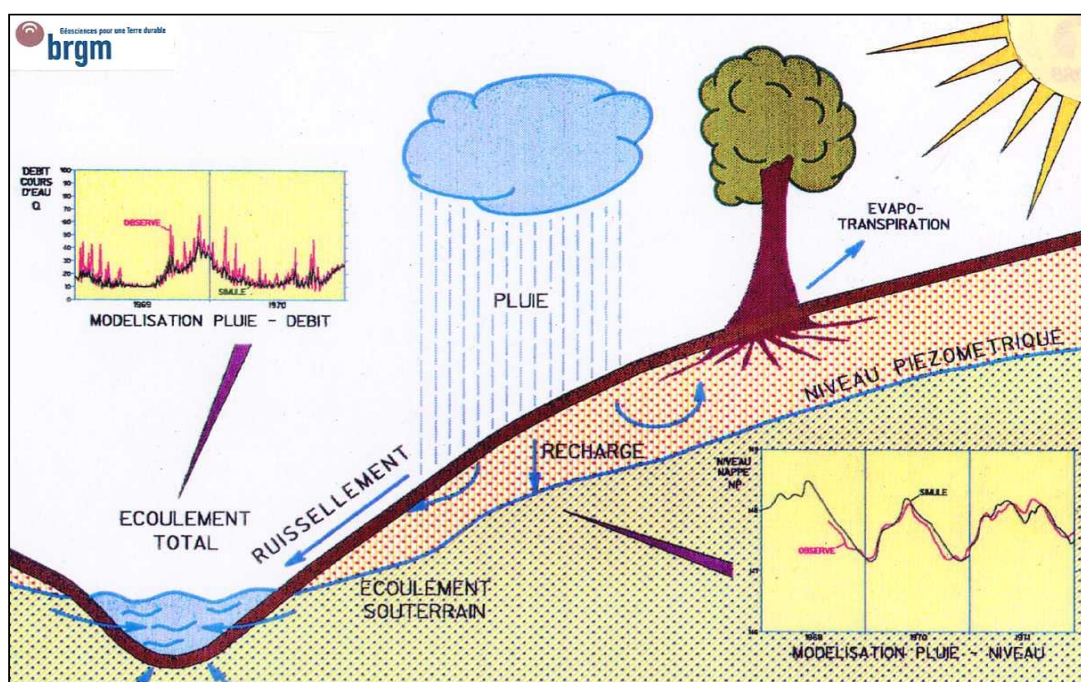


Illustration 51 – Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant.

Il permet de simuler le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique).

Ce modèle est global, car il considère des « données d'entrée » globales, pluie et évapotranspiration potentielle, et en sortie, débit à l'exutoire et/ou niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Le logiciel GARDENIA simule le cycle de l'eau par plusieurs réservoirs en cascade

4.3. COLLECTE, CONTROLE ET MISE EN FORME DES DONNEES

La phase de collecte et contrôle des données est essentielle pour assurer la validité des résultats des modélisations quelles qu'elles soient.

Cette phase comprend l'analyse du système hydrologique étudié, afin d'identifier ses conditions aux limites (prélèvement pour l'alimentation en eau potable, apports et/ou sorties souterraines, etc.). Elle est réalisée d'après l'analyse des cartes géologiques et hydrogéologiques et la consultation des études régionales ou locales réalisées sur le secteur.

Dans cette étude, on a cherché à recueillir les données sur la période la plus longue possible, afin d'intégrer le plus possible les fluctuations climatiques interannuelles et pouvoir disposer d'une période d'initialisation et de référence de longueur suffisante.

Une analyse critique des données de base a été effectuée de façon à identifier les lacunes d'observations et les erreurs grossières ou systématiques sur les données.

4.3.1. Pas de temps

Vu l'objectif de l'étude et malgré le nombre important de bassins et d'années à modéliser le pas de temps journalier a été choisi pour simuler les débits des cours d'eau au droit des stations hydrométriques et les niveaux piézométriques. Vu le contexte hydrogéologique et la taille des bassins versants à simuler, la vidange des aquifères va constituer une ressource primordiale lors des étiages mais un volume annuel relativement modeste, le pas de temps journalier permettra ainsi d'obtenir des bilans plus fins et plus représentatifs de la réalité observée. Pour effectuer un bilan satisfaisant et quantifier les impacts du changement climatique, il apparaît donc nécessaire de simuler au mieux les débits journaliers.

4.3.2. Données nécessaires pour la modélisation

Données débitmétriques

Les données journalières des débits des stations retenues dans le cadre de cette étude (*cf.* illustration 3) ont été fournies par les DREAL des trois régions concernées (Bourgogne, Ile de France, Centre). La sélection des stations hydrométriques a été faite à l'aide des informations fournies par ces DREAL (qualité de la courbe de tarage, qualité des jaugeages en étiage, nombre de mesures, station influencée ou non, etc.).

- **Caractéristiques principales issues de la banque hydro**

Les principales caractéristiques d'étiages (QMNA5, VCN10, VCN3) au droit des différentes stations figurant dans la banque de données « Hydro » ont été collectées (*cf.* illustration 53).

Par ailleurs, pour les 20 bassins modélisés, il a paru nécessaire de collecter le débit moyen annuel et/ou la lame d'eau écoulée correspondante (illustration 54) ainsi que des informations permettant de caractériser la variation moyenne mensuelle interannuelle du débit et/ou de la lame d'eau écoulée. Ces informations figurent dans l'illustration 57.

On constate ainsi, pour les bassins versants suivis de la zone d'étude que :

- pour un même bassin versant, il y a très peu de différences entre le QMNA₅ et le VCN₃ ;
- la lame ruisselée correspondante au QMNA₅, varie entre 0, l'Ignon à Villecomte, et 5 l/s/km² pour l'Yonne à Corancy ;

- la lame d'eau écoulée moyenne annuelle varie entre 220 mm, le Nohain à St Martin, et 840 mm pour l'Yonne à Corancy ;
- la lame d'eau moyenne minimale mensuelle est faible. Elle varie entre 2,4 et 29 mm avec une moyenne de 15 mm et elle s'observe généralement en août ;
- la lame d'eau ruisselée mensuelle maximale moyenne interannuelle varie entre 27 et 130 mm avec une moyenne de 73 mm. Ce maximum se produit généralement en janvier – février.

La répartition mensuelle des lames d'eau moyennes interannuelles au droit des différentes stations a été reportée par département sur l'illustration 55.

Les illustrations 56 et 57, quant à elles, permettent de comparer, entre les différents bassins versants, les lames ruisselées annuelles, mensuelles extrêmes et le ratio obtenu entre elles.

Ces figures permettent de constater que certains bassins se distinguent, notamment :

- L'Yonne, l'Houssière et la Selle dont les lames ruisselées mensuelles aussi bien minimales que maximales sont les plus élevées. Cela s'explique notamment par les fortes précipitations observées survenant de plus sur une géologie favorable au ruissellement.
- Le Nohain, qui présente les lames maximales et moyennes ruisselées les plus faibles malgré une lame ruisselée minimale parmi les plus élevées. On obtient ainsi, pour ce bassin du Nohain, le ratio, entre ces deux lames mensuelles, le plus faible. Cette information est représentative des bassins versants à forte régulation généralement due à la présence d'un aquifère significatif (bassins crayeux) mais pouvant également signifier de forts écoulements non mesurés.

Nota Bene : VCNd, débit moyen minimum sur d jours Ex : VCN10 : débit moyen minimum sur 10 jours

QMNA 5 : débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans

ID	cours d'eau - station	Numéro banque Hydro	VALEURS ISSUES DE LA BANQUE HYDRO						
			superficie (km ²)	période disponible	Module	QMNA5	VCN10 (médian)	VCN3 (médian)	VCN10 (1/5)
18	L'Armancon à Aisy-sur-Armancon [aval]	H2452020	1350	1989-2015	12.70	0.70	0.88	0.71	0.49
1	L'Armancon à Brienon-sur-Armancon	H2482010	2982	1967-2015	29.10	2.90	3.70	3.40	2.3
6	L'Arroux à Dracy-Saint-Loup [Surmoulin]	K1251810	776	1984-2015	6.30	0.20	0.23	0.20	0.13
3	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	K1341810	2277	1967-2015	27.60	1.40	1.50	1.30	0.84
2	La Bourbince à Vitry-en-Charollais	K1383010	819	1967-2015	7.78	1.00	1.10	0.90	0.81
17	La Brenne à Montbard	H2442340	732	1988-2015	8.14	0.38	0.47	0.42	0.28
4	La Guye à Sigy-le-Chatel [Corcelles]	U3225010	272	1970-2015	2.09	0.11	0.15	0.13	0.079
10	L'Houssiere à Chaumard	H2013010	60	1990-2015	1.54	0.20	0.21	0.18	0.14
15	L'Ignon à Villecomte	U1215030	304	1986-2015	3.34	0.008	0.020	0.015	0.002
9	La Nievre d'Arzembouy à Poiseux [Poisson]	K1954010	224	1984-2015	2.40	0.23	0.24	0.23	0.18
13	Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain [Villiers]	K4094010	473	1969-2015	3.38	1.00	1.38	1.33	0.91
20	L'Ource à Leuglay [Froidvent]	H0301010	173	1985-2015	2.02	0.13	0.17	0.15	0.1
5	La Seille à Saint-Usuge	U3424010	937	1968-2015	13.80	1.20	1.29	1.14	0.92
19	La Seine à Nod-sur-Seine	H0100010	371	1968-2015	4.62	0.43	0.54	0.50	0.35
7	La Selle à la Celle-en-Morvan [Polroy]	K1284810	138	1969-2015	3.00	0.25	0.25	0.20	0.17
21	Le Serein a Chablis [Pont de la deviation]	H2342020	1119	1954-2015	7.84	0.21	0.32	0.30	0.17
14	La Tille à Arceau [Arcelot]	U1224010	846	1966-2015	7.24	0.12	0.18	0.16	0.089
11	La Tille à Champdotre	U1244040	1258	1967-2015	11.10	0.55	0.94	0.84	0.4
16	La Tille à Crecey-sur-Tille	U1204010	231	1970-2015	2.72	0.13	0.14	0.16	0.084
8	L'Yonne à Corancy	H2001020	106	1990-2015	2.77	0.54	0.53	0.47	0.39

Illustration 52 – Informations de base et caractéristiques d'étiage collectées auprès de la banque « Hydro » aux différentes stations en m³/s.

Cours d'eau	Armançon		Arroux		Bourbince	Brenne	Guye	Houssière	Ignon	Nièvre
Superficie (km2)	1350	2982	776	2277	819	732	272	60	304	224
Mois\Station	H2452020	H2482010	K1251810	K1341810	K1383010	H2442340	U3225010	H2013010	U1215030	K1954010
1	25.29	53.98	13.97	56.53	15.25	15.77	4.29	2.94	6.88	4.75
2	24.30	61.13	12.66	58.83	15.48	15.42	4.42	2.72	6.41	4.46
3	17.82	44.91	9.51	41.51	10.55	11.61	3.06	2.35	5.55	3.48
4	13.86	37.05	8.20	33.73	8.44	9.53	2.46	1.72	4.20	3.30
5	10.81	30.10	6.02	24.54	7.48	7.02	1.81	1.42	3.30	1.99
6	4.53	16.22	2.26	12.51	4.39	3.04	0.98	0.87	1.66	0.89
7	3.42	9.91	1.27	6.44	2.62	2.41	0.43	0.66	0.81	0.49
8	2.34	7.20	0.70	4.83	2.12	1.68	0.26	0.43	0.41	0.43
9	3.51	8.19	0.76	4.98	2.45	2.11	0.38	0.48	0.48	0.44
10	8.12	14.78	2.42	12.56	4.06	4.95	0.98	0.83	1.50	1.13
11	14.57	25.23	6.39	28.05	8.13	9.19	2.27	1.77	3.27	2.38
12	22.94	45.51	11.32	49.34	12.87	14.55	3.74	2.62	5.98	4.00
Moyenne	12.63	29.52	6.29	27.82	7.82	8.11	2.09	1.57	3.37	2.31
Cours d'eau	Nohain	Ource	Seille	Seine	Selle	Serein	Tille		Yonne	
Superficie (km2)	473	173	937	371	138	1119	846	1258	231	106
Mois\Station	K4094010	H0301010	U3424010	H0100010	K1284810	H2342020	U1224010	U1244040	U1204010	H2001020
1	4.91	3.89	23.23	8.27	5.95	17.62	15.58	24.18	5.40	4.91
2	5.19	3.70	23.28	9.00	6.41	15.76	14.78	22.36	4.98	4.63
3	4.97	3.22	18.01	6.59	4.45	14.60	12.38	17.72	4.23	3.89
4	4.40	2.48	16.14	5.39	3.50	9.48	9.54	12.36	3.24	2.97
5	3.60	2.13	12.29	4.44	2.42	8.57	7.47	11.13	2.56	2.63
6	2.56	1.04	7.24	2.60	1.47	2.91	3.50	5.11	1.29	1.88
7	2.01	0.66	4.71	1.53	0.83	1.63	1.69	2.96	0.75	1.42
8	1.68	0.40	3.00	1.10	0.58	1.40	0.79	1.88	0.40	1.09
9	1.62	0.49	4.88	1.60	0.62	1.15	0.83	1.81	0.55	1.05
10	1.87	1.08	11.38	2.89	1.54	3.13	2.84	5.22	1.53	1.57
11	2.51	2.01	19.28	4.52	3.21	6.98	6.75	10.83	2.93	3.09
12	3.55	3.42	23.44	7.81	5.35	14.12	12.11	18.28	4.69	4.17
Moyenne	3.24	2.04	13.91	4.64	3.03	8.11	7.36	11.15	2.71	2.78

Illustration 53 – Débits moyens mensuels interannuels observés en m³/s au droit des différentes stations (source Banque Hydro).

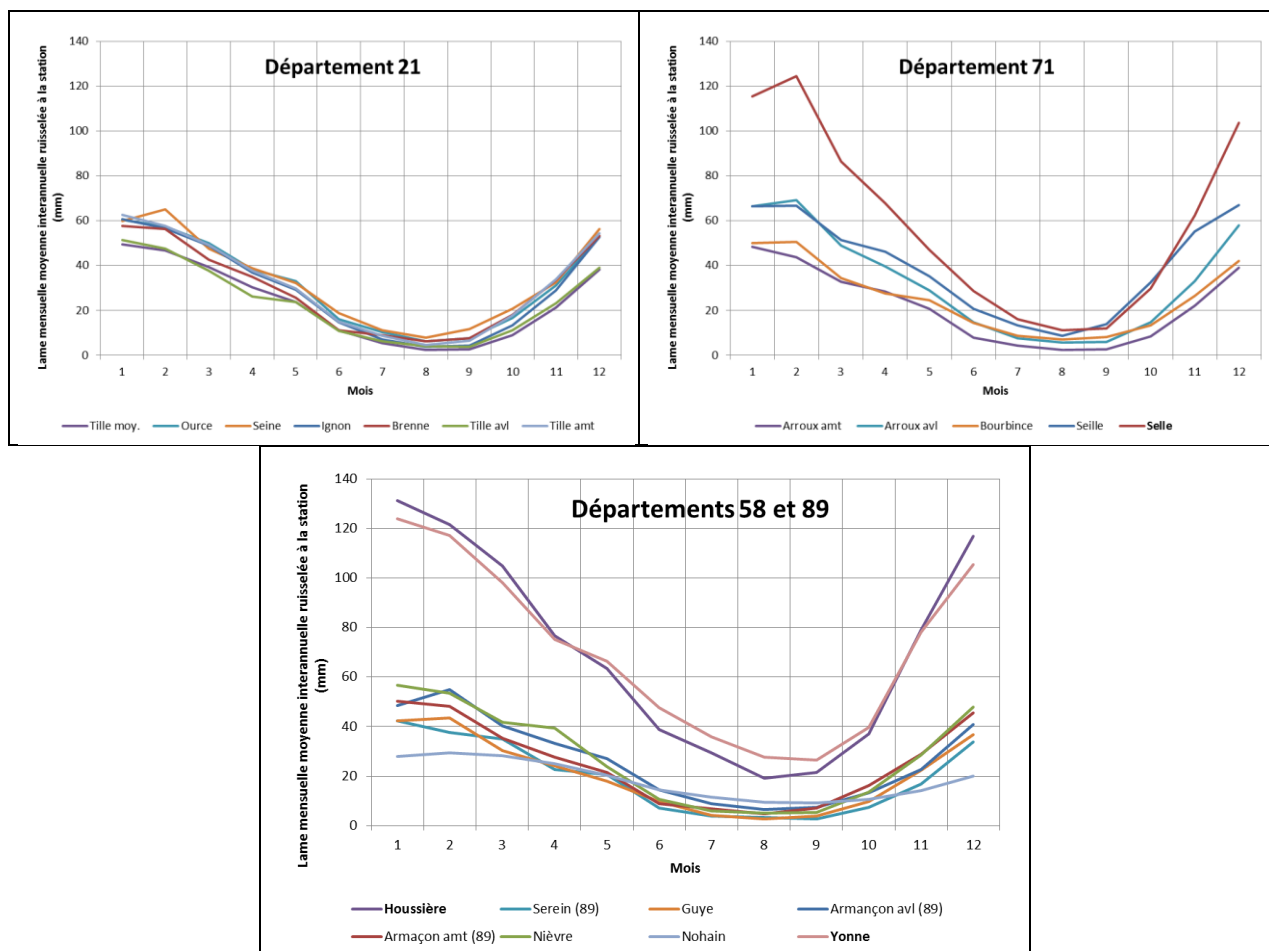


Illustration 54 – Lames d'eau moyennes mensuelles interannuelles aux différentes stations des différents départements de la zone d'étude.

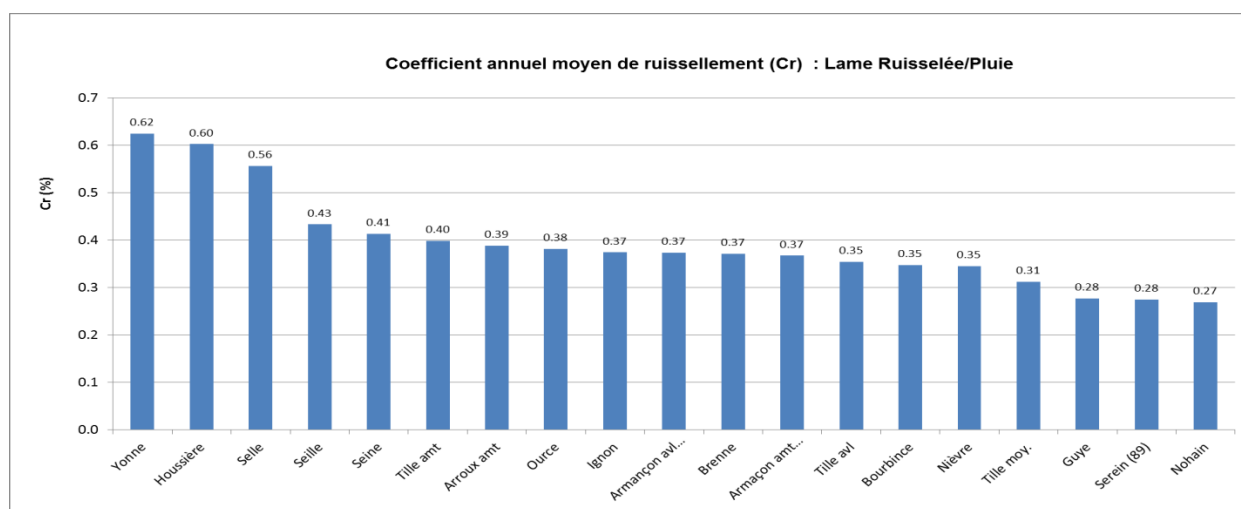


Illustration 55 – Coefficient moyen annuel de ruissellement au droit des stations hydrométriques (Ecoulement moyen banque hydro/Pluie Aurelhy)

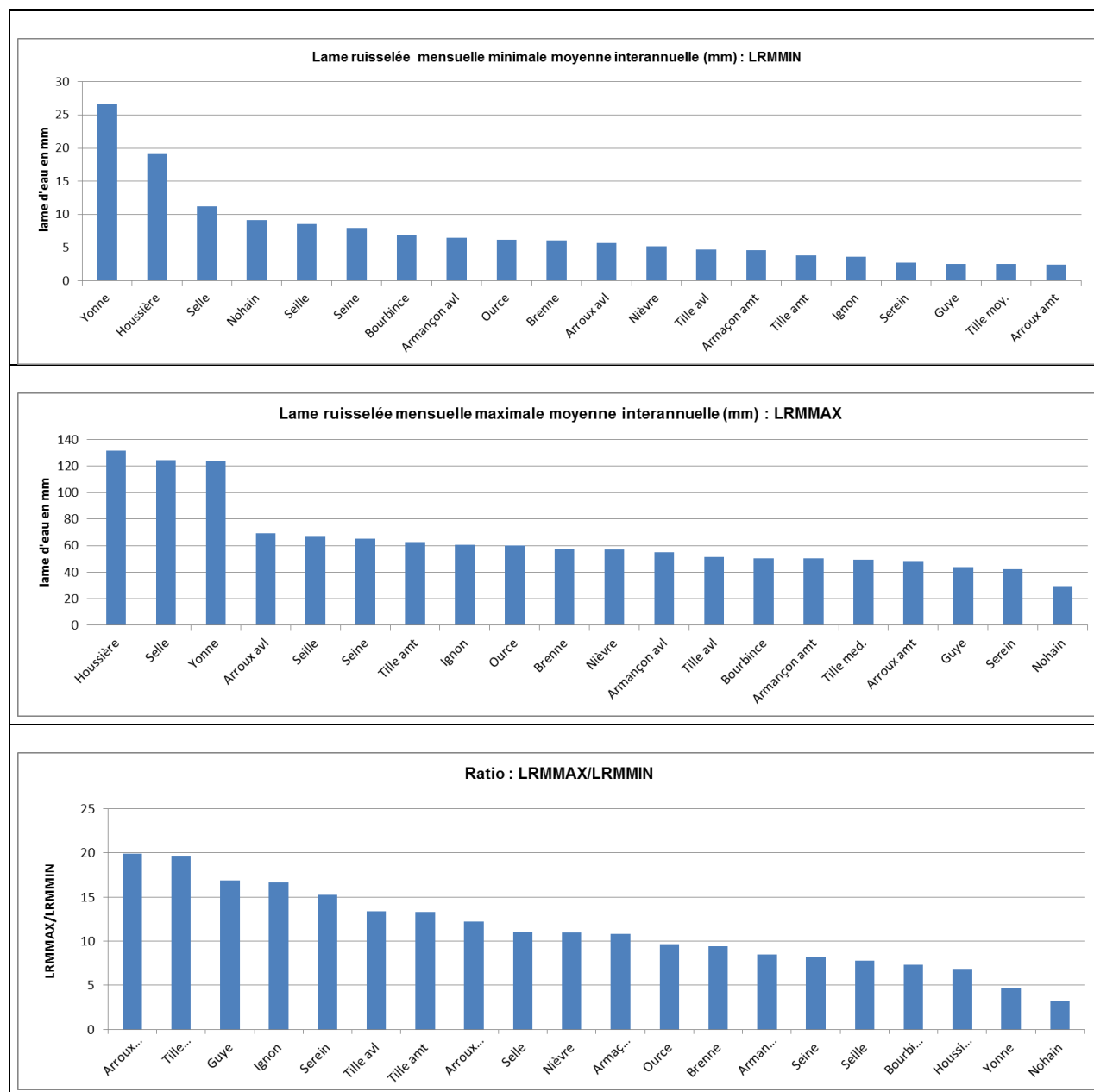


Illustration 56 – Comparaison des lames d'eau moyennes mensuelles interannuelles minimales et maximales aux différentes stations des différents bassins versants.

- **Données piézométriques**

Pour chacun des bassins versants à modéliser, un inventaire des piézomètres mesurant le niveau de la formation aquifère de surface a été dressé. Dans ces inventaires, les piézomètres ont été choisis en fonction du contexte hydrogéologique, de l'allure de la chronique mesurée, du nombre de points de mesures et de leur fiabilité. L'ouvrage choisi doit être le plus « représentatif » du comportement du bassin, qu'il soit situé dans ou au voisinage du bassin versant.

Neuf piézomètres ont ainsi été choisis parmi les 33 présélectionnés. Leur localisation est reportée sur l'illustration 58.

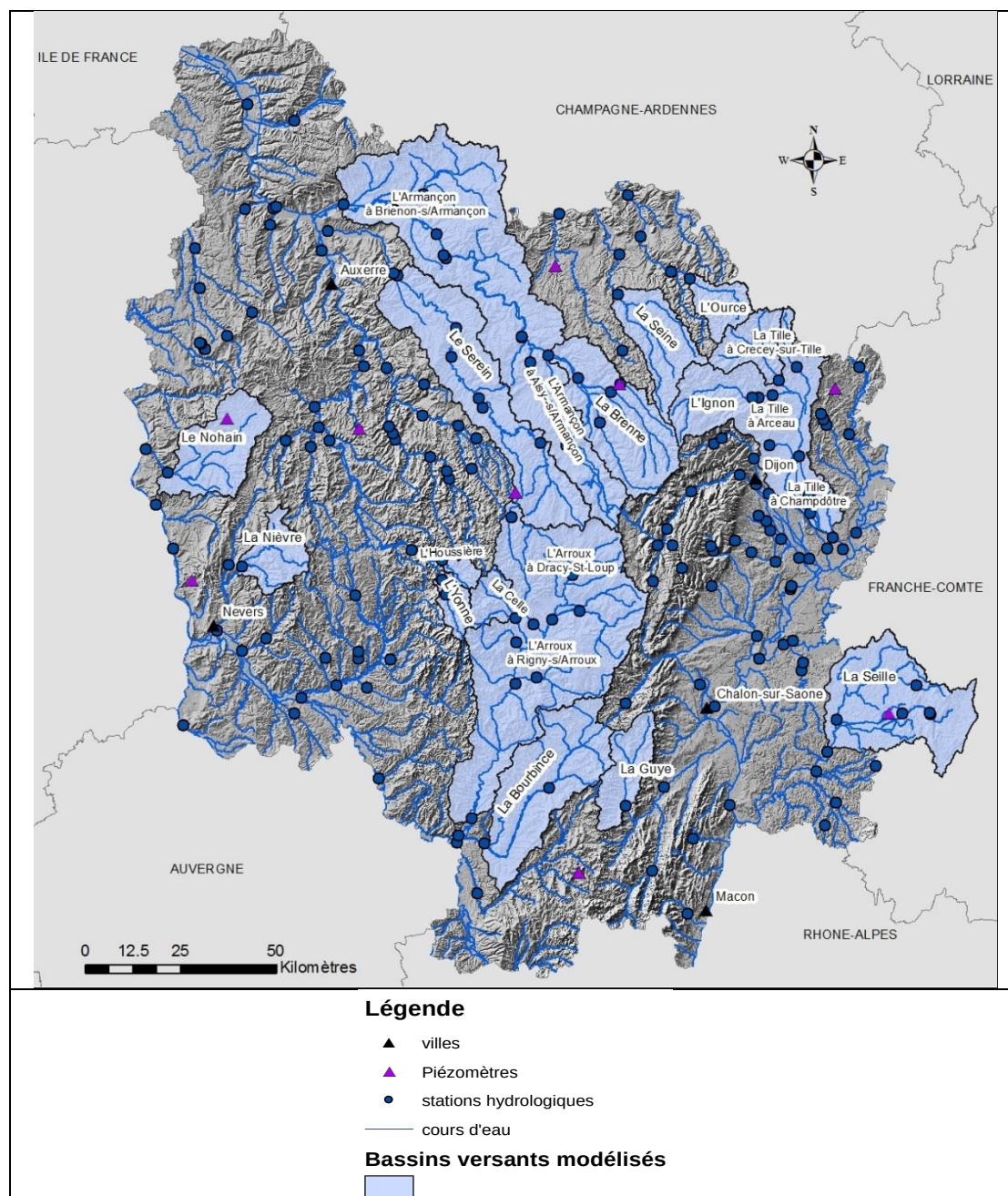


Illustration 57 - Localisation des bassins versants et des piézomètres sélectionnés pour la modélisation

• Données climatiques

Données de Météo France

Les données climatiques de base (précipitations + ETP) ont été acquises auprès de la climathèque Météo-France.

Ces stations ont toutefois été choisies en fonction de leur distance aux bassins versants, de leur altitude (la plus proche possible de l'altitude moyenne du bassin versant) tout en favorisant les stations permettant de fournir une chronique complète des données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith sur l'ensemble de la période de modélisation souhaitée. En effet le complètement de données manquantes sur une période peut induire des biais (séries non homogènes) fortement préjudiciables aux calages des modélisations. Lorsqu'il n'a pas été possible d'obtenir des séries complètes (principalement au niveau des données d'évapotranspiration potentielle) les séries ont été complétées soit en effectuant une correction d'échantillonnage (utilisation de la méthode des doubles cumuls) soit en prolongeant la série par les valeurs décennales moyennes interannuelles et utilisant cette période uniquement pour l'initialisation du modèle, le calage du modèle proprement dit étant réalisé sur la période où les chroniques sont complètes. Pour les bassins versants d'altitude, un facteur correctif constant sur l'ensemble de la période de modélisation a été appliqué sur la pluviométrie, neige comprise, lorsque la pluviométrie annuelle moyenne du poste le plus proche était foncièrement différente de la pluviométrie moyenne du bassin versant obtenue à partir de la carte des isohyètes interannuelles établie par Météo France et calculées selon la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie, Bénichon et Le Breton, 1986).

Contrairement à la pluviométrie, les données collectées d'ETP sont des données ponctuelles peu nombreuses qui ne permettent pas de définir une relation simple de variation avec l'altitude moyenne du bassin versant. Les valeurs semblent diminuer suivant l'altitude mais également suivant la latitude et l'exposition. La variation de la moyenne interannuelle (1981-2010) est toutefois limitée à moins de vingt pourcents, le minimum se situant à St Quentin Reims (713 mm) et le maximum à Bourges (835 mm).

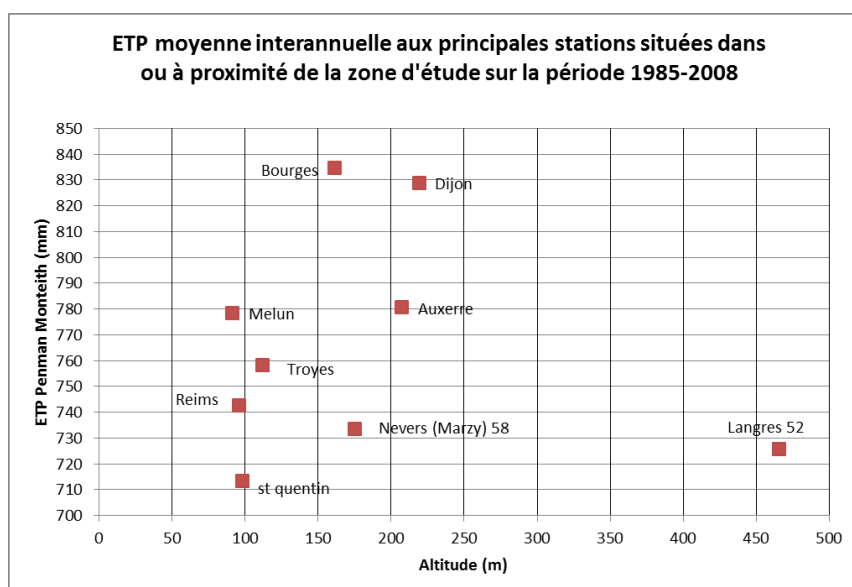


Illustration 58 – Valeurs moyennes interannuelles de l'ETP Penman Monteith au droit des stations Météo France collectées.

Données climatiques fournies par l'UMR Dijon

Le jeu de données fourni par l'UMR Dijon comporte les données moyennes journalières d'ETP Penman et de précipitations à raison d'une valeur journalière par bassin versant modélisé.

Ces valeurs ont été définies par interpolation puis intégration sur chacun des bassins versants à partir des données pluviométriques figurant dans le tableau de l'illustration 60. Les différentes stations utilisées sont localisées sur l'illustration 58.

NumPoste	NOM DE LA STATION	longitude	latitude	alt	index_bassins	names_bassins	names_stations HYDRO	index_grid
21142001	Chanceaux	4.7183	47.5183	462	16	SEINE	Nod_sur_Seine	10185
21308001	Grignon	4.4067	47.5600	335	1	ARMANCON	Aisy_sur_Armancon	9196
21308001	Grignon	4.4067	47.5600	335	2	ARMANCON	Brienon_sur_Armancon	9196
21308001	Grignon	4.4067	47.5600	335	6	BRENNE	Montbard	9196
21349001	Liernais	4.2833	47.2067	492	3	ARROUX	Dracy_Saint_Loup	8746
21349001	Liernais	4.2833	47.2067	492	4	ARROUX	Rigny_sur_Arroux	8746
21386001	Marigny	4.4583	47.4633	310	1	ARMANCON	Aisy_sur_Armancon	9303
21386001	Marigny	4.4583	47.4633	310	2	ARMANCON	Brienon_sur_Armancon	9303
21386001	Marigny	4.4583	47.4633	310	6	BRENNE	Montbard	9303
21519001	Recey	4.8633	47.7817	328	12	OURCE	Leuglay	10633
21589001	Recey	4.9617	47.4683	554	9	IGNON	Villecomte	10954
21589001	Recey	4.9617	47.4683	554	18	TILLE	Arceau	10954
21589001	Recey	4.9617	47.4683	554	19	TILLE	Champdotre	10954
39177001	Crancot	5.6600	46.6900	509	15	SEILLE	Saint_Usuge	13240
39199001	Domblans	5.5983	46.7633	253	15	SEILLE	Saint_Usuge	13023
39362001	Lons le Saunier	5.5167	46.6917	298	15	SEILLE	Saint_Usuge	12801
71029001	Bellevsre	5.3650	46.8400	190	15	SEILLE	Saint_Usuge	12255
71320001	Mont St Vincent	4.4767	46.6267	602	5	BOURBINCE	Vitry_en_Charollais	9389
89005001	Ancy le Franc	4.1617	47.7767	180	2	ARMANCON	Brienon_sur_Armancon	8433
89418001	Tonnerre	3.9767	47.8667	137	2	ARMANCON	Brienon_sur_Armancon	7775

Illustration 59 – Stations pluviométriques ayant servi à la détermination des précipitations journalières moyennes sur les différents bassins versants modélisés.

Facteur correctif sur les pluies et sur l'ETP

La pluviométrie étant un index, afin de permettre un meilleur calage, ce paramètre d'ajustement a été laissé libre de fluctuer entre +/- 5% autour de cette valeur moyenne. Pour l'ETP le paramètre d'ajustement a été laissé libre de fluctuer entre +/- 10% autour de la valeur d'ETP de la station la plus proche.

Prélèvements

L'absence de prélèvement significatif était une des contraintes pour le choix des bassins versants à modéliser. Il n'y a donc pas de bassin versant nécessitant une simulation des prélèvements.

4.4. CALAGES DES MODELES SUR LE TEMPS PRESENT (1981-2010)

C'est la phase de calage, sur les observations, qui permet d'obtenir la fonction de transfert, entre la pluie, le niveau piézométrique et le débit. Cette phase de calage du modèle est réalisée automatiquement par le logiciel Gardénia sous contrôle de l'utilisateur.

La modélisation, avec Gardénia des relations pluie/débit, pluie/niveau ou pluie/niveau/débit fait intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies et des débits (ou/et des niveaux). Les paramètres de calage sont optimisés afin de simuler au mieux les débits d'étiage et/ou les niveaux piézométriques sur la période commune de suivi et ainsi obtenir un coefficient d'ajustement maximal, ceci sans volonté d'expliquer physiquement les paramètres.

Chaque bassin versant a donné lieu à plusieurs essais de calage réalisés avec les deux jeux de données climatiques présentés au paragraphe précédent.

Le tableau (illustration 61) présente les principaux résultats obtenus sur la période 1981-2010 pour les différents bassins versants. On constate ainsi que les coefficients d'ajustement obtenus sont relativement bons pour les deux jeux de données (coefficient moyen de Nash de 0.8 soit un coefficient d'ajustement voisin de 0.9). On notera toutefois que les ajustements :

- sur les débits sont généralement meilleurs que ceux sur les niveaux,
- avec le jeu de données de l'UMR Dijon, (spatialisation de la pluie et ETP) les coefficients sont améliorés.

Les calages retenus seront donc ceux réalisés avec les données fournies par l'UMR Dijon, c'est-à-dire à partir des données climatologiques spatialisées puis intégrées pour chacun des bassins versants simulés.

Les graphiques résultant des calages retenus permettant une comparaison visuelle entre valeur observée/valeur simulée sont fournis en annexe. Les coefficients d'ajustement (R) figurent sur ces graphiques.

Ils varient pour :

- les débits entre 0.857 (l'Ource) et 0.944 (Tille),
- les niveaux entre 0.822 (l'Ource) et 0.96 (La Seille),

Les débits sont d'une manière générale mieux simulés que les niveaux piézométriques.

Par ailleurs l'examen de ces tracés permet de réaliser quelques commentaires.

Le piézomètre 04051X0007/S, utilisé pour les modélisations de la Brenne, de l'Ource et de la Seine, pourrait ne pas être assez profond et qu'ainsi, il ne permette pas, ou plus, de mesurer des niveaux inférieurs à la cote 209.15 NGF. Même si cela semble moins net, c'est peut être aussi le cas du piézomètre 05213X0018/P1 utilisé pour la modélisation de la Nièvre d'Arzembois. Ces piézomètres ont été, malgré cela, retenus par suite de la mauvaise qualité ou de la période d'observation trop courte des ouvrages supplétifs. Les débits maximums observés de la Guye à Sigy semblent bien trop réguliers pour être naturels et/ou corrects. Il est probable que cela ait faussé le calage et la modélisation des niveaux piézométriques simulés pour lesquels on observe une tendance continue à la baisse.

Typologie des bassins versants de la Bourgogne et modélisation hydrologique globale - Projet HYCCARE

Dept.	BV	géologie	Piézomètres	Calage avec un poste (Pluvio et ETP)				Calage avec interpolation des postes (Pluvio et ETP)			
				Nash débit	Nash piézo	Pluie	ETP	Nash débit	Nash piézo	Pluie	ETP
21	L'Ignon à Villecomte	calcaire jurassique	04398X0002/SONDAG	0.797	0.87	933	823	0.841	0.867	949	691
21	La Brenne à Montbard	calcaire jurassique	04051X0007/S	0.835	0.805	883	823	0.89	0.783	926	702
21	La Seine à Nod-sur-Seine	calcaire jurassique	04051X0007/S	0.826	0.757	1002	823	0.859	0.753	985	665
21	La Tille	calcaire jurassique (situation karstique)	04398X0002/SONDAG	0.823	0.872	967	823	0.878	0.869	933	709
21		sédiments récents	04398X0002/SONDAG	0.869	0.891	886	823	0.891	0.9	885	732
21	L'Ource à Leuglay	calcaire jurassique, karstifié	04051X0007/S	0.872	0.81	927	728	0.734	0.677	914	710
58	Le Nohain à Saint-Martin sur Nohain	calcaire jurassique	04644X0002/PUITS	0.624	0.794	900	808	0.863	0.882	796	720
58	La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux	calcaire jurassique	05213X0018/P1	0.792	0.545	957	734	0.803	0.584	950	688
58	L'Houssière à Chaumard	socle métamorphique	04973X0005/PZ1	0.832	0.805	1368	823	0.861	0.805	1313	652
58	La Guye à Sigy le Chatel	calcaire jurassique socle métamorphique	06252x	0.794	0.67	818	771	0.828	0.856	780	673
58	L'Yonne à Corancy	socle métamorphique et plutonique	04973X0005/PZ1	0.776	0.736	1368	823	0.785	0.743	1350	658
71	La Selle à la Celle en Morvan	permien et socle granitique	06241X0016/P	0.861	0.726	1368	823	0.874	0.736	1249	705
71	La Seille à Saint-Usuge	sédiments récents	05811X0159/F2	0.741	0.891	1138	839	0.787	0.92	1141	802
71	L'Arroux	socle métamorphique, grès triasiques et	06241X0016/P	0.796	0.4	853	823	0.817	0.741	847	675
71			06241X0016/P	0.848	0.55	969	734	0.815	0.805	999	678
71	Bourbince à vitry en charollais	calcaire jurassique socle métamorphique	06241X0016/P	0.752	0.773	895	734	0.805	0.792	889	705
89	L'Armançon	craie crétacé, calcaires jurassiques	04661x0002/s1	0.81	0.71	805	755	0.85	0.738	889	696
89			04661x0002/s1	0.835	0.733	883	781	0.863	0.743	914	710
89	Le Serein à Chablis	calcaire jurassique, karstifié	04973X0005/PZ1	0.684	0.8	921	794	0.867	0.824	884	730

Illustration 60 - Coefficients d'ajustement ($Nash=R^2$) des calages réalisés avec les deux jeux de données climatiques sur la période 1981-2010

4.5. EXPLOITATION DES RESULTATS SUR 1981-2010

4.5.1. Bilans hydrologiques

Le tableau (illustration 62) fournit les résultats des modélisations réalisées sur la période 1980-2010 avec les différents termes du bilan.

Les différentes colonnes indiquées dans le tableau sont :

- Département, Cours d'eau, nom de la station,
- Puis, sur la période 1980-2011, la valeur moyenne interrannuelle des variables suivantes:
 - Les précipitations,
 - l'évapotranspiration réelle,
 - la pluie efficace,
 - l'écoulement rapide,
 - l'écoulement lent et très lent qui pourrait être assimilé à de l'écoulement souterrain*,
 - le pourcentage de l'écoulement lent /écoulement total.

* Cette assimilation n'est pas automatique et va dépendre fortement du pas de temps des données, de la taille du bassin versant et du type d'aquifère. En effet, dans un système karstique ou fortement fissuré l'écoulement peut être rapide et pourtant c'est de l'eau souterraine. A l'inverse, pour un petit bassin versant, si le pas de temps de calcul est journalier une partie du ruissellement peut être considéré comme « écoulement souterrain ».

4.5.2. Evapotranspiration Réelle

La carte de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle calculée par modélisation au pas de temps journalier sur la période 1981-2010 est reportée sur l'illustration 63. Les bilans réalisés, au droit des stations modélisées, font apparaître une augmentation de l'ETR vers le sud et en fonction de l'altitude (Est-Ouest).

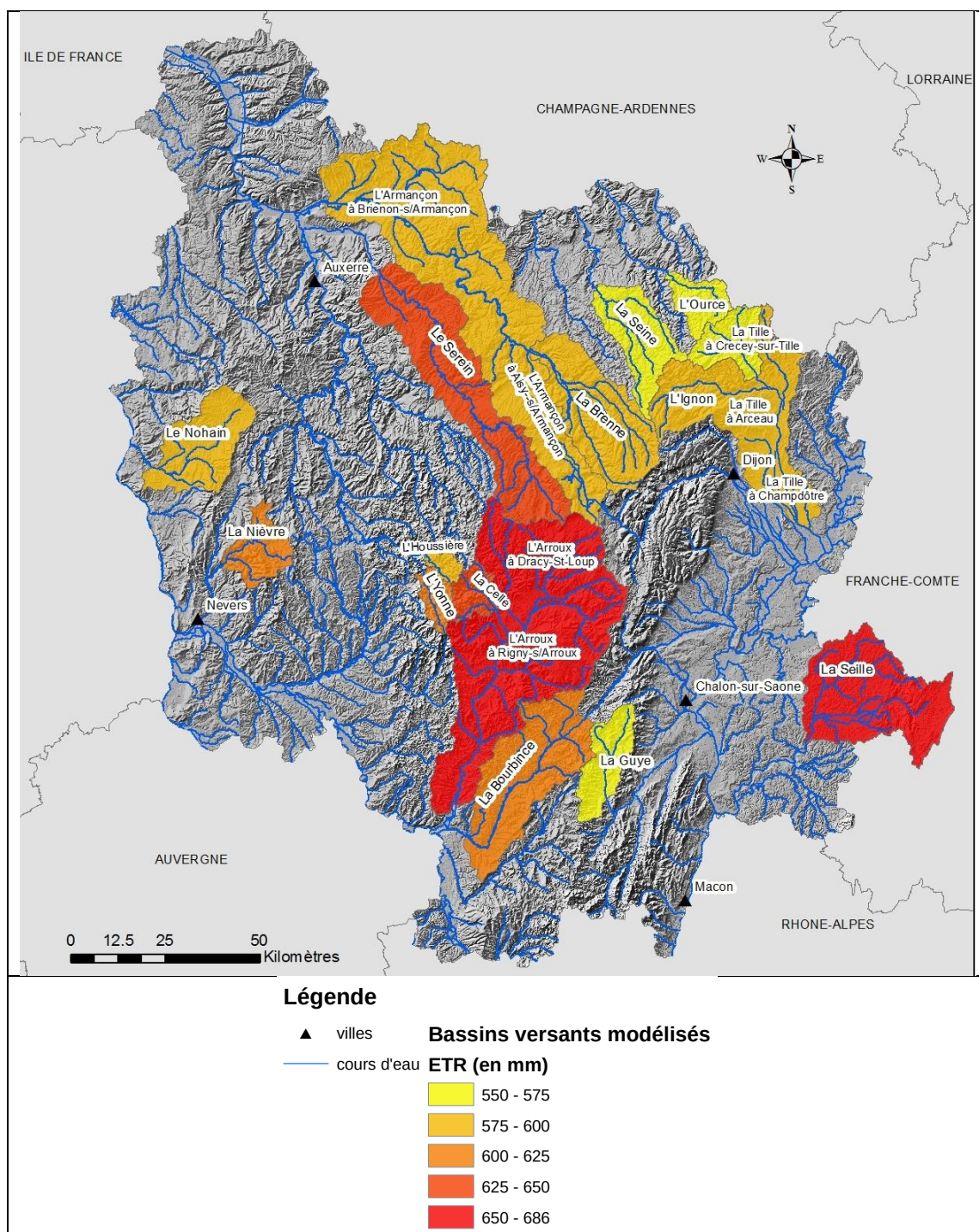


Illustration 61 - Cartographie de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle calculée par modélisation au pas de temps journalier sur la période 1981-2010

4.5.3. Pluie efficace

L'illustration 64 permet de visualiser la valeur de Pluie efficace moyenne interannuelle au droit des différents bassins versants modélisés durant la période 1981/2010.

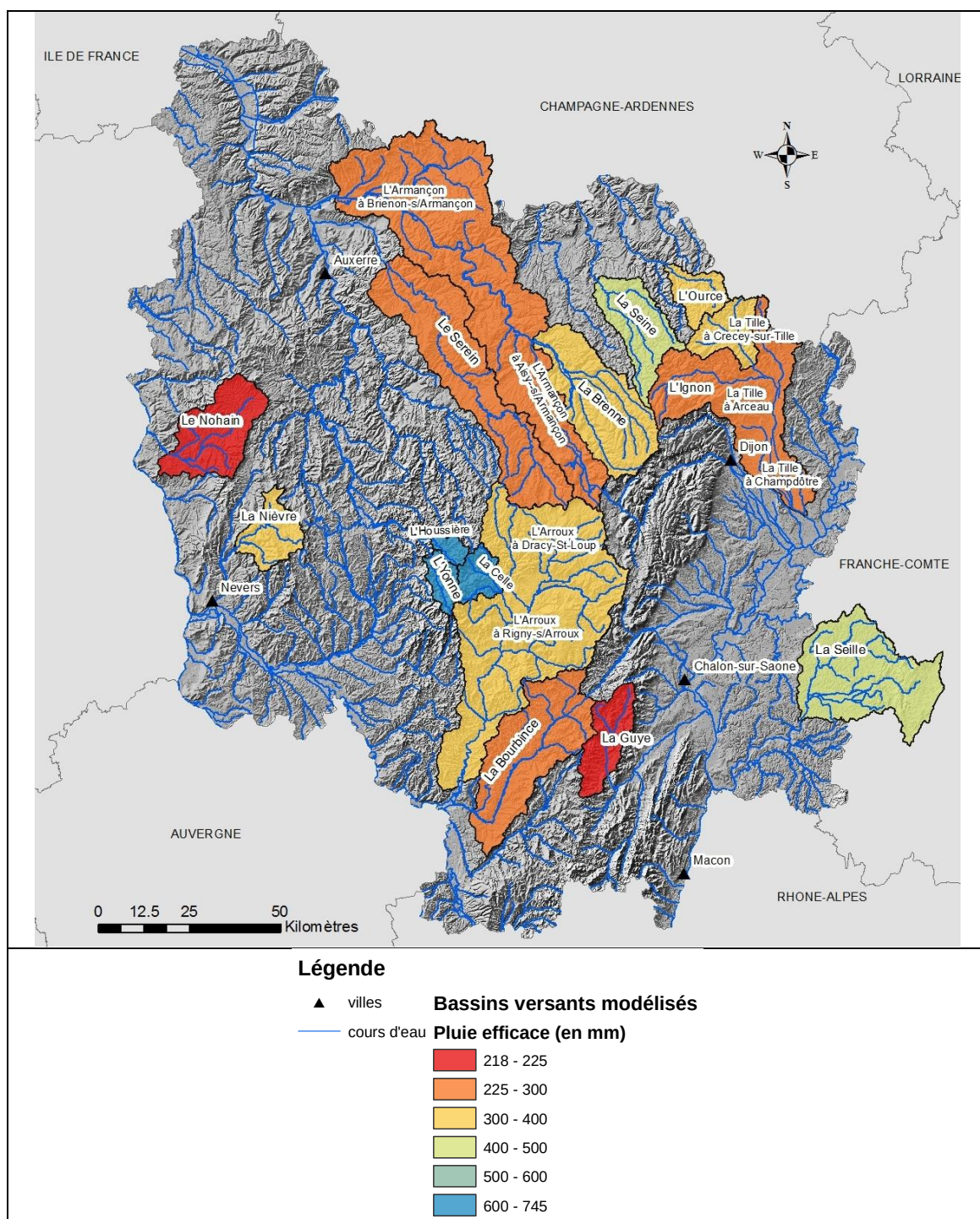


Illustration 62 - Cartographie de la pluie efficace moyenne interannuelle calculée par modélisation au pas de temps journalier sur la période 198-2010.

4.5.4. Recharge des aquifères

Par suite de la difficulté inhérente au contexte particulièrement fissuré et fracturé des différents bassins versants, il ne nous est pas apparu pertinent de vouloir se baser sur la répartition ruissellement/recharge fournie par la modélisation pour évaluer la recharge réelle des aquifères.

Dept.	BV	station	Pluie	ETR	Pluie_Effic	Q_rapide	Q_lent	Q_tres lent	Dif_Stock	%Q_lent
21	L'IGNON	Villecomte	949	615	334	328	6	0.0	0.4	1.7
21	La Brenne	Montbard	926	585	341	32	200	108.3	0.6	90.6
21	La Seine	Nod sur Seine	985	571	414	382	32	0.1	0.5	7.7
21	La Tille	Crecey	933	575	358	351	7	0.1	0.5	1.9
21		Champdotre	885	593	292	283	9	0.1	1.1	2.9
21		Arceau	875	591	283	276	6	0.1	0.9	2.2
21	L'Ource	Leuglay	913	567	346	335	10	0.0	0.7	3.0
58	Le Nohain	Saint Martin	795	576	219	67	136	16.0	-0.1	69.6
58	La Nièvre Arzembouy	Poiseux	950	620	330	325	5	0.0	0.2	1.5
58	L'Houssière	Chaumard	1313	596	717	696	21	0.8	0.1	3.0
58	La Guye	Sigy le Chatel	776	557	219	148	58	13.5	-0.7	32.7
58	L'Yonne	Corancy	1350	604	746	724	21	0.6	0.3	2.9
71	La Selle	Celle en Morvan	1243	626	617	592	20	4.0	0.9	3.8
71	La Seille	Saint Usage	1141	686	455	445	8	1.1	0.3	2.1
71	L'Arroux	Dracy	847	585	261	257	3	0.9	0.8	1.6
71		Rigny	999	675	324	210	72	41.2	0.1	35.1
71	Bourbince	Vitry en Charollais	894	623	271	123	84	63.5	0.6	54.5
89	L'Armançon	Aisy	910	604	306	71	231	2.6	0.9	76.6
89		Brienon	889	594	294	266	27	0.1	0.9	9.3
89	Le Serein	Chablis	884	625	258	236	22	0.0	1.0	8.5

Illustration 63 - Bilans en mm des modélisations sur la période 1981-2010

4.6. EXPLOITATION DES DEBITS SIMULES

Les différentes modélisations ont permis de simuler les débits et niveaux piézométriques sur une période d'environ 30 ans (hors période d'initialisation).

Ces débits simulés ont été ensuite utilisés pour effectuer des ajustements statistiques suivant une loi racine Gauss (la racine des valeurs suivant une loi de Gauss) afin d'estimer :

- Le QMNA5 des débits moyens mensuels,
- Le VCN10 de période de retour 5 ans.

L'illustration 65 présente les résultats obtenus au droit des différentes stations modélisées. Figurent dans ce tableau pour rappel et afin de les comparer :

- la période de mesure des débits observés ayant servi au calage mais également à la détermination des valeurs fréquentielles de la banque HYDRO,
- les principaux débits caractéristiques de ces stations : module, QMNA5, VCN10, VCN3 figurant dans la banque hydro

Ce tableau permet de constater que sur 20 stations modélisées :

- Les écarts sur les modules sont relativement faibles (17 stations, écart $\leq 10\%$) voire très faibles (pour 12 stations, écart $\leq 5\%$), l'écart sur le module dépassant les 10% pour seulement 3 stations,
- Les écarts sur le QMNA5 ou sur le VCN10 sont nettement plus conséquents. Ils varient entre 0 et 1400% avec une moyenne de 13% si l'on accepte les deux valeurs les plus fortes (l'Ignon et la Tille à Arceau). Il convient toutefois de relativiser cette notion de pourcentage notamment pour les faibles valeurs d'étiage qui sont associées aux plus fortes incertitudes. Aux incertitudes, directement dépendantes de la qualité de la station de mesure, s'ajoutent les perturbations dues à d'éventuels prélèvements ainsi que les erreurs d'échantillonnage dues à des périodes de traitement entre simulations et banque hydro qui peuvent être différentes.
- Les valeurs du VCN10 de période de retour 5 ans sont légèrement inférieures, d'environ 20%, aux valeurs du QMNA5.

ID	cours d'eau - station	numéro	VALEURS ISSUES DE LA BANQUE HYDRO							Série simulée (1981-2010)			Ecart sur QMNA5	Ecart sur VCN10	Ecart sur module
			superficie (km2)	période disponible	Module	QMNA5	VCN10 (médian)	VCN3 (médian)	VCN10 (1/5)	Module	QMNA5	VCN10 (5ANS)			
18	L'Armancon a Aisy-sur-Armancon [aval]	H2452020	1350	1989-2015	12.70	0.70	0.88	0.71	0.49	13.2	0.21	0.07	-70%	-48%	4%
1	L'Armancon a Briennon-sur-Armancon	H2482010	2982	1967-2015	29.10	2.90	3.70	3.40	2.3	27.7	1.97	1.58	-32%	-19%	-5%
6	L'Arroux a Dracy-Saint-Loup [Surmoulin]	K1251810	776	1984-2015	6.30	0.20	0.23	0.20	0.13	6.42	0.18	0.14	-10%	4%	2%
3	L'Arroux a Rigny-sur-Arroux	K1341810	2277	1967-2015	27.60	1.40	1.50	1.30	0.84	23.3	1.3	1.05	-7%	14%	-15%
2	La Bourbince a Vitry-en-Charollais	K1383010	819	1967-2015	7.78	1.00	1.10	0.90	0.81	7.04	0.6	0.49	-40%	-29%	-10%
17	La Brenne a Montbard	H2442340	732	1988-2015	8.14	0.38	0.47	0.42	0.28	7.9	0.07	0.03	-82%	-53%	-3%
4	La Guye a Sigy-le-Chatel [Corcelles]	U3225010	272	1970-2015	2.09	0.11	0.15	0.13	0.079	1.92	0.16	0.15	45%	48%	-8%
10	L'Houssiere a Chaumard	H2013010	60	1990-2015	1.54	0.20	0.21	0.18	0.14	1.36	0.16	0.13	-20%	-5%	-12%
15	L'Ignon a Villecomte	U1215030	304	1986-2015	3.34	0.008	0.020	0.015	0.002	3.22	0.12	0.09	1400%	440%	-4%
9	La Nievre d'Arzemboou a Poiseux [Poisson]	K1954010	224	1984-2015	2.40	0.23	0.24	0.23	0.18	2.34	0.08	0.06	-65%	-50%	-3%
13	Le Nohain a Saint-Martin-sur-Nohain [Villiers]	K4094010	473	1969-2015	3.38	1.00	1.38	1.33	0.91	3.28	0.96	0.9	-4%	-1%	-3%
20	L'Ource a Leuglay [Froidvent]	H0301010	173	1985-2015	2.02	0.13	0.17	0.15	0.1	1.89	0.12	0.1	-8%	0%	-6%
5	La Seille a Saint-Usuge	U3424010	937	1968-2015	13.80	1.20	1.29	1.14	0.92	13.5	0.61	0.44	-49%	-37%	-2%
19	La Seine a Nod-sur-Seine	H0100010	371	1968-2015	4.62	0.43	0.54	0.50	0.35	4.86	0.37	0.29	-14%	-11%	5%
7	La Selle a la Celle-en-Morvan [Polroy]	K1284810	138	1969-2015	3.00	0.25	0.25	0.20	0.17	2.72	0.24	0.19	-4%	8%	-9%
21	Le Serein a Chablis [Pont de la deviation]	H2342020	1119	1954-2015	7.84	0.21	0.32	0.30	0.17	9.14	0.38	0.32	81%	47%	17%
14	La Tille a Arceau [Arcelot]	U1224010	846	1966-2015	7.24	0.12	0.18	0.16	0.089	7.57	0.45	0.37	275%	156%	5%
11	La Tille a Champdotre	U1244040	1258	1967-2015	11.10	0.55	0.94	0.84	0.4	11.6	0.84	0.7	53%	32%	5%
16	La Tille a Crecey-sur-Tille	U1204010	231	1970-2015	2.72	0.13	0.14	0.16	0.084	2.62	0.15	0.12	15%	26%	-4%
8	L'Yonne a Corancy	H2001020	106	1990-2015	2.77	0.54	0.53	0.47	0.39	2.5	0.37	0.31	-31%	-15%	-10%

Illustration 64 - informations de base et caractéristiques d'étiage collectées auprès de la banque « Hydro » et comparaison avec les valeurs des séries simulées sur 1981-2010 aux différentes stations en m³/s.

4.7. LIMITES D'UTILISATION DES MODELES

Si les caractéristiques physiques des bassins versants modélisés changent (extension des réseaux de drainage, couverture végétale, ...) et si les prélèvements sont sensiblement modifiés, l'utilisation du modèle sera faussée. En effet, pour ces modèles, les paramètres issus du calage dépendent des caractéristiques du bassin et des activités qui s'y déroulent. Si ces caractéristiques changent, le modèle ne sera plus calé.

Par ailleurs, la mauvaise connaissance des volumes prélevés et/ou de la répartition temporelle de ces prélèvements peut nuire fortement à la modélisation notamment des étiages

L'amélioration des estimations des contributions des eaux souterraines au débit des rivières (« Part lente ») ou des impacts des prélèvements passe donc obligatoirement par l'amélioration et la disponibilité en temps opportun de l'ensemble des données nécessaires à la modélisation.

4.8. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

4.8.1. Présentation

Une fois calés, les modèles peuvent être exploités à des fins de prévision. Les scénarii à simuler sont alors fonction des objectifs assignés au départ à l'étude :

- évaluation de l'impact de scénarios climatiques,
- recherche d'une configuration optimale de prélèvements permettant de respecter des contraintes,
- prévision d'un état piézométrique face à une demande en eau accrue,
-

Dans le cadre de cette étude, il s'agissait d'évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau des différents bassins versants. Il a été considéré que les caractéristiques du bassin versant telles que caractéristiques des sols, coefficients cultureux, occupation du sol restaient identiques et que seules les données climatologiques d'entrée, précipitations et l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), étaient modifiées.

4.8.2. Méthodologie de la démarche d'évaluation

Par bassin versant simulé, la démarche consiste alors à :

- Vérifier que les facteurs climatologiques (pluie et ETP) générés par le modèle climatique sur la période commune à la période observée (1981/2010) sont statistiquement proches des valeurs observées,
- Simuler les débits et/ou les niveaux piézométriques sur la période totale 1981-2098,
- Vérifier que ces débits et/ou niveaux sont, sur la période commune à la période observée (1981/2010), statistiquement proches des valeurs observées,
- Evaluer l'évolution, par palier ou en continu, de ces débits et/ou niveaux piézométriques simulés entre la période 1981-2010 et la période 2011-2098. Cette évolution peut être considérée comme l'impact du changement climatique sur les débits et /ou niveaux actuels,

- Appliquer cette évolution aux ressources évaluées à partir des valeurs observées pour obtenir une évaluation des ressources sur la période 2011-2098.

4.8.3. Analyse des données d'entrée et des valeurs obtenues par simulations

Ces données d'entrée nous ont été fournies par l'UMR Dijon au pas de temps journalier sur la période 1981-2098. Elles consistaient en des séries de données de pluie et ETP journalières provenant du modèle hydroclimatique, intégrées sur la superficie de chacun des bassins versant à modéliser.

L'analyse des données transmises montre :

- Une nette augmentation de l'ETP qui provient essentiellement de l'augmentation de la température. Cette augmentation était attendue puisque c'est l'un des premiers paramètres mis en évidence et évalué, suivant le scénario, comme subissant une augmentation comprise entre +2 et +3.5°C dans le cadre du changement climatique,
- Une augmentation de la pluviométrie qui, si elle n'est pas intrinsèquement surprenante en quantité annuelle, elle l'est, a contrario, par sa répartition. En effet, contrairement à d'autres études déjà réalisées, non seulement la quantité globale de précipitations augmenterait mais le nombre de jours de pluie et la quantité augmenteraient aussi et ce quelle que soit la saison.

Les données simulées par les modélisations hydrologiques sur la période 2010-2098 ne seront pas traitées dans ce rapport et feront l'objet d'une note complémentaire, à accès restreint, destinée uniquement à l'usage d'ALTERRE Bourgogne.

5. Analyses et spatialisation

L'objectif de ce chapitre est de tenter de spatialiser les données simulées à l'ensemble de la zone d'étude en utilisant des corrélations avec les indicateurs hydro-géomorphologiques. Ces indicateurs sont décrits dans le chapitre 3. Les résultats de modélisation utilisés dans cette approche sont ceux de la période actuelle (1981 – 2010).

5.1. ANALYSES DES DONNEES DE DEBITS

Avant de rechercher d'éventuelles corrélations, il est nécessaire d'analyser les valeurs des débits moyens interannuelles et les QMNA5, afin d'écarter les bassins versants avec des valeurs extrêmes et de contrôler la pertinence de l'ensemble des résultats.

5.1.1. Les débits moyens

Pour caractériser le fonctionnement hydrologique du bassin versant, on utilise fréquemment les débits moyens mensuels ou annuels d'une station de jaugeage et leurs valeurs moyennes sur toute la période d'observation. Le débit moyen interannuel est souvent appelé « module ». Les résultats de la modélisation (chapitre 4) ont permis de qualifier 20 bassins versants de la zone d'étude. Pour densifier les données disponibles, les modules ont été complétés par ceux issus des stations hydrologiques disponibles dans les bassins non modélisés. Ce travail a permis d'ajouter 23 nouveaux bassins versants au 20 déjà modélisés. L'illustration 66 présente ces 43 bassins versants avec les valeurs des modules spécifiques (rapportées à la surface de chaque bassin versant).

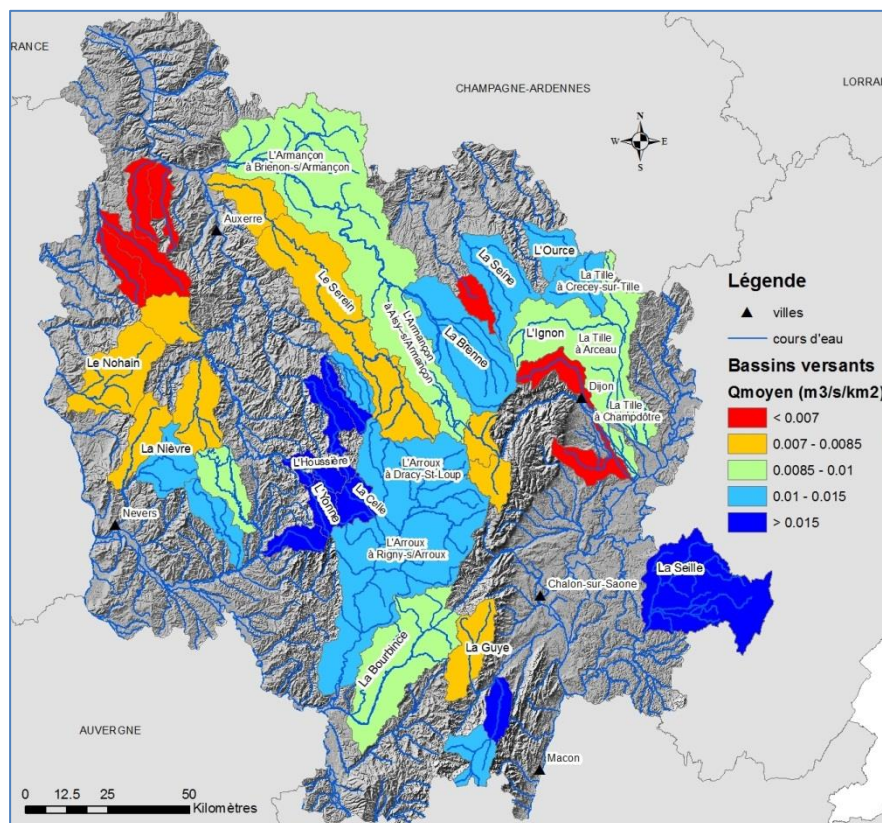
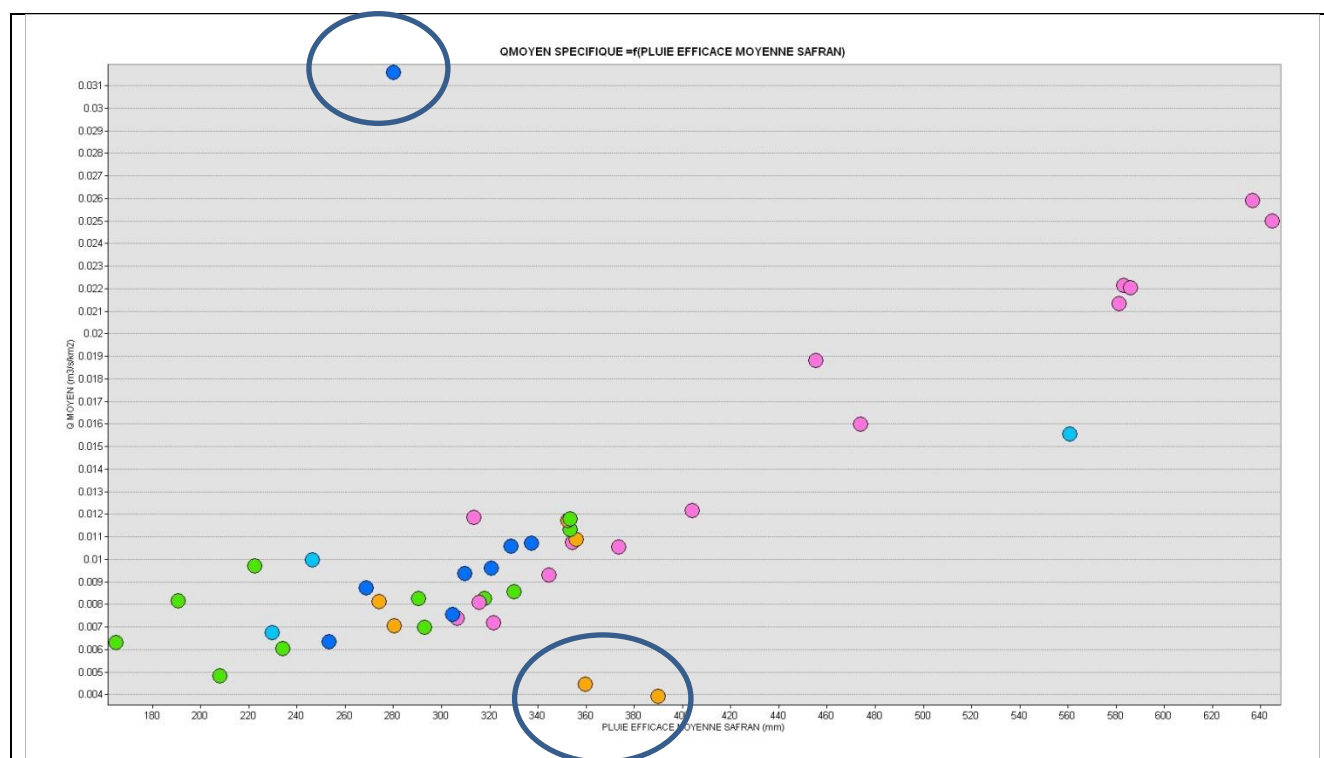


Illustration 65 – Débits moyens interannuels spécifiques pour les 43 bassins versants retenus

Pour analyser la cohérence des résultats, les données simulées du module spécifiques ont été comparées aux pluies efficaces moyennes SAFRAN de la même période. Les résultats de cette corrélation sont présentés dans le graphique de l'illustration 67.



Les données ponctuelles sont représentées par classe de typologie de fonctionnement décrite dans le chapitre 3. Légende Bassins versants Classe 1 4 5 21 22	<i>Illustration 66 – Qmoyen spécifique en fonction de la pluie efficace moyenne (Safran) et par classe de typologie de fonctionnement.</i>
--	---

La corrélation entre les deux paramètres est bonne car le débit moyen a la particularité d'intégrer les crues et les étiages.

Trois bassins versants semblent fonctionner de manière totalement différente et seront donc écartés lors des tentatives de corrélations avec les indicateurs spatiaux. Il s'agit en haut du graphe de la Grosne et d'une partie de l'Ouche amont et du ruisseau de Marcenay en bas du graphique. Le manque de corrélation entre les modules spécifiques et la pluie efficace moyenne peut s'expliquer par :

- une consommation d'eau importante par les plantes ;
- une consommation d'eau importante par les prélèvements ;
- et des écoulements non mesurés (karst, nappes, fracturation, ..) par les stations hydrologiques.

En retirant du graphique les trois bassins versants problématiques, on obtient pour une corrélation linéaire un coefficient de détermination R^2 de 0.89.

5.1.2. Le QMNA5

Le QMNA5 défini dans les chapitres précédents permet d'apprécier la sévérité des étiages. Comme les débits moyens, les données simulées des 20 bassins versants ont été utilisées ainsi que les données des stations hydrologiques.

Contrairement aux débits moyens les valeurs du QMNA5 ont pu être recalculées dans le cas où les stations hydrologiques ne correspondaient pas aux exutoires des bassins versants de la zone d'étude. Ces données complémentaires ont permis de renseigner 54 bassins versants et donc de densifier les données pour les tentatives de corrélations. L'ensemble des données sont présentées sur l'illustration 69.

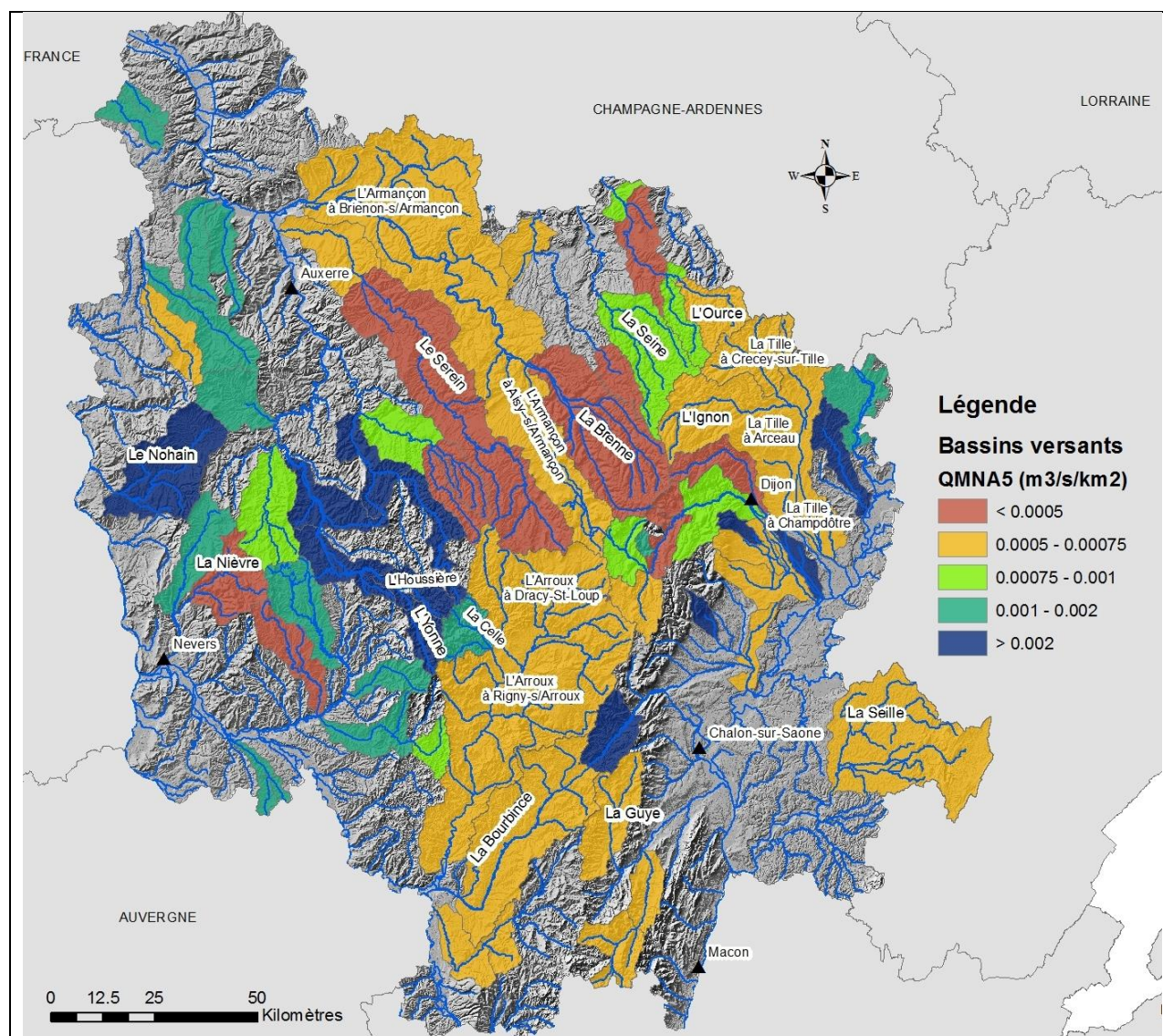
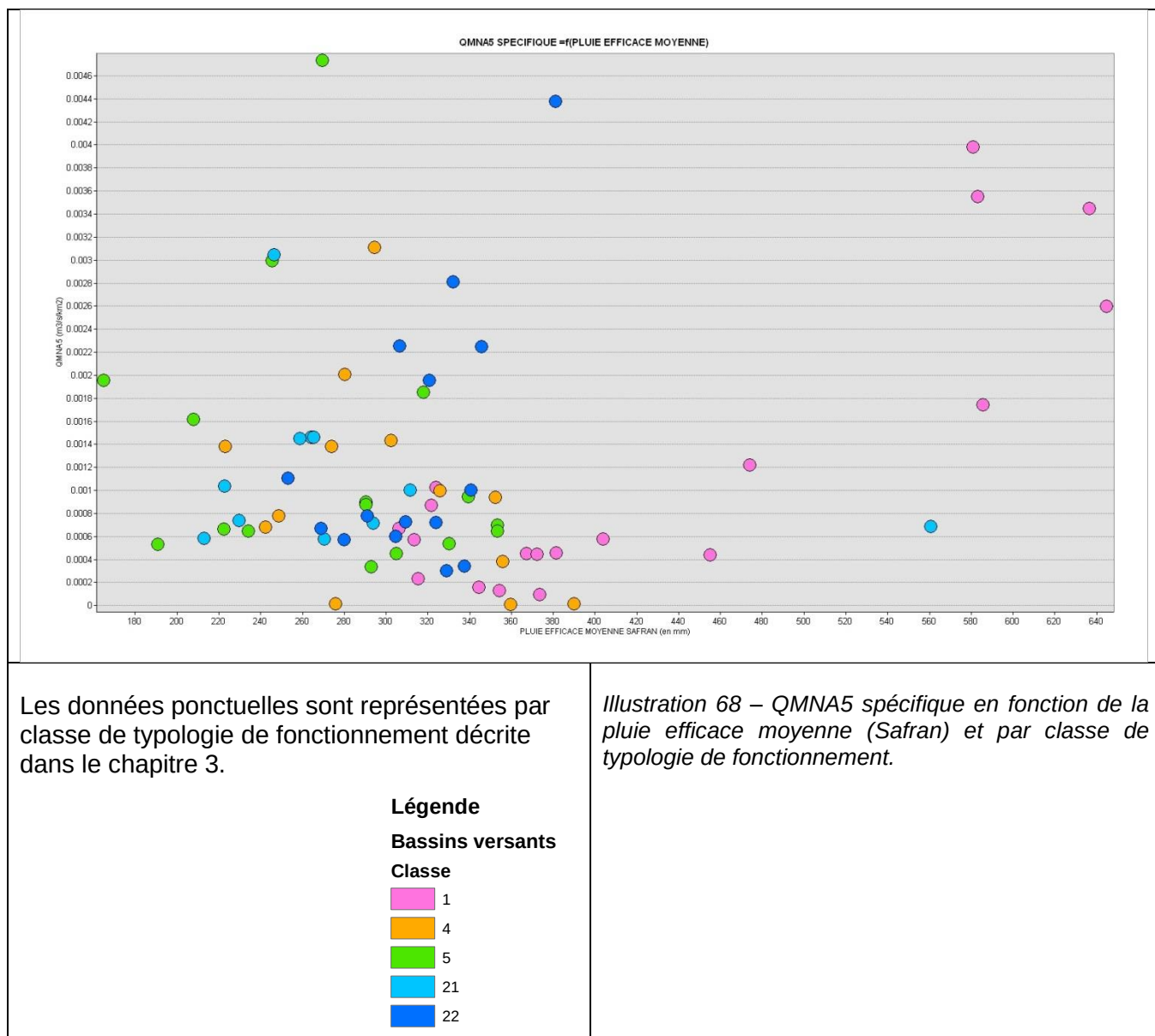


Illustration 67- Répartition des QMNA5 spécifiques (en m³/s/km²) par bassin versant.

Si on compare les QMNA5 spécifiques aux valeurs de pluies efficaces moyennes Safran, on obtient le graphique de l'illustration 69.



Sur le graphique, les bassins versants ne sont pas corrélés entre eux car les QMNA5 ne présentent pas de condition spécifique de répartition. Le nuage de points montre des comportements différents associés à une pluie efficace variable.

5.2. SPATIALISATION

Les données modélisées disponibles sont le QMNA5 et le module pour la période 1981 – 2010 pour les bassins versants présentés dans le paragraphe 5.1. Dans un premier temps, à partir de ces informations, nous avons regardé l'ensemble des bassins versants pour voir s'il existe des corrélations entre ces débits et les indicateurs spatiaux.

L'approche est résumée dans l'illustration 71. On constate qu'il n'y a pas de corrélation évidente entre les indicateurs hydro-géomorphologiques et les débits modélisés et/ou calculés à partir des stations hydrologiques.

Puis dans un second temps, en partant du principe que chaque classe définie par la typologie, permet de caractériser un fonctionnement hydrologique et hydrogéologique, des tentatives de corrélations ont été réalisées pour les six types de bassins versants. La classe 3 ne sera pas traitée car il n'existe pas de valeurs de débits modélisés pour ce type de bassin versant.

5.2.1. Les bassins versants de classe 1

Les bassins versants appartenant à cette classe sont majoritairement localisés en zone de socle (Le Morvan) avec des lithologies de granites, de basaltes... Ils représentent près de 58 % de la classe. Les autres bassins sont tous localisés en bordure de la zone de socle, ils correspondent à des secteurs où il y a une transition avec des lithologies de calcaires, marnes et gypses et dans une moindre mesure avec des sables et des grès.

Après confrontation des différents paramètres, les deux relations trouvées pour cette classe sont les suivantes :

Relation entre le QMNA5 spécifique et la pluie efficace moyenne pour la période 1981 – 2010 (Safran) – 12 bassins versants (illustration 70)

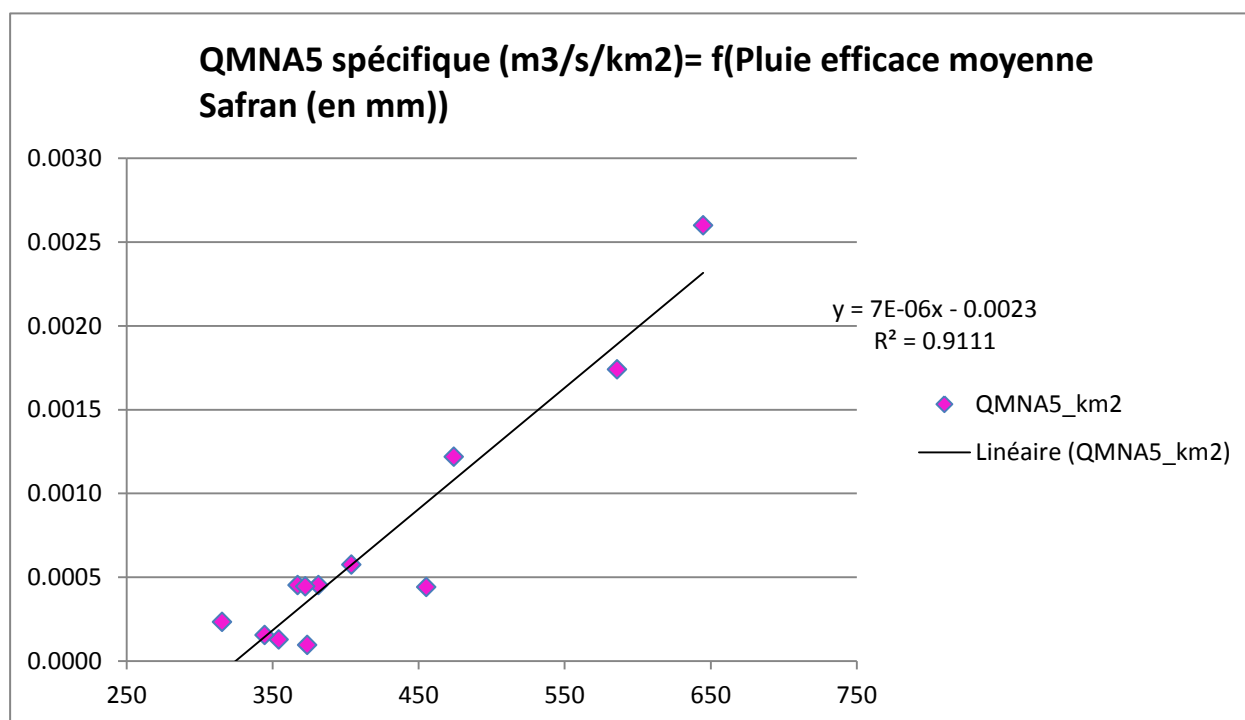


Illustration 69 – Relation entre le QMNA5 spécifique et la pluie efficace moyenne Safran pour les bassins versants de classe 1.

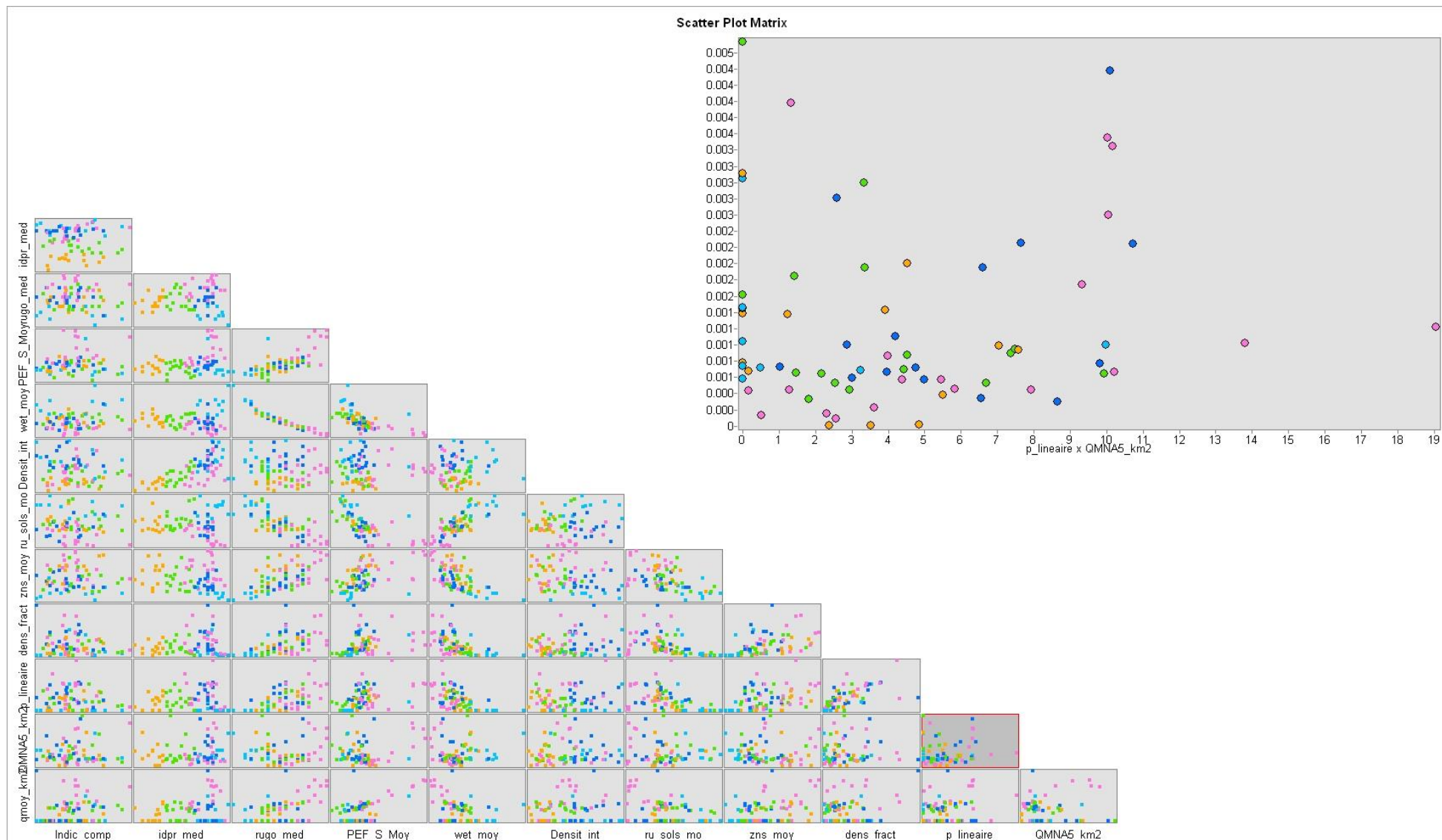


Illustration 70 – Recherche de corrélations entre débits modélisés et indicateurs spatiaux

Cette corrélation montre que pour cette classe, la répartition des pluies efficaces permet de limiter les effets des étiages avec plus de pluies en été que sur les autres secteurs du territoire bourguignon comme le montre l'analyse de la distribution des pluies. Cet effet est accentué par la présence des reliefs du Morvan.

Corrélation entre le QMNA spécifique et le pourcentage de linéaire du réseau hydrographique en lien avec de la fracturation- 12 bassins versants (illustration 72)

La relation entre les deux paramètres est exponentielle, elle concerne 12 bassins versants sur 15 appartenant au panel de cette classe.

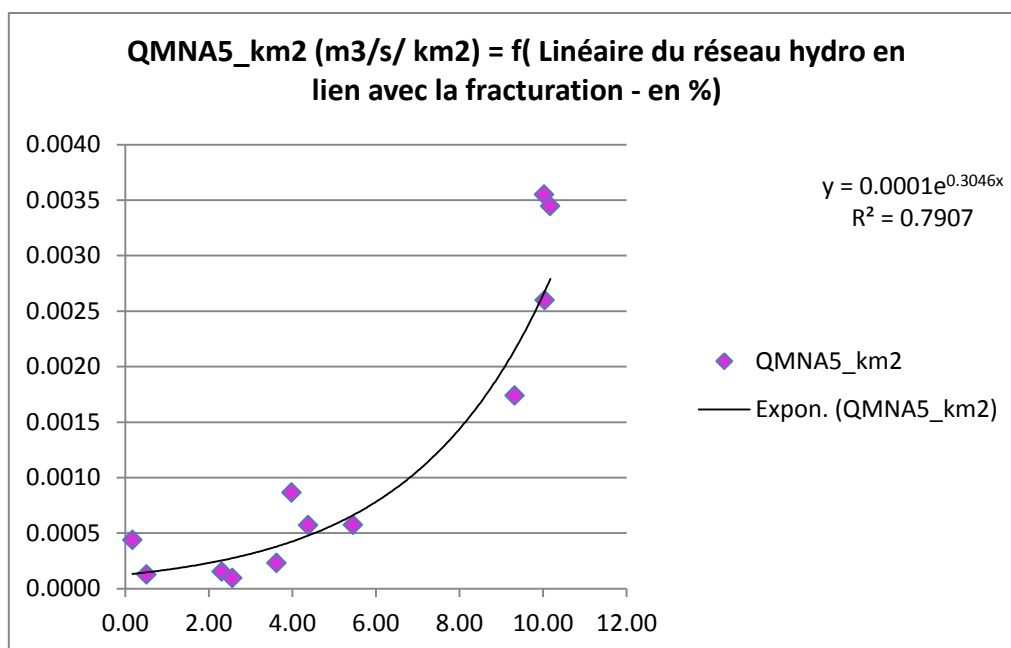


Illustration 71 - Relation entre le QMNA5 spécifique et le pourcentage de linéaire hydrologique affecté par de la fracturation pour les bassins versants de classe 1.

5.2.2. Les bassins versants de classe 2-1

La classe 2 s'articule autour de 3 lithologies avec des bassins versants à dominante « sableux » (44 %), un pôle caractérisé par des « calcaires, des marnes, des gypses » (25 %), et des secteurs composés d'« argiles, de sables et de cailloutis » (16.5 %). La classe 2- 1 est caractérisé par un comportement d'aquifères « sableux » avec un ruissellement important dans le secteur de la Bresse, une réserve utile plus importante et une zone non saturée moins épaisse.

Après traitements, 12 bassins versants de cette classe ont une valeur de QMNA5. Une seule corrélation a été trouvée pour l'ensemble des indicateurs spatiaux.

Corrélation entre le QMNA spécifique et l'épaisseur moyenne de la zone non saturée – 9 bassins versants (illustration 73)

En retirant du graphique les deux bassins versants dont la zone non saturée est la plus importante (supérieure à 40 m), on améliore les résultats et obtient pour une relation de type exponentielle avec un coefficient de détermination R^2 de 0.7487 (plus l'épaisseur de la ZNS est

faible plus le QMNA5 spécifique est grand). Les aquifères sableux du fait de leur proximité avec le réseau de surface semblent jouer un rôle non négligeable dans le soutien des débits pendant les étiages.

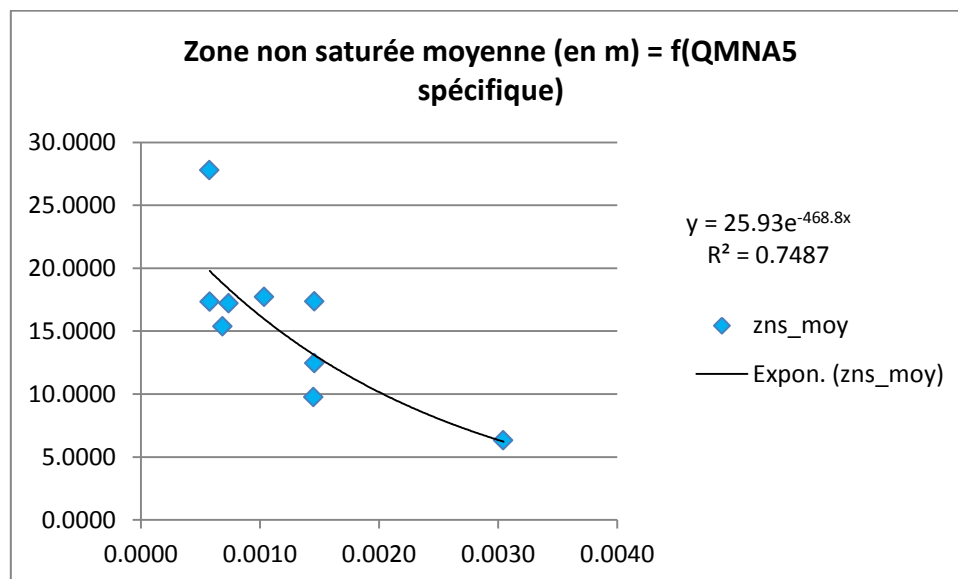


Illustration 72 – Relation entre l'épaisseur de la zone non saturée moyenne (en m) et le QMNA5 spécifique pour les bassins versants de classe 2-1

5.2.3. Les bassins versants de classe 2-2

La lithologie de cette classe est décrite au paragraphe 5.2.2, elle correspond à une fracturation élevée dans les bassins versants de type « calcaires », un relief plus marqué et une densité du réseau hydrographique intermittent plus faible.

Pour cette classe, aucune corrélation n'a été mise en évidence : cela est dû principalement à la complexité de fonctionnement de ces bassins versants karstifiés et fracturés qui rend difficile la compréhension de la répartition des débits d'étiage.

5.2.4. Les bassins versants de classe 4

Les classes 4 et 5 ont la particularité d'avoir des bassins versants avec les mêmes lithologies : « calcaires, marnes, gypse » et la « craie ». Ils sont principalement localisés au Nord du seuil de Bourgogne. Les deux classes sont caractérisées par : une forte infiltration, une rugosité moyenne, une réserve utile du même ordre que les classes 2 et 3, une épaisseur de la zone non saturée relativement élevée et une densité du réseau hydrographique « intermittent » faible.

L'infiltration est le paramètre principal qui différencie ces deux classes, la classe 4 étant plus infiltrante que la classe 5.

Corrélation entre Le QMNA5 spécifique et la rugosité médiane 10 bassins versants - (illustration 74)

Le calcul de « l'indice de rugosité » permet de caractériser les différents types de reliefs. La corrélation montre une relation exponentielle entre les deux paramètres. Plus la rugosité est

forte, plus le QMNA5 est faible. Cette classe est particulière car si on trace le graphique de la relation entre le QMNA5 spécifique et les pluies efficaces moyennes, on constate que les points sont dispersés et qu'il n'y a pas de relation évidente entre les deux paramètres. Néanmoins plus les pluies efficaces sont fortes plus les débits d'étiage sont faibles (illustration 75). Ce genre de courbe montre l'impact de sous écoulements non pris en compte dans les calculs de débits comme de la fracturation ou de la karstification. Cette classe est marquée aussi par des pluies efficaces faibles dont la répartition annuelle peut jouer un rôle sur ces débits.

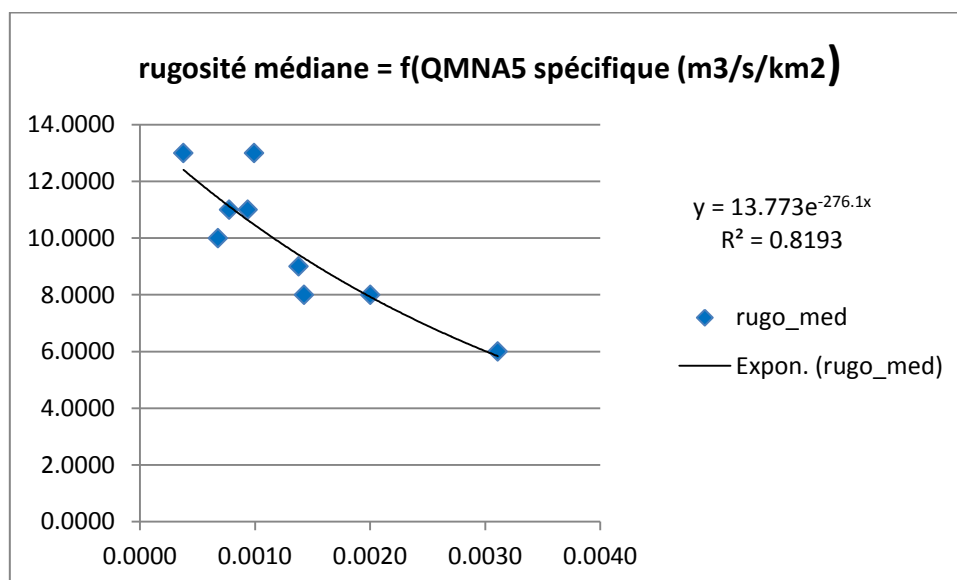


Illustration 73 – Relation entre la rugosité médiane et le QMNA5 spécifique pour les bassins versants de classe 4.

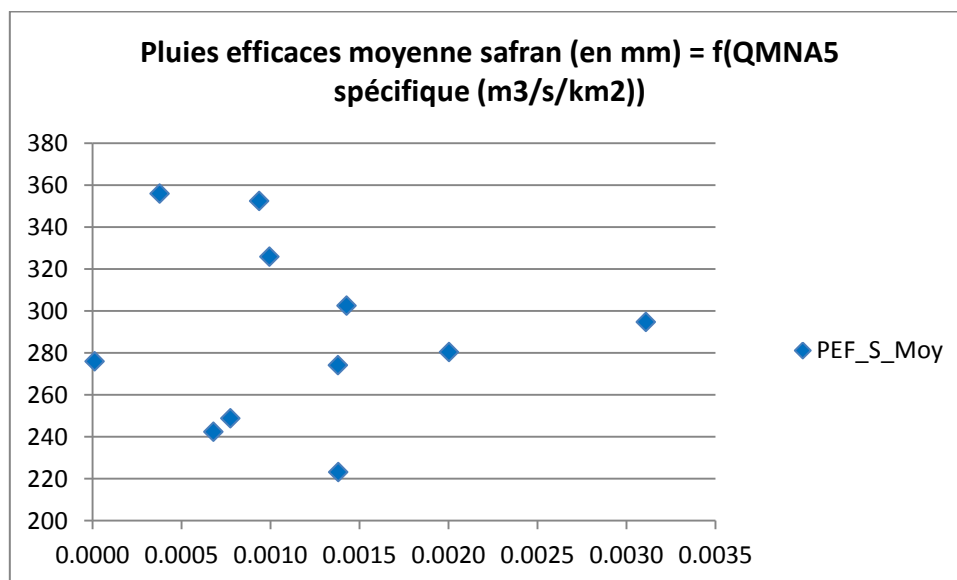


Illustration 74 – Graphique mettant en relation pluie efficace moyenne et QMNA5 spécifique pour les bassins versants de classe 4.

5.2.5. Les bassins versants de classe 5

La lithologie de cette classe est décrite au paragraphe 5.2.4, elle correspond à des bassins versants qui sont moins infiltrants que ceux de la classe 4. Pour cette classe, aucune corrélation n'a été mise en évidence.

Le seul paramètre qui semble interagir avec le QMNA5 spécifique c'est la rugosité médiane. En retirant près de $\frac{1}{4}$ des bassins versants problématiques du graphique, on obtient un résultat moins satisfaisant par rapport aux autres classes (un coefficient de détermination R^2 de 0.6949) comme le montre le graphique ci-dessous.

Corrélation entre Le QMNA5 spécifique et la rugosité médiane 11 bassins versants - (illustration 76)

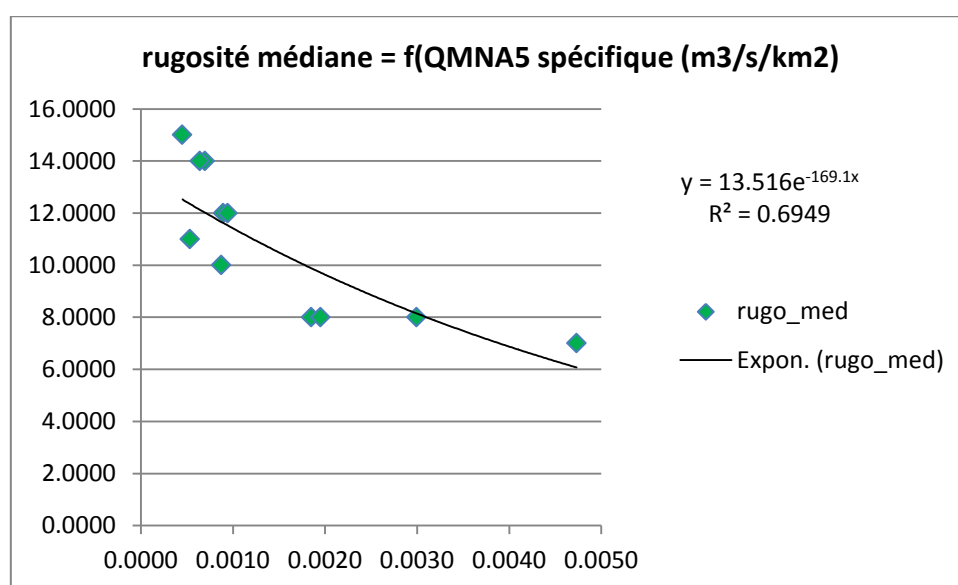


Illustration 75 – Graphique mettant en relation la rugosité médiane en fonction du QMNA5 spécifique pour les bassins versants de classe 5.

Un des objectifs de cette étude était de spatialiser les données simulées à l'ensemble de la zone d'étude en utilisant des corrélations avec les indicateurs hydro-géomorphologiques.

La spatialisation des résultats simulés a reposé uniquement sur la période actuelle limitant les possibilités de corrélation.

Les complexités géologique et hydrogéologique de la zone d'étude, la diversité des bassins versants et le manque de données, ne permettent pas d'aboutir même par classe de typologie de fonctionnement de couvrir l'ensemble de la zone d'étude et de réaliser la spatialisation attendue.

6. Conclusion

L'objectif général du projet Hyccare consistait à mettre à disposition des décideurs locaux les outils qui leur permettront de mieux prendre en compte le risque lié aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau. L'élaboration de connaissances locales permettra à terme de construire avec les différents acteurs des territoires des pistes d'adaptation.

Pour ce projet, la contribution du BRGM proposée s'applique à l'échelle de l'ensemble des bassins versants de la région Bourgogne, et se décompose du point de vue hydrologique en trois phases : l'amélioration d'un modèle de bilan hydrique spatialisé grâce à une typologie et un calcul de recharge sur l'ensemble du territoire bourguignon, la mise en place de la modélisation hydrologique qui simule les débits à l'exutoire d'une vingtaine de bassins versants et l'extension de ces résultats à l'ensemble du territoire à partir des cartes de recharge et des différents indicateurs.

Le calcul des indicateurs morphologiques, ont permis de réaliser une typologie des 283 bassins versants sur la région Bourgogne correspondant pour certains aux stations de la banque Hydro. Cette approche a pour but d'identifier les différentes classes de bassins versants en fonction de leur caractéristiques et de définir des types de comportements.

La typologie des bassins versants a été réalisée à partir d'indicateurs hydrologiques et géomorphologiques. Cette classification des bassins versants de la zone d'étude a permis de mieux comprendre leur fonctionnement et d'améliorer leur connaissance. L'aboutissement de cette approche qualitative est une classification selon 6 grands types de bassins versants montrant :

- l'impact de la fracturation et de la karstification ;
- une distinction très nette de comportements entre les bassins versants sédimentaires et ceux de socle ;
- et des zones de transition entre le sédimentaire et le socle mieux appréhendées avec des nuances sur certaines têtes de bassins versants.

Les différentes modélisations réalisées avec le logiciel GARDENIA ont permis de simuler les débits et niveaux piézométriques sur une période minimale de 30 ans (hors période d'initialisation). Les résultats montrent que sur 20 stations modélisées :

- Les écarts sur les modules sont relativement faibles (17 stations, écart $\leq 10\%$) voire très faibles (pour 12 stations, écart $\leq 5\%$), l'écart sur le module dépassant les 10% que pour seulement 3 stations ;
- Les écarts sur le QMNA5 ou sur le VCN10 sont nettement plus conséquents. Ils varient entre 0 et 1400% avec une moyenne de 13% si l'on excepte les deux valeurs les plus fortes (l'Ignon et la Tille à Arceau). Il convient toutefois de relativiser cette notion de pourcentage notamment pour les faibles valeurs d'étiage qui sont associées aux plus fortes incertitudes.
- Les valeurs du VCN10 de période de retour 5 ans sont légèrement inférieures, d'environ 20%, aux valeurs du QMNA5.

Un des objectifs de cette étude était de spatialiser les données simulées à l'ensemble de la zone d'étude en utilisant des corrélations avec les indicateurs hydro-géomorphologiques. La spatialisation des résultats simulés a reposé uniquement sur la période actuelle limitant les possibilités de corrélation et ne permettant pas d'aboutir même par classe de typologie de fonctionnement à couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Enfin, dans les études de changement climatique déjà réalisées, l'évaluation des changements probables s'est généralement effectuée en utilisant différents modèles climatiques, c'est le cas par exemple dans le projet EXPLORE 2070 commandité par le Ministère en charge de l'Environnement (Stollsteiner, 2012). Cette démarche permet ainsi d'évaluer les incertitudes inhérentes aux différents modèles. Dans le cas d'EXPLORE 2070 le résultat retenu a consisté à fournir des évaluations minimales et maximales (fourchette) avec des valeurs moyennes qui confirmaient, globalement sur l'ensemble du territoire, une légère augmentation de la pluviométrie en hiver et à une diminution des précipitations et un ralongement de la période sèche en été. Dans la présente étude, la réalisation du modèle climatique régional, qui représentait un aspect important et délicat de la démarche, a permis d'évaluer de façon satisfaisante les évolutions de température mais n'a pas permis de fournir une évaluation fiable des précipitations. Il a donc été décidé lors des comités de pilotage de ne pas communiquer les résultats sur les ressources en eau obtenus à partir de celle-ci.

● * : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>

7. Bibliographie

Aquifères et Eaux souterraines en France (1986), *collection scientifique et technique*, 2 tomes, , éditions BRGM

Charles Perrin, Claude Michel, Vazken Andréassian (2007) - Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) Cemagref

Allier D., Tormo F., Brugeron A., (2011) - Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes. BRGM/RP-59890-FR.

Boé, J., 2007 : « Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 256 pp.

M. Chauveau, S. Chazot, C. Perrin, P.Y. Bourgin, E. Sauquet, J.P. Vidal, N. Rouchy, E. Martin, J. David, T. Norotte, et al. 2013 - Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, n° 4, 2013, p. 5-15

IPCC. (2001) - Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of working group 1 to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, US, Cambridge University Press.

IPCC. (2007) - Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M.Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Moss *et al.*, (2010) - The next generation of scenarios for climate change research and assessment

Pinson.S, Allier D, Stollsteiner P, Mardhel .V, Wulleumier.A, (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes

Rat. P. 1986 - Guide géologique Bourgogne Morvan. Edition Masson, 2^{ème} édition, 1986, 216p.

Stollsteiner P., (2012) - PROJET Explore 2070. Evaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraine – Rapport BRGM/RP-61483-FR

Ubertosi M., Vautier A., Curmi P., Lamy C., Toussaint H., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P., (2009). Évaluation de la réserve en eau à l'échelle des pédocapots de Bourgogne. 33^{èmes} journées scientifiques GFHN. *Teneur en eau et transferts en milieux poreux : mesures et statistiques à l'échelle stationnelle*, Aix en Provence, 25 - 26 novembre 2009.

Références bibliographiques concernant l'outil de modélisation Gardénia et dérivés (extrait)

THIERY D., 1995 - Influence de la physiographie d'un bassin versant sur les paramètres de modélisation hydrologique globale. Application à la Bretagne et à la Moselle. VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM Montpellier "Régionalisation en hydrologie, application au développement". In Le Barbé et E. Servat (Ed) ORSTOM Editions, pp. 517-529.

THIERY D. et MOUTZOPOULOS C., 1995 - Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM "Régionalisation en hydrologie, application au développement". In Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions, pp. 285 295.

THIERY (D.), LUCAS (C.), DIAGANA (B.), 1993 - Modelling the aquifer recovery after a long duration drought in Burkina Faso proceedings of the IAHS/IAMAP International Symposium on "extreme hydrological events: precipitation, floods and drought" YOKOHAMA, Japon, Juill. 1993. Publication AIHS 213 pp 43-50.

THIERY (D.), 1991 - Analyse par modélisation hydrologique globale de la sensibilité des aquifères aux sécheresses et à la pollution. Congrès : Société Hydrotechnique de France XXles Journées de l'Hydraulique, Sophia Antipolis, 29 31 janvier 1991 "Les eaux souterraines et la gestion des eaux" pp 1.16.1-1.16.9.

THIERY (D.), 1990 - Analysis of long duration piezometric records from Burkina Faso to determine aquifer recharge. Rev. IAH International contributions to hydrogeology, vol.8, 1990, p.313 323.

Modèle GR4J

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003) - Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279 (1-4), 275-289.

Annexe 1

Fiches des modélisations

Calages et simulations de référence

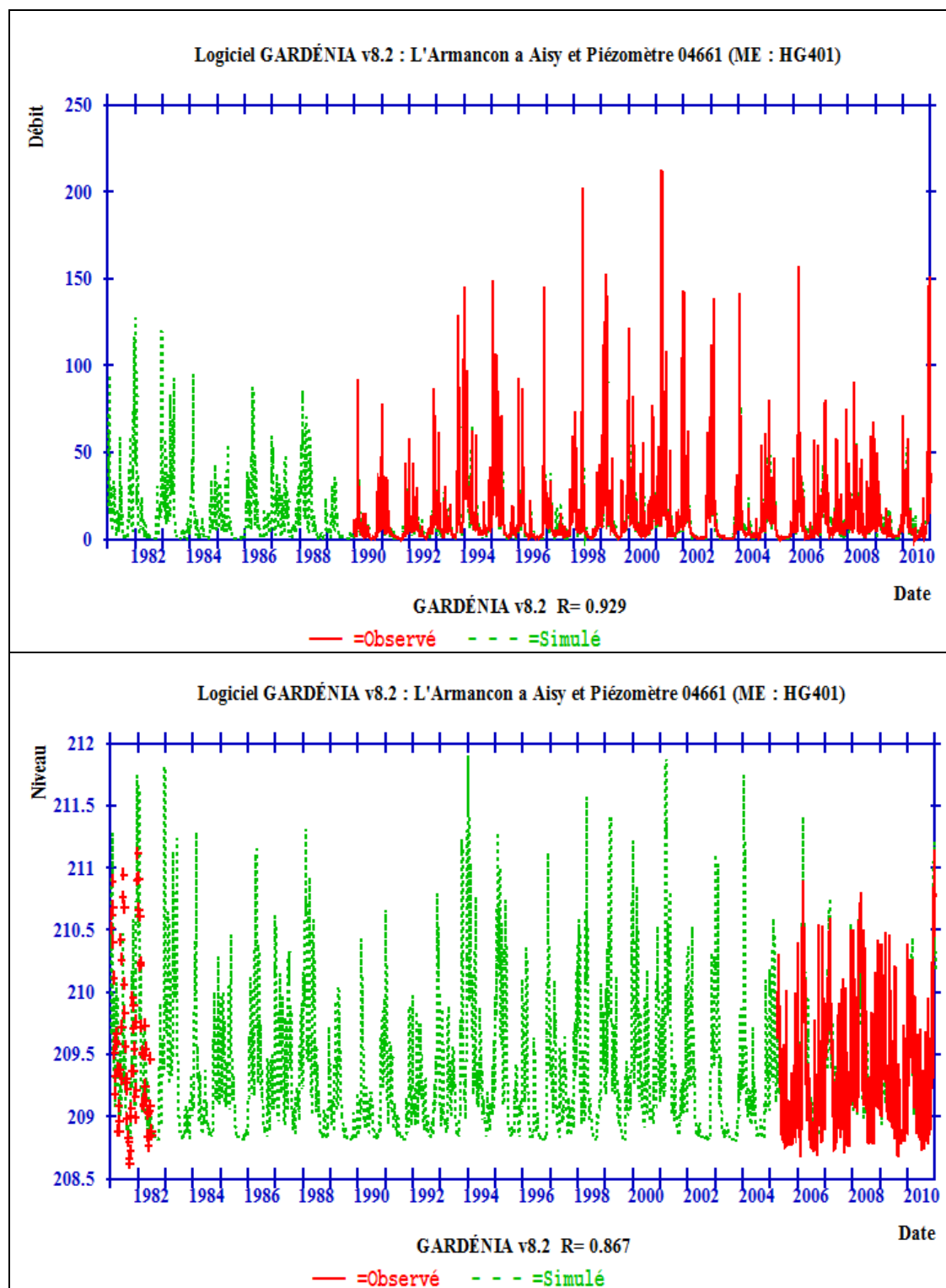
Période 1981-2010

(logiciel GARDENIA)

L'Armançon à Aisy sur Armançon

Piézomètre : 04661x0002/s1

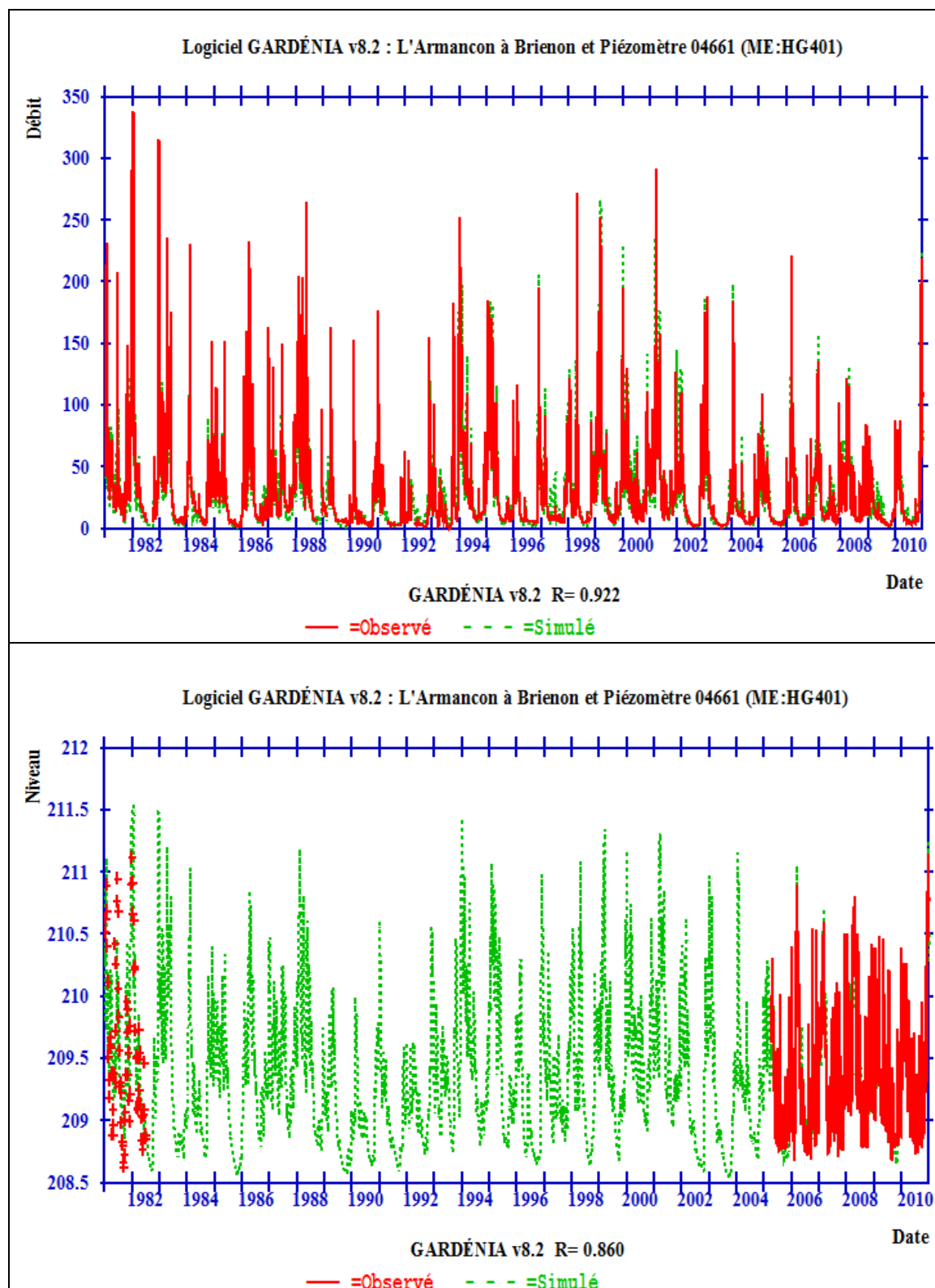
ME : HG401



L'Armançon à Brienon sur Armançon

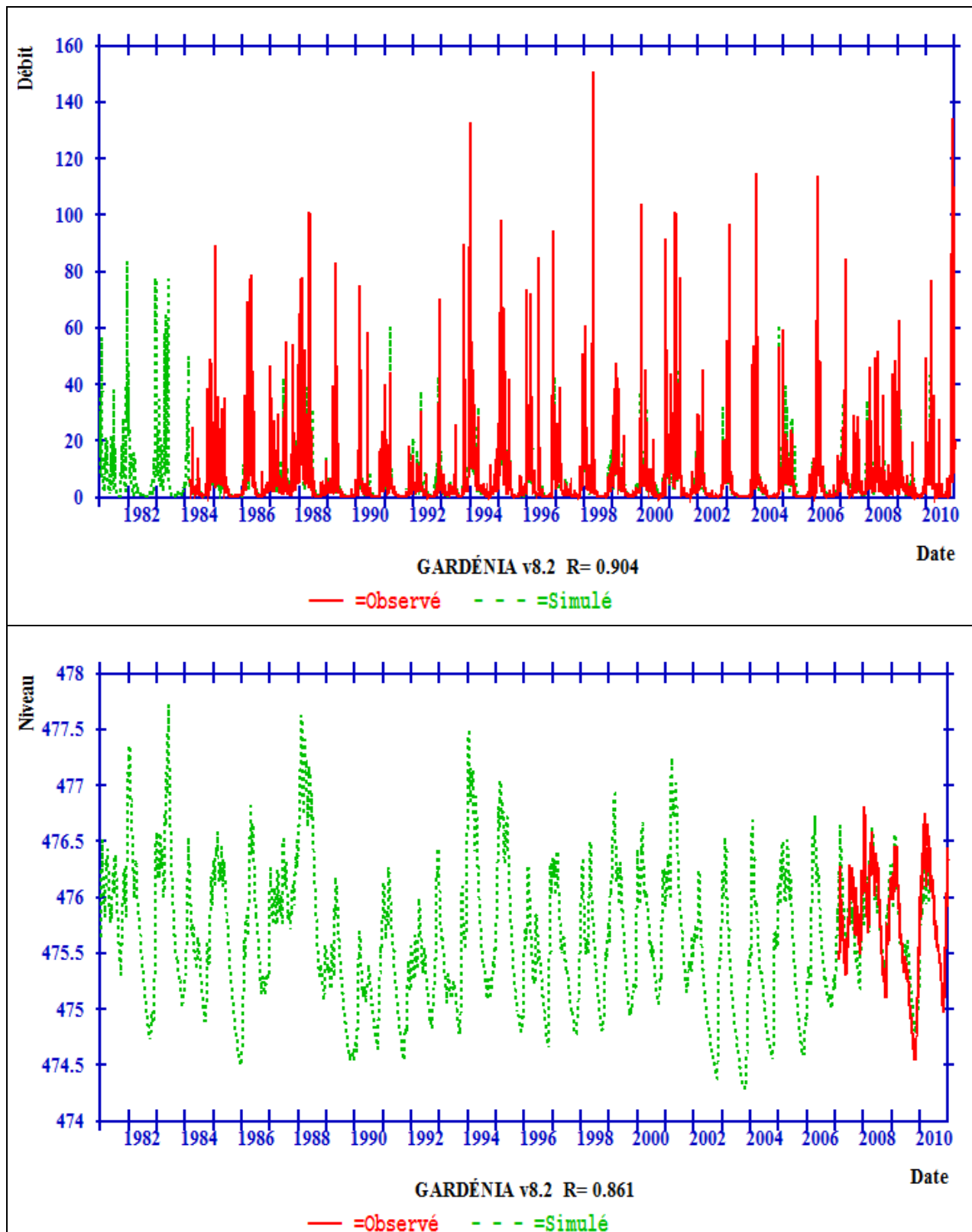
Piézomètre : 04661x0002/s1

ME : HG401



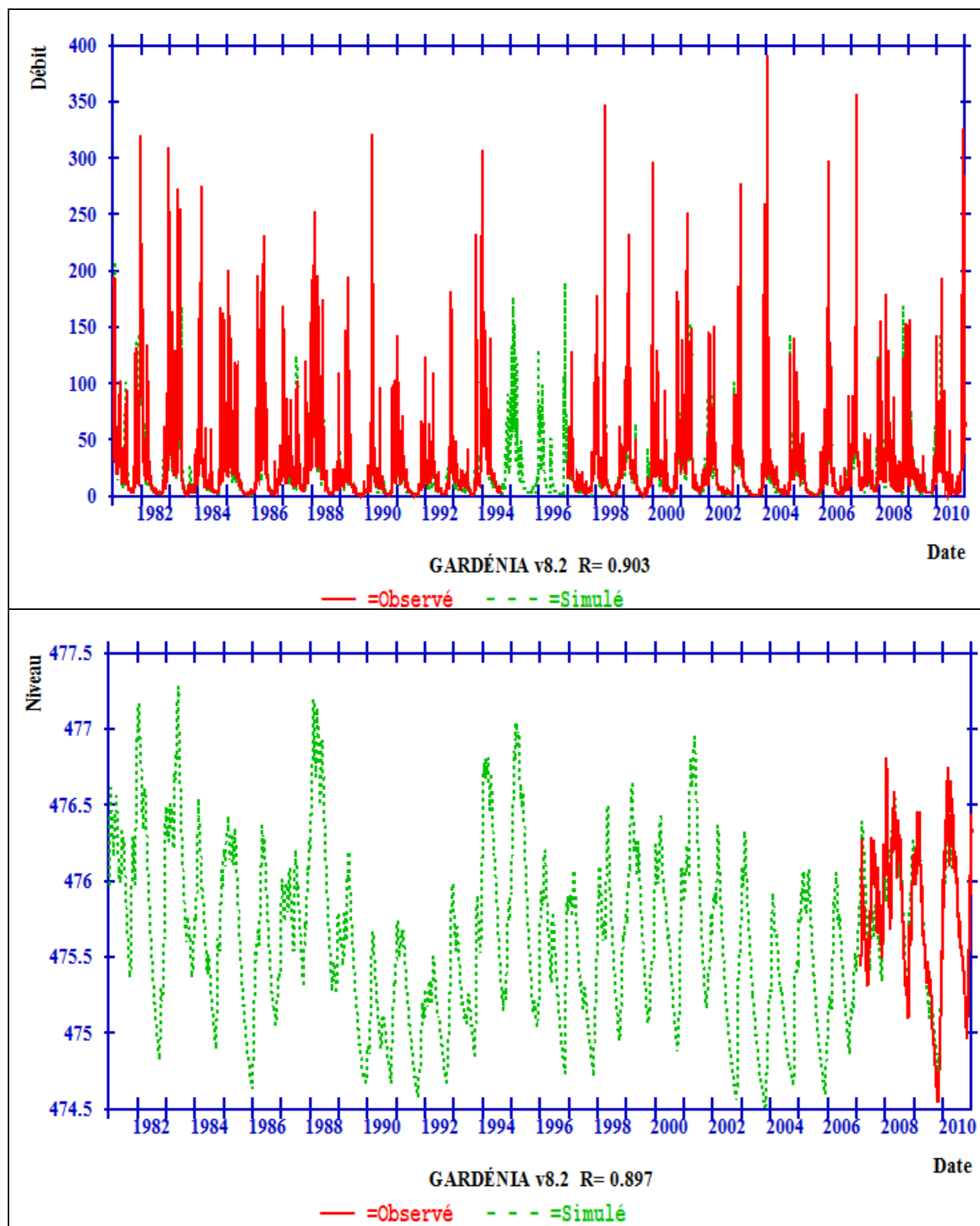
L'Arroux à Dracy Saint Loup

Piézomètre : 06241x0016/P ME :GG043



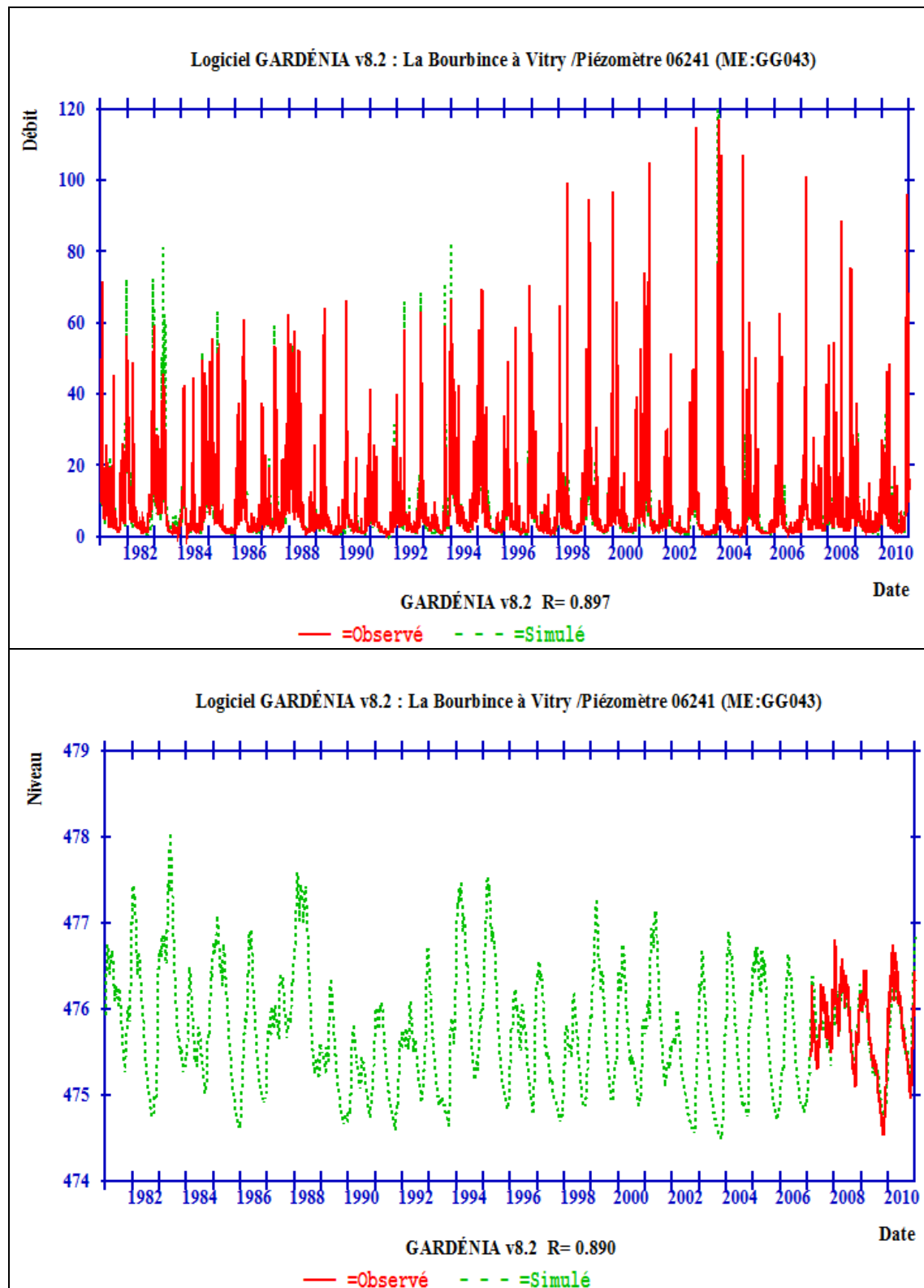
L'Arroux à Rigny sur Arroux

Piézomètre : 06241x0016/P ME :GG043



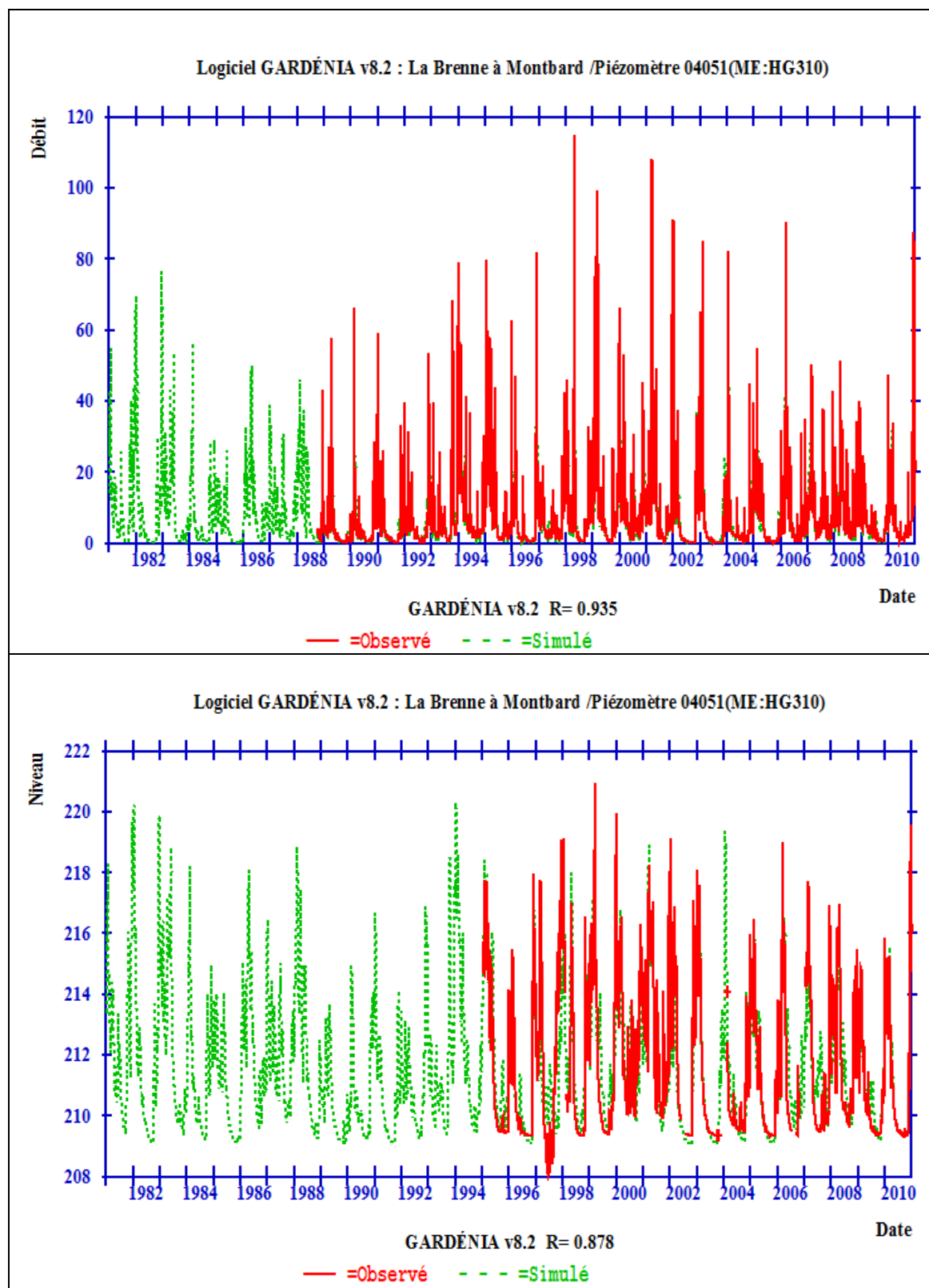
La Bourbince à Vitry en Charollais

Piézomètre : 06241x0016/P ME :GG043



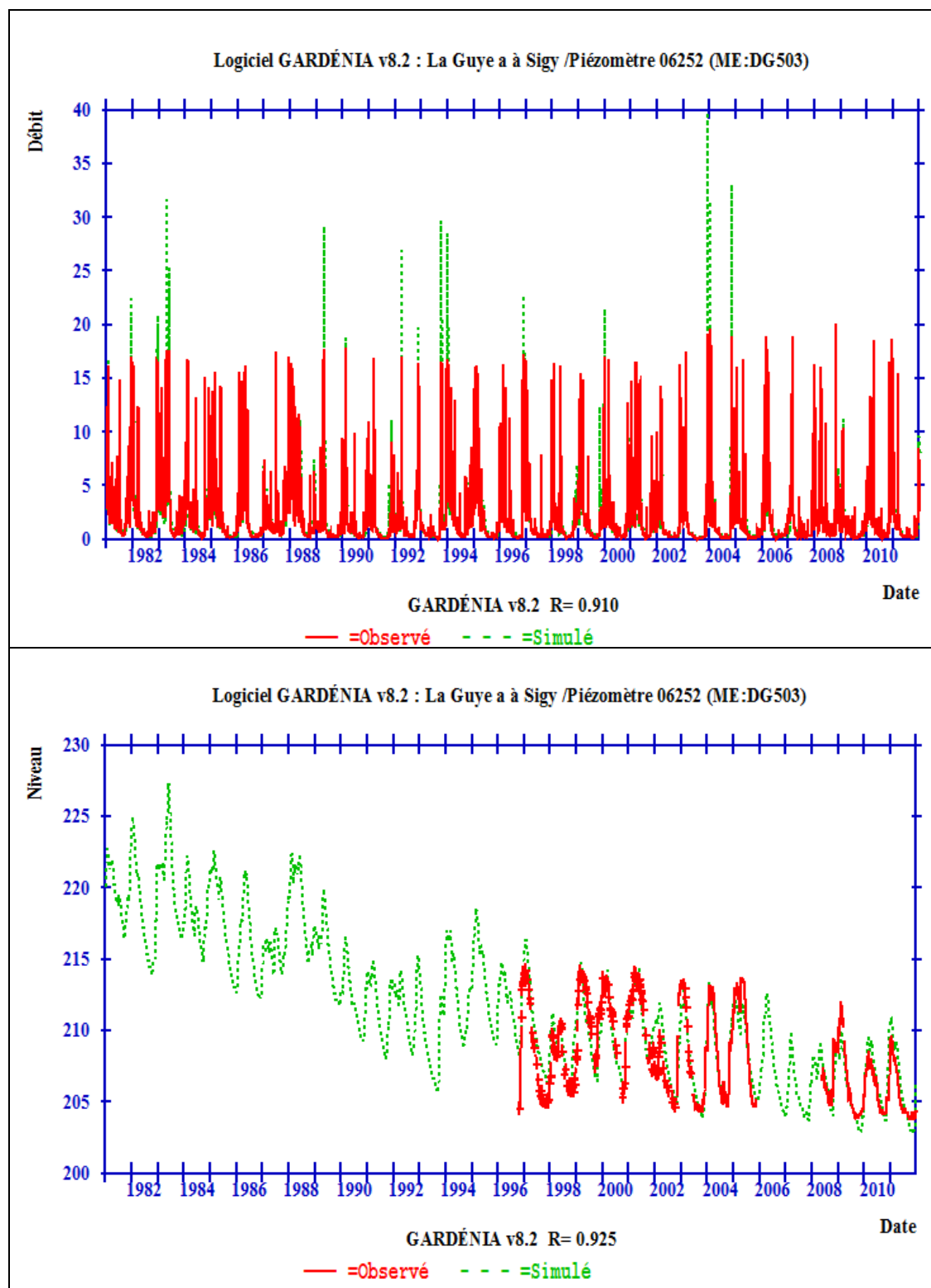
La Brenne à Montbard

Piézomètre : 04051x0007/S ME :HG310



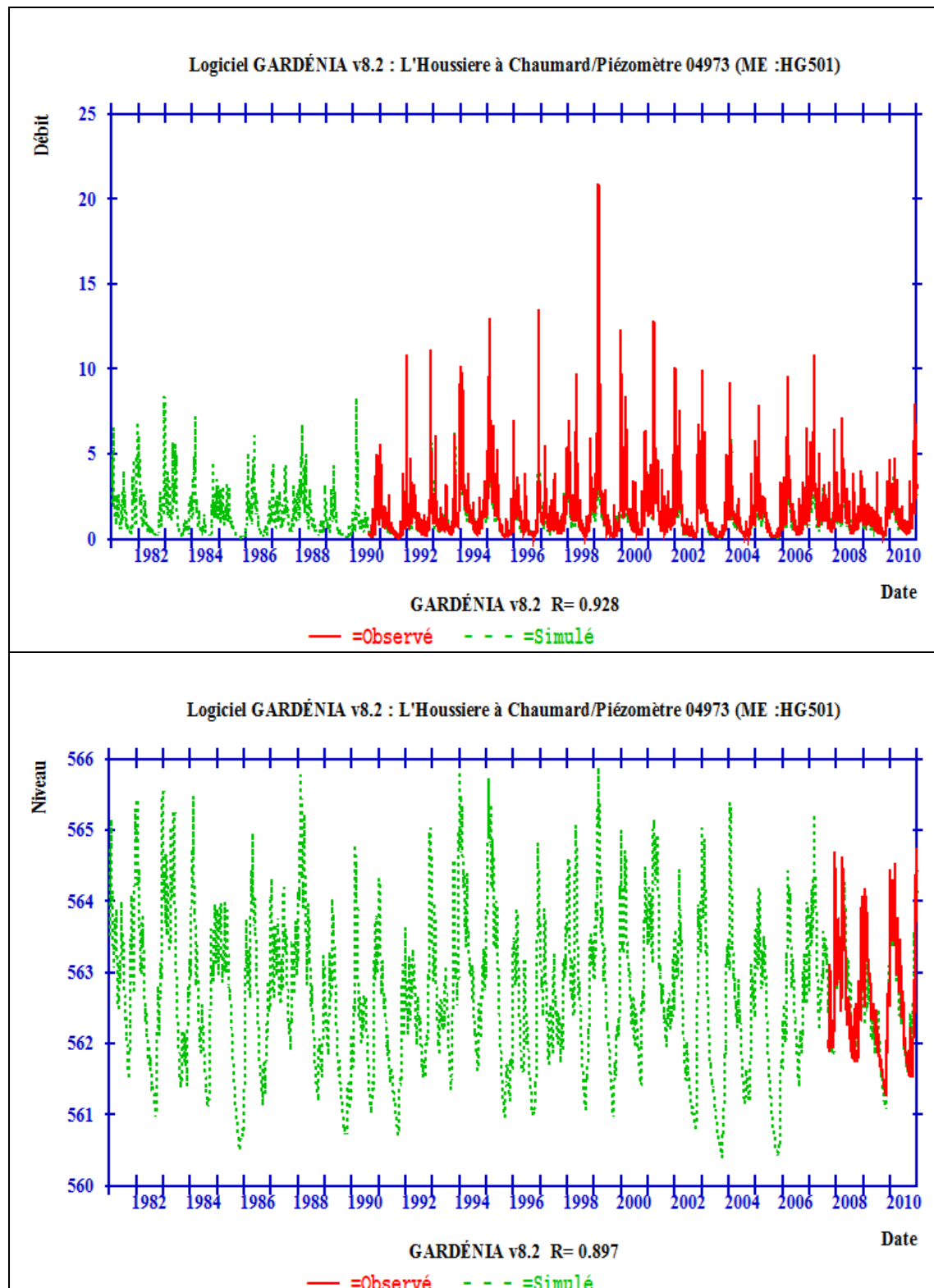
La Guye à Sigy le Chatel

Piézomètre : 06252x ME :DG503



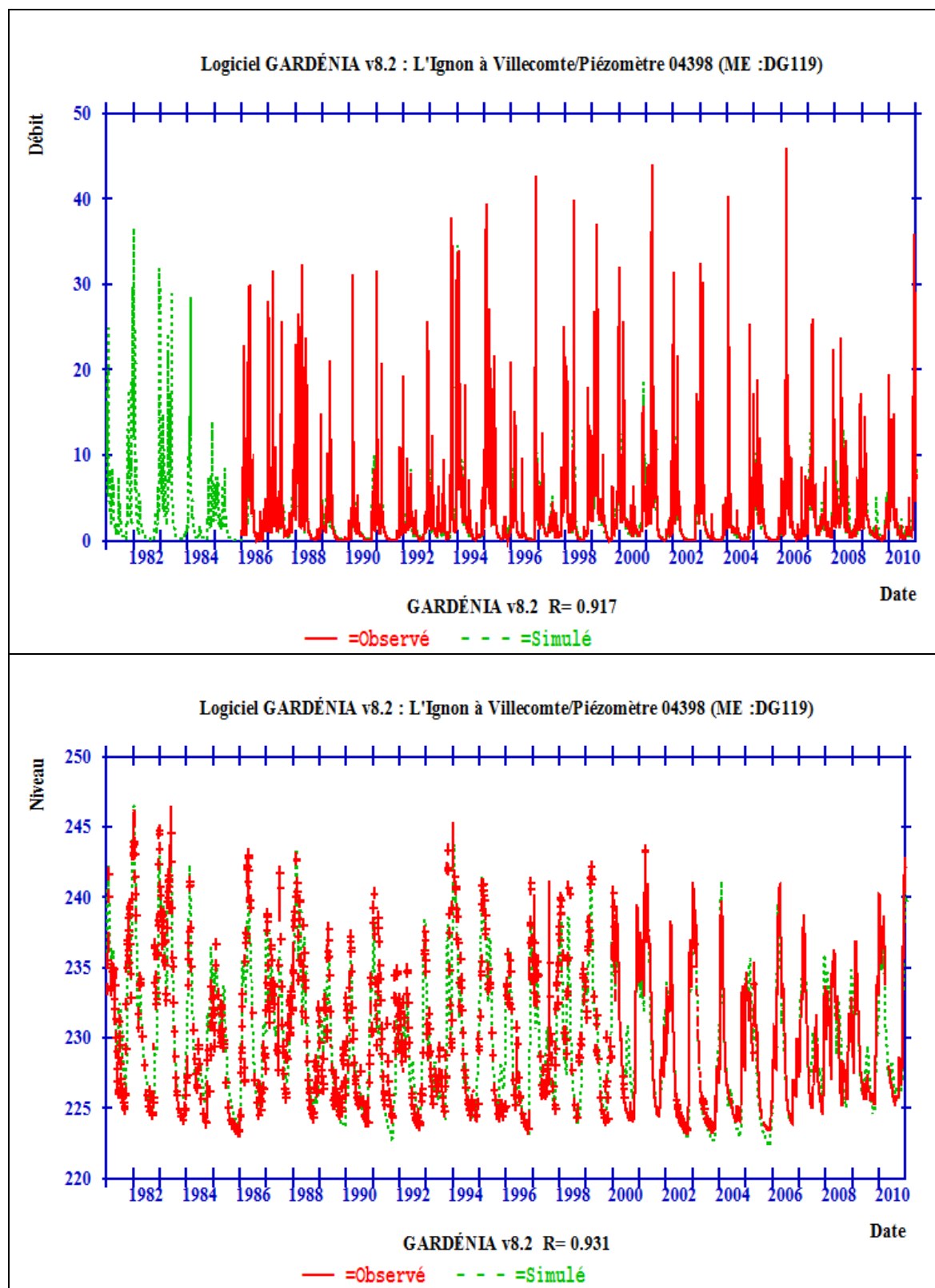
L'Houssière à Chaumard

Piézomètre : 04973x0005 ME :HG501



L'Ignon à Villecomte

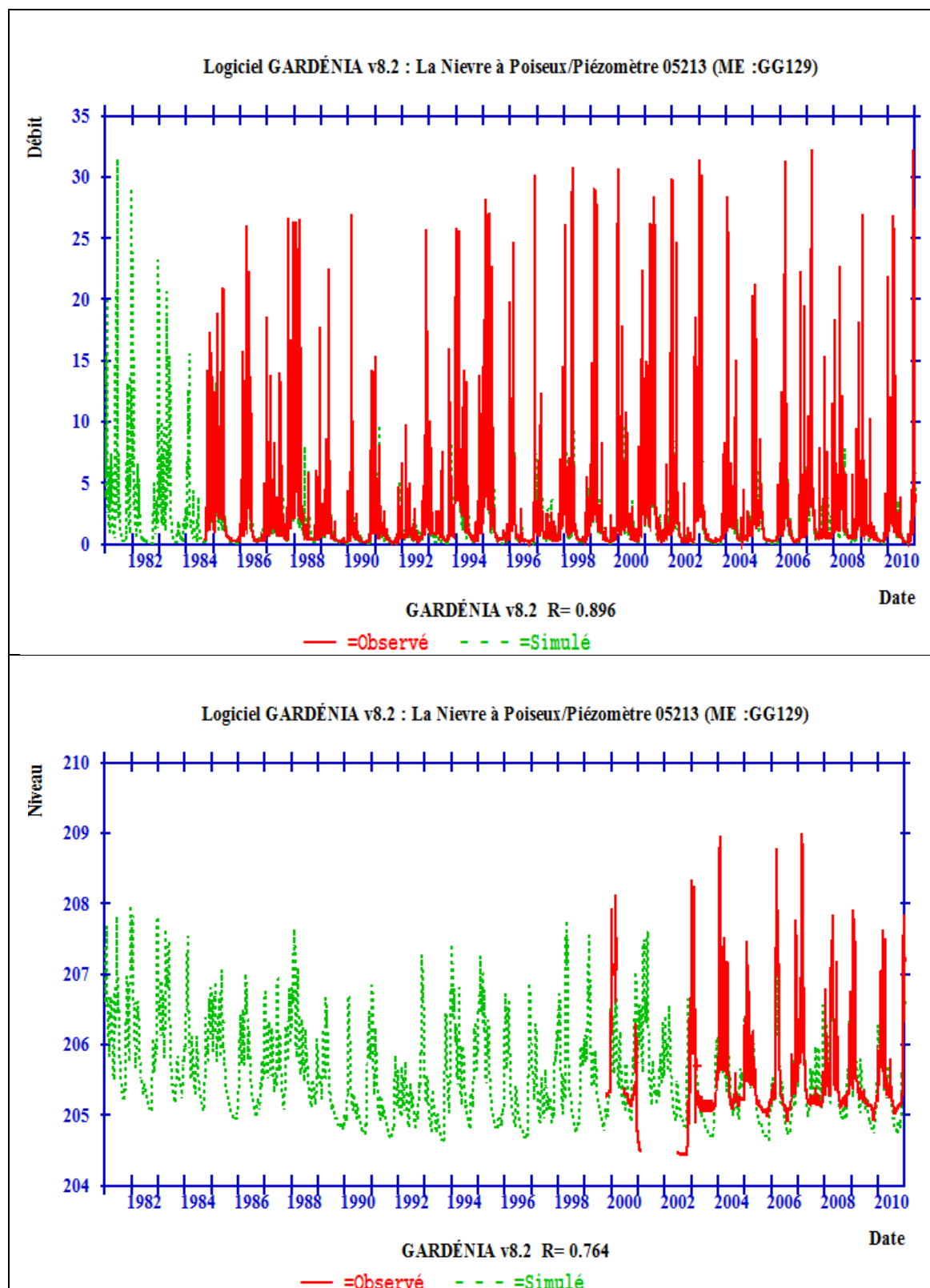
Piézomètre : 04398x0002 ME :DG119



La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux

Piézomètre : 05213x0018/P1

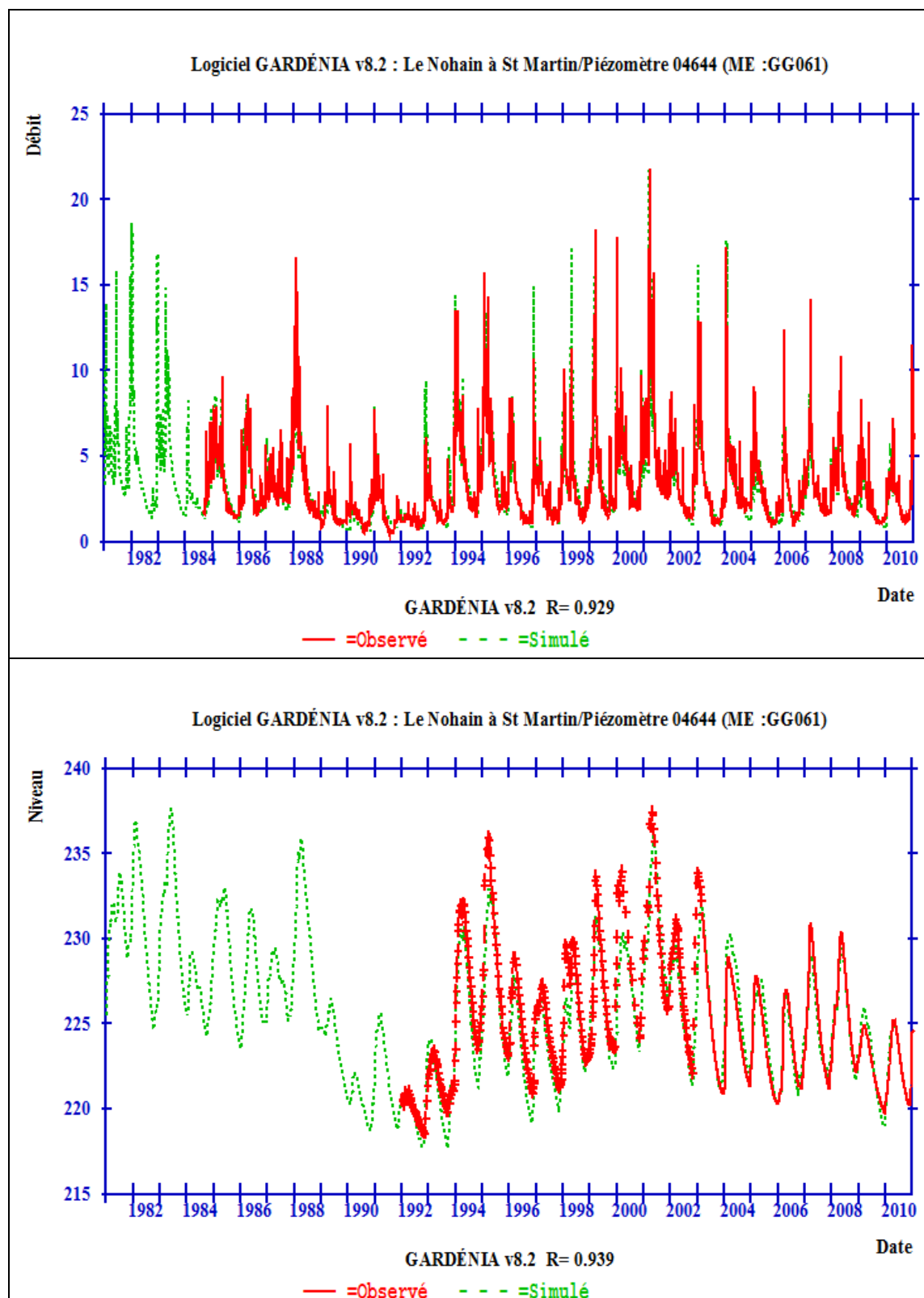
ME :GG129



Le Nohain à Saint Martin sur Nohain

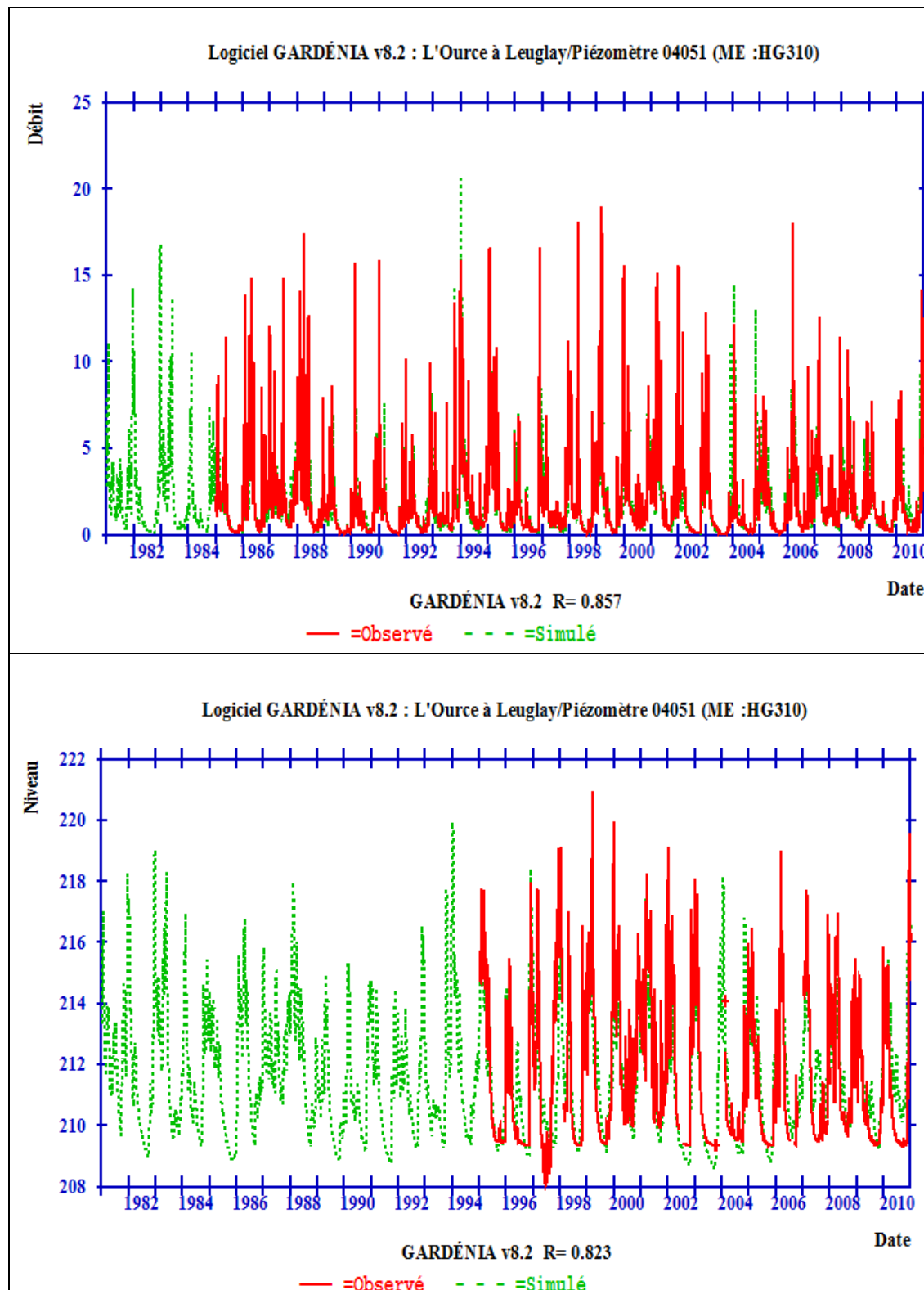
Piézomètre : 04644x0002/Puits

ME :GG061



L'Ource à Leuglay

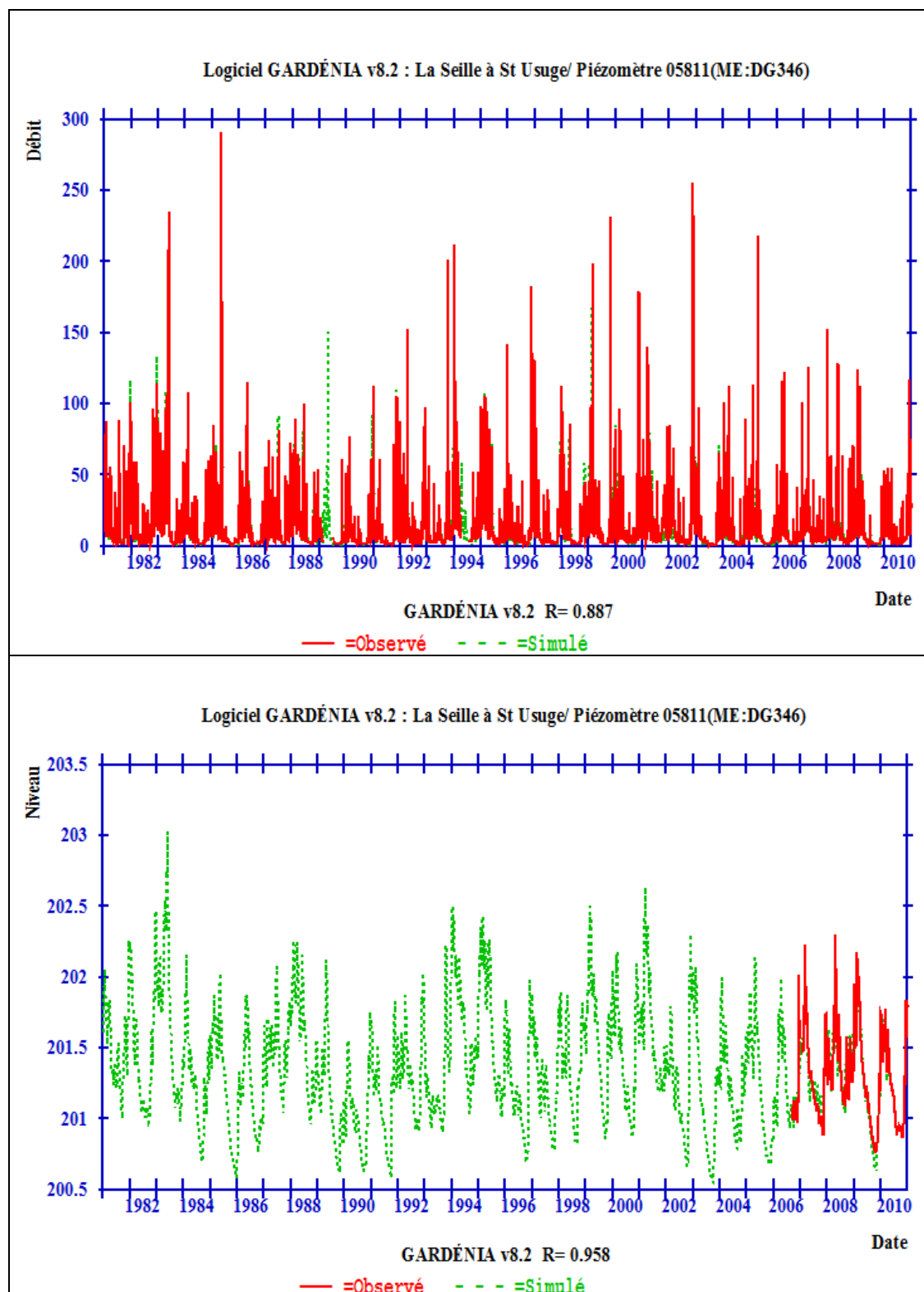
Piézomètre : 04051x0007/S ME :HG310



La Seille à Saint-Usuge

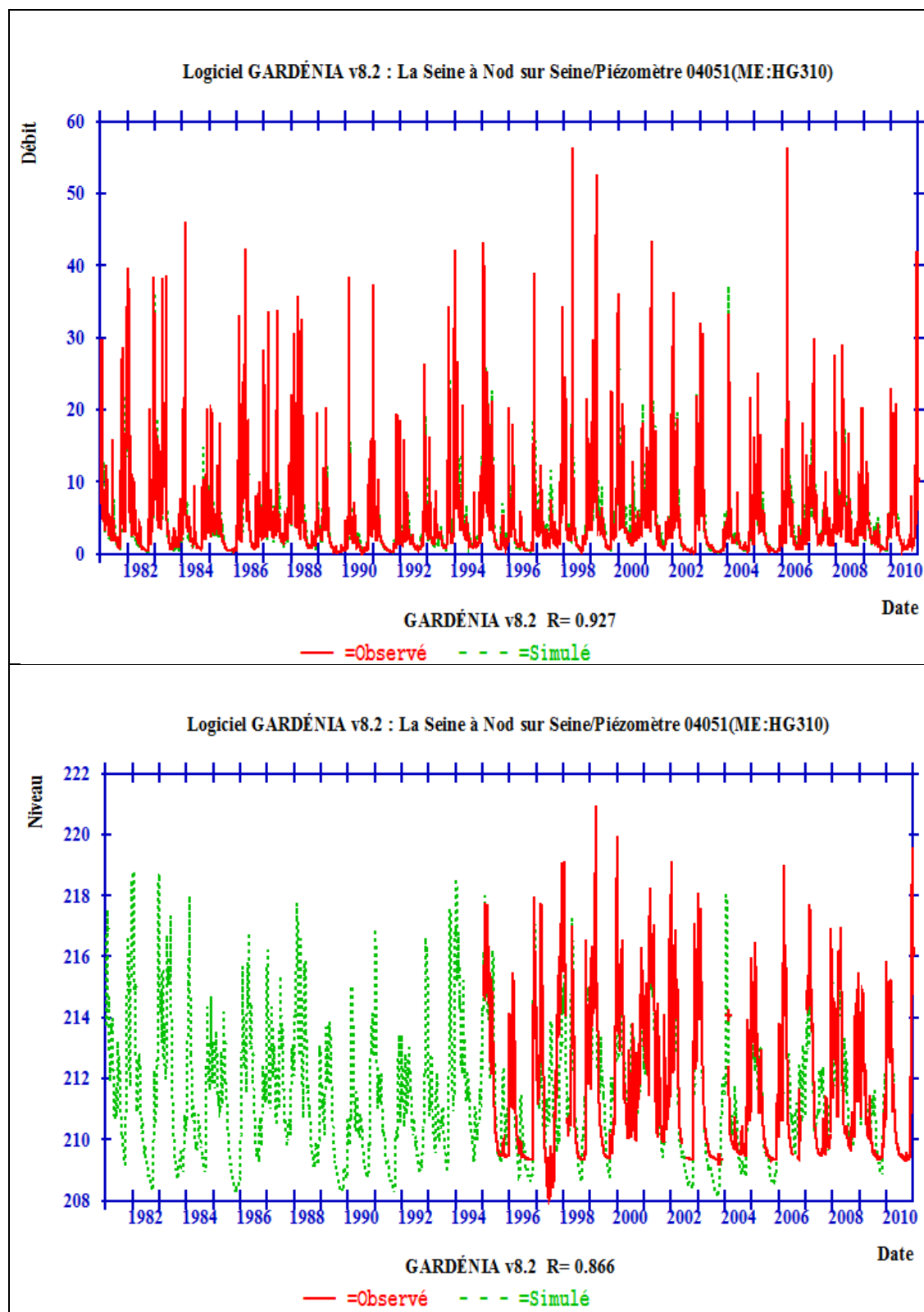
Piézomètre : 05811x0159/F2

ME :DG346



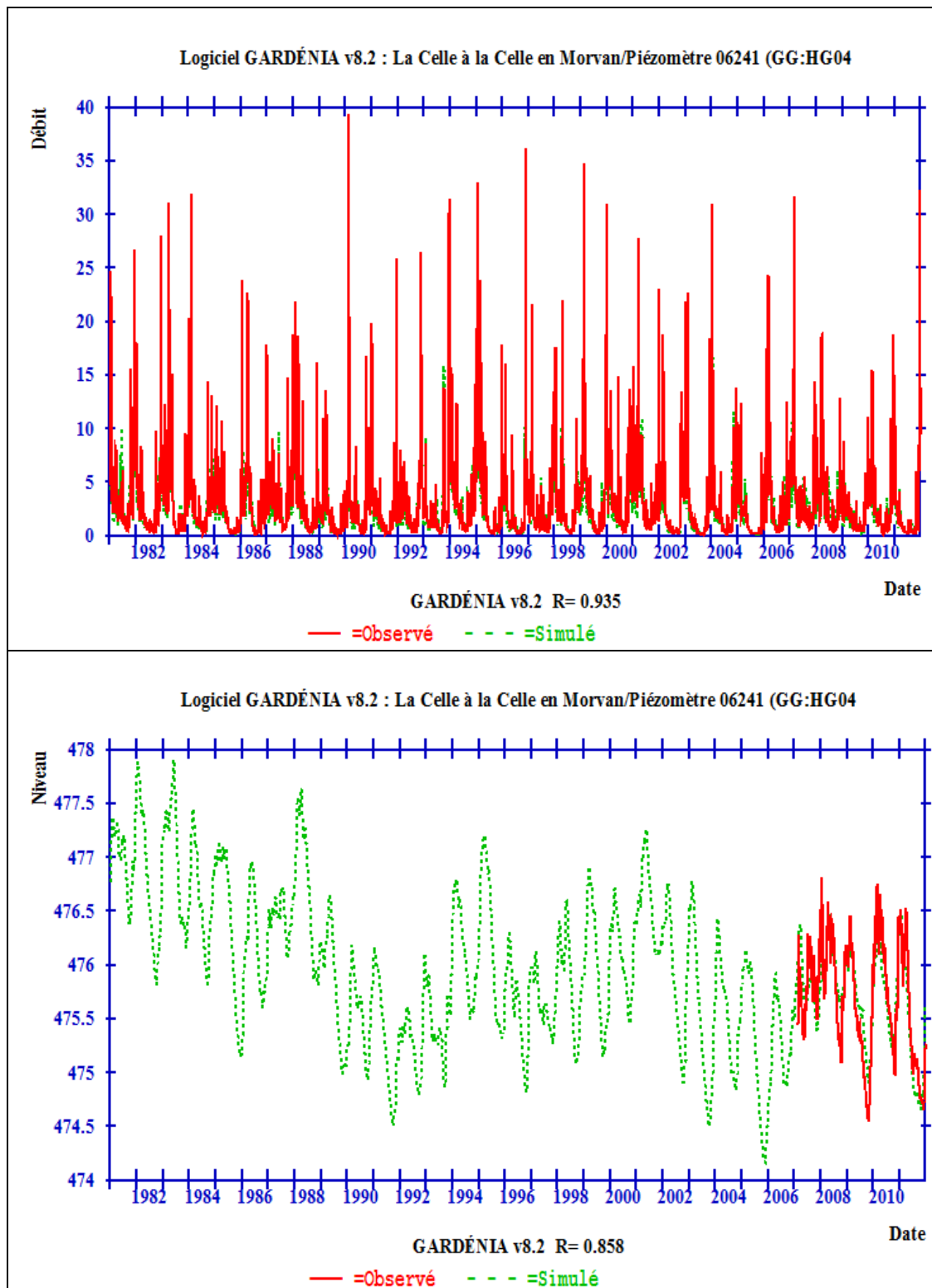
La Seine à Nod sur Seine

Piézomètre : 04051x0007/S ME :HG310



La Selle à la Celle en Morvan

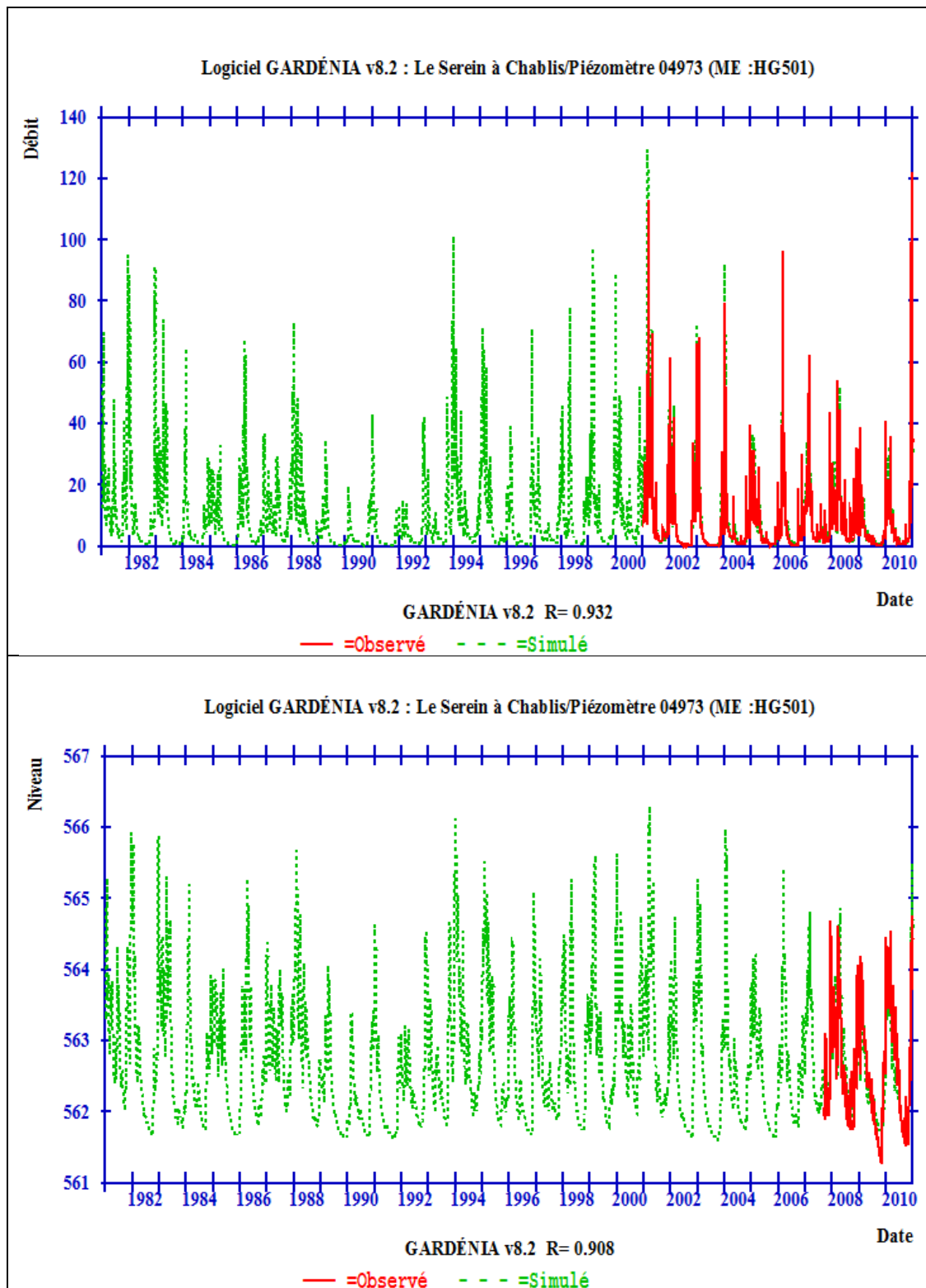
Piézomètre : 06241x0016/P ME:GG043



La Serein à Chablis

Piézomètre : 04973x0005/PZ1

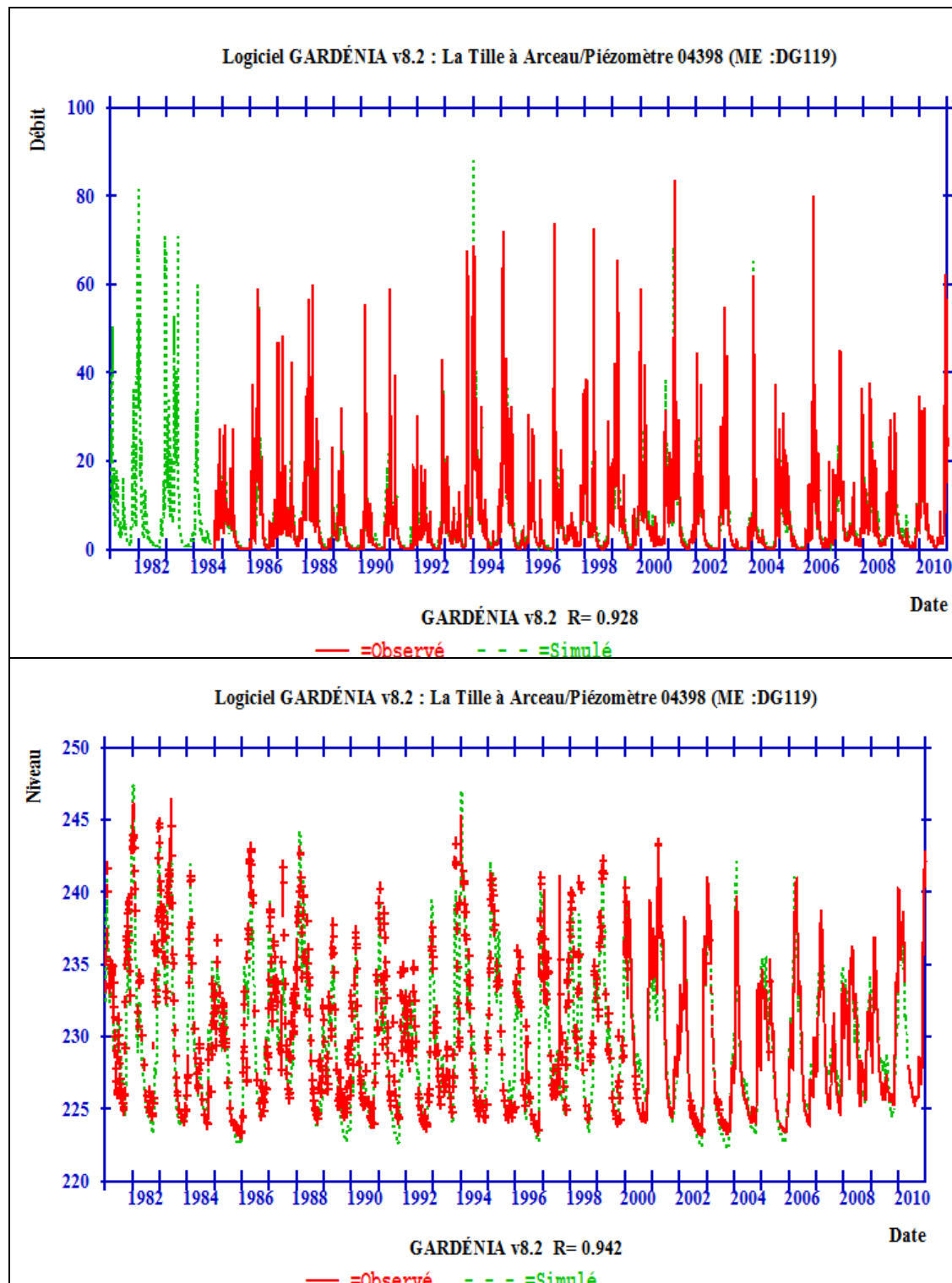
ME:HG501



La Tille à Arceau

Piézomètre : 04398x0002/SONDAG

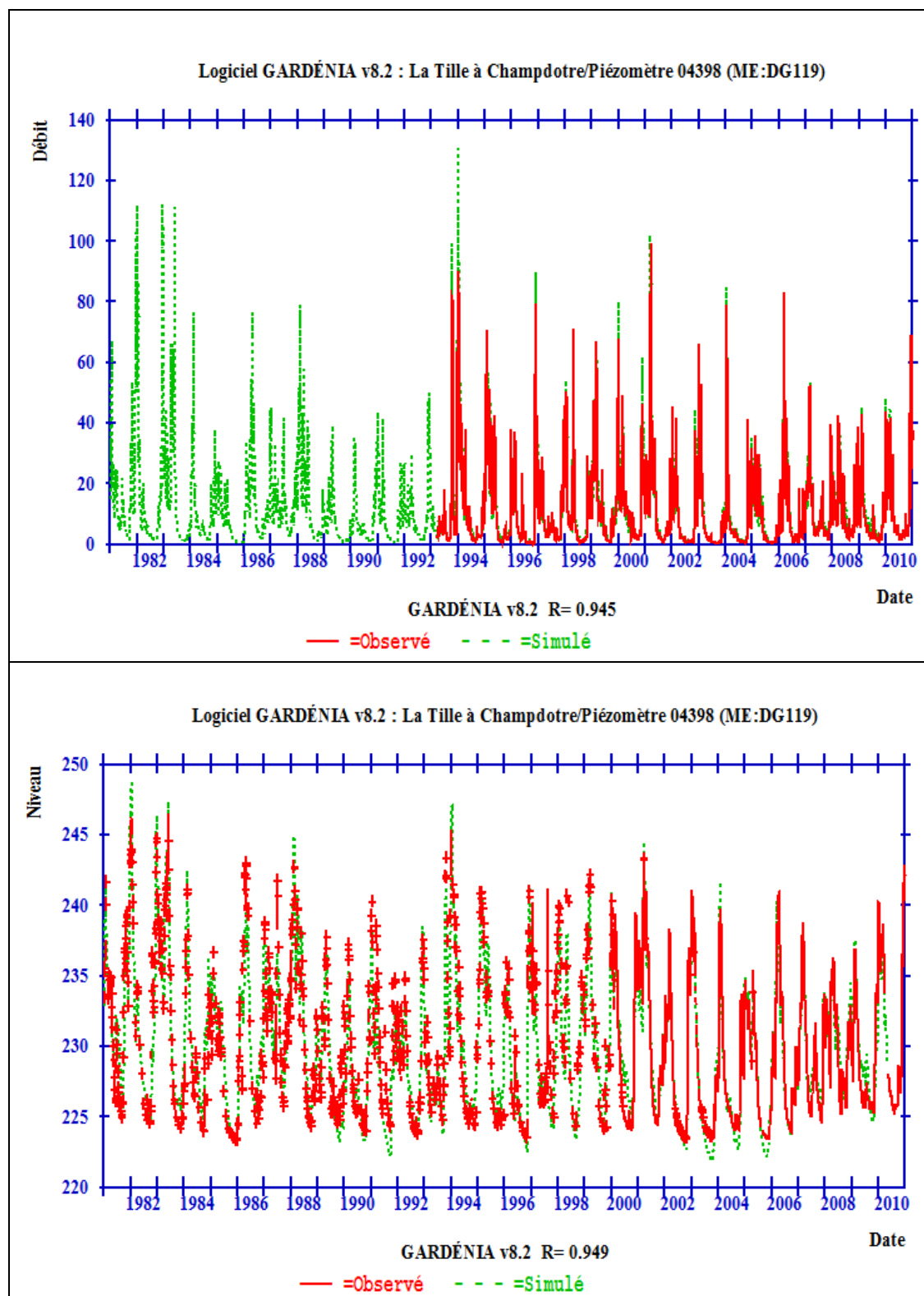
ME:DG119



La Tille à Champdotre

Piézomètre : 04398x0002/SONDAG

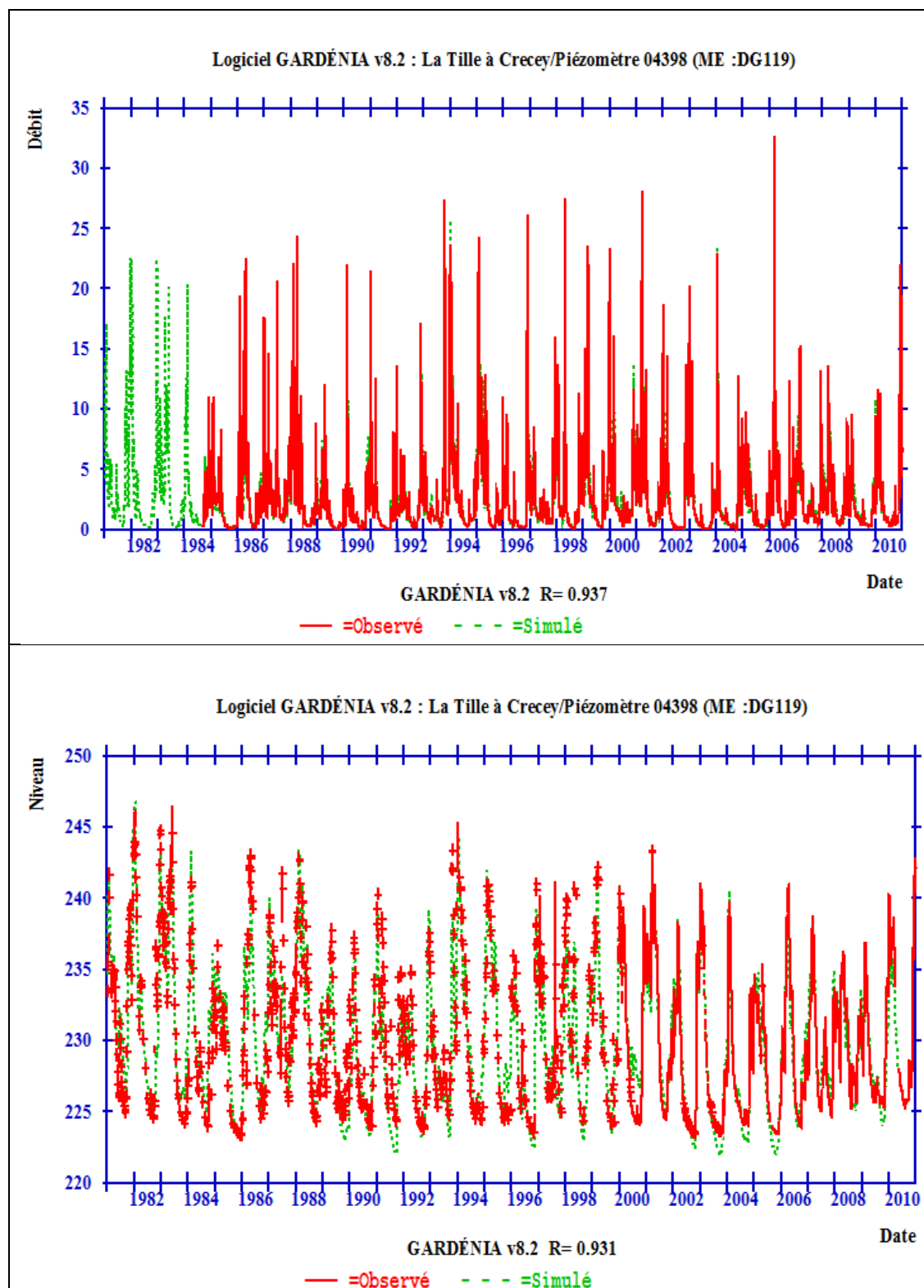
ME:DG119



La Tille à Crecey

Piézomètre : 04398x0002/SONDAG

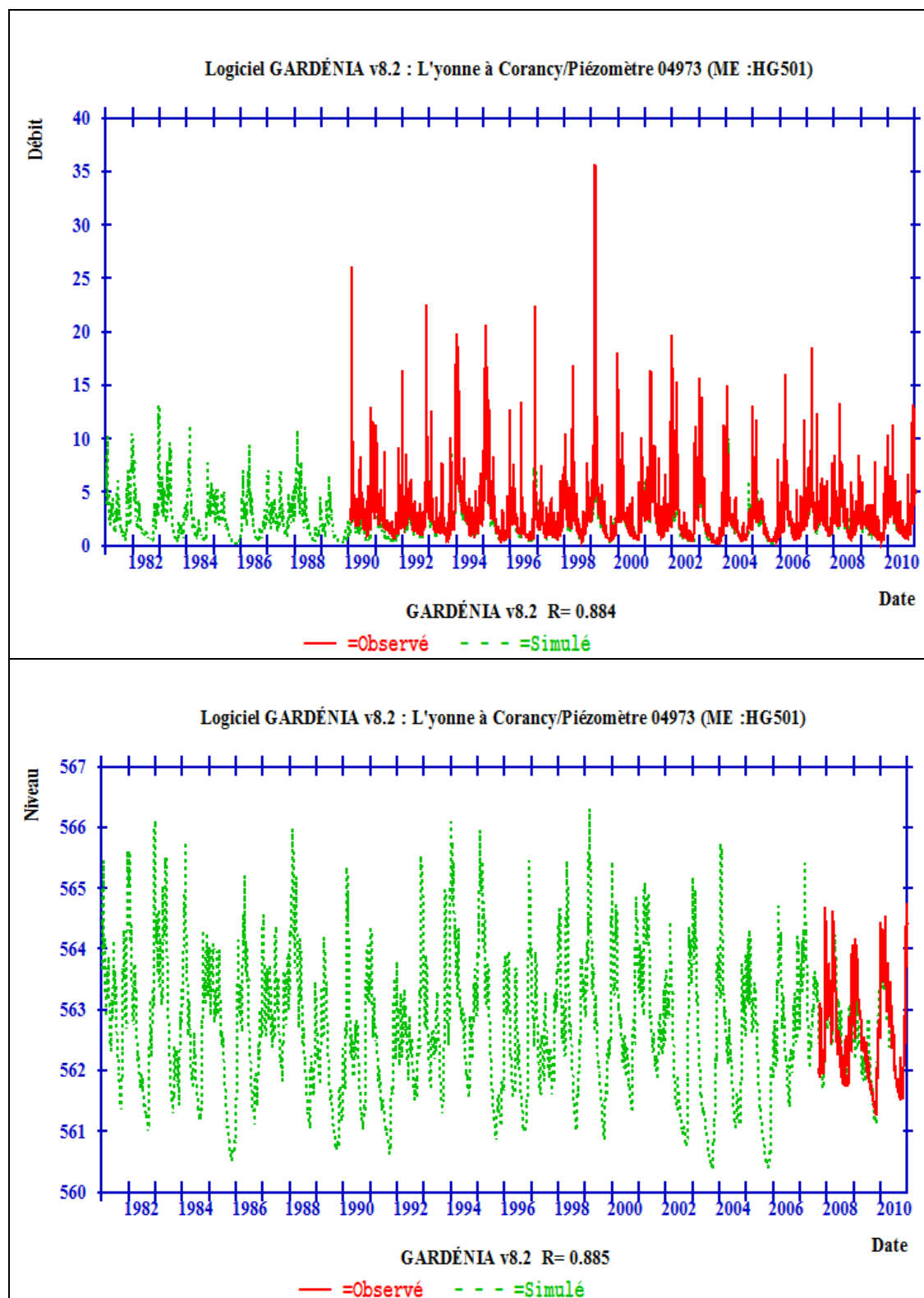
ME:DG119



L'Yonne à Corançy

Piézomètre : 04973x0005/PZ1

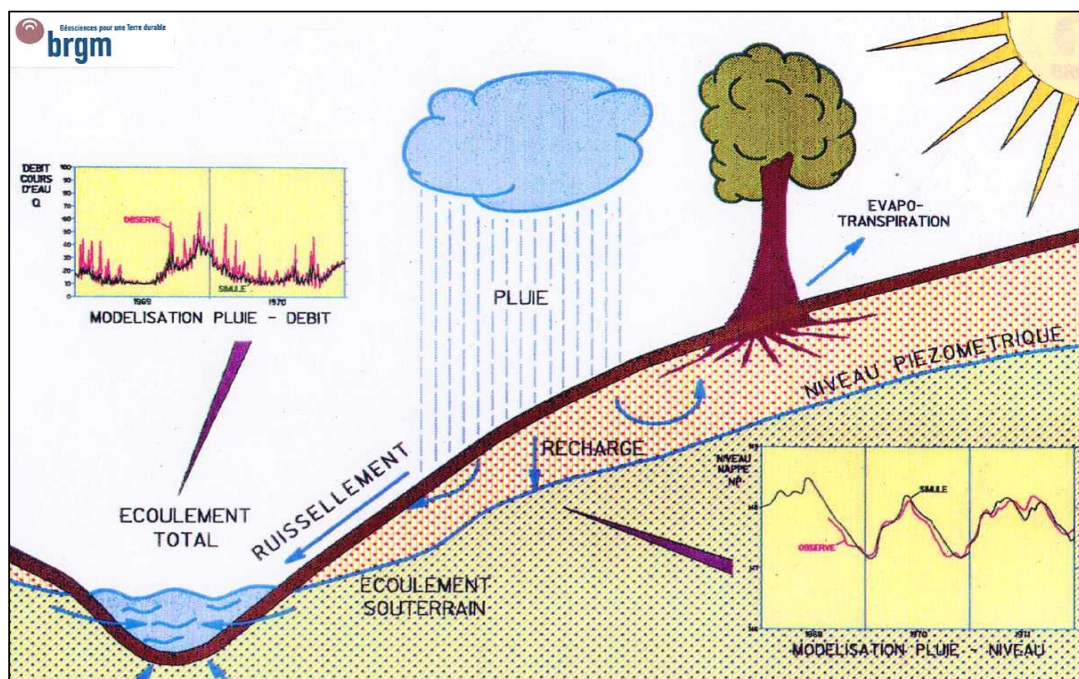
ME:HG501



Annexe 2

Logiciel GARDENIA

Le logiciel de modélisation GARDENIA, développé par le BRGM, est utilisé dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et éventuellement prévoir des **niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant**. Il permet de modéliser le fonctionnement d'un hydrosystème, tel que celui schématisé sur l'illustration ci-dessous.



Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

Il permet de simuler le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique).

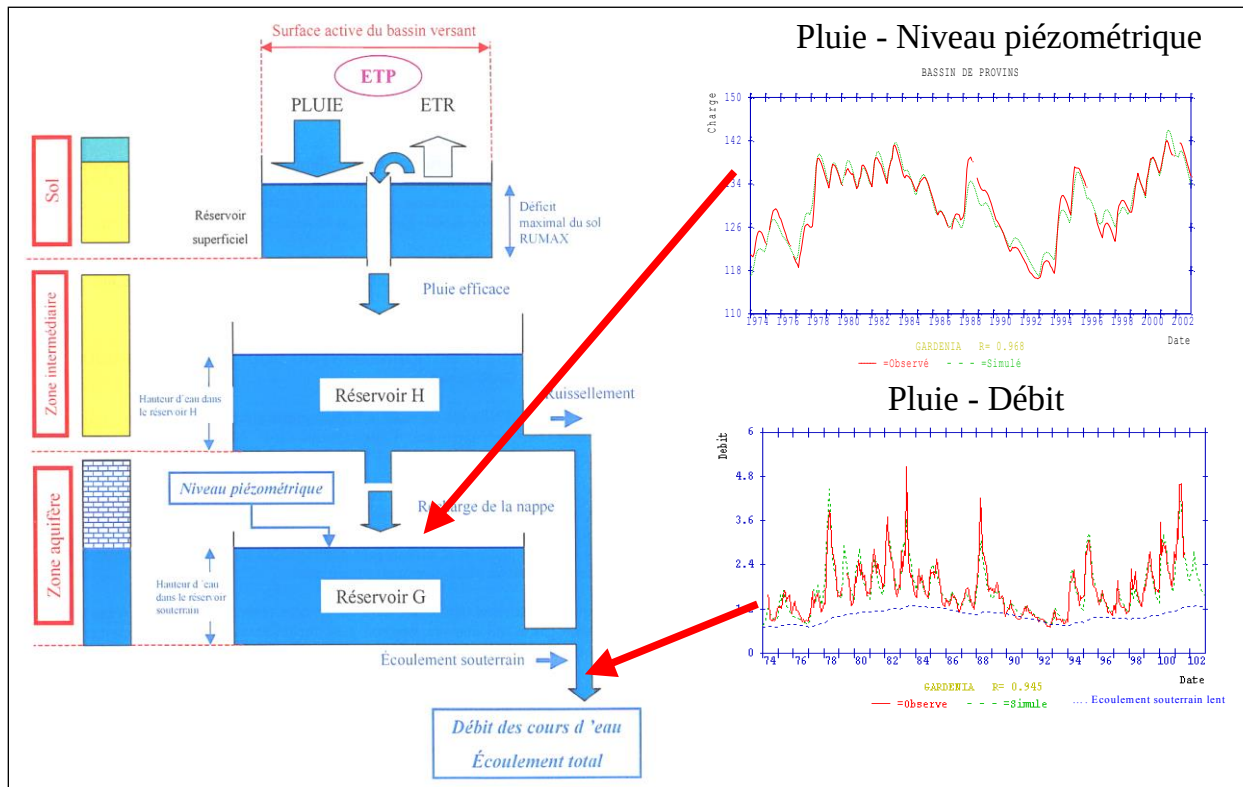
Ce modèle est global, car il considère des « données d'entrée » globales, pluie et évapotranspiration potentielle, et en sortie, débit à l'exutoire et/ou niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Le logiciel GARDENIA simule le cycle de l'eau par plusieurs réservoirs en cascade

Fonctionnement du modèle

Plusieurs schémas hydrauliques peuvent être utilisés :

- le schéma type GARDENIA au sens strict avec son module de production propre. Plusieurs configurations sont possibles avec notamment 1 ou 2 réservoirs souterrains.



Principe du modèle hydrologique GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (Schéma classique)

Dans la configuration avec 1 réservoir souterrain (illustration 52), les 3 réservoirs représentent schématiquement la zone superficielle du sol sujette à la reprise par évaporation ;

- la zone non saturée siège des écoulements rapides (ruissellement et composante rapide des écoulements karstiques) ;
- la zone saturée siège des écoulements lents de l'aquifère ;
 - le schéma mixte type GARDENIA avec le module de production type GR4 ;
 - le schéma type GR4 développé par Edijatno et Michel (1989).

Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant.

Pour initialiser l'état de remplissage des réservoirs, il est nécessaire, en modélisation hydrologique globale, de prendre en compte une période d'initialisation. Celle-ci doit être d'autant plus longue que l'inertie ou « mémoire » de l'aquifère est grande. Cela suppose de disposer de chroniques de pluie et d'ETP sur une période aussi longue que possible antérieurement à la période de calage.

Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les données d'entrée (pluie, ETP) et les données de sortie (débit et/ ou niveau piézométrique) avec un jeu de paramètres aussi

réaliste que possible, calé sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles. Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique.

L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés. L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock.

Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées (coefficient d'ajustement R). Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur qui peut le contraindre, notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Le coefficient R est égal à la racine de Nash et le coefficient de Nash (NTD) est défini par:

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}$$

où q_{ci} et q_{oi} sont les débits calculé (modélisé) et observé du jour i ;

$\bar{q}_o$ est la moyenne de q_{oi} sur les n jours servant au calcul du coefficient.

Une fois calé, le modèle peut être utilisé pour :

- Calculer les différents termes du bilan hydrologique en permettant notamment, dans une certaine mesure, de différencier les deux composantes de l'écoulement :
 - celle rapide que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel et à la composante rapide des écoulements karstiques ;
 - celle lente que l'on peut assimiler à la composante lente des écoulements souterrains, c'est à dire à la contribution des aquifères au débit des rivières.
- Simuler des débits et/ ou des niveaux résultant d'épisodes climatiques exceptionnels. Ces simulations permettent le dimensionnement d'ouvrages tels que retenues pour l'irrigation, aménagements de sources, fondations de bâtiments, niveaux de sous-sol, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour l'évacuation des crues ou pour la régulation des débits (barrages), etc. ;
- Faire une extension de débits ou de niveaux piézométriques sur une longue période pendant laquelle on ne possède pas de mesures, à partir, par exemple, de différents scénarii climatiques ;
- Émettre une prévision de débits et/ ou de niveaux piézométriques. Il est possible de prolonger une série observée jusqu'à une certaine date à partir de scénarios de précipitations prévisionnels pour les semaines ou mois futurs (sécheresses, périodes de hautes eaux) ;
- Reconstituer des valeurs manquantes dans une chronique de débits (rivière ou source), et/ou de niveau piézométrique (nappe). Les séries ainsi complétées peuvent être utilisées dans d'autres calculs ou modélisations.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies (D3E)
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr