

Appui au SCHAPI -Module 1 Caractérisation des apports du karst aux crues sur le territoire du SPC Loire-Cher-Indre (Bassin de l'Yèvre)

V Hakoun

▶ **To cite this version:**

V Hakoun. Appui au SCHAPI -Module 1 Caractérisation des apports du karst aux crues sur le territoire du SPC Loire-Cher-Indre (Bassin de l'Yèvre). [Rapport de recherche] BRGM/RP69925-FR, BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). 2020. hal-03295378

HAL Id: hal-03295378
https://brgm.hal.science/hal-03295378

Submitted on 22 Jul 2021

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

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



Document public

Appui au SCHAPI 2019 – Module 1 Caractérisation des apports du karst aux crues sur le territoire du SPC Loire-Cher-Indre (Bassin de l'Yèvre)

Rapport final

BRGM/RP-69925-FR
Mai 2020

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Appui au SCHAPI 2019 – Module 1 Caractérisation des apports du karst aux crues sur le territoire du SPC Loire Bretagne (Bassin de l'Yèvre)

Rapport final

BRGM/RP69925-FR
Mai- 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2019
(Convention DGPR – BRGM. Appui scientifique au SCHAPI)

V. Hakoun

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : J.-B. Charlier	Nom : J.-C. Maréchal
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Responsable d'unité
Date : 28/04/2020	Date : 19/05/2020
Signature : 	Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Hydrologie karst, crue, hydrogéologie, jurassique, eau souterraine, Cher, Bourges

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

Hakoun V. (2020) – Appui au SCHAPI 2019 – Module 1. Caractérisation des apports du karst aux crues sur le territoire du SPC Loire Bretagne (Bassin de l'Yèvre). Rapport Final. BRGM/RP-69925-FR, 56 p.

© BRGM, **2020**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) pour le compte du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), le BRGM travaille sur la problématique de la contribution des eaux souterraines aux crues. Le premier module sur les « crues karstiques », défini pour l'année 2019 pour le compte du SPC Loire-Cher-Indre, porte sur la caractérisation du rôle du karst sur les crues de l'Yèvre à l'amont de Bourges, en Champagne Berrichonne.

La compréhension des processus de crues dans des bassins à composante karstique est complexe du fait de fortes infiltrations en surface et d'interactions prononcées entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Afin de comprendre précisément les processus de genèse de crue dans les bassins où des aquifères karstiques sont présents, il est nécessaire de caractériser le fonctionnement hydrologique (écoulements en surface) et hydrogéologique (écoulements en souterrain) des bassins, en tenant compte des spécificités hydrauliques liées aux formations géologiques karstiques.

L'objectif général de cette étude est de comprendre plus précisément l'origine des différences de réponses hydrologiques observées et de caractériser le fonctionnement des aquifères karstiques locaux et leur potentielle implication dans la genèse des crues régionales, qui est un phénomène peu étudié. Une meilleure compréhension des processus hydrogéologiques pourrait ainsi participer à l'amélioration de la prévision des crues sur les bassins karstiques.

Afin de caractériser les processus hydrogéologiques des différents bassins de l'Yèvre dans la zone amont à Bourges, nous avons mis en œuvre une série d'approches qui reposent sur des données spatiales et temporelles. Ces analyses portent d'une part sur la cartographie géologique, la cartographie de l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR), d'essais de traçages et la piézométrie régionale. Elles portent d'autre part sur les débits classés, l'analyse de l'écoulement de base, les dépendances piézométrie-pluviométrie et piézométrie-débit.

Les résultats ont permis d'identifier des transferts interbassins, notamment dans la partie amont de l'Ouatier qui induisent une augmentation relative de la superficie du bassin d'environ 18%. Des bassins sont favorables à des transferts souterrains, par le biais de pertes (Colin et Airain) et d'autres sont plus favorables à des gains (Ouatier et Auron). Par ailleurs, la variabilité spatiale des couches géologiques permet d'expliquer l'origine du contraste des réactions hydrologiques entre les sous-bassins. En particulier le Moulon qui est situé sur des couches plus imperméables favorables au ruissellement possède des débits de crue plus élevés que les autres sous bassins situés sur des calcaires plus favorables aux échanges verticaux (infiltration) ou latéraux (interbassins).

D'un point de vue opérationnel, l'augmentation relative de la surface associée au bassin de l'Ouatier pourrait être prise en compte pour améliorer les prévisions sur ce bassin. Par ailleurs, la caractérisation des gains et des pertes pourrait être prise en compte pour expliquer des processus d'atténuation (probables pour le Colin et l'Airain) et d'amplification (probables pour l'Ouatier et l'Auron) des débits de crue. Enfin la combinaison de la position relative du Moulon (situé proche de la station de référence à Bourges) et de la réactivité du bassin induit une sensibilité des débits de crue à ce bassin lors d'évènements pluvieux importants.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Présentation du site et des données disponibles 10

2.1. SITE D'ETUDE DU BASSIN DE L'YEVRE 10
2.1.1. Situation régionale 10
2.1.2. Géologie 11
2.1.3. Hydrologie 13
2.1.4. Hydrogéologie 15

2.2. DONNEES DISPONIBLES 17
2.2.1. Données spatiales 17
2.2.2. Données temporelles 17

3. Diagnostic d'évaluation du role du karst sur la genèse des crues 19

3.1. METHODE D'INDICE DE PERSISTANCE DES RESEAUX (IPDR) 19
3.1.1. IDPR sans distinction des régimes d'écoulements 19
3.1.2. IDPR fonction des régimes d'écoulements pérennes et intermittents 21

3.2. METHODE DE CALCUL DU DEBIT DE BASE 21

3.3. METHODE STATISTIQUE DES DEBITS CLASSES 22

4. Analyse du bassin de l'Yèvre 25

4.1. APPLICATION DE L'IDPR 25
4.1.1. IDPR cours d'eau pérennes et intermittents ($IDPR_{PI}$) 25
4.1.2. Prise en compte de l'intermittence 26
4.1.3. Nouvelles limites de bassin pour l'Ouatier 27

4.2. ANALYSE DES DEBITS 28
4.2.1. Débits classés 28
4.2.2. Débits de bases et lien avec l'IDPR 29

4.3. RELATIONS RECHARGE – DEBIT 32
4.3.1. Dépendance pluie – piézométrie 32
4.3.2. Dépendance piézométrie - débits 33

5. Conclusion 36

6. Bibliographie 38

Liste des figures

Figure 1: Carte géologique simplifiée du Berry (d'après D. Vaslet, 2001). 11

Figure 2 : Coupe géologique suivant la vallée du Cher et de l'Auron (d'après Martin & Maget (1998) et Maget et al. (2002))..... 12

Figure 3 : Bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges et principaux sous-bassins topographiques, carte topographique dans le bassin de l'Yèvre. Le réseau hydrographique distingué en rouge est intermittent (BD TOPO et MNT 25m), les triangles rouges représentent les stations hydrométriques. Les zones d'apports, de sources et de pertes sont représentés par les points bleu, mauve et rouge respectivement (données comm. pers. SIVY et EDREE, 2010) 13

Figure 4 : Paysage typique de la Champagne Berrichonne (à gauche) et source du Moulon (à droite), les dépôts orangés du cours d'eau illustrent la présence de fer à la source (clichés BRGM©). 14

Figure 6: Carte des essais de traçage 2345 et 1144 qui montrent des liens hydrauliques entre les bassins de l'Airain et de l'Auron (gauche) et du Colin et de l'Ouatier (droite). En bleu : points d'injections, vert : restitutions avérées et orange : points sans restitution (fond carte – IGN©)..... 16

Figure 7: Cartes des points de mesures des cumuls pluviométriques, des stations hydrométriques et piézométriques dans la région de Bourges. 18

Figure 8 : Réseau hydrographique naturel, réseau de talweg et IDPR correspondant. Figure d'après Charlier & Pinson (2017)..... 20

Figure 9 : Grille d'interprétation des valeurs de l'IDPR construit pour une des écoulements de nature pérennes et intermittents ($IDPR_{PI}$) ou perennes seuls ($IDPR_{P}$) (d'après Charlier & Pinson (2017))..... 21

Figure 10 : Table d'interprétation des débits classés (d'après Mangin (1971) et Marsaud (1997)). 24

Figure 11 : Carte de l'IDPR calculé à partir des cours d'eau pérennes et intermittents (à gauche) et carte géologique harmonisée (1/50000) dans la région (à droite). L'alternance de marnes et de calcaires sur le bassin du Moulon est représentées par les aires bleues cyan hachées. Les calcaires Oxfordiens sont représentés en bleu grisé. La structure géologique régionale en arc est visible dans les parties amont des bassins de l'Auron et de l'Airain (sud/sud-est)..... 25

Figure 12 : Comparaison des fonctions de distribution d'$IDPR_{PI}$ sur les sous-bassins. L'asymétrie prononcée de la fonction de l'Ouatier suggère des parts plus importantes pour l'infiltration. 26

Figure 13: IDPR calculé à partir du réseau d'écoulement pérenne (IDPR P) et ratio de l'IDPR calculé à partir du réseau pérenne et de l'IDPR calculé à partir du réseau pérenne et intermittent. L'IDPR P montre une part importante de zones infiltrantes (à gauche). Le rapport des IDPR P et PI montre les zones où l'intermittence est dominante, notamment dans le bassin du Colin..... 27

Figure 14: Essais de traçages entre le Colin et l'Ouatier (à gauche) sur fond de ratio d'$IDPR_{P}$/$IDPR_{PI}$. Carte piézométrique en hautes eaux en 2000 (à droite). Sur la base des essais de traçages, de la piézométrie et de la topographie, le bassin topographique initial (en bleu) est étendu dans sa partie amont au nord-est (hachuré). Les flèches rouges à droite représentent les directions d'écoulements souterrains. 28

Figure 15 : Débits moyen journaliers classés. A gauche : L'Ouatier (bleu) et le Moulon (noir) ; à droite : l'Airain (bleu) et l'Auron (noir), les lignes rouges indiquent les ruptures de pentes interprétées et les débits associés..... 29

Figure 16 : Débits total (noir) et de base (rouge) de l'Ouatier 31

Figure 17: Débits total (noir) et de base (rouge) du Moulon 31

Figure 18: Dépendance entre $IDPR_{PI}$ moyen et l'indice de débit de base (BFI). La régression (bleu) a pour équation : $BFI(IDPR_{PI}) = -4x10^{-4} \times IDPR_{PI} + 0.69$. Coefficient de détermination (R^2) = 0.47..... 31

Figure 19 : Maxima de corrélations croisées entre les cumuls pluviométriques (ordonnées) et le délai de la corrélation des variations de hauteurs piézométriques (abscisses) pour 5 stations météo et 10 piézomètres du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges. Les corrélations les plus importantes sont obtenus pour des cumuls de 13 à 15 jours et pour des délai cours (<5 j.) pour 5 ouvrages et pour des délais longs (>6 jours) pour 6 ouvrages. Les faibles valeurs de corrélation (<0.6) suggèrent une inertie élevée de la recharge. 33

Figure 20 : Relation piézométrie - débit entre points d'observations de niveaux d'eau pour les sites situés au sein des bassins étudiés. 34

Figure 21 : Débits total (noir) et de base (rouge) - l'Airain 43

Figure 22 : Débits total (noir) et de base (rouge) - Auron 43

Figure 23: Débits total (noir) et de base (rouge) - Moulon 43

Figure 24: Débit total (noir) et de base (rouge) - Ouatier 44

Figure 25: Débit total (noir) et de base (rouge) - Yèvre à Savigny 44

Figure 26: Débit total (noir)et de base (rouge) - Yèvre à St. Doulchard 44

Figure 27 : Corrélation des cumuls de pluies horaires entre les stations d'observations de la région amont de Bourges. La figure montre les faibles corrélations (Tau de Kendall < 0.7 en haut, *** : p.value <0.001, ** : p.value<0.05, * :p.value<0.1) au pas de temps horaire entre toutes les stations..... 45

Figure 28: Comparaison des moyennes des cumuls horaires (trait noir) et des maximas (traits bleu) horaires et des valeurs individuelles enregistrés aux stations en amont de Bourges. La faible dispersion des données par rapport aux valeurs moyenne suggère une uniformité spatiale des épisodes 46

Liste des annexes

Annexe 1 : Table des formations géologiques des sous-bassins..... 40

Annexe 2 : Intermittence des cours d'eau (réseau ONDE)..... 41

Annexe 3 : Débits classés..... 42

Annexe 4 : Débits et débits de bases aux stations (2010-2019)..... 43

Annexe 5 : Stations pluviométriques, corrélation des pluies horaires et cumuls horaires max et moyens par stations..... 45

1. Introduction

La compréhension des processus de crues dans des bassins à composante karstique est complexe du fait d'interactions prononcées entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines. Les écoulements au sein des aquifères karstiques sont contraints par la géométrie d'un réseau de drainage souterrain, en général peu connu, qui permet des transferts de pression et de masse à des vitesses nettement supérieures à celles rencontrées pour des milieux poreux tels que les plaines alluviales. Ce réseau de drainage souterrain peut être en connexion hydraulique directe avec la surface. Ainsi, une fraction ou l'intégralité des écoulements de surface (rivière ou ruissellement) peuvent être ponctuellement redirigés en souterrain, et de manière similaire, les écoulements souterrains peuvent être redirigés en surface. Afin de comprendre précisément les processus de genèse de crue dans les bassins où des aquifères karstiques sont présents, il est nécessaire de caractériser le fonctionnement hydrologique (écoulements en surface) et hydrogéologique (écoulements en souterrain) des bassins, en tenant compte des spécificités hydrauliques liées aux formations géologiques karstiques.

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), le Service de Prévision des Crues Loire-Cher-Indre (SPC LCI) a identifié le besoin d'approfondir la compréhension du rôle des processus karstiques dans la genèse de crues sur le bassin de l'Yèvre, à l'amont de Bourges. Les sous bassins de l'Yèvre se situent en partie sur des terrains calcaires. Parmi ces sous bassins, les réponses hydrologiques (à travers les débits de pointe par exemple) sont très contrastées lors d'épisodes de pluie intense.

L'objectif général est de comprendre plus précisément l'origine des différences de réponses hydrologiques observées et de caractériser le fonctionnement des aquifères karstiques locaux et leur potentielle implication dans la genèse des crues régionales. Dans la région, les formations géologiques de nature calcaire sont reconnues pour leur ressource en eau. Par ailleurs, en surface des zones de pertes ont été identifiées dans les cours d'eau, ce qui témoigne de possibles interactions entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. Dans la région, les implications dans les processus de crues des différences de lithologie et des interactions entre eau de surface et eau souterraines restent peu étudiées. Une meilleure caractérisation des processus hydrogéologiques pourrait ainsi participer à l'amélioration de la prévision des crues sur les bassins karstiques.

Afin de caractériser les processus hydrogéologiques des différents bassins de l'Yèvre dans la zone amont à Bourges, nous mettons en œuvre une série d'approches qui reposent sur des données spatiales et temporelles. Spécifiquement ces analyses portent d'une part sur la cartographie géologique, la cartographie de l'indice de développement et de persistance des réseaux, d'essais de traçages et la piézométrie régionale. Elles portent d'autre part sur les débits classés, l'analyse de l'écoulement de base, les dépendances piézométrie-pluviométrie et piézométrie-débit.

2. Présentation du site et des données disponibles

2.1. SITE D'ETUDE DU BASSIN DE L'YEVRE

2.1.1. Situation régionale

La région d'étude est le bassin de l'Yèvre dans sa partie amont à la ville de Bourges. Cette région se situe au sein du territoire du SPC Loire Cher Indre, à l'est et au sud-est de la ville de Bourges.

Le climat est de type atlantique à tendance continentale. La température annuelle moyenne est relativement douce : de l'ordre de 12°C. La pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 750 mm (station Météo-France de Bourges), avec un pic des cumuls maximaux mensuels moyens au mois de mai (env. 80 mm) et une distribution relativement uniforme des cumuls moyens au cours de l'année (env. 62 mm). La demande évapotranspiratoire est comprise entre 500 et 600 mm/an, la hauteur de pluie efficace est comprise entre 100 et 300 mm/an. Le territoire comprend quelques zones de bocage et de forêt. L'agriculture régionale est dominée par les céréales. De manière singulière, quelques zones viticoles sont présentes dans la région, notamment au Nord du sous bassin du Moulon dans la zone de Ménetou-Salon.

Le territoire est peu vallonné et correspond à l'extrémité orientale de la Champagne Berrichonne, connue pour ses sols calcaires. En amont de Bourges, le bassin de l'Yèvre couvre une superficie d'environ 1779 km^2 (station de Saint Doulchard). Les principaux affluents de l'Yèvre sont : le Moulon et l'Ouatier en rive droite, l'Auron et l'Airain en rive gauche. L'altitude moyenne du bassin est de 186 m. Le point culminant se situe sur les collines du Sancerrois : la Motte d'Humbligny culmine à 429 m, son versant Sud (entre les bassins du Moulon et de l'Ouatier) est drainé par le Colin - un cours d'eau pour lequel l'intermittence est la règle plus que l'exception.

Les surfaces associées aux bassins topographiques des affluents de l'Yèvre sont présentées dans le tableau ci-dessous. La morphologie associée au bassin de chaque affluent est relativement allongée, la longueur du plus court et du plus long bassin est de 16 et 50 km pour le Moulon et l'Auron respectivement.

Cours d'eau	Station Hydro	Code BD Hydro	bassin topographique (km^2)	Période d'observation
Yèvre	Saint Doulchard	K570232001	1779	2008/04 -2018/12
Yèvre	Savigny	K555230001	543	2000/01 - 2018/12
Moulon	Asnières	K557410001	104	2000/01 – 2018/12
Ouatier	Maubranche	K555458001	160	2004/07 – 2018/12
Airain	Crosses	K554301001	305	2000/01 – 2014/04
Auron	L'Ormediot	K565301001	589	2000/01 – 2018/12

2.1.2. Géologie

Dans la région de Bourges, le contexte géologique s'inscrit dans celui du bassin Parisien : les formations sont donc sédimentaires. Le bassin de l'Yèvre est situé à l'extrémité Sud du bassin Parisien, les formations géologiques dominantes retrouvées sont les suivantes (des plus anciennes vers les plus récentes, du Sud vers le Nord) (Figure 1) :

- Une série d'âge Jurassique qui s'appuie sur le Nord du Massif Central et qui forme un arc d'axe Nord-Est – Sud-Ouest. Un pendage affecte ces formations, celui-ci est orienté vers le Nord-Ouest. Comme illustré sur la coupe en Figure 2, ce pendage est important au Sud-Ouest et s'adoucit vers le Nord-Est, notamment au centre du bassin de l'Yèvre.
- Une série plus récente du Crétacé inférieur est aussi présente. Située sur le Jurassique, elle se trouve au Nord de la ville de Bourges, notamment dans le bassin du Moulon.
- Des alluvions et colluvions d'âge Quaternaire recouvrent les formations du Jurassique et du Crétacé. Au centre du bassin de l'Yèvre, ces alluvions sont en lien avec des paléo-vallées ou la vallée actuelle de certains cours d'eau.

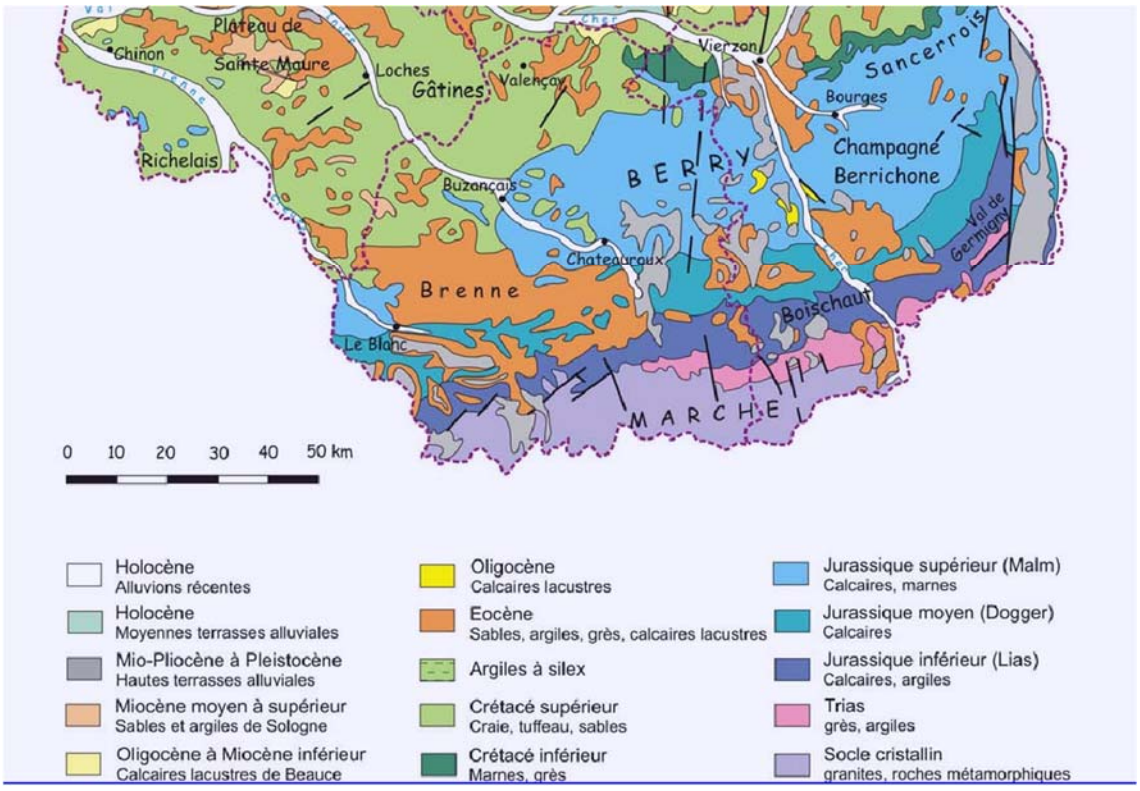


Figure 1: Carte géologique simplifiée du Berry (d'après D. Vaslet, 2001).

La Figure 2 présente une coupe schématique d'axe Nord-Ouest Sud-Est de la région (Maget et al., 2002; Martin & Maget, 1998). La coupe illustre la succession des formations du Jurassique, du Crétacé et du Quaternaire. A l'échelle régionale, au sein du Jurassique, les formations alternent entre argiles et marnes, calcaires et calcaires marneux. Le pendage de ces formations s'adoucit dans la région d'Issoudun-Bourges, ce qui forme un territoire relativement plat : la Champagne berrichonne. Sur le territoire de l'Yèvre, la formation du Jurassique dominante est celle des calcaires de l'Oxfordien supérieur (Malm). Vers le Sud, ces calcaires reposent sur des

marnes de l'Oxfordien inférieur qui reposent elles même sur une alternance de marnes et de calcaires du Dogger. A l'extrémité Sud, avant les couches du Trias figurent des calcaires du Dogger (Bajocien et Bathonien moyen). Ces affleurements du Dogger, à l'extrémité Sud du bassin de l'Auron, constituent des zones de recharge de l'aquifère qui devient confiné lorsqu'il plonge sous le bassin Parisien (Boirat, 1993). Au Nord du bassin, les calcaires de l'Oxfordien sont recouverts par les marnes de Saint-Doulchard (jusqu'à 50 m d'épaisseur) et par des formations marneuses, argileuses et gréseuses du Crétacé inférieur, en particulier dans le bassin du Moulon.

A noter que les formations du Jurassique et du Crétacé peuvent être recouvertes par des dépôts pluri-métriques éolien-argilo-limoneux en lien avec la dernière glaciation (Würm) et des d'autres fluvio-lacustre de l'Eocène. Ces dépôts relativement imperméables sont favorables au développement de territoire de bocage et forêts, comme p. ex. au Nord de Gron où l'Yèvre prend sa source.

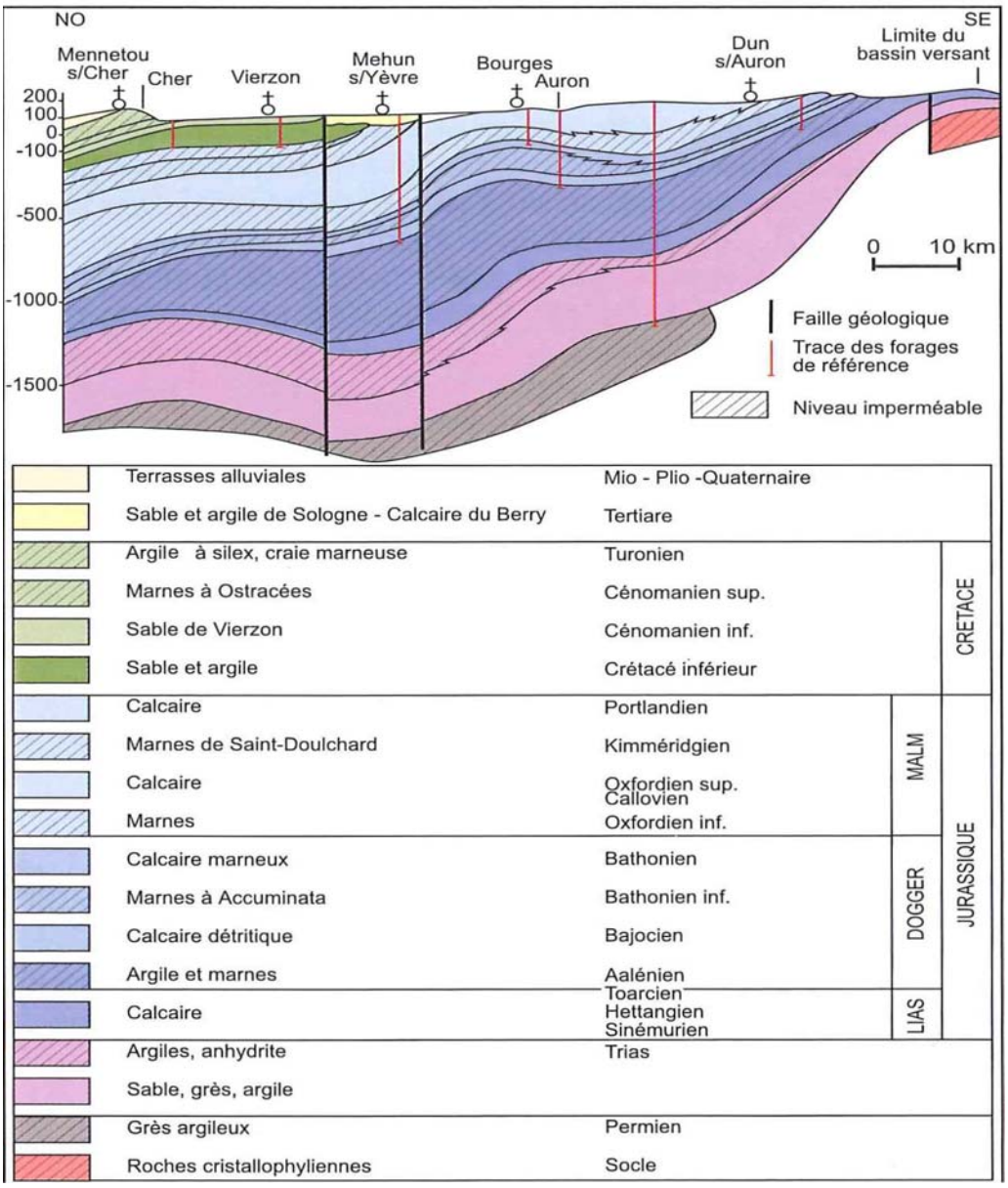


Figure 2 : Coupe géologique suivant la vallée du Cher et de l'Auron (d'après Martin & Maget (1998) et Maget et al. (2002)).

2.1.3. Hydrologie

Le réseau hydrographique du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges est peu dense. Sa morphologie est intimement liée à la nature des terrains traversés, les calcaires d'âge Jurassique à faible pendage de la Champagne berrichonne. A son amont, l'Yèvre prend sa source à l'Est de Bourges dans la forêt la Cour Fonju au Nord de Gron. De sa source (altitude 191 m) à la station hydrométrique de Saint-Doulchard à Bourges (altitude 123 m) l'Yèvre parcours 39 km. Bien qu'elle coule sur une lithologie composée de calcaires et de marnes favorables à l'érosion (incision), le lit de l'Yèvre est relativement plat et ne forme aucune gorges (Figure 4). Il suit et sculpte des terrains peu vallonnés (Boirat, 1993).

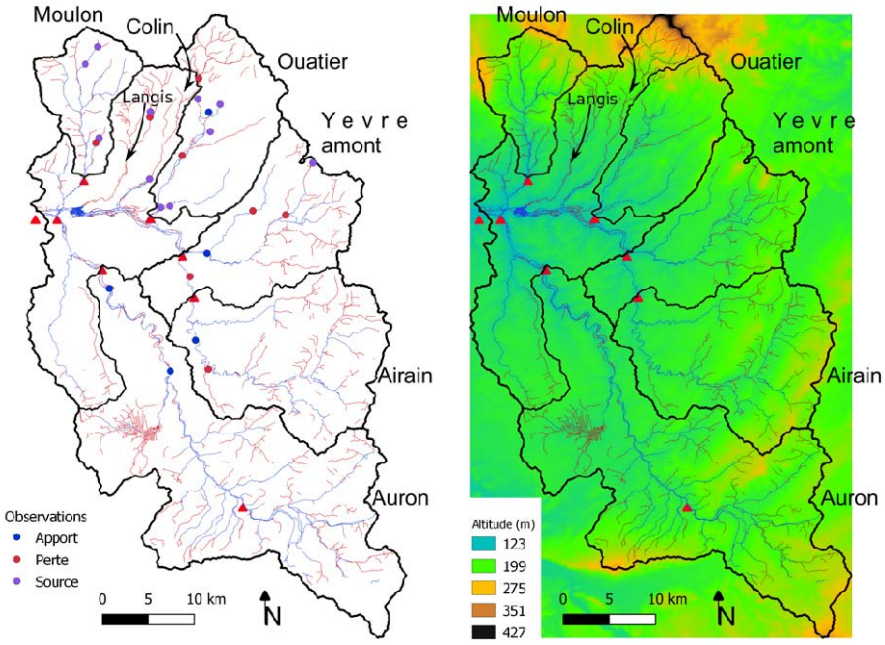


Figure 3 : Bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges et principaux sous-bassins topographiques, carte topographique dans le bassin de l'Yèvre. Le réseau hydrographique distingué en rouge est intermittent (BD TOPO et MNT 25m), les triangles rouges représentent les stations hydrométriques. Les zones d'apports, de sources et de pertes sont représentés par les points bleu, mauve et rouge respectivement (données comm. pers. SIVY et EDREE, 2010) .

L'Yèvre à l'amont de Bourges a plusieurs affluents en rive droite : Le Moulon, le Colin, l'Ouatier et le Langis. Ces rivières prennent source à une altitude d'environ 200 m, sur les collines du Pays-Fort. Les écoulements sont orientés du Nord vers le Sud. La forme de ces sous-bassins est relativement plus allongée que celle des affluents en rive gauche, l'Auron et l'Airain. En rive gauche, l'affluent qui contribue de manière importante au débit de l'Yèvre est l'Auron, qui prend sa source au Sud sur les contreforts du massif central. Un affluent mineur de l'Auron, situé à l'ouest, est la Rampenne qui est fréquemment à sec. L'Airain est le second affluent de l'Yèvre en rive gauche où l'axe d'écoulement est principalement orienté du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Les sous-bassins des affluents de l'Yèvre sont dissymétriques : les sous-bassins en rive gauche sont plus allongés que ceux en rive droite.



Figure 4 : Paysage typique de la Champagne Berrichonne (à gauche) et source du Moulon (à droite), les dépôts orangés du cours d'eau illustrent la présence de fer à la source (clichés BRGM©).

Les différentes morphologies rencontrées dans les sous-bassins trouvent en partie leur origine dans la variété des lithologies rencontrées. La forme arquée de la bordure sud du bassin parisien (cf. Figure 1) met à l'affleurement une succession de lithologies qui est détaillée dans l'inventaire réalisé par l'état des lieux du SAGE Yèvre-Auron (voir Annexe 1). Celui-ci identifie trois groupes de sous-bassins (SAGE, 2005) :

1. L'Auron amont et l'Airain ont leurs sources sur les couches les plus anciennes, imperméables. Les cours d'eau atteignent ensuite la série du Jurassique supérieur calcaire (Malm). En rive gauche l'Auron est couvert d'une couverture tertiaire (10m) qui favorise les écoulements de surface.
2. L'Yèvre amont, l'Ouatier, le Colin, le Langis, l'Auron aval et la Rampenne coulent sur les formations perméables calcaire du Jurassique supérieur. Les sources de ces cours d'eau émergent à la faveur de contacts avec des terrains moins perméables : marnes du Jurassique, sables et argile du Crétacé inférieur, et argiles lacustre du Tertiaire respectivement. Les cours d'eau ont peu d'affluents, la couverture de limons est relativement absente avec des épaisseurs nulles ou de quelques mètres.
3. Le Moulon prend sa source sur les terrains du Crétacé constitués d'une alternance d'argile et de sables qui présentent des éléments ferrugineux. La source du Moulon est ainsi ferrugineuse (Figure 4). Le cours d'eau du Moulon coule sur des terrains imperméables du Crétacé puis rejoint les couches marneuses du Jurassique Supérieur (Kimméridgien, marnes de St-Doulchard).

A la faveur de ces changements de lithologie, les processus d'apports et de pertes dans les cours d'eau de la région de l'Yèvre reflètent les interactions prononcées entre eau de surface et eau souterraine. Ces interactions sont en lien avec le contexte hydrogéologique qui est présenté ci-après. Les périodes d'intermittence de l'Yèvre et de la majeure partie de ses affluents sont documentées depuis les années 1990 par des observations ponctuelles. Depuis 2012, ces observations catégorisées (écoulement visible, non visible, assec) sont reportées sur le réseau ONDE (Observatoire National Des Etiages). A l'amont de Bourges, ce réseau d'observation est composé de 13 stations, réparties sur le bassin (à l'exception du sous-bassin du Moulon). L'irrégularité des écoulements est illustrée par les phases successives entre écoulements visibles de fin de période de hautes eaux (à la fin du printemps) et les assecs fréquents de fin de la période estivale (septembre). Sur des données disponibles depuis 2012, une tendance à l'augmentation des assecs sur l'ensemble du territoire semble être observée depuis 2017 (illustration en Annexe 2).

La Figure 3 présente les zones de pertes et d'apports identifiées par jaugeages (EDREE, 2010) sur l'Airain et l'Auron ainsi que des observations réalisées par le Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Yèvre (SIVY) qui mettent en évidence des assecs et des pertes sur certains tronçons des cours d'eau. Au mois d'octobre 2008, des différences de débits mesurées sur l'Airain mettent en évidence une zone d'apport et deux zones de pertes et deux zones d'apports identifiées sur l'Auron (EDREE, 2010).

A ce jour, il n'existe pas d'évaluation quantitative des volumes d'eau transférés entre les sous-bassins par voie souterraine. Ces volumes pourraient être estimés par le biais de bilans annuels entre les pluies efficaces et les débits écoulés pour chaque sous-bassins.

Les processus de crue résultent de fronts pluvieux d'origine océanique (Dir. Inondation Loire-Bretagne). Le recensement des crues historiques présentés dans le PPRi de l'Yèvre amont et dans l'état des lieux rédigé par le SAGE Yèvre-Auron (SAGE, 2005) indique que les évènements les plus importants ont eu lieu en mai 1836, mai 1856, janvier 1910, mars 1919, février (1945), décembre (1952), février 1957, décembre 1982 et mai 2001. Les crues majeures récentes ont eu lieu en mai 2008, février et novembre 2013, mai 2015 et mai-juin 2016. Ainsi, deux périodes sont propices aux crues (i) en hiver, principalement en février et (ii) à la fin du printemps, en mai.

Les analyses des temps de propagations des ondes de crues rapportées par le SAGE Yèvre-Auron mettent en évidence que l'arrivée des ondes de crues à la confluence entre l'Yèvre et l'Auron est structurée : en général, les crues de l'Auron précèdent celles de l'Yèvre de 0 à 40 h, et dans 60% des cas, le débit de pointe atteint à la station du Boulevard de l'Avenir (à Bourges) est généré par la crue de l'Auron. D'après les mesures de débits, il existe un fort contraste entre les processus de propagation de crues de l'Auron et de l'Yèvre. Sur l'Auron, le temps de réponse des débits (délai) entre les deux stations est peu variable et de l'ordre de 20 h ; le signal de débit n'est pas perturbé par des cours d'eau dans la partie aval. Sur l'Yèvre, le délai moyen de propagation des débits est de l'ordre de 70h, mais la dispersion de ce délai est élevée (entre 32 et 123 h). En outre, les débits amont et aval ont une faible dépendance du fait de la contribution des nombreux affluents de l'Yèvre en rive droite après la station amont.

2.1.4. Hydrogéologie

Les études hydrogéologiques récentes menées sur le territoire du Cher et de l'Indre portent sur la caractérisation des quantités et de la qualité des eaux souterraines dans les différentes masses d'eau exploitables (Maget et al., 2002; Maget, Le Boucher, & Gaget, 2005; Martin, 2005). La description du contexte hydrogéologique proposée ci-dessous est basée sur ces travaux et sur la synthèse de Lelong (2006).

Les différents types d'aquifères présents sur le territoire berrichon sont :

- Les aquifères poreux, en lien avec des alluvions, généralement à surface libre et localisés dans les grandes vallées.
- Les aquifères poreux, libres ou captif dans les dépôts du Trias ou de l'Infra-Lias.
- Les aquifères discontinus, libres ou captifs dans des calcaires fissurés et karstifiés du Jurassique.

Les aquifères contenus dans les calcaires fissurés du Jurassique sont les plus étendus et les plus importants en terme de volumes exploitables. L'eau qui s'y présente est la ressource locale pour des usages principalement agricole et domestique (AEP) et en moindre mesure industriel (Martin, 2005). Une carte piézométrique régionale a été réalisée en période de basses et hautes eaux entre 2000 et 2001 (IWACO, 2001).

Dans la région du bassin de l'Yèvre, le principal aquifère libre est contenu dans les calcaires du Jurassique supérieur : du Calcaire de Buzançais (Kimméridgien inf.) au Calcaire de Bourges (Oxfordien sup.). Cet aquifère est représenté par la référence 4077 de la BDLISA. Dans cet aquifère la lithologie est souvent compacte et les écoulements semblent suivre des objets à perméabilité plus élevée, par exemple : les fissures, fractures ou conduits karstiques en lien avec des accidents structuraux (faille ou anticlinaux), et des zones favorables à la dissolution (vallée).

Les amplitudes des fluctuations piézométriques annuelles dans les calcaires Jurassique sont variables. Les fortes amplitudes décamétriques reflètent un faible emmagasinement. Bien que l'amplitude de ces fluctuations soient importantes au regard d'autres plus faibles rencontrées dans des milieux poreux (nappes alluviales), elles restent relativement différentes de comportements hydrodynamiques rencontrés dans des aquifères karstiques présents dans d'autres contextes hydrogéologiques. Par exemple, en contexte méditerranéen, la piézométrie mesurée dans des ouvrages en lien avec des conduits karstiques peut varier de plusieurs dizaines de mètres en une journée sous l'effet d'épisodes de pluies intenses. Des similitudes sont toutefois remarquables, en particulier : des vitesses élevées pour le transport de masse et comme nous le verrons par la suite, des zones de contribution aux écoulements externes au bassin hydrologique – ces similitudes sont mises en évidence par des expériences de traçages artificiels.

Des traçages artificiels ont été réalisés pour préciser les modalités d'interactions entre eau de surface et eau souterraine. Au Sud, des traçages depuis des pertes et des ouvrages souterrains (puits) n'ont permis de mettre en évidence qu'une relation hydraulique entre le puits 05205X0037 (proche de l'Airain à Vornay) et l'Auron (Ormediot), au moment de l'expérience[1] (Figure 5). Toutefois des processus de pertes et d'apports entre les cours d'eau de l'Airain et de l'Auron ont été identifiés par jaugeages (cf. supra). Par ailleurs, au Nord des traçages effectués dans le lit du Colin à Aubinges ont mis en évidence un transfert partiel des écoulements vers l'Ouatier avec une résurgence à Valentigny[2] (

Figure 13).



Figure 5: Carte des essais de traçage 2345 et 1144 qui montrent des liens hydrauliques entre les bassins de l'Airain et de l'Auron (gauche) et du Colin et de l'Ouatier (droite). En bleu : points d'injections, vert : restitutions avérées et orange : points sans restitution (fond carte – IGN©).

[1] http://fichetracages.brgm.fr/fichetracage?idtracage=2345

[2] http://fichetracages.brgm.fr/fichetracage?idtracage=1144

2.2. DONNEES DISPONIBLES

2.2.1. Données spatiales

Les données spatiales acquises dans la zone d'étude sont :

- La topographie IGN 1/25000,
- Le réseau hydrographique issu de la BD CARTHAGE,
- La carte géologique harmonisée BRGM à l'échelle 1/50000,
- Les « indices » karstiques (gouffre, cavité, dépression) : données issues de l'inventaire publiées sur le portail Géorisques,
- Les données « eaux souterraines » avec
    - La piézométrie en basse et hautes eaux
- Les traçages artificiels recensés en ligne sur le SIGES Centre
- Les cartes d'indice de développement et de persistance des réseaux IPDR (BRGM)
    - Cours d'eau permanents ($IDPR_P$)
    - Cours d'eau permanents et intermittents ($IDPR_{PI}$)

2.2.2. Données temporelles

Les données temporelles acquises dans la zone d'étude sont :

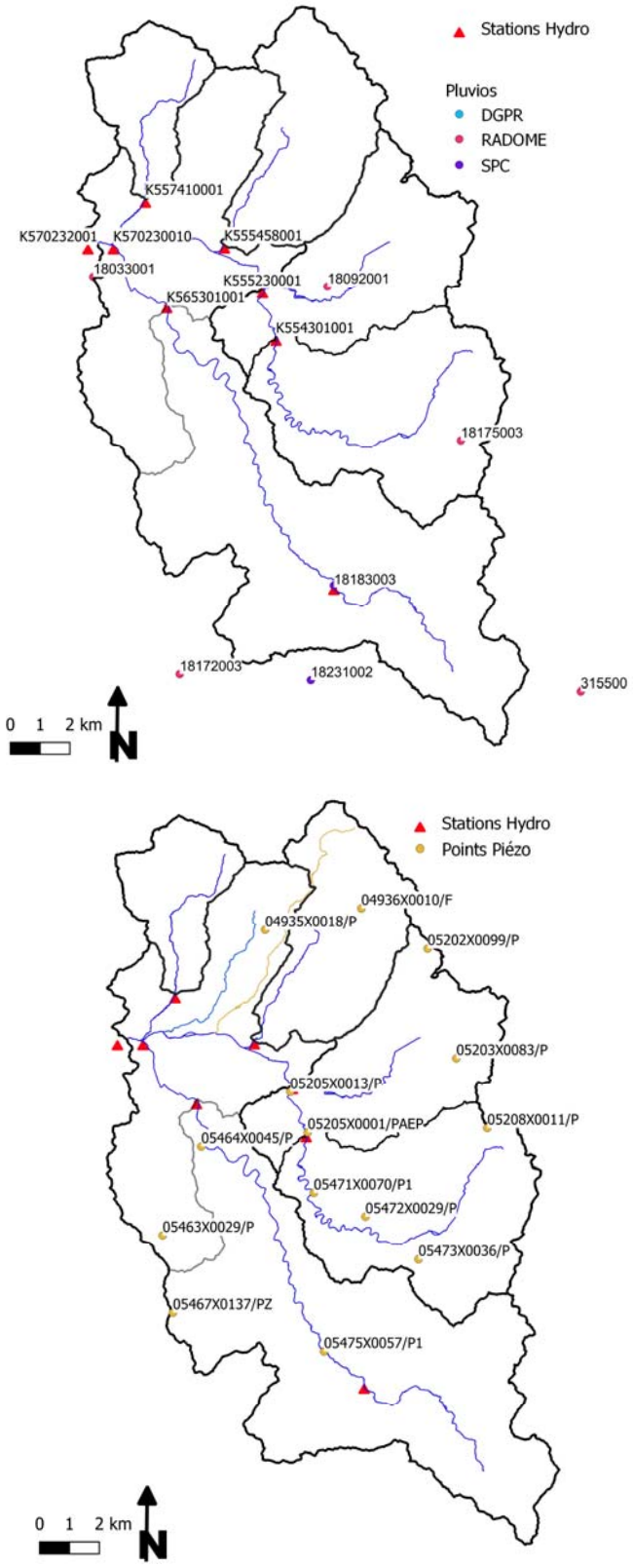
- Les précipitations aux stations météorologiques de Meteo-France (Tableau 1) et SPC
- L'ETP moyennée sur chaque bassin et sous-bassins (Météo France)
- Le débit aux stations hydrométriques (SPC)
- Les données de piézométrie journalière issues d'ADES sur les piézomètres régionaux

Code	Nom	Réseau	x	y	z	Bassin
03155003	LURCY-LEVIS SA	RADOME	695954	6624243	225	Auron amont
18033001	BOURGES	RADOME	651359	6662294	161	Yèvre aval
18092001	AVORD	RADOME	672786	6661381	175	Yèvre amont
18175003	OUROUER	RADOME	684986	6647251	221	Airain
58160001	NEVERS-MARZY	RADOME	708569	6655351	175	Hors-zone
18047001	CHAPELLE-D'ANG SAPC	DGPR	656686	6697207	190	Ouatier
18231002	ST-PIERRRE LES ETIEUX	SPC	671261	6625235	171	Hors-zone
18279006	VIERZON	SPC	629271	6679990	100	Hors-zone
18183003	LE PONDY	SPC	673374	6633959	168	Auron

Tableau 1 : Stations météorologiques ouvertes situées proches ou sur la zone d'étude.

La Figure 6 présente l'emplacement des stations hydrométriques des piézomètres et des stations de mesure des cumuls pluviométriques situés dans la zone d'étude.

Figure 6: Cartes des points de mesures des cumuls pluviométriques, des stations hydrométriques et piézométriques dans la région de Bourges.



3. Diagnostic d'évaluation du role du karst sur la genèse des crues

Dans un contexte où les processus de ruissellement sont en partie le résultat d'interactions surface/souterrain en zones karstiques, il semble déterminant de préciser la géométrie des zones favorables aux transferts de surface (ruissellement) et celles aux transferts verticaux (infiltration). L'implication de zones karstiques dans la genèse de crue est complexe car celles-ci peuvent amplifier ou atténuer/déphaser les écoulements en rivière. A la faveur d'infiltration localisée et de transferts de pression rapides, les débits de sources karstiques peuvent augmenter rapidement et contribuer significativement aux crues. Les processus d'infiltration rapide dans le karst peuvent également être à l'origine d'un stockage temporaire ayant pour effet d'atténuer le ruissellement et de déphaser la contribution en rivière. Les modalités temporelle d'infiltration sont cruciales : si la capacité d'infiltration est réduite, la contribution à la crue peut alors être modifiée, notamment par amplification du ruissellement.

La cartographie du ruissellement et de son évolution en fonction des propriétés géologiques et notamment karstiques est une étape importante pour préciser les unités contributives aux écoulements. Cette précision permet par la suite d'être utilisée pour la paramétrisation de modèles de prévision. Des méthodes de cartographie des zones ruisselantes ont été développées et appliquées en contexte de crues karstiques sous climat Méditerranéen (Pinson & Charlier, 2018) p. ex dans les régions PACA (bassin du Calavon-Coulon cf. : Charlier, Chapuis, & Desprats, 2013; Charlier, Rivert, Mardhel, Pourtout, & Desprats, 2016) et Occitanie (Cesse cf. : Charlier & Pinson, 2017). A ce jour, ces méthodes n'ont pas été appliquées dans un contexte climatique océanique comme celui auquel sont soumises les formations carbonatées de la région centre.

Cette section présente les principales méthodes mises en œuvre par la suite pour la caractérisation des eaux d'origines karstiques dans la genèse de crue sur le bassin amont de l'Yèvre.

3.1. METHODE D'INDICE DE PERSISTANCE DES RESEAUX (IPDR)

3.1.1. IDPR sans distinction des régimes d'écoulements

L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) aide à la qualification des chemins empruntés sur un bassin versant par l'eau de surface (Mardhel & Gravier, 2005). Outre les processus d'évapo(transpi)ration de l'eau, l'eau sous forme liquide quitte un bassin soit

- Par ruissellement de surface dans un cours d'eau,
- Par une infiltration et un écoulement souterrain, dans un aquifère.

L'IDPR permet de qualifier les parts d'écoulements qui ruisselle et s'infiltre par le biais d'une indication relative à la géomorphologie actuelle du terrain et des écoulements à travers la connaissance du réseau hydrographique. Ainsi, l'IDPR résulte de l'hypothèse selon laquelle le réseau hydrographique est dépendant des formations géologiques sous-jacentes.

Le calcul d'IDPR se base sur la comparaison entre un réseau de drainage hydrographique théorique, où chaque talweg est associé à une rivière -- indice de développement -- et le réseau hydrographique naturel -- persistance des réseaux. La Figure 7 montre le résultat du calcul réalisé pour une grille donnée : on obtient ainsi une carte de l'indice qui représente le ratio de distance entre un réseau théorique et un réseau réel. Pour chaque cellule, le calcul d'IDPR est :

$$IDPR = \frac{distance\ au\ plus\ proche\ cours\ d'eau\ théorique}{distance\ au\ plus\ proche\ cours\ d'eau\ réel} \times 1000.$$

Les valeurs élevées associées à cette métrique sont donc des zones où le réseau hydrographique est dense. Ces entités ont une tendance aux transferts de surface (ruissellement). Au contraire, les valeurs faibles de la métrique sont associées à des zones où le réseau hydrographique est peu dense. Dans ces entités, les transferts sont principalement verticaux, vers le souterrain. Par construction, les distributions de valeurs d'IDPR évoluent dans la gamme 0-2000, et les classes suivantes sont généralement identifiables :

- IDPR = 0 : talweg au cours d'eau absent
- IDPR = 1000 : talweg avec cours d'eau présent
- IDPR = 2000 : zone remplie d'eau non décrite par un talweg.

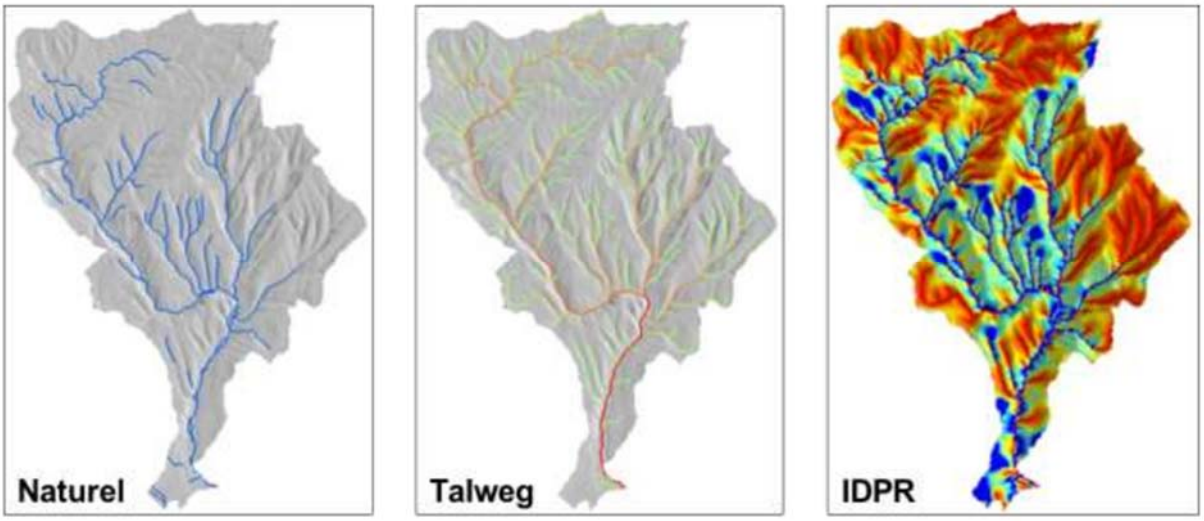


Figure 7 : Réseau hydrographique naturel, réseau de talweg et IDPR correspondant. Figure d'après Charlier & Pinson (2017).

En pratique, le calcul d'IDPR repose sur plusieurs produits de système d'information géographique. Bien que les réseaux hydrographiques réels soient identifiés et cartographiés, les précisions relatives à leur nature (intermittence, canaux, plan d'eau) et à leur position restent quelques fois incertains. En outre, la détermination des positions des cours d'eau théoriques, qui relève d'un traitement d'analyse de pente sur un territoire maillé, dépend de la résolution et de la précision du modèle numérique de terrain employé. On retiendra que plusieurs cartes d'indice IDPR peuvent être obtenues, en particulier en fonction de la précision des données employées mais aussi en fonction de la nature des écoulements dans les cours d'eau réels (intermittents ou pérennes).

3.1.2. IDPR fonction des régimes d'écoulements pérennes et intermittents

Une présentation détaillée de l'IDPR calculé en fonction de la nature du régime d'écoulement est présentée par Pinson & Charlier (2018). En contexte karstique, les écoulements intermittents peuvent dénoter du changement hydrologique temporaire des terrains, notamment une diminution de la capacité d'infiltration et une augmentation du ruissellement. En tenant compte de l'intermittence (p. ex. en supprimant les cours d'eau intermittent du calcul), la carte d'IDPR peut changer drastiquement. Pour comparer deux cartes d'IDPR construites selon la nature des écoulements de cours d'eau, il est intéressant d'étudier le rapport de l'IDPR calculé avec un réseau d'écoulements pérennes et intermittents ($IDPR_{PI}$) au calcul intégrant les écoulements pérennes seuls ($IDPR_P$). Ce rapport, $IDPR_P$ / $IDPR_{PI}$, permet de qualifier la temporalité de l'intermittence. Un ratio proche de 1 met en évidence une d'intermittence nulle alors qu'un ratio proche de 0 met en évidence une intermittence importante. Une grille d'interprétation des différentes classes de valeurs d'IDPR et du ratio des $IDPR_P$ / $IDPR_{PI}$ est présentée sur la Figure 8.

Guide d'interprétation			IDPR_PI			
			Classe	0 - 800	800 - 1200	1200 - 2000
			Inf. & Ruis.	Infiltration majoritaire	Infiltration et ruissellement de même importance	Ruissellement majoritaire
Ratio IDPR_P / IDPR_PI	Classe	Ruissellement temporaire				
	0 – 0.25	Fort		Zone à dominante infiltrante contribuant potentiellement fortement aux crues (réseau intermittent)	Zone à l'interface entre Infiltration et Ruissellement contribuant potentiellement fortement aux crues	Zone à dominante ruisselante contribuant potentiellement fortement aux crues
	0.25 – 0.5	Moyen		↕	↕	↕
	0.5 - 0.75	Faible		↕	↕	↕
	0.75 – 0.95	Très faible		↕	↕	↕
	0.95 – 1	Aucun		Zone à dominante infiltrante quel que soit la période de l'année (talweg « sec »)	Zone à l'interface entre Infiltration et Ruissellement ne contribuant potentiellement pas de manière significative à des crues	Zone à dominante ruisselante tout au long de l'année

Figure 8 : Grille d'interprétation des valeurs de l'IDPR construit pour une des écoulements de nature pérennes et intermittents ($IDPR_{PI}$) ou perennes seuls ($IDPR_P$) (d'après Charlier & Pinson (2017)).

3.2. METHODE DE CALCUL DU DEBIT DE BASE

Le calcul du débit de base d'un cours d'eau permet de quantifier la part des écoulements qui peuvent être en lien avec un délai d'infiltration ou des transferts d'eau plus lents. En l'absence d'évènements neigeux et de stockage dans des réservoirs, l'écoulement de base dans un cours d'eau est majoritairement influencé par les apports souterrains. Le calcul fait donc l'hypothèse qu'un écoulement en rivière est la somme de deux composantes : un écoulement rapide et un écoulement lent et que les part de contributions à l'écoulement total varie au cours du temps.

Ainsi, le débit total q peut s'écrire :

$$q_k = f_k + b_k,$$

où q est le débit total, f est le débit de la composante d'écoulement rapide, b est la composante de l'écoulement lent (débit de base) et k est le pas de temps. Pendant, les périodes de temps où les eaux souterraines ne sont pas influencées par la recharge, le modèle de récession plausible est celui exponentiel. On fait alors l'hypothèse que le flux sortant de l'aquifère est linéairement proportionnel à son emmagasinement. Le débit de base, b, peut ainsi s'écrire :

$$b_{k+1} = b_k \times e^{\{-\delta t\}\tau} = \mathrm{a}b_k,$$

où δt est la longueur du pas de temps, τ est une constante de temps caractéristique, $a = e^{\{-\delta t\}\tau}$. La contribution des écoulements lents au débit est progressive et la courbe des débits associés présente en général des variations à basse fréquence et de faible intensité. Ceci implique d'une part, que les longueurs d'onde correspondantes aux basses fréquences d'un débit de cours d'eau sont liées aux processus d'écoulement lent et, d'autre part, que les longueurs d'onde correspondante aux hautes fréquences sont plus liés à des processus de surface. Ainsi Lyne & Hollick (1979) propose de déterminer le débit de base, b, en utilisant un filtre passe bas :

$$b_k = \alpha b_{k-1} + \frac{1-\alpha}{2}(y_k + y_{k+1}) \quad ,$$

avec α la valeur du filtre (Lyne & Hollick (1979) propose α = 0.925 de manière générique) et y_k est le débit total au pas de temps k .

Le calcul d'une fraction d'écoulement permet de s'affranchir des valeurs de débits qui peuvent varier selon des magnitudes différentes -- en fonction notamment de la taille des bassins. L'indice de débit de base (BFI) quantifie la part moyenne de l'écoulement lent à l'écoulement total. Le BFI est le ratio entre la valeur moyenne (dénoté par les crochets ci-dessous) du débit de la composante lente et la valeur moyenne du débit total :

$$BFI = \frac{<b>}{<q>} \quad .$$

Dans un contexte de caractérisation des processus de contribution des aquifères karstiques au crues, le calcul du débit de base permet d'aider à la caractérisation des réponses hydrologiques des différents sous-bassins. A l'aide du débit de base, nous chercherons à explorer les questions suivantes :

- Sur des terrains soumis à un même contexte climatique, les débits de base montrent-ils une variabilité qui pourrait être expliquée par des caractéristiques du bassin ?
- Si une caractéristique existe, existe-t-il une métrique qui puisse aider à quantifier un lien entre caractéristique du bassin et des capacités de ruissellement ou d'infiltration ?

3.3. METHODE STATISTIQUE DES DEBITS CLASSES

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser et de classifier les différents régimes d'écoulement observables à un exutoire d'aquifère karstique. Cette méthode permet d'identifier si les fréquences d'apparitions de débits ont des ruptures de pentes notables, celles-ci pouvant être mises en correspondance à des processus hydrologiques spécifiques (Crochet & Marsaud, 1997). Par la suite la méthode est appliquée à la caractérisation des cours d'eau (et non de source), l'interprétation de la méthode originale est donc modifiée.

La méthode initialement proposée par Mangin (1970) consiste à classer les débits dans des groupes et d'ajuster une loi statistique de référence (loi Normale ou Log-Normale par exemple). L'ajustement de cette loi permet de construire un graphique diagnostique qui permet de comparer les déviations entre les valeurs observées et les valeurs théoriques de la loi. Ces déviations se traduisent par une (ou des) ruptures de pentes significative(s), pour des valeurs de débits critiques. Ces ruptures apparaissent en général pour des valeurs de débit extrêmement faibles (< premier quartile) et pour des valeurs élevées (> dernier quartile). L'interprétation des ruptures de pente aux valeurs faibles est entachée d'incertitude du fait des faibles fréquences d'apparition qui y sont associées. Mangin (1970) recommande de ne pas interpréter ces ruptures. En revanche, avec l'analyse de variables complémentaires (notamment la piézométrie), les ruptures de pentes aux valeurs moyennes et/ou aux valeurs élevées permettent de mettre en évidence et d'identifier différents processus :

- Dans le cas d'une source : un fonctionnement de trop plein, la fuite vers un autre système voisin, le stockage momentané ou des débordements de la station de jaugeage pendant les crues. Dans le cas d'une rivière : potentiellement un défaut de la station de jaugeage.
- Dans le cas d'une source des contributions externes au bassin (augmentation de l'aire d'alimentation) ou des mesures de débits à la station influencées par un autre système. Dans le cas d'une rivière : des apports souterrains issus de bassins voisins.

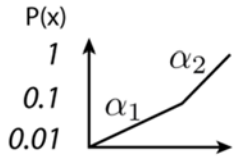
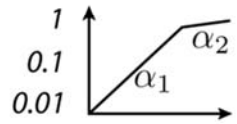
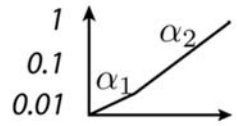
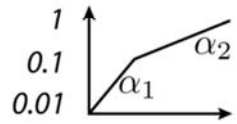
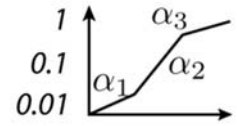
Ruptures de pente et probabilités	Schéma	Interprétations
Fortes probabilités $\alpha_1 < \alpha_2$		- Fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un système externe - Stockage temporaire - Fuite ou débordement de la station de jaugeage en hautes eaux
$\alpha_1 > \alpha_2$		- Apports en provenance d'un autre système - Apports externes au bassin contribue au débit mesuré à la station de jaugeage
Basses probabilités $\alpha_1 < \alpha_2$		- Constitution d'une réserve
$\alpha_1 > \alpha_2$		- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
$\alpha_1 < \alpha_2$ et $\alpha_2 > \alpha_3$		- Stockage d'un volume d'eau pendant la décrue et restitution pendant le tarissement

Figure 9 : Table d'interprétation des débits classés (d'après Mangin (1971) et Marsaud (1997)).

4. Analyse du bassin de l'Yèvre

4.1. APPLICATION DE L'IDPR

4.1.1. IDPR cours d'eau pérennes et intermittents ($IDPR_{PI}$)

La Figure 10 présente le calcul de l'$IDPR_{PI}$ sur une grille de 25m de côté, avec le réseau hydrographique de la BD TOPO, sans distinction relative au régime d'écoulement des cours d'eau. En complément, nous présentons la carte géologique harmonisée où figurent les formations marneuses (en bleu cyan) sur le bassin du Moulon et les formations Jurassique (en violet / lavande) sur la majorité du territoire. La carte d'$IDPR_{PI}$ montre la présence de terrains qui favoriseraient l'infiltration sur l'ensemble des parties aval des sous bassins de l'Yèvre à l'amont de Bourges, aux exceptions de deux cas extrêmes : les sous bassins du Moulon et de l'Ouatier qui présentent une faible et forte densité de zone « infiltrantes » respectivement. Une analyse plus détaillée de la distribution spatiale des valeurs d'$IDPR_{PI}$ met en évidence que le sous bassin du Colin ne ressort pas spécifiquement comme infiltrant ce qui est en contradiction avec les processus d'intermittence identifiés sur le terrain. Les valeurs de l'$IDPR_{P}$ en tenant compte du régime d'écoulement avec les cours d'eau pérennes seuls permettra de préciser ces éléments.

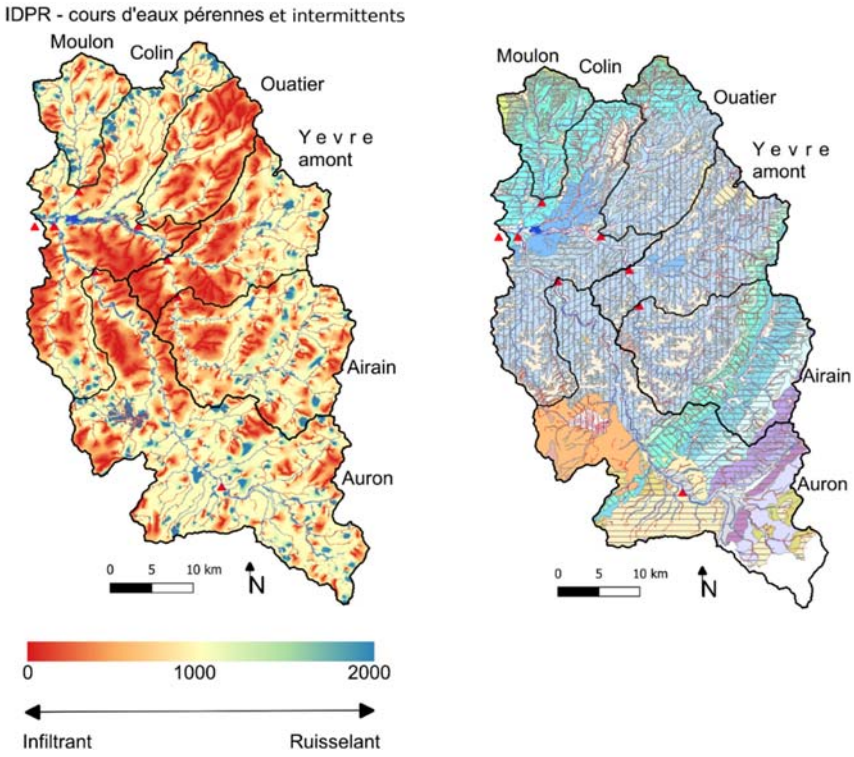


Figure 10 : Carte de l'IDPR calculé à partir des cours d'eau pérennes et intermittents (à gauche) et carte géologique harmonisée (1/50000) dans la région (à droite). L'alternance de marnes et de calcaires sur le bassin du Moulon est représentées par les aires bleues cyan hachées. Les calcaires Oxfordiens sont représentés en bleu grisé. La structure géologique régionale en arc est visible dans les parties amont des bassins de l'Auron et de l'Airain (sud/sud-est).

Pour interpréter plus en détail la répartition spatiale de l'$IDRP_{PI}$ sur les bassins versants, nous proposons d'analyser la distribution des valeurs dans chaque sous bassins. Ainsi, les fonctions de densités ont été calculées en respectant des classes d'$IDPR_{PI}$ identiques (Figure 11). Ces densités présentent une valeur maximale autour de la valeur 1000 en lien avec la forte répartition de cette valeur sur l'ensemble des sous bassins. En outre, les densités ont une distribution asymétrique (négative), de manière générale les ailes aux valeurs basses d'IDPR sont plus prononcées.

La répartition relative des valeurs basses d'$IDPR_{PI}$ met en évidence une graduation du caractère infiltrant/ruisselant entre les sous bassins. Ceux-ci peuvent être classés du plus infiltrant au plus ruisselant : l'Ouatier, l'Yèvre amont (Savigny), l'Airain, l'Auron, l'Yèvre à Saint Doulchard et le Moulon. Comme nous le verrons par la suite, cette classification permet de mettre en évidence un lien avec la géologie ainsi qu'une dépendance entre les valeurs moyennes d'$IDPR_{PI}$ et de débit de base. Cette analyse pointe la prédominance relative du ruissellement pour le bassin du Moulon.

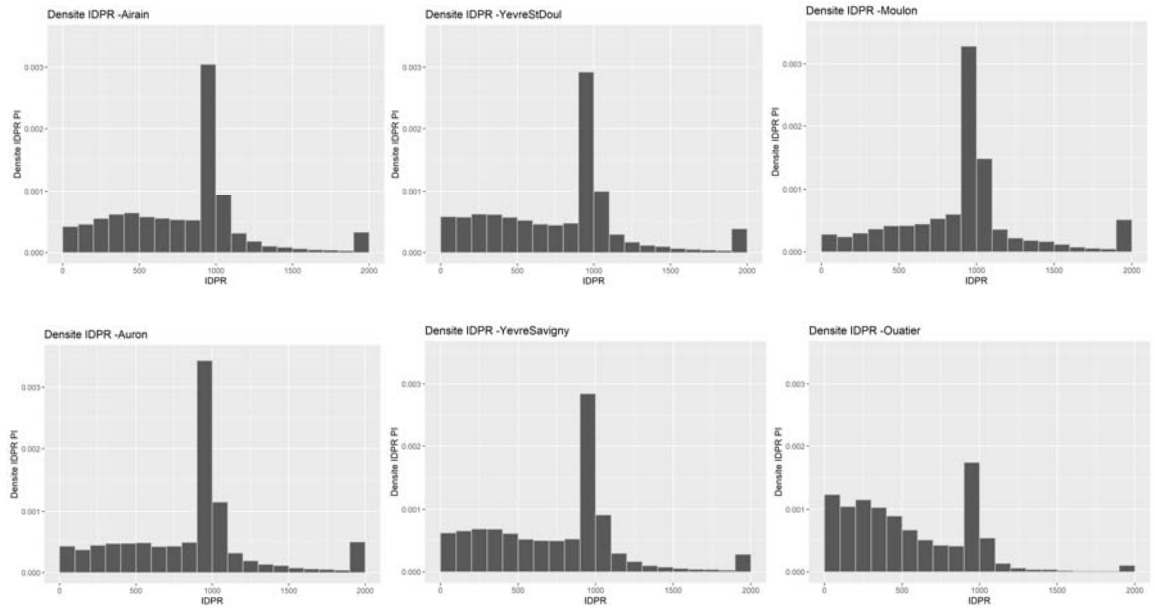


Figure 11 : Comparaison des fonctions de distribution d'$IDPR_{PI}$ sur les sous-bassins. L'asymétrie prononcée de la fonction de l'Ouatier suggère des parts plus importantes pour l'infiltration.

4.1.2. Prise en compte de l'intermittence

L'IDPR recalculé en tenant compte du régime d'écoulement pérenne ($IDPR_P$) obtenu à partir de la BD TOPO est présenté sur la Figure 12. La figure présente également le rapport d'IDPR écoulement pérenne sur l'IDPR écoulement pérenne et intermittent ($IDPR_P/IDPR_{PI}$), comme outil de comparaison des valeurs d'IDPR entre ces deux calculs. Le rapport fait ressortir en rouge, les zones où les valeurs d'IDPR sont sensibles au régime d'écoulement, là où l'intermittence est importante. Les principales zones sensibles sont : le bassin du Colin, à l'est du sous bassin du Moulon, la partie Sud-Est du bassin amont de l'Yèvre, la partie Nord du bassin de l'Airain. Dans ces zones, l'$IDPR_P$ diminue. Sont alors mises en évidence des zones majoritairement infiltrantes, ce qui est en accord avec les observations de terrain. Enfin, il ressort que les valeurs d'IDPR avec ou sans prise en compte du régime d'écoulement pour le bassin du Moulon restent globalement inchangées.

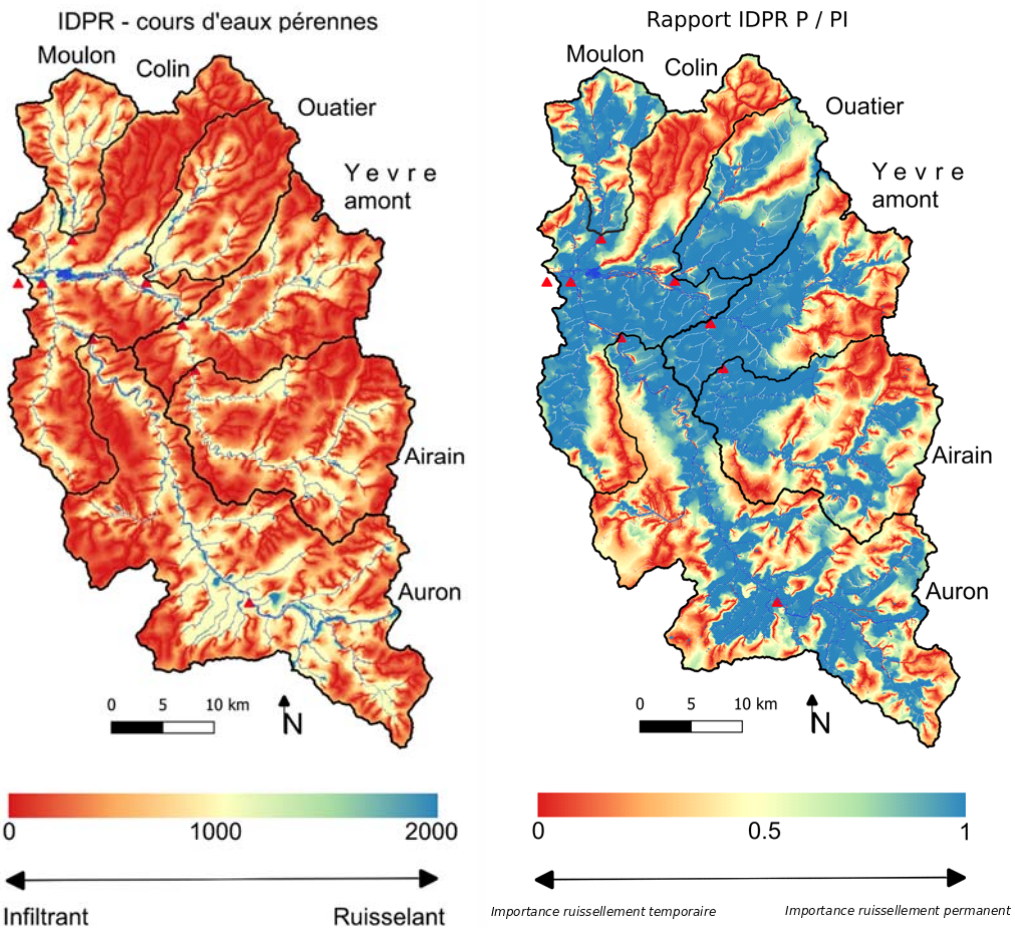


Figure 12: IDPR calculé à partir du réseau d'écoulement pérenne (IDPR P) et ratio de l'IDPR calculé à partir du réseau pérenne et de l'IDPR calculé à partir du réseau pérenne et intermittent. L'IDPR P montre une part importante de zones infiltrantes (à gauche). Le rapport des IDPR P et PI montre les zones où l'intermittence est dominante, notamment dans le bassin du Colin.

4.1.3. Nouvelles limites de bassin pour l'Ouatier

L'analyse conjointe du ratio de l'IDPR$_P$/IDPR$_{PI}$, des essais de traçages et de la piézométrie régionale présentés précédemment permettent de préciser la géométrie du bassin versant de l'Ouatier. Dans sa partie amont les traçages ont permis de mettre en évidence un transfert entre les bassins du Colin et de l'Ouatier. Le ratio des IDPR met en évidence un effet prononcé de l'intermittence pour le Colin (

Figure 13: Essais de traçages entre le Colin et l'Ouatier (à gauche) sur fond de ratio d'IDPR$_P$/IDPR$_{PI}$. Carte piézométrique en hautes eaux en 2000 (à droite). Sur la base des essais de traçages, de la piézométrie et de la topographie, le bassin topographique initial (en bleu) est étendu dans sa partie amont au nord-est (hachuré). Les flèches rouges à droite représentent les directions d'écoulements souterrains.

Figure 13 à gauche). La piézométrie a une direction d'écoulement du Colin vers l'Ouatier prononcée à l'amont des sous bassins. Ces caractéristiques suggèrent que les flux « perdus » du Colin dans la partie amont deviennent des gains pour le bassin de l'Ouatier ; nous proposons d'agrandir les limites du bassin versant de l'Ouatier, comme présenté sur la

Figure 13: Essais de traçages entre le Colin et l'Ouatier (à gauche) sur fond de ratio d'IDPR$_P$/IDPR$_{PI}$. Carte piézométrique en hautes eaux en 2000 (à droite). Sur la base des essais de traçages, de la piézométrie et de la topographie, le bassin topographique initial (en bleu) est étendu dans sa partie amont au nord-est (hachuré). Les flèches rouges à droite représentent les directions d'écoulements souterrains.

Figure 13 (à droite) ; l'impluvium de l'Ouatier devenant 194 km^2.

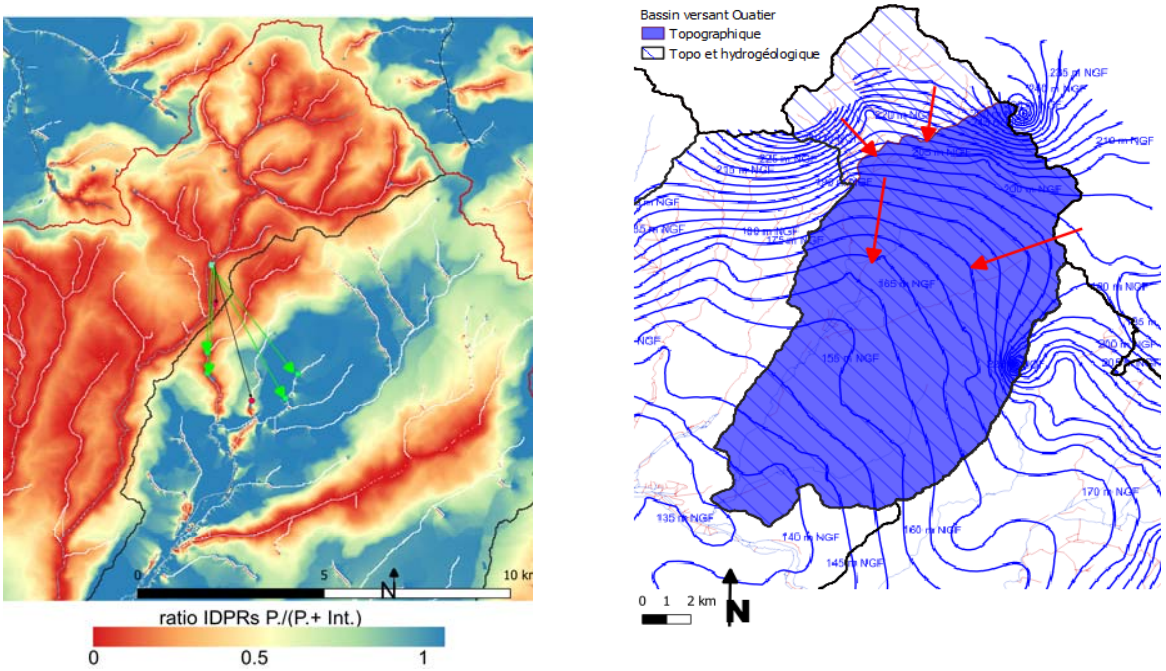


Figure 13: Essais de traçages entre le Colin et l'Ouatier (à gauche) sur fond de ratio d'IDPR$_P$/IDPR$_{PI}$. Carte piézométrique en hautes eaux en 2000 (à droite). Sur la base des essais de traçages, de la piézométrie et de la topographie, le bassin topographique initial (en bleu) est étendu dans sa partie amont au nord-est (hachuré). Les flèches rouges à droite représentent les directions d'écoulements souterrains.

4.2. ANALYSE DES DEBITS

4.2.1. Débits classés

L'analyse des débits classés aux stations hydrométriques des sous bassins de l'Yèvre a pour but d'explorer les ruptures de pentes dans les distributions des débits et d'associer les valeurs des débits auxquelles ces ruptures se trouvent ainsi que les pentes associées à des processus d'interaction (contribution, atténuations) entre eau de surface, eau souterraine et transferts interbassins (Figure 9). Du fait de leurs localisations rapprochées et des différences et/ou similarités mises en évidence grâce à l'analyse des calculs d'IDPR, les débits classés sont comparés pour deux paires de sous bassin : l'Ouatier et le Moulon, l'Airain et l'Auron. Les débits classés pour chaque station sont présentés en Annexe 3.

La Figure 14 montre une comparaison des débits classés pour (i) l'Ouatier et le Moulon et (ii) l'Airain et l'Auron. La comparaison des débits classés pour l'Ouatier et le Moulon montre que 80% des débits sont semblables. Toutefois, l'intersection des courbes des débits classés indique que les débits d'étiages de l'Ouatier sont supérieurs à ceux du Moulon (la courbe de l'Ouatier est dessous celle du Moulon) et que les débits de crue de l'Ouatier sont très inférieurs à ceux du Moulon (la courbe de l'Ouatier est au-dessus de celle du Moulon). Une rupture de pente avec des modalités différentes (pente post-rupture, débit au point de rupture) montre un comportement différent entre les deux bassins. Pour le Moulon, la pente des probabilités augmente suite à la rupture qui est observée aux débits supérieurs à 5 $m^3.s^{-1}$. Ce comportement pourrait être lié à un problème de la station de mesure ou à une fuite en souterrain. Pour l'Ouatier, la pente des probabilités décroit post-rupture aux débits supérieurs à 2 $m^3.s^{-1}$. Cette décroissance pourrait être en lien avec des apports souterrains d'un bassin voisin (Colin probablement).

L'analyse des courbes de débits classés pour l'Airain et l'Auron est relativement différente, celles-là ne présentant pas d'intersection. Ceci s'explique par une superficie de bassin de l'Auron (580 km^2) très supérieure à celle de l'Airain (308 km^2), le débit moyen de l'Auron est ainsi plus élevé. Une rupture de pente pour l'Auron est atteinte pour des débits de l'ordre de 24 $m^3.s^{-1}$ et la pente des probabilités, plus faible après la rupture de pente, suggère des apports d'une autre origine (production de ruissellement sur un affluent ou apports souterrains depuis un bassin voisin). Pour l'Airain, la rupture de pente est atteinte à une valeur de débit de l'ordre de 20 $m^3.s^{-1}$, la pente post-rupture est plus importante et suggère la fuite en souterrain vers un autre système. Ces résultats sont cohérents avec les connaissances apportées par ailleurs par les essais de traçages et les mesures de débits différentiels réalisés sur ces deux bassins, ce qui donne un argument de plus à une contribution de l'Airain au débit de l'Auron.

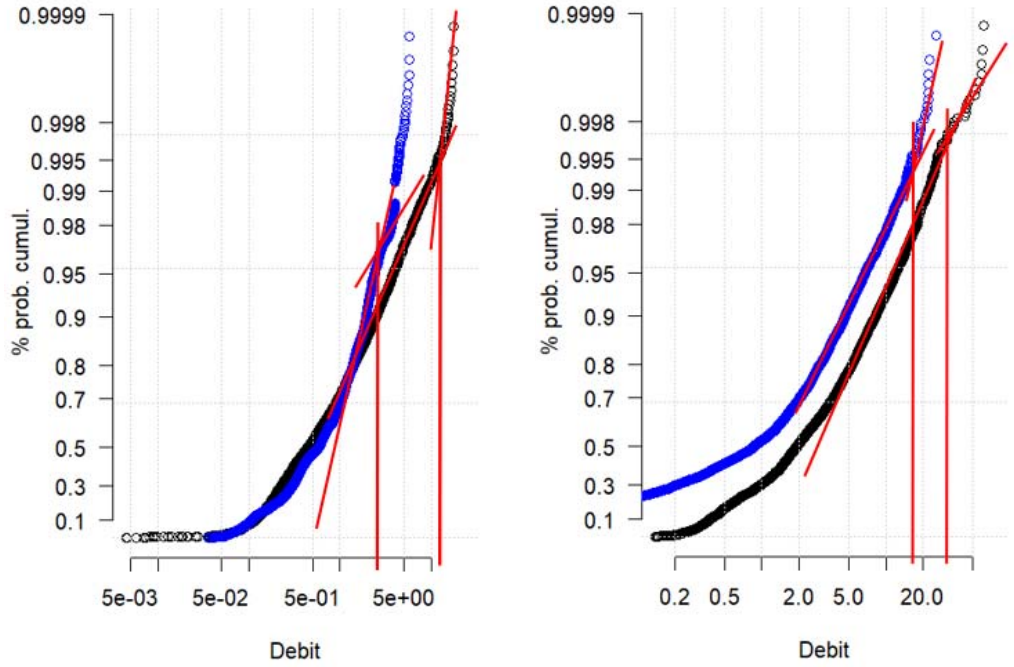


Figure 14 : Débits moyen journaliers classés. A gauche : L'Ouatier (bleu) et le Moulon (noir) ; à droite : l'Airain (bleu) et l'Auron (noir), les lignes rouges indiquent les ruptures de pentes interprétées et les débits associés.

4.2.2. Débits de bases et lien avec l'IDPR

Sur le territoire de l'Yèvre à l'amont de Bourges les processus d'écoulements lents en rivière qui soutiennent le débit en période d'étiage sont liés à des écoulements souterrains. Le calcul et la recherche des fractions de débits de base impliqués dans les écoulements ont pour objectifs (i) d'aider à identifier les bassins sur lesquels les eaux souterraines ont un impact significatif sur la dynamique d'écoulement, (ii) d'évaluer si un indicateur spatial peut renseigner sur les valeurs de débits de base et (iii) d'identifier si les valeurs de débits de base peuvent contribuer à renseigner sur l'état de saturation de l'aquifère et sur les possibilités de changement de comportement, passage d'un comportement infiltrant à ruisselant, ce dernier point est traité en section 4.3.2.

Le Tableau 2 présente un résumé du débit de base (BF moyen), de l'indice de débit de base calculé (BFI moyen) et un rappel de la taille de bassin et du débit moyen des bassins étudiés. Le débit de base renseigne sur le débit associé aux écoulements lents, supposés souterrains. L'indice de débit de base renseigne sur la fraction que représente le BF par rapport au débit total. Les résultats obtenus montrent que l'Ouatier a une fraction de débit de base (BFI moyen) de l'ordre de 50%. Les plus basses valeurs de fraction de débit de base sont rapportées pour l'Airain (29%) et le Moulon (30%).

Code	Nom station	BF moyen ($m^3.s^{-1}$)	BFI moyen	Aire bassin (BH– km^2)	Q moyen ($m^3.s^{-1}$)
K5543010	Airain_Crosses	0.54	0.29	300	1.66
K5653010	Auron_Bourges	1.36	0.38	585	3.66
K5574100	Moulon_Bourges	0.33	0.31	104	1.01
K5554580	Ouatier_Moulins	0.42	0.49	160	0.8
K5702320	Yevre_StDoulchard	5.51	0.43	1775	12.5
K5552300	Yevre_Savigny	1.08	0.32	531	3.24

Tableau 2 : Résumé des informations de débits de base et BFI pour les bassins de l'Yèvre

Les Figure 15 et Figure 16 présentent les débits et débits de base pour les sous-bassins de l'Ouatier et du Moulon qui ont des comportements hydrométriques très distincts malgré leur proximité géographique et des surface de bassin similaires. L'ensemble des séries temporelles de débit et débits de bases est présenté en annexe. Sur le Moulon, les fortes fluctuations de débit contrastent avec le peu d'apport du débit de base. Ces fluctuations sont en lien avec les propriétés de terrain, notamment la géologie marneuse qui favorise le ruissellement et diminue les capacités d'infiltration – ceci se traduit aussi sur la fraction d'$IDPR_{PI}$ <1000 qui est faible pour ce bassin (Figure 11). En revanche, l'Ouatier présente des débits maximaux plus faibles que ceux du Moulon et une forte proportion du débit de base. Ici aussi, la géologie peut être la cause de cette répartition des débits: l'Ouatier s'est développé sur des terrains calcaires qui favorisent les transferts verticaux (infiltration) et réduisent le ruissellement et les débits de pointe, si l'aquifère n'est pas saturé. Ceci se traduit aussi dans la fraction d'$IDPR_{PI}$<1000 qui est élevée (Figure 11). Ci-après nous explorons le lien entre débit de base et $IDPR_{PI}$ pour tous les bassins.

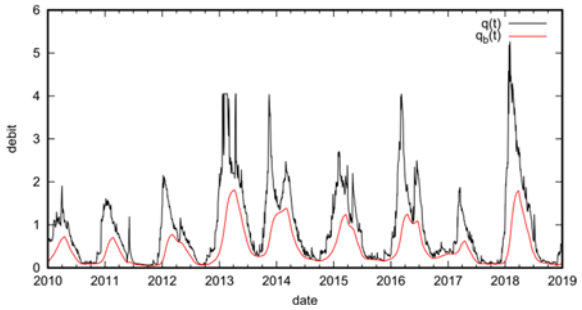


Figure 15 : Débits total (noir) et de base (rouge) de l'Ouatier

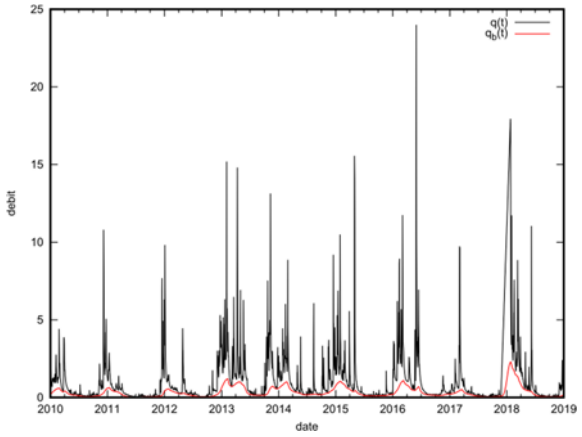


Figure 16: Débits total (noir) et de base (rouge) du Moulon

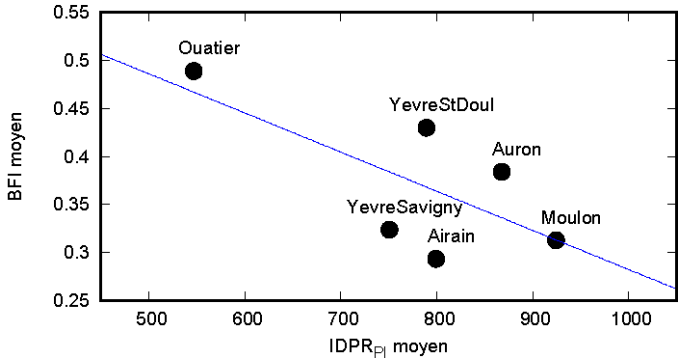


Figure 17: Dépendance entre $IDPR_{PI}$ moyen et l'indice de débit de base (BFI). La régression (bleu) a pour équation : $BFI(IDPR_{PI}) = -4x10^{-4} \times IDPR_{PI} + 0.69$. Coefficient de détermination (R^2) = 0.47.

La Figure 17 montre la dépendance négative entre l'$IDPR_{PI}$ moyen et le débit de base, plus l'$IDPR_{PI}$ est faible et plus l'indice d'écoulement de base est élevée. Dans cette étude, les bassins s'alignent relativement bien sur une droite qui joint deux bassins « aux pôles », l'Ouatier avec $IDPR_{PI}$ faible et BFI élevé et le Moulon avec IDPR élevé et BFI faible. Bien que tous les bassins appartiennent à la moitié inférieure des gammes de valeurs d'IDPR et de BFI, la régression calculée est en très bon accord avec celle déterminée par Caballero, Lanini, & Lechevallier (2020) sur 120 cours d'eau en contexte sédimentaire ($BFI(IDPR_{PI}) = -4x10^{-4} \times IDPR_{PI} + 0.95$). Cette relation illustre que les bassins où l'$IDPR_{PI}$ est plus faible semblent favoriser les transferts verticaux jusqu'aux écoulements souterrains (caractère infiltrant) et à l'inverse, les bassins où l'IDPR est élevé favorisent les transferts rapides de surface (caractère ruisselant).

4.3. RELATIONS RECHARGE – DEBIT

Afin de mettre en évidence des relations spécifiques entre les processus d'écoulements souterrains et de surface, nous caractérisons dans la suite :

- Les relations entre pluviométrie et fluctuations piézométriques par le biais de calcul de corrélation « croisées » et
- Les relations entre piézométrie et débits aux stations hydrométriques.

Une étude préliminaire des cumuls pluviométriques aux différentes stations sur le bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges montre que (Annexe 5) :

- Les pluies horaires sont peu corrélées entre stations de mesure ce qui traduit une faible dépendance spatiale des processus de pluie à courte échelle temporelle.
- Les cumuls horaires moyens et maximaux atteints aux stations sont semblables, ceci traduit une certaine uniformité des pluies à l'échelle du bassin.

4.3.1. Dépendance pluie – piézométrie

Afin d'explorer les capacités des pluies à influencer la recharge sur le court terme (jusque 20 jours), nous avons calculé la corrélation croisée entre les valeurs de piézométrie et les cumuls de pluies journaliers et jusqu'à 20 jours (cumuls sur 1, 2, 3, …, 20 jours). La Figure 18 synthétise l'ensemble des coefficients de corrélation pour les cumuls calculées entre 5 stations météos et 10 ouvrages sur lesquels les données étaient complètes sur la période (2000-2019).

L'étude détaillée des corrélations cumuls journaliers – piézométrie permet de mettre en évidence les points suivants :

1. Les corrélations pour des cumuls journaliers sont faibles, quel que soit le délai (lag) de jours après l'évènement pluvieux
2. Les corrélations les plus importantes sont atteintes pour des cumuls sur quinze jours.

Pour le second cas, les délais de corrélation sont (i) courts (0-5 jours) ou (ii) longs (5-15 jours), ce qui représente un effet « immédiat » du cumul sur une quinzaine ou un effet à plus long terme. A l'exception d'un ouvrage qui présente une relativement forte corrélation (05472X0029) pour des temps courts qui pourraient être en lien avec des processus de recharge localisée, l'absence de forte corrélation à pas de temps faible ne permet pas de conclure sur l'absence ou la présence de processus de recharge préférentielle au travers de pertes par exemple.
Les trois premiers ouvrages de la Figure 18 sont situés dans des zones où l'infiltration est prédominante selon l'IDPR et la géologie, les bassins du Colin et de l'Ouatier notamment. Dans ces bassins, la dualité des écoulements pourrait justifier les faibles corrélations qui sont calculées. Au cours de la recharge, les ouvrages situés dans une roche moins fracturée/karstifiée, à emmagasinement plus important que le réseau de fractures/conduits, auront une hausse piézométrique déphasée et de plus faible amplitude que ceux au sein du réseau de fractures/conduits.

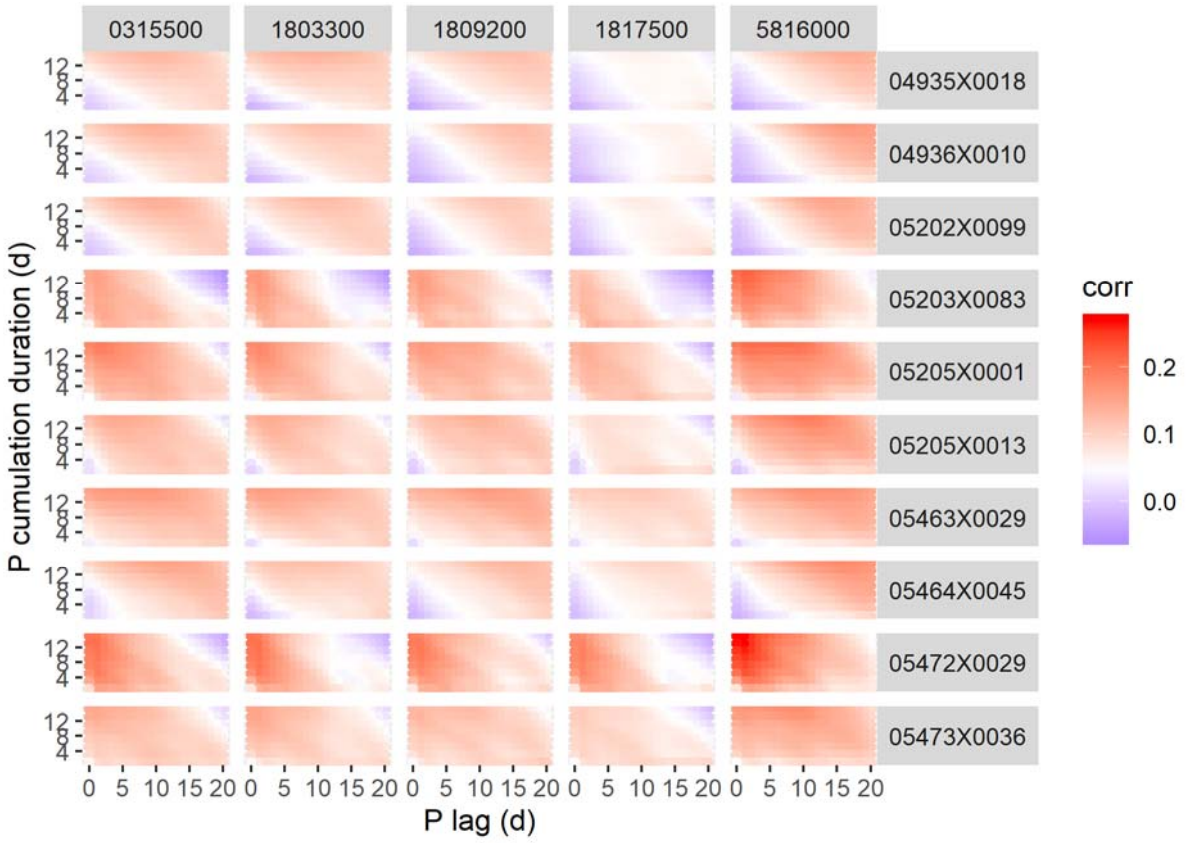


Figure 18 : Maxima de corrélations croisées entre les cumuls pluviométriques (ordonnées) et le délai de la corrélation des variations de hauteurs piézométriques (abscisses) pour 5 stations météo et 10 piézomètres du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges. Les corrélations les plus importantes sont obtenus pour des cumuls de 13 à 15 jours et pour des délai cours (<5 j.) pour 5 ouvrages et pour des délais longs (>6 jours) pour 6 ouvrages. Les faibles valeurs de corrélation (<0.6) suggèrent une inertie élevée de la recharge.

4.3.2. Dépendance piézométrie - débits

Afin de rechercher si un indicateur de saturation de l'aquifère pourrait être mis en évidence, nous étudions par la suite les relations piézométrie-débit des sous bassin de l'Yèvre, à l'exception du Moulon où aucun piézomètre n'est présent et où les interactions entre eau de surface et souterraine sont limitées. En présence d'un indicateur, la piézométrie de l'aquifère pourrait ne plus augmenter pendant que le débit quant à lui augmente plus intensément. Pour mener cette analyse, nous considérerons les piézomètres inclus dans chaque bassin et, comme des échanges entre bassins ont été démontrés ou supposés, nous associons certains piézomètres appartenant aux bassins proches voisins. Les associations piézomètres bassins sont présentées sur la Figure 19. Un résumé de la distribution spatiale et des caractéristiques des piézomètres est donnée au Tableau 3.

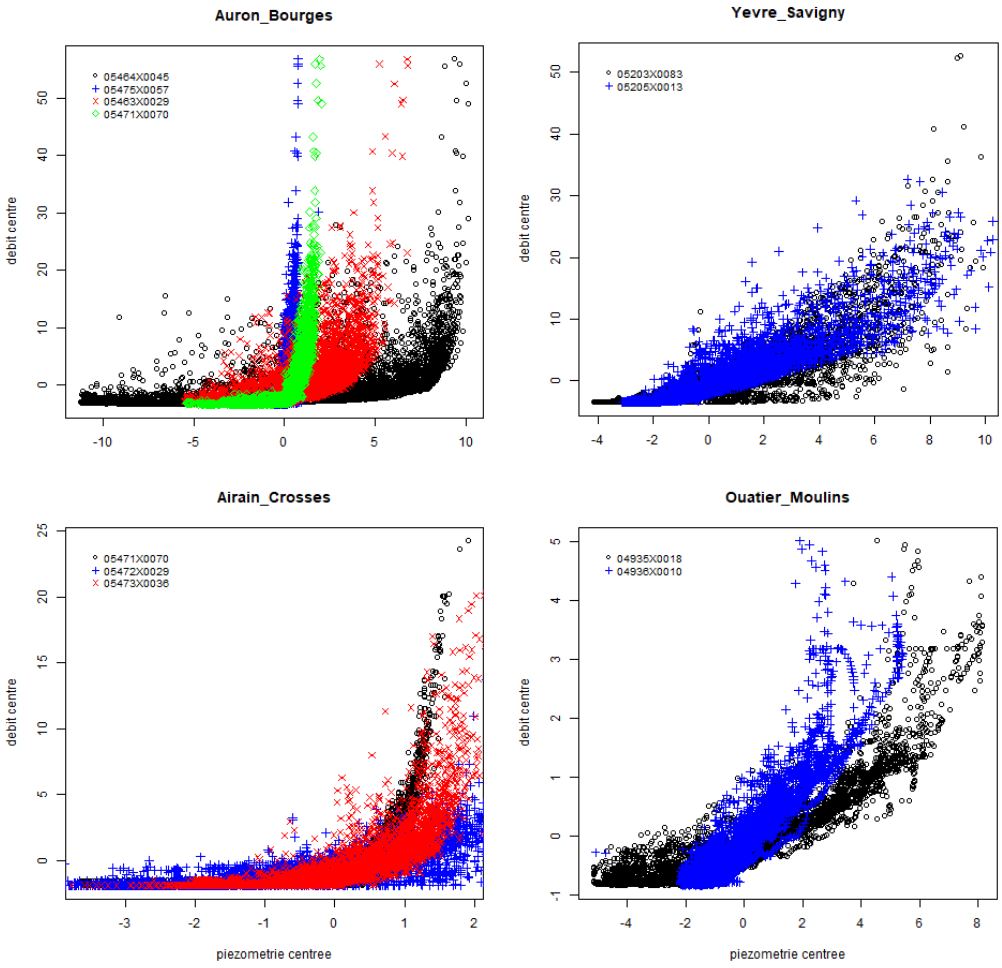


Figure 19 : Relation piézométrie - débit entre points d'observations de niveaux d'eau pour les sites situés au sein des bassins étudiés.

Les résultats des comparaisons piézométrie-débit montrent qu'aucun piézomètre ne montre un plafonnement à une valeur spécifique, ce qui aurait témoigné d'une saturation de l'aquifère. Toutefois, pour les deux bassins de l'Airain et de l'Auron, les comparaisons piézométrie-débit montrent des effets de seuils qui pourraient être mis en relation avec des états de saturation progressifs et à des processus de ruissellement plus important suite à une saturation partielle de l'aquifère. A partir d'une côte piézométrique donnée, la pente de la relation piézométrie-débit s'accentue, illustrant l'augmentation du débit et la plus faible mise en charge de l'aquifère. Enfin, l'absence de seuil et la dispersion des valeurs de piézométrie aux valeurs élevées pour les bassins de l'Ouatier et de l'Yèvre amont (Savigny) (Figure 19**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) va dans le même sens que les résultats indiquant un caractère infiltrant associé au bassin de l'Ouatier mis en évidence ci-dessus.

Bassin étudié	Piézomètre	Remarque	Seuil	Côte moyenne (mNGF)
Airain	05471X0070	Voisin du cours d'eau	+1.5m / moyenne	155.21
	05472X0029	-	-	176.74
	05473X0036	Amont du bassin	-	177.81
Auron (Bourges)	05464X0045	Proche du cours d'eau (Aval)	+9.8m / moyenne	149.35
	05475X0057	Proche du cours d'eau (Amont)	+1.4m / moyenne	163.81
	05463X0029	Bassin de l'Airain	+5m / moyenne	170.62
	05471X0070	Bassin de l'Airain	+2m / moyenne	155.21
Ouatier	04936X0010	Amont du bassin	-	176.7
	04935X0018	Bassin du Colin	-	163.98
Yèvre (Savigny)	05203X0083	Amont du bassin	-	192.71
	05205X0013	Voisin de la station de débit	-	144.02

*Tableau 3 : Synthèse des ouvrages et potentiels indicateurs de saturation du karst par sous bassin. * La forme de la relation piézométrie est incertaine pour cette relation, «-» indique une absence de relation claire ».*

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était de comprendre plus précisément l'origine des différences de réponses hydrologiques observées et de caractériser le fonctionnement des aquifères karstiques locaux et leur potentielle implication dans la genèse des crues régionales.

Dans une première partie, nous avons cherché à identifier les zones plus favorables au ruissellement et à l'infiltration, à l'aide de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) et de la cartographie géologique régionale. Les résultats mettent en évidence une composante relativement plus ruisselante sur la partie Nord du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges, qui est représentée par le sous bassin du Moulon. Des zones plus favorables à l'infiltration sont réparties sur l'ensemble du reste du territoire, celles-ci sont en lien avec des formations calcaires du Jurassique. Par ailleurs, l'utilisation des informations liées à la pérennité des écoulements dans le calcul de l'IDPR a permis de mettre en lumière le caractère très infiltrant du sous-bassin du Colin (voisin de l'Ouatier)(Figure 12). Cette information combinée aux essais de traçages et à la piézométrie permet de proposer une extension du bassin versant de l'Ouatier de 160 à 194 km².

Dans un second temps, nous avons cherché à caractériser les contributions des eaux souterraines aux écoulements de surface pour les sous bassins. Pour cela, nous avons analysé les (i) de débits classés et (ii) de la relation entre IDPR et index des débits de base moyens. L'interprétation de la classification des débits suggère des processus de transfert entre bassin, notamment entre l'Airain et l'Auron et des fonctionnements contrastés comme par exemple entre le Moulon et l'Ouatier (Figure 14).
Pour l'analyse conjointe IDPR et index de débits de base, les résultats obtenus ont mis en évidence une dépendance négative entre ces deux variables et une distribution des index de débits moyens répartie entre deux pôles : faible (~30%) pour le bassin du Moulon et élevée (~50%) pour le bassin de l'Ouatier. Ces débits classés et la distribution des débits de base ont permis de classer les contributions des eaux souterraines aux écoulements de surface de chaque sous-bassin.

Enfin dans un troisième temps, l'analyse a porté sur les dynamiques de recharge et des interactions entre niveaux piézométriques et débits, dans le but de mieux comprendre les composantes de recharge et de saturation de l'aquifère karstique. Les corrélations entre les cumuls de pluie et la piézométrie journaliers augmentent lorsque des cumuls pluri-journaliers sont considérés, ce qui a mis en évidence un effet de délai de la recharge sur les niveaux piézométriques. Par ailleurs, la relation piézométrie-débit montre que des effets de seuils en lien probable avec la saturation du karst pourraient être responsables d'une hausse du ruissellement dans certains sous-bassins (Figure 19).

Synthétiquement la caractérisation menée dans cette étude permet de préciser les points suivants:

- Les transferts interbassins dans la partie amont de l'Ouatier induisent une augmentation relative de la superficie du bassin d'environ 18%.
- Les bassins du Colin, et de l'Airain sont probablement en perte, ils contribueraient probablement aux écoulements vers l'Ouatier et l'Auron, qui seraient en gain.
- L'origine des forts débits de pointe et des courts temps de réaction du bassin du Moulon sont en lien avec la géologie relativement imperméable qui favorise le ruissellement.

D'un point de vue opérationnel, l'augmentation relative de la surface associée au bassin de l'Ouatier pourrait être prise en compte pour améliorer les prévisions sur ce bassin. Par ailleurs, la caractérisation des gains et des pertes pourrait être prise en compte pour expliquer des processus d'atténuation (probables pour le Colin et l'Airain) et d'amplification (probables pour l'Ouatier et l'Auron) des débits de crue. Enfin la combinaison de la position relative du Moulon (situé proche de la station de référence à Bourges) et de la réactivité du bassin induit une sensibilité des débits de crue à ce bassin lors d'évènements pluvieux importants.

Une première perspective à ce travail serait d'utiliser une méthode de bilan ou de modélisation pour tenter de quantifier les échanges interbassins. Une seconde perspective serait d'évaluer les potentiels déphasages entre la réponse du débit à la station de l'Yèvre à Saint-Doulchard, celle du Moulon et celles sur les bassins « amont », par exemple l'Airain, et de les mettre en lien avec les dynamiques des niveaux d'eau souterraine. Cette dernière perspective pourrait permettre d'évaluer si la variabilité des temps de propagation des ondes de crues dépend de l'état de saturation de l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien.

6. Bibliographie

Boirat, J. M. (1993). *Etude géologique et hydrogéologique synthétique du Dogger dans les départements de l'Indre et du Cher. Rapport BRGM/RR-36645-FR.* Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-36645-FR.pdf

Caballero, Y., Lanini, S., & Lechevallier, J. (2020). *Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique - Application au bassin Rhône Méditerranée Corse - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-69217-FR*. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69217-FR.pdf

Charlier, J.-B., Chapuis, H., & Desprats, J.-F. (2013). *Appui au SCHAPI 2013 - Module 1 - Identification du rôle potentiel du karst dans les crues sur le territoire du SPC Méditerranée-Est.* Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62888-FR.pdf

Charlier, J.-B., & Pinson, S. (2017). *Essai de cartographie du ruissellement des zones karstiques - application au bassin de la Cesse*. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67522-FR.pdf

Charlier, J.-B., Rivert, F., Mardhel, V., Pourtout, C., & Desprats, J.-F. (2016). *Appui au SCHAPI 2016 - Module 1 - Rôle des eaux souterraines d'origine karstiques dans les crues sur le territoire du SPC Grand Delta.* Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-66511-FR.pdf

Crochet, P., & Marsaud, B. (1997). Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation. *Hydrogéologie*, *3*, 3–18.

EDREE. (2010). *Etude pour l'amélioration de la connaissance du fonctionnement du bassin versant de l'Airain. Rapport N° R/ED H10.04*. Retrieved from https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/etude-pour-l-amelioration-de-la-connaissance-du-fonctionnement-du-bassin-versant-de-l-airain0

IWACO. (2001). *Etude hydrogéologique de cartes piézométriques des bassins de l'Yèvre et de l'Auron, pour le Conseil Général du Cher.* Retrieved from http://sigescen.brgm.fr/IMG/pdf/piezo_yevre_auron_2000_2001.pdf

Lelong, F. (2006). Berry. In J.-C. Roux (Ed.), *Aquifères et eaux souterraines en France* (BRGM-AIH, pp. 315–320). BRGM Editions.

Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 89–93. Retrieved from http://www.academia.edu/download/39814986/Stochastic_Time-Variable_Rainfall-Runoff20151108-5238-xrczh.pdf

Maget, P., Afzali, H., Bailly-Comte, V., Baudouin, V., Le Boucher, E., Colleau, A., … Herrouin, J. P. (2002). *Etude des nappes du Jurassique dans les département du Cher et de l'Indre. Phase 1 : Acquisition des données hydrogéologiques.* Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51887-FR.pdf

Maget, P., Le Boucher, E., & Gaget, E. (2005). *Etude des nappes du Jurassique dans les départements du Cher et de l'Indre. Phase 2: aspect qualité des eaux et bilan*

hydrogéologique. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53760-FR.pdf

Mangin, A. (1970). Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales de Spéléologie*, *25*(3), 581–610.

Mangin, A. (1971). Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Annales de Spéléologie*, *28*(1), 21–40.

Mardhel, V., & Gravier, A. (2005). *Cartographie de la vulnéraibilité intrinsèque des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM RP-54148-FR.* Retrieved from https://http//infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54148-FR.pdf

Marsaud, B. (1997). *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*. Université Paris XI Orsay.

Martin, J. C. (2005). *Etude des nappes du Jurassique dans les départements du Cher et de l'Indre. Phase 2: aspect qualité des eaux et bilan hydrogéologique. Deuxième partie: bilan hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-53169-FR.* Retrieved from infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53169-FR.pdf

Martin, J. C., & Maget, P. (1998). *Etat des connaissances dans la nappe intensément exploitée de l'Yèvre et de l'Auron. Rapport BRGM N 2639.*

Pinson, S., & Charlier, J.-B. (2018). *Cartographie du ruissellement des zones karstiques - application à l'arc Méditerranéen. Rapport BRGM RP-68563-FR.* Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68563-FR.pdf

SAGE. (2005). *Yèvre - Auron, Etat des lieux*.

Annexe 1 : Table des formations géologiques des sous-bassins

Sous-bassin versant	Formations affleurantes(*)			
	Age		Epaisseur et nature des terrains	Formations de couverture (**)
Auron amont	Trias		Notamment autour de l'étang de Goule : 40 à 70 mètres d'argiles rouges ou bariolées, grès, dolomies	-
			Moins de 10 mètres de sables, grès argileux et argiles bariolées	-
	Jurassique inf.	Hettangien	20 à 40 mètres de calcaires clairs à débris de coquilles	-
		Sinémurien	20 à 30 mètres de calcaires argileux et marnes gris-bleu	
		Pliensbachien	Quelques mètres de marnes gris-bleu à rares intercalations calcaires	
		Toarcien inférieur et moyen	55 à 60 mètres de schistes carton et marnes grises à jaunes	en rive gauche : placage quasi-continu d'argiles, argiles sableuses et marnes blanches à vertes, parfois sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, d'âge Tertiaire (Eocène-Oligocène), d'origine lacustre, surmontées sur toute la superficie des Marais de Contres par des terres noires tourbeuses (quelques centimètres sur les bordures à l.30m).
		Toarcien supérieur Aalénien	10 à 15 mètres d'argiles schisteuses et micacées gris-bleu à ocre	
	Jurassique moyen	Bajocien	Près de 100 mètres de calcaires plus ou moins argileux	
		Bathonien	40 mètres de calcaires oolithiques blancs	
		Callovien	30 mètres de calcaires argileux jaunâtres	
	Jurassique sup.	Oxfordien inférieur	10 mètres de marnes noires puis calcaires argileux blanchâtres	en rive droite, surtout sur les calcaires de l'Oxfordien : lambeaux de formations limono-argileuses et sableuses sur 1 à 2 mètres d'épaisseur, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
		Oxfordien moyen et supérieur	15 à 20 mètres de calcaire argileux compact, parfois de marnes noires	
		Oxfordien supérieur	160 mètres de calcaires liés (succession de bancs calcaires décimétriques séparés par des lits argileux centimétriques)	
Auron aval	Jurassique sup.	Oxfordien supérieur	100 mètres de calcaires liés	Sur tout le bassin versant, surtout en amont, par plaques : formation limono-argileuse et sableuse sur 0,5 à 2 mètres d'épaisseur, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
			40 mètres de calcaires crayeux (calcaires de Bourges)	
		Kimméridgien inférieur	20 mètres minimum de calcaires liés	
			15 à 20 mètres de calcaires	
Rampenne	Jurassique sup.	Oxfordien supérieur	100 mètres de calcaires liés	En rive gauche, tout en amont du bassin versant : alluvions anciennes composées de sables, graviers ou galets emballés dans une matrice argileuse Sur tout le bassin versant, par plaques : formation limono-argileuse et sableuse sur 0,5 à 1,5 mètres d'épaisseur, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
			40 mètres de calcaires crayeux (calcaires de Bourges)	
			20 mètres minimum de calcaires liés	

(*) décrites d'amont en aval du cours d'eau

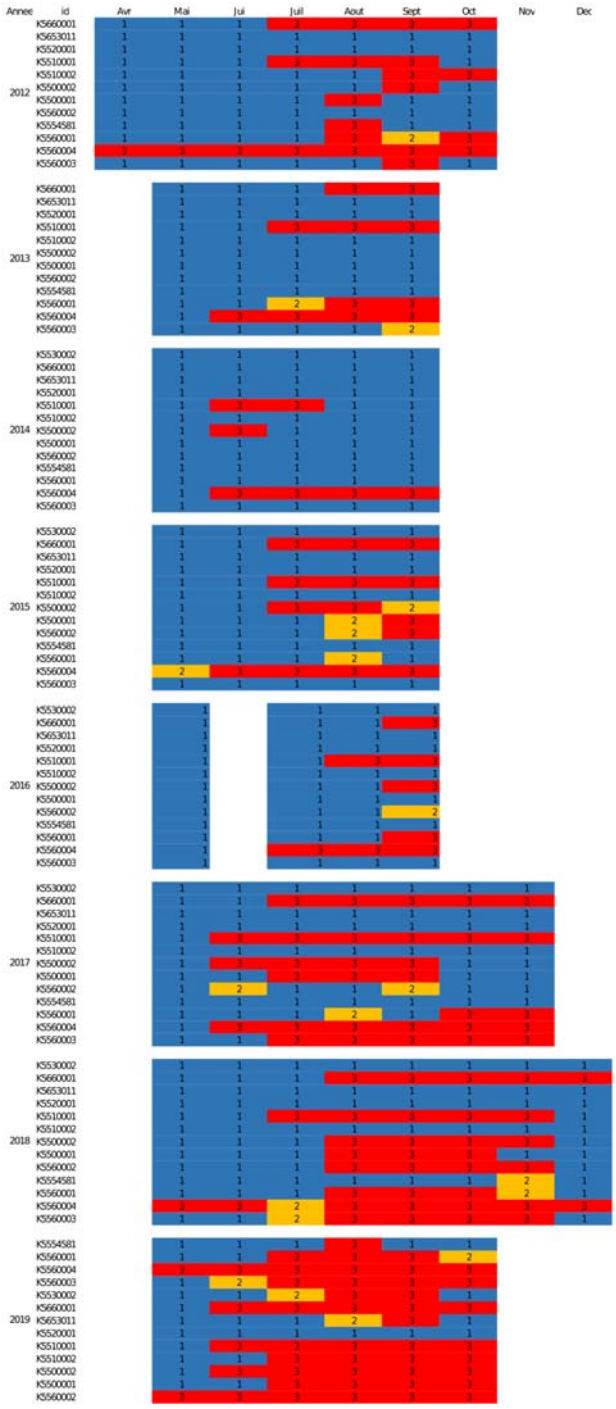
(**) tous les cours d'eau sont accompagnés d'alluvions anciennes, subactuelles et actuelles, constituées essentiellement d'éléments calcaires empruntés aux terrains traversés. A l'aval, les vallées s'élargissent et favorisent l'accumulation de terres noires tourbeuses qui atteignent et dépassent souvent un mètre d'épaisseur.

Tableau n°12 : Formations géologiques affleurantes des sous-bassins versants de l'Auron

Sous-bassin	Formations affleurantes(*)			
	Age		Epaisseur et nature des terrains	Formations de couverture (**)
Airain	Jurassique moyen à sup.	Toarcien inf. et moyen	55 à 60 mètres de schistes carton et marnes grises à jaunes	-
		Toarcien sup. Aalénien	10 à 15 mètres d'argiles schisteuses et micacées gris-bleu à ocre	-
		Bajocien	Près de 100 mètres de calcaires plus ou moins argileux	-
		Bathonien	40 mètres de calcaires oolithiques blancs	-
		Callovien	30 mètres de calcaires argileux jaunâtres	-
	Jurassique sup.	Oxfordien inférieur	10 mètres de marnes noires puis calcaires argileux blanchâtres	Assez abondants sur tout l'aval du sous BV : formations limono-argileuses et sableuses sur presque 2 mètres d'épaisseur, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne, érodées en « dogts de gant » par les cours d'eau.
		Oxfordien moy. et sup.	15 à 20 mètres de calcaire argileux compact, parfois de marnes noires	
Yèvre Amont	Jurassique sup.	Oxfordien supérieur	Sur la plus grande partie du sous-bassin versant : 160 mètres de calcaires liés (succession de bancs calcaires décimétriques séparés par des lits argileux centimétriques)	Sur les buttes de Gron : formations résiduelles d'âge Tertiaire (Crétacé et Eocène) de nature sableuse et argileuse, sur 2 à 5 mètres d'épaisseur. Partout ailleurs : lambeaux de faible épaisseur (moins d'un mètre) de formations limono-argileuses et sableuses, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
Ouatier	Jurassique sup.	Oxfordien supérieur	Sous la Tripande : 100 mètres de calcaires liés Sous l'Ouatier : 50 mètres de calcaires crayeux (calcaires de Bourges)	lambeaux de faible épaisseur (moins d'un mètre) de formations limono-argileuses et sableuses, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
Colin	Jurassique supérieur	Albien à Barrémien	Tête de bassin versant : alternance d'argiles et de sables sur 45 mètres d'épaisseur	-
		Portlandien	30 à 40 mètres de calcaires gris à pâte fine	
		Kimméridgien	80 à 90 mètres de marnes	
		Oxfordien supérieur	20 à 25 mètres de calcaires	A mi-hauteur du sous-BV : placage quasi continu de 0,4 à 1,5 mètres de limons argileux et sableux à cailloux, d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
		Oxfordien supérieur	25 à 30 mètres de calcaires liés	
		Oxfordien supérieur	50 mètres de calcaires crayeux (calcaires de Bourges)	-
Langis	Jurassique supérieur	Kimméridgien	Mobile amont du bassin versant : 60 à 80 mètres de marnes	Sur les versants : quelques restes de formations limono-argileuses et sableuses (moins d'un mètre d'épaisseur), d'âge Quaternaire, d'origine éolienne.
		Oxfordien supérieur	Mobile aval du bassin versant : 15 à 20 m de calcaires liés	
Moulon	Crétacé	Cénomanien à Barrémien	Mobile amont du BV : alternance d'argiles et de sables sur 120 à 150 mètres d'épaisseur	Sur les crêtes : 0,5 à 7 mètres de sables à silex, d'âge Tertiaire (Eocène)
	Jurassique sup. à moy.	Kimméridgien	Mobile aval du bassin versant : 60 à 80 mètres de marnes	A l'ouest d'Asnières : alluvions anciennes constituées de deux mètres de sables roux.
Annain	Crétacé	Cénomanien sup. à Barrémien	Amont du BV : alternance de marnes, d'argiles et de sables sur 120 à 150 mètres d'épaisseur	Sur les crêtes : 0,5 à 7 mètres de sables à silex, d'âge Tertiaire (Eocène)
	Jurassique sup.	Portlandien	En fond de vallée : 30 à 40 mètres de calcaires gris à pâte fine	En aval : calcaires, marnes et argiles lacustres d'âge Tertiaire
		Kimméridgien sup.	Aval du BV : 20 mètres de calcaires	
Barangeon	Crétacé	Cénomanien sup. à Albien	alternance de marnes, d'argiles et de sables sur près de 100 mètres d'épaisseur	Les crêtes sont largement recouvertes en amont par des sables à silex et en aval par des calcaires, marnes et argiles lacustres, tous d'âge Tertiaire. Les fonds de vallons accueillent sur une grande largeur des alluvions quaternaires constituées de sables plus ou moins argileux.
Yèvre aval	Jurassique sup.	Kimméridgien	40 à 50 mètres de calcaires gris	En fond de vallée : alluvions récentes constituées d'argiles, sable et galets. En rive gauche essentiellement : jusqu'à 30 mètres de marnes et calcaires lacustres du Berry.
		Portlandien	50 mètres de marnes	
	Crétacé	Sannoisien à Cénomanien sup.	30 à 40 mètres de calcaires gris à pâte fine alternance de marnes, d'argiles et de sables sur 120 à 150 mètres d'épaisseur	

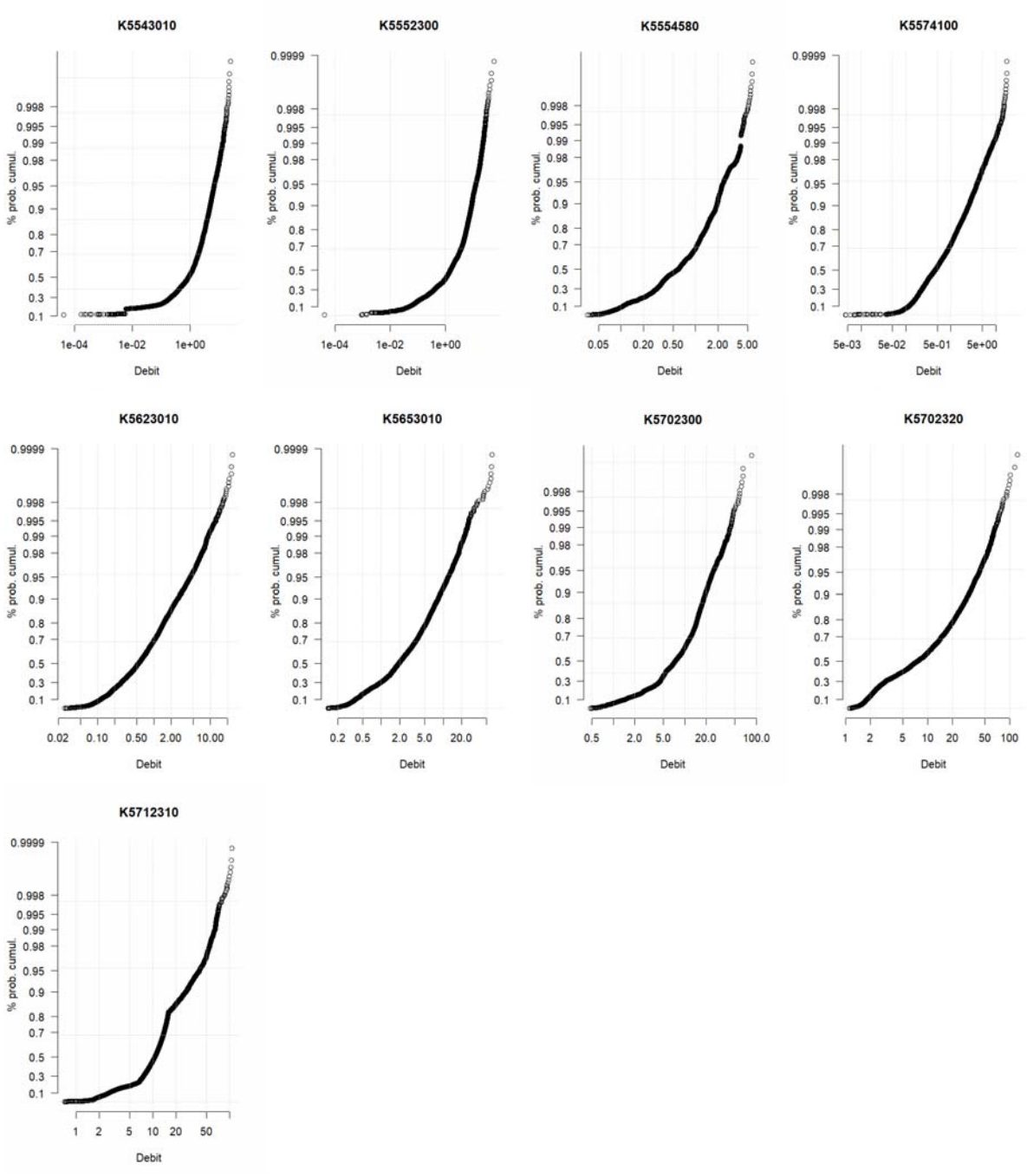
Tableau n°13 : Formations géologiques affleurantes des sous-bassins versants de l'Yèvre

Annexe 2 : Intermittence des cours d'eau (réseau ONDE)



Annexe 3 : Débits classés

Cette annexe présente les courbes des débits classés pour l'ensemble des stations hydrométriques du bassin de l'Yèvre en amont de Bourges.



Annexe 4 : Débits et débits de bases aux stations (2010-2019)

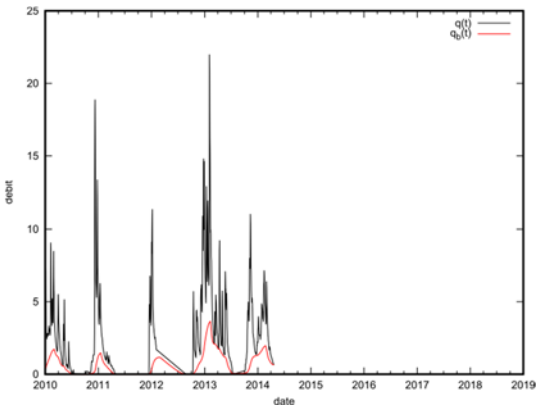


Figure 20 : Débits total (noir) et de base (rouge) - l'Airain

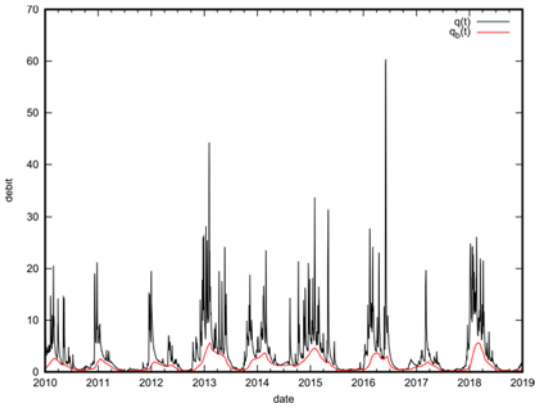


Figure 21 : Débits total (noir) et de base (rouge) - Auron

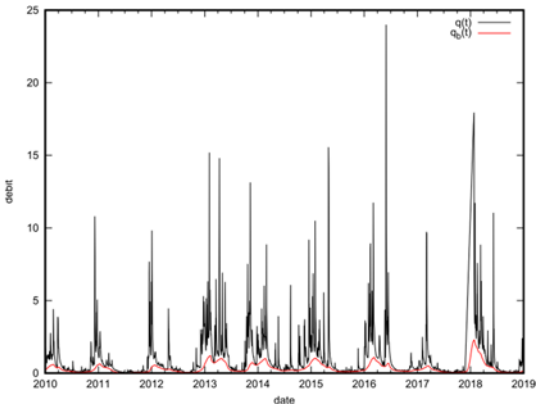


Figure 22: Débits total (noir) et de base (rouge) - Moulon

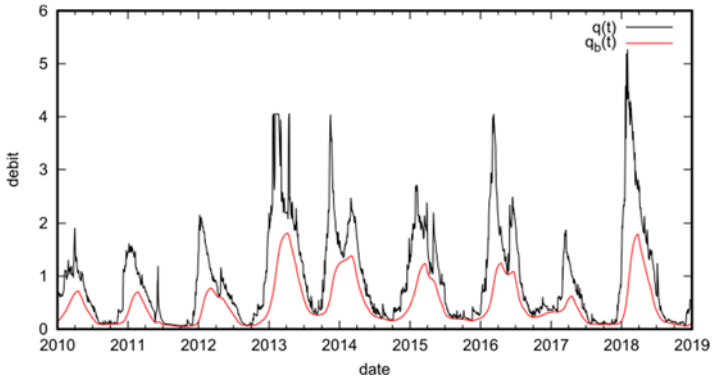


Figure 23: Débit total (noir) et de base (rouge) - Ouatier

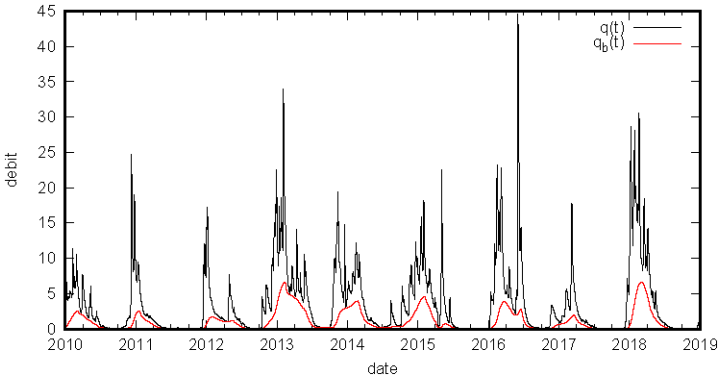


Figure 24: Débit total (noir) et de base (rouge) - Yèvre à Savigny

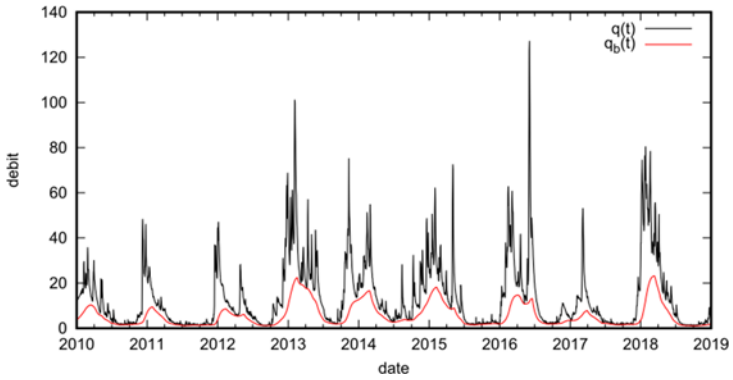


Figure 25: Débit total (noir)et de base (rouge) - Yèvre à St. Doulchard

Annexe 5 : Stations pluviométriques, corrélation des pluies horaires et cumuls horaires max et moyens par stations

#	Code	Nom	Réseau	x	y	z
1	03155003	LURCY-LEVIS SA	RADOME	695954	6624243	225
2	18033001	BOURGES	RADOME	651359	6662294	161
3	18047001	CHAPELLE-D'ANG_SAPC	DGPR	656686	6697207	190
4	18087003	DUN-SUR-AURON	fermé	666292	6645124	167
5	18092001	AVORD	RADOME	672786	6661381	175
6	18172003	ORVAL RAD	RADOME	659273	6625786	165
7	18175003	OUROUER	RADOME	684986	6647251	221
8	18176001	PARASSY	fermé	663973	6681217	257
9	18223003	SAINT-MARTIN-D'AUXIGNY	fermé	654666	6679578	200
10	18251001	SEVRY	fermé	685146	6670871	205
11	18279005	VIERZON	fermé	629833	6682354	155
12	18231002	SAINT-PIERRE-LES-ETIEUX-SPC	SPC	671261	6625235	171
13	18279006	VIERZON-SPC	SPC	629271	6679990	100
14	18183003	LE PONDY-SPC	SPC	673374	6633959	168

Tableau 4 : Détail des stations météo dans la région de l'Yèvre à l'amont de Bourges

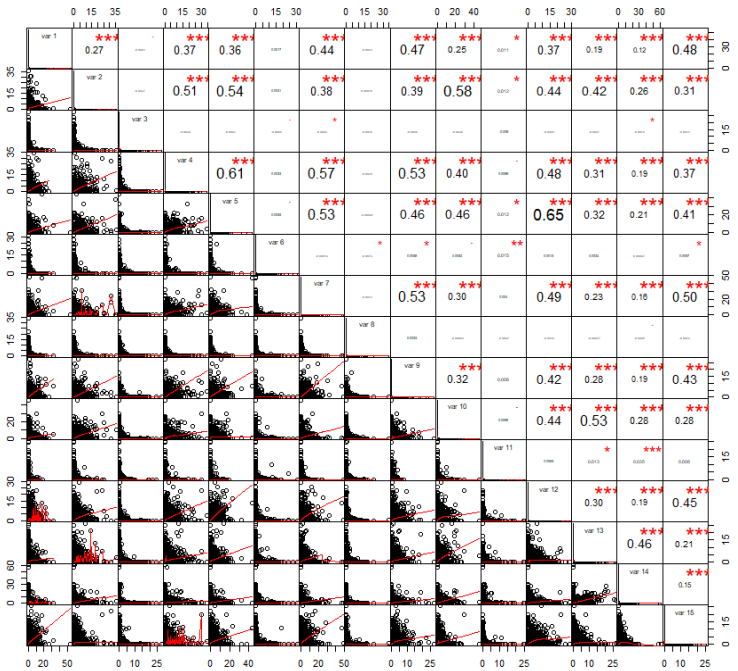


*Figure 26 : Corrélation des cumuls de pluies horaires entre les stations d'observations de la région amont de Bourges. La figure montre les faibles corrélations (Tau de Kendall < 0.7 en haut, *** : p.value <0.001, ** : p.value<0.05, * :p.value<0.1) au pas de temps horaire entre toutes les stations.*

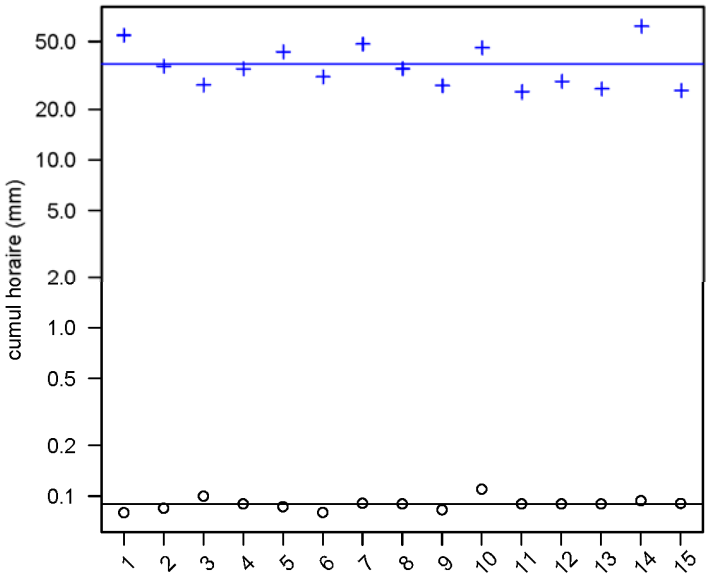


Figure 27: Comparaison des moyennes des cumuls horaires (trait noir) et des maximas (traits bleu) horaires et des valeurs individuelles enregistrés aux stations en amont de Bourges. La faible dispersion des données par rapport aux valeurs moyenne suggère une uniformité spatiale des épisodes

pluvieux.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction Eau Procédés et Analyses
Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 90