

Document public

Appui au SCHAPI 2020 – Module 1

Étude évènementielle de la contribution du karst aux crues de l'Yèvre à l'amont de Bourges (SPC Loire-Cher-Indre)

Rapport final

BRGM/RP-70442-FR
Mars 2021

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Appui au SCHAPI 2020 – Module 1

Étude évènementielle de la contribution du karst aux crues de l'Yèvre à l'amont de Bourges (SPC Loire-Cher-Indre)

Rapport final

BRGM/RP-70442-FR
Mars 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2020

(Convention DGPR – BRGM. Appui scientifique au SCHAPI)

V. Hakoun

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : J.-C. Maréchal	Nom : F. Garrido
Fonction : Responsable unité NRE	Fonction : Directeur Adjoint DEPA
Date : 10/03/2021	Date : 13/03/21
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, Hydrogéologie, Crue, Cher, Bourges

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

Hakoun V., (2021) – Appui au SCHAPI 2020 – Module 1. Étude évènementielle de la contribution du karst aux crues de l'Yèvre à l'amont de Bourges (SPC Loire Cher Indre). Rapport final. BRGM/RP-70442-FR, 53 p., 35 ill., 2 ann.

© BRGM, **2021**, 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 2020 pour le compte du SPC Loire-Cher-Indre, porte sur la caractérisation du rôle du karst sur les évènements de crues de l'Yèvre à l'amont de Bourges, en Champagne Berrichonne.

Les terrains carbonatés karstifiés offrent d'importantes capacités d'échanges entre eau de surface et eau souterraine, ce qui complique les processus de crues des bassins à composante karstique. Cette complexité est exacerbée par l'hétérogénéité spatiale des propriétés hydrodynamiques, peu prévisible, des aquifères karstiques. Il en résulte que le fonctionnement hydrologique de ces bassins à composante karstique représente un défi pour des objectifs opérationnels de prévisions des crues.

L'objectif général de cette étude est d'approfondir les connaissances du rôle du karst sur les sous bassins versants de l'Yèvre à l'amont de Bourges. Pour répondre à cet objectif et préciser les processus hydrogéologiques en lien avec le karst dans la genèse des crues de l'Yèvre dans sa partie amont, nous avons mis en œuvre une série d'approches qui reposent sur une analyse de données spatiales et temporelles à l'échelle évènementielle et la modélisation des écoulements de surface et souterrain avec l'outil de modélisation GARDENIA (Thiery, 2014).

Les résultats obtenus par ces deux approches permettent d'améliorer la compréhension des processus de genèse de crue sur le bassin de l'Yèvre. Elles permettent d'identifier les piézomètres susceptibles d'apporter une information reflétant un état de remplissage du karst, ce qui semble représenter une information pertinente pour la prévision des crues du territoire. Par ailleurs, les résultats obtenus via l'approche de modélisation permettent de valider les schémas conceptuels d'écoulement sur les sous bassins de l'Yèvre et de quantifier les parts de contributions des eaux souterraines aux écoulements en rivière, et de transferts (souterrains) interbassins et / ou des superficies de bassin versant à considérer.

D'un point de vue opérationnel, les informations caractérisant l'état de remplissage du karst ainsi que celles relatives aux dimensions des bassins (et aux fuites interbassins) pourraient être intégrées aux modèles de prévisions des crues sur le bassin de l'Yèvre et les sous bassins de la zone amont à Bourges.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Modèle GARDENIA 11

2.1. FONCTION DE PRODUCTION 12

2.2. TRANSFERTS ENTRE RESERVOIRS 13

2.3. RESERVOIRS SOUTERRAINS 13

2.4. ECHANGES EXTERNES 15

2.5. CALIBRATION 15

2.6. SERIES CALCULEES PAR LE MODELE 16

2.7. OPTIMISATION DES PARAMETRES 16

3. Bassin de l'Yèvre et données disponibles 17

3.1. SITUATION REGIONALE 17

3.2. GEOLOGIE 18

3.3. HYDROLOGIE 19

3.4. HYDROGEOLOGIE 21

3.5. DONNEES UTILISEES 22

4. Analyse évenementielle des crues de l'Yèvre 25

4.1. INTRODUCTION 25

4.2. RESULTATS 25

4.2.1. Bassin de l'Airain 25

4.2.2. Bassin de l'Auron 28

4.2.3. Bassin de l'Ouatier 30

4.2.4. Bassin du Moulon 31

4.2.5. Bassin de l'Yèvre 33

4.3. SYNTHESE 37

5. Approche par modélisation 38

5.1. INTRODUCTION 38

5.2. RESULTATS 38
5.2.1. Bassin de l'Airain 38
5.2.2. Bassin de l'Auron 39
5.2.3. Bassin de l'Ouatier 40
5.2.4. Bassin du Moulon 41
5.2.5. Bassin de l'Yèvre 42

5.3. ECHANGE LATERAUX SOUTERRAINS ET OPTIMISATION DES SURFACES D'ALIMENTATION DES BASSINS 44

5.4. CONCLUSION 46

6. Conclusion 47

7. Bibliographie 49

Liste des figures

FIGURE 1 : STRUCTURE SIMPLE DU MODELE GARDENIA SIMPLE POUR LA SIMULATION DES DEBITS DE RIVIERE ET DE NIVEAUX DE NAPPE (THIERY, 2014). 11
FIGURE 2 : RESERVOIR SOL DE TYPE "RESERVE UTILE" (TOUT OU RIEN) (THIERY, 2014). 12
FIGURE 3 : SCHEMA DU RESERVOIR INTERMIDAIRE H (THIERY, 2014) 13
FIGURE 4 : STRUCTURE DU RESERVOIR SOUTERRAIN G1 (THIERY, 2014) 13
FIGURE 5 : STRUCTURE DU RESERVOIR SOUTERRAIN G2 (THIERY, 2014). 14
FIGURE 6 : STRUCTURE DU RESERVOIR SOUTERRAIN A SEUIL G (THIERY, 2014). 14
FIGURE 7 : PARAMETRES A OPTIMISER POUR DIFFERENTES STRUCTURE DE MODELES (CHARLIER, 2017). 16
FIGURE 8 : CUMULS PLUVIOMETRIQUES ANNUELS A BOURGES (DONNEES METEO FRANCE) 17
FIGURE 9: CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DU BERRY (D'APRES D. VASLET, 2001). 18
FIGURE 10 : COUPE GEOLOGIQUE SUIVANT LA VALLEE DU CHER ET DE L'AURON (D'APRES MARTIN & MAGET (1998) ET MAGET ET AL. (2002)) 19
FIGURE 11 : BASSIN DE L'YEVRE A L'AMONT DE BOURGES ET PRINCIPAUX SOUS-BASSINS TOPOGRAPHIQUES, CARTE TOPOGRAPHIQUE DANS LE BASSIN DE L'YEVRE. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DISTINGUE EN ROUGE EST INTERMITTENT (BD TOPO ET MNT 25M, DONNEES IGN ©). 20
FIGURE 12 : DEBITS DE CRUE ($M^3.S^{-1}$) HIVERNALE DE L'YEVRE A BOURGES ET SUR LES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE L'YEVRE A L'AMONT DE BOURGES. LA FIGURE MONTRE LA PREPONDERANCE DES DEBITS DE L'AURON ET DE L'AIRAIN AUX DEBITS DE L'YEVRE AINSI QUE LA SUCCESSION DES ONDES DE CRUES ENREGISTREES A BOURGES. 21
FIGURE 13 : CARTES DES POINTS DE MESURES DES CUMULS PLUVIOMETRIQUES, DES STATIONS HYDROMETRIQUES (A GAUCHE) ET DES PIEZOMETRES DANS LE BASSIN DE L'YEVRE A L'AMONT DE BOURGES (A DROITE). 23
FIGURE 14 : CHRONIQUE DES DEBITS DE L'AIRAIN (CROSSES - K554301001) ET DE LA PIEZOMETRIE AU PIEZOMETRE 05471X0070 – VORNAY . SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM. 26
FIGURE 15 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'AIRAIN. COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL DU COURS D'EAU ET (BAS) DE LA PIEZOMETRIE INITIALE AU POINT 05471X0070 – VORNAY 27
FIGURE 16 : CHRONIQUE PLUIE, DEBIT DE L'AURON (ORMEDIOT - K565301001) ET PIEZOMETRIE DU POINT 05464X0045/P – PLAIMPIED. SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM. 28
FIGURE 17 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'AURON. COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL ET DE LA PIEZOMETRIE AU POINT 05464X0045/P – PLAIMPIED. 29

FIGURE 18 : EN FONCTION D'UN SEUIL A 155.6M NGF, LE NIVEAU D'EAU INITIAL DANS LE PIEZOMETRE 05471X0070 – VORNAY DU BASSIN DE L'AIRAIN PERMET D'IDENTIFIER UNE REPONSE HYDROLOGIQUE DIFFERENTE DE L'AURON. 29
FIGURE 19 : CHRONIQUE DES PLUIES, DEBITS DE L'OUATIER (MAUBRANCHE - K555458001) ET PIEZOMETRIE DU POINT 04936X0010 – RIANS. SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM.....30
FIGURE 20 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'OUATIER. COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL. 31
FIGURE 21 : CHRONIQUE DES PLUIES, DEBITS DU MOULON (ASNIERES - K557410001) ET PIEZOMETRIE DU POINT 04935X0018 - SOULANGIS. SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM. 32
FIGURE 22 : COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC), VOLUME DE CRUE (VOL. Q) ET DEBITS MAXIMAUX (QX) DU BASSIN DU MOULON EN FONCTION DES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES.....33
FIGURE 23 : CHRONIQUE DES PLUIES, DES DEBITS DE L'YEVRE (SAVIGNY - K5552300) ET PIEZOMETRIE DU POINT 05203X0083/P – VILLEQUIERS. SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM. 34
FIGURE 24 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'YEVRE (STATION DE SAVIGNY) (PERIODE 2008-2018). COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL ET DE LA PIEZOMETRIE INITIALE AU POINT 05203X0083/P – VILLEQUIERS. RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL. 34
FIGURE 25 : CHRONIQUE DES PLUIES, DES DEBITS DE L'YEVRE (SAINT-DOULCHARD - K570232001) ET PIEZOMETRIE DU POINT 05205X0013/P – SAVIGNY. SOURCE DES DONNEES : METEO FRANCE, BANQUE HYDRO ET ADES / BRGM. 35
FIGURE 26 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'YEVRE (STATION DE SAINT-DOULCHARD) (PERIODE 2008-2018). COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL ET DE LA PIEZOMETRIE INITIALE AU POINT 05205X0013/P – SAVIGNY. 36
FIGURE 27 : RELATIONS ENTRE CUMULS PLUVIOMETRIQUES ET VOLUME DE CRUE (QMM), COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT (RC) ET DEBIT MAXIMAL OBTENUS A PARTIR D'UNE SELECTION DE CRUES SUR LE BASSIN DE L'YEVRE (STATION DE SAINT-DOULCHARD) (PERIODE 2008-2018). COLORIMETRIE EN FONCTION (HAUT) DU MOIS, (MILIEU) DU DEBIT INITIAL ET DE LA PIEZOMETRIE INITIALE AU POINT 05471X0070/P –VORNAY.....36
FIGURE 28 : SIMULATIONS GARDÉNIA DU DEBIT MOYEN JOURNALIER (HAUT) DE L'AIRAIN A CROSSES (K5543010) ET DE LA PIEZOMETRIE (BAS) AU PIEZOMETRE DE VORNAY (05471X0070/P1) OBTENUES AVEC GARDÉNIA.....39
FIGURE 29 : SIMULATIONS DU DEBIT MOYEN JOURNALIER DE L'AURON A ORMEDIOT (K5653010) ET DE LA PIEZOMETRIE AU PIEZOMETRE DE PLAIMPIED (05464X0045/P) OBTENUES A L'AIDE DE L'OUTIL GARDÉNIA : 40
FIGURE 30 : SIMULATIONS DU DEBIT MOYEN JOURNALIER DE L'OUATIER A MOULINS SUR YEVRE (MAUBRANCHE - K5554580) ET DE LA PIEZOMETRIE AU PIEZOMETRE DE RIANS (04936X0010/F) OBTENUES AVEC GARDÉNIA.....40
FIGURE 31:SIMULATIONS DU DEBIT MOYEN JOURNALIER DU MOULON A BOURGES (ASNIERES - K5574100) 41
FIGURE 32: COMPARAISON DES SIMULATIONS GARDENIA ET GR4J AU PAS DE TEMPS HORAIRE SUR LE BASSIN DU MOULON. HAUT : CHRONIQUE COMPLETE. BAS : DETAIL DU PREMIER SEMESTRE 2016.....42
FIGURE 33 : SIMULATIONS PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE DU DEBIT JOURNALIER DE L'YEVRE A SAINT DOULCHARD (BOURGES) ET DANS TROIS PIEZOMETRES DU BASSIN DE L'YEVRE. LES SIMULATIONS SONT EN ROUGE, LES OBSERVATIONS SONT EN NOIR. 43
FIGURE 34 : SIMULATIONS PLUIE-DEBIT-PIEZOMETRIE DU DEBIT HORAIRE DE L'YEVRE A SAINT DOULCHARD (BOURGES) ET DANS TROIS PIEZOMETRES DU BASSIN DE L'YEVRE. LES SIMULATIONS SONT EN ROUGE, LES OBSERVATIONS SONT EN NOIR. HAUT : DEBITS. MILIEU : PIEZOMETRIE. BAS : RELATIONS DEBIT- PIEZOMETRIE..44
FIGURE 35 : CARTES PIEZOMETRIQUES BASSES ET HAUTES EAUX SUR LE BASSIN DE L'OUATIER. LES FLECHES INDIQUENT LES DIRECTIONS D'ECOULEMENTS SOUTERRAINS : LES FLANCS AMONTS DU BASSIN SONT ALIMENTES PAR DES APPORTS EXTERNES, LA PARTIE SUD EXPORTE VERS L'YEVRE. **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

Liste des annexes

ANNEXE 1 : TABLEAU DES STATIONS METEOROLOGIQUES.....50
ANNEXE 2 : CARTES PIEZOMETRIQUES DE L'OUATIER.....51
ANNEXE 3 :TABLEAU DES RESULTATS GARDENIA 52

1. Introduction

Afin de comprendre précisément les processus de genèse de crue dans des bassins où des aquifères karstiques sont présents, il est nécessaire de caractériser le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des bassins, en tenant compte des spécificités hydrogéologiques rencontrés dans les aquifères karstiques. Cependant, la caractérisation 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 et d'un nombre restreint de points d'observations (piézomètre, source) caractérisant la dynamique des 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 avec la surface. Ainsi, une fraction ou l'intégralité des écoulements de surface (rivière ou ruissèlement) peuvent être ponctuellement redirigés en souterrain, et de manière similaire, les écoulements souterrains peuvent être redirigés vers la surface.

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 un besoin d'approfondissement de compréhension et du rôle des processus karstiques dans la genèse de crues sur le bassin de l'Yèvre. Dans sa partie à l'amont de Bourges, l'Yèvre et ses affluents présentent des réponses hydrologiques, notamment les débits de pointe, très contrastés.

L'identification de l'origine de ces contrastes de réponses est l'objet du précédent rapport (RP-69925-FR, Hakoun (2020)) dans lequel nous avons pu mettre en évidence un lien entre les différentes lithologies présentes dans chaque sous bassin et les contrastes de réponses hydrologiques. Le sous bassin du Moulon a des crues qui présentent des débits de pointe importants et une réponse hydrologique très rapide du fait de la présence de terrains marneux qui favorisent le ruissellement. Malgré une taille similaire à celle du Moulon, le sous bassin voisin de l'Ouatier a des débits pointe et des réponses hydrologiques bien moindres et atténuées du fait de la présence de terrains plus calcaires karstifiés qui favorisent l'infiltration et les échanges souterrains. Par ailleurs, sur la base d'études antérieures de jaugeages et de traçages, l'étude précédente propose aussi un modèle d'échange entre les sous bassins de l'Airain (en perte) et de l'Auron (en gain) où le sous-sol est constitué en partie de calcaires karstifiés.

Le présent travail vise à approfondir les connaissances du rôle du karst dans la genèse des crues en adoptant une approche évènementielle et une approche par modélisation. Ces approches ont pour buts d'identifier si des conditions de remplissage de l'aquifère peuvent impacter les processus de crue, de valider les schémas de fonctionnement des sous bassins de l'Yèvre, en tenant compte de la dynamique des eaux souterraines, et d'explorer les possibilités d'estimation des flux entre les sous bassins à l'amont de l'Yèvre.

2. Modèle GARDENIA

L'outil de modélisation GARDENIA (modèle **G**lobal **A** **R**éservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **NI**veaux **A**quifères – http://gardenia.brgm.fr), développé par le BRGM, permet de simuler le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. L'approche employée est une modélisation conceptuelle basée sur une représentation simplifiée des écoulements au travers de réservoirs successifs. Cette approche permet de tenir compte des écoulements souterrains (Thiery, 2014).

Les variables d'entrée de l'outil de modélisation GARDENIA sont des chroniques météorologiques (précipitations et évapotranspiration potentielle) sur une aire de bassin versant. Les variables de sortie calculées par GARDENIA sont multiples. Les principales sont : les débits d'un cours d'eau à l'exutoire du bassin et / ou les niveaux piézométriques dans la nappe associée au bassin. D'autres variables telles que la pluie efficace, la recharge de l'hydrosystème ou des termes sources (positif/négatif) au bassin peuvent être calculées.

Plusieurs structures de réservoirs successifs peuvent être considérées dans GARDENIA. La structure qui nécessite un nombre minimum de paramètres et qui permet de simuler le cycle de l'eau comporte 3 réservoirs en cascade (Figure 1). Le premier réservoir représente les transferts d'eau à l'interface atmosphère/sol, ce réservoir permet de simuler les processus d'évapotranspiration. Le second réservoir représente les transferts d'eau dans une zone intermédiaire à l'interface sol-zone non saturée ; ce réservoir permet de simuler les processus d'écoulement rapide vers la rivière et lente avec une infiltration vers la nappe. Le troisième et dernier réservoir représente les transferts à l'interface zone non saturée-zone saturée ; ce réservoir permet de simuler le remplissage par la recharge et la vidange d'un aquifère au sein d'une rivière. À noter que dans des cas plus complexes, d'autres processus (p. ex. fonte de neige, écoulements très retardés souterrains) peuvent être pris en compte avec l'ajout de fonctions spécifiques et/ou de réservoirs supplémentaires.

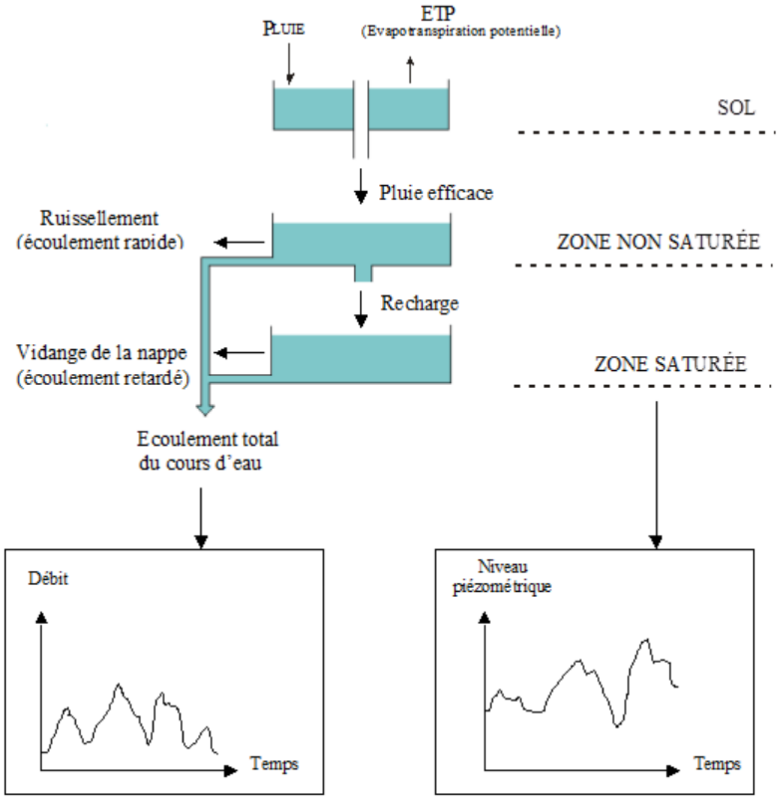


Figure 1 : Structure simple du modèle GARDENIA simple pour la simulation des débits de rivière et de niveaux de nappe (Thiery, 2014).

2.1. FONCTION DE PRODUCTION

La fonction « production » est réalisée dans le réservoir sol selon deux options. Première option : un réservoir sol type réserve utile, avec un seuil (tout ou rien). Deuxième option : un réservoir sol progressif, avec des lois quadratiques qui permettent de tenir compte de l'état de remplissage du réservoir (Edijatno & Michel, 1989), similaire à la fonction de production des modèles GRs.

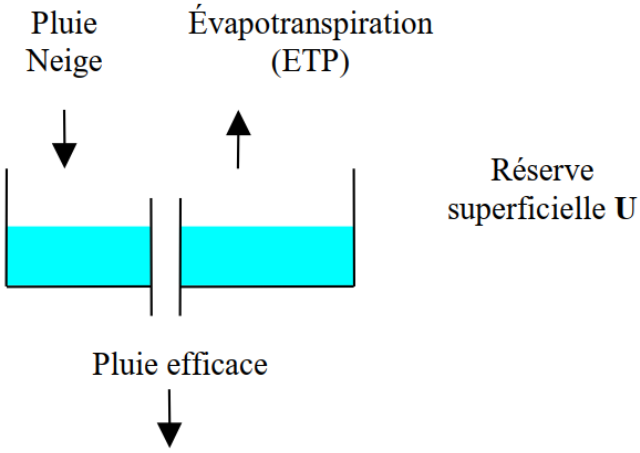


Figure 2 : Réservoir sol de type "réserve utile" (tout ou rien) (Thiery, 2014).

Le réservoir sol est alimenté par l'excédent de pluie *P* (Pluie-ETP). Dans la suite, « pluie » correspond à l'excédent de pluie et « ETP » correspond à l'excédent d'ETP.

Réservoir sol « progressif »

La capacité maximale du réservoir U est notée *Sx*. La pluie nette *Pn* est estimée à l'aide de lois quadratiques, la quantité de pluie qui atteint le réservoir le réservoir intermédiaire dépend du niveau S du réservoir sol :

- **Si P > ETP**
  Pn = (P-ETP) . (S(t) / Sx)^2
  ETR = ETP

Dans ce cas, $\Delta S = S_X \tanh(P - S_X) \left[\frac{1-\left(\frac{S}{S_X}\right)^2}{1+\left(\frac{S}{S_X}\right)\tanh\left(\frac{P}{S_X}\right)} \right]$

- **Si P < ETP**
  Pn = 0
  ETR = (ETP – P) . (S(t) / Sx) . (2-(S(t) / Sx))
- Dans ce cas, $\Delta S = -ETP \frac{S}{ETP + \frac{S_X}{\left(2-\frac{S}{S_X}\right)}}$

Réservoir sol « réserve utile »

On note *RUMAX* la valeur de rétention du sol. La pluie nette est estimée par seuil :

- **Si P > ETP**
  Pn = 0 tant que S(t) < RUMAX et Pn = P –ETP quand S(t) > RUMAX
- **Si P < ETP**
  ETR = (ETP – P) tant que S(t) >0 et ETR = 0 quand S(t) = 0
  Pn = 0

2.2. TRANSFERTS ENTRE RESERVOIRS

Le réservoir souterrain intermédiaire H représente la zone non saturée et permet de diviser la pluie nette *Pn* en composantes *QH* et *ALIMG,* les débits d'écoulement rapide qui rejoint l'exutoire et d'écoulement lent qui rejoint le réservoir souterrain. Le réservoir H est alimenté par la pluie nette calculée ci-dessus (issue du réservoir superficiel U), il a donc deux exutoires : celui de sortie du modèle et celui vers le réservoir souterrain.

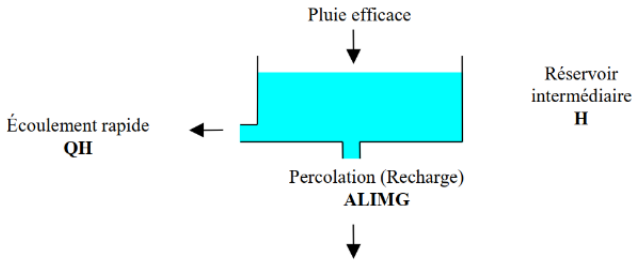


Figure 3 : Schéma du réservoir intermidaire H (Thiery, 2014).

L'écoulement vers l'exutoire correspond à la composante rapide du débit de rivière dénoté *QH*. Ce débit est calculé par une loi non linéaire contrôlée par le paramètre *RUIPER*. Ce paramètre *RUIPER* est un seuil de hauteur d'eau dans le réservoir H au-dessus duquel le débit vers la sortie du modèle (*QH*) et la fuite vers le réservoir souterrain (*ALIMG*) sont égaux. Le débit *QH* s'écrit :

QH = H . dt / (THG . RUIPER / H)

Avec *THG* la constant de temps de la loi de vidange exponentielle du réservoir H. La fuite vers le réservoir souterrain G1 est noté *ALIMG*. Elle suit une loi de vidange exponentielle telle que :

ALIMG = H . dt / THG. Le ratio QH / ALIMG est égal au rapport H / RUIPER.

2.3. RESERVOIRS SOUTERRAINS

Deux réservoirs souterrains (et une option de seuil) peuvent être mis en série et pris en compte dans GARDENIA. Ils correspondent à des écoulements lents et très lents. Le réservoir de la zone saturée G1 est alimenté par le réservoir intermédiaire H. Le réservoir de la zone saturée G2 est alimenté par le réservoir G1.

Le réservoir G1 a une hauteur d'eau notée *G1* et il est vidangé par deux exutoires :

- le débit *QG1* est calculé selon une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 : QG1 = G1 . dt /TG1 ;
- le débit d'alimentation au réservoir G2, *ALIMG2*, suit une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG12 : ALIMG2 = G1 . dt / TG12.

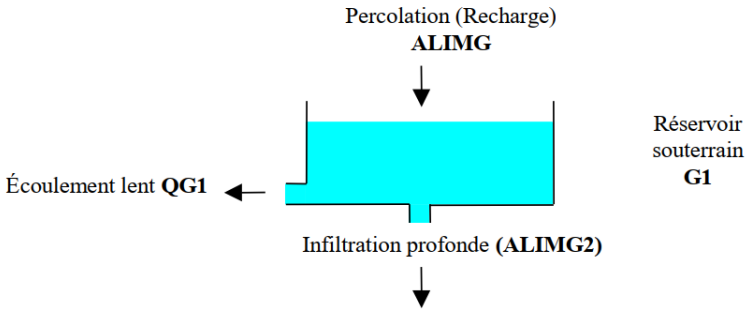


Figure 4 : Structure du réservoir souterrain G1 (Thiery, 2014).

Dans le cas simple (1 réservoir), sans drainance de G1 vers G2, le débit ALIMG2 est nul.

Le deuxième réservoir aquifère G2 est un réservoir facultatif qui représente un aquifère profond ou une partie inférieure de l'aquifère G1. L'alimentation de ce réservoir est le débit de fuite depuis G1, ALIMG12. La hauteur d'eau contenue dans le deuxième réservoir est notée *G2*. Le débit issu du réservoir G2 profond est un débit très lent QG2 calculé avec une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG2 :

QG2 = G2 . dt / TG2.

Le débit du réservoir, QG2, peut être évacué par plusieurs exutoires : à l'exutoire du bassin ou vers un horizon profond. Dans ce dernier cas, le débit de fuite n'est pas pris en compte dans le calcul de débit à l'exutoire du bassin.

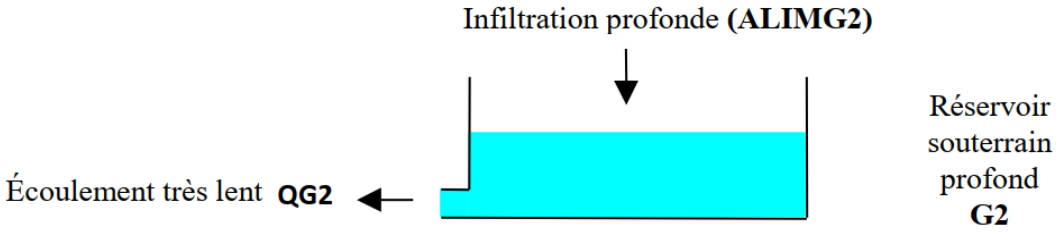


Figure 5 : Structure du réservoir souterrain G2 (Thiery, 2014).

Enfin, **l'option de seuil s'applique à une seconde structure du premier réservoir G1** (et l'éventuel G2) de la zone saturée. Cette structure contient un réservoir avec un exutoire de vidange et un exutoire de seuil. Cette option permet d'ajouter un débit à celui de vidange lorsque le niveau d'eau du réservoir atteint une côte donnée.

Cette structure permet de simuler une côte de débordement ou de représenter une courbe de tarissement avec effet de seuil -- changements de pente correspondants à des régimes de vidanges contrastés aux temps courts et aux temps longs. Cette seconde structure du réservoir G1 contient un niveau d'eau G et une hauteur de seuil, SEUIL. Le débit de vidange suit une loi de vidange exponentielle propre, avec une constante de temps TG2 :

QG2 = G . dt / TG2 ; et le débit complémentaire sensible au seuil est :

QG1 = (G – SEUIL) . dt / TG1 si G > SEUIL

QG1 = 0 si G ≤ SEUIL

De manière similaire au réservoir G2, le débit QG2 peut être exporté hors du bassin, sans contribuer au débit à l'exutoire.

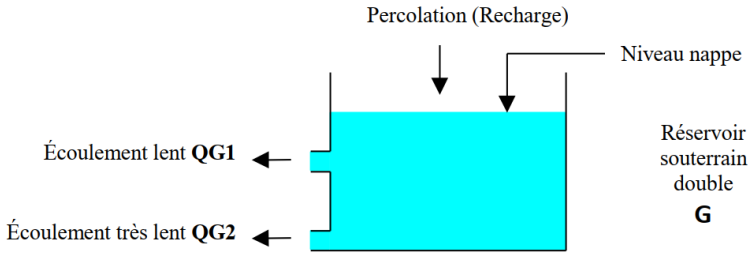


Figure 6 : Structure du réservoir souterrain à seuil G (Thiery, 2014).

2.4. ECHANGES EXTERNES

Dans les bassins versants où les eaux souterraines jouent un rôle important dans le bilan, il est fréquent que des échanges interbassins se produisent. Une part de la composante souterraine peut ainsi « sortir » ou « entrer » et modifier le bilan mesuré à l'exutoire de surface. Ces échanges sont modélisés à l'aide d'un coefficient d'échange souterrain externe.

Q_Echang_Sout = Fact_Echang . QG1_Avant_Echang, et

Q_Echang_Sout = QG1 . Fact_Echang / (1+Fact_Echang)

Dans le cas où la structure du modèle contient un deuxième réservoir souterrain (G2), le débit échangé est :

Q_Echang_Sout = QG2 . Fact_Echang / (1+Fact_Echang)

Les **échanges souterrains n'affectent pas le niveau d'eau calculé dans le réservoir, ils affectent seulement le débit évacué**. Le facteur d'échange est positif si le bassin est en gain, négatif si le bassin est en perte.

2.5. CALIBRATION

La méthode de calibration est semi-automatique. L'utilisateur fournit la gamme de paramètres, une valeur initiale et les paramètres à optimiser. L'optimisation est faite avec l'algorithme non linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960).

La stratégie de calibration dépend du modèle considéré, pluie-débit ou pluie-débit-piézométrie. Dans le premier cas, le modèle est calibré sur le débit seul. Dans le second, la calibration repose sur une prise en compte des valeurs de débit et des niveaux piézométriques, via une pondération. Le critère d'ajustement F est alors :

F = (alpha x F_Debit) + (1-alpha x F_Niveaux) avec 0 < alpha < 1

Avec F_Debit et F Niveaux les coefficients de Nash respectifs au débit et à la piézométrie. Le critère de Nash a été choisi car il fait référence dans les approches de modélisation hydrologique. Il est compris entre -∞ et 1, et favorise les fortes valeurs. Par défiintion, le critère de Nash intègre une normalisation par rapport au débit moyen, ainsi un critère de Nash inférieur ou égal à 0 reflète une performance inférieure ou égale à une valeur constante égale à la moyenne de la série simulée. Dans GARDENIA, les critères de Nash du débit et de la piézométrie sont calculés après normalisation par la valeur moyenne observée. Enfin, le choix de ce critère est cohérent avec la volonté d'être performants sur les forts débits de crue et non sur faibles débits d'étiages.

Lorsque le débit et la piézométrie sont utilisés et simulés par GARDENIA, nous avons choisi de pondérer uniformément l'information contenue par chaque variable. Ainsi, alpha = 0.5 et le modèle est contraint à la fois par le débit à l'exutoire du bassin mais aussi par la piézométrie. Du fait de la contrainte apportée par la chronique de piézométrie pour le réservoir lent et des interactions avec notamment le réservoir intermédiaire H, l'estimation des flux échangés entre réservoirs est relativement plus robuste dans le modèle pluie-débit-piézométrie.

2.6. SERIES CALCULEES PAR LE MODELE

Selon l'utilisation de GARDENIA, deux types de séries peuvent être calculées.

Le débit Q à l'exutoire du bassin est obtenu par la somme des débits issus des réservoirs à destination de l'exutoire, soit Q = QH + QG1 + QG2. Avec le débit Q en mm, calculé à chaque pas de temps. Cette lame d'eau est transformée en débit par multiplication avec l'aire du bassin versant et l'ajout de l'éventuel débit extérieur (terme source), puis par division par la durée du pas de temps.

Pour calculer le niveau piézométrique h, en un point de l'aquifère, le modèle calculera selon le choix de l'utilisateur h = *G1* ou *G2*. Ou, dans le cas du réservoir à deux exutoires : h = G. Le niveau h est calculé en mm, il est transformé en niveau absolu en mètres par division avec un coefficient d'emmagasinement global (optimisé) et l'ajout d'un niveau de base local (prédéfini).

2.7. OPTIMISATION DES PARAMETRES

Trois structures du modèle GARDENIA ont été sélectionnées. Le nombre de réservoirs souterrains est différentes dans chaque structure. Les paramètres hydrologiques qui caractérisent le fonctionnement des différents réservoirs sont présentés sur la Figure 7.

Pour un calcul du type pluie-débit (sans piézométrie), le nombre minimal de paramètres du modèle de base (1 réservoir) est de 4. Pour les modèles à 2 ou 3 réservoirs, le nombre de paramètres s'élève à 6 a minima. Pour un calcul du type pluie-débit-piézométrie, un nouveau paramètre (coefficient d'emmagasinement) est nécessaire ; le nombre total de paramètres est alors de 5 ou 7, pour 1 ou de multiples réservoirs respectivement. En option, l'utilisateur peut choisir d'optimiser l'aire du bassin ou le facteur d'échange, ces options ajoutent chacune 1 paramètre.

Paramètre	Unité	Signification	Réservoir	Conditions utilisation	Structure du modèle (X = oui ; O = non)		
					1res	2res	3res
Aire	km²	Superficie du bassin	tous	En option	**Option « Aire »**		
RUMAX	mm	Capacité du réservoir RU de type « réserve utile » ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration »	superficiel U	Si option « réserve utile » sélectionnée	**Non utilisé**		
Sx	mm	Capacité maximale du réservoir sol progressif		Si option « réservoir sol progressif » sélectionnée	**X**	**X**	**X**
RUIPER	mm	Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation	intermédiaire H		**X**	**X**	**X**
THG	mois	Temps de demi-montée du réservoir G1 (temps de ½ percolation)			**X**	**X**	**X**
TG1	mois	Temps de demi-tarissement du réservoir G1 vers exutoire	souterrain G1 ou G à 2 exutoires		**X**	**X**	**X**
TG12	mois	Temps de demi-tarissement du réservoir G1 vers G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2)	Souterrain G1	si G2 sélectionné	**O**	**X**	**O**
SEUIL	mm	Seuil de séparation entre les deux exutoires	souterrain G à 2 exutoires		**O**	**O**	**X**
TG2	mois	Temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent)	souterrain G2 ou G à 2 exutoires		**O**	**X**	**X**
Fact_Echang	%	Coefficient d'échange souterrain externe	Souterrain G1, ou G2, ou G à 2 exutoires	En option	**Option « Ech »**		
Coef_Emmag	s.d.	Coefficient d'emmagasinement global de l'aquifère	Souterrain G1, ou G2, ou G à 2 exutoires	Si calage sur piézométrie	**Mode Pluie-Piézo-Débit**		

Figure 7 : Paramètres à optimiser pour différentes structure de modèles (Charlier, 2017).

3. Bassin de l'Yèvre et données disponibles

Cette étude s'inscrit dans la continuité de l'action pour le SCHAPI de 2019 qui portait sur la caractérisation hydrogéologique du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges. Une présentation détaillée du bassin de l'Yèvre figure dans le rapport RP-69925-FR (Hakoun, 2020). La présentation suivante en reprend les principaux éléments.

3.1. SITUATION REGIONALE

La région du bassin de l'Yèvre dans la partie amont à Bourges se situe au sein du territoire du SPC Loire Cher Indre. Elle s'étend 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 de l'ordre de 12°C. À Bourges, les cumuls interannuels sont relativement variables sur la période 2000-2018, la pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 735 mm (Figure 8). Les périodes entre mai-juin et février-mars sont propices à des cumuls plus importants comparées au reste de l'année. La demande évapotranspiratoire est comprise entre 500 et 600 mm/an, la hauteur de pluie efficace est comprise entre 100 et 300 mm/an.

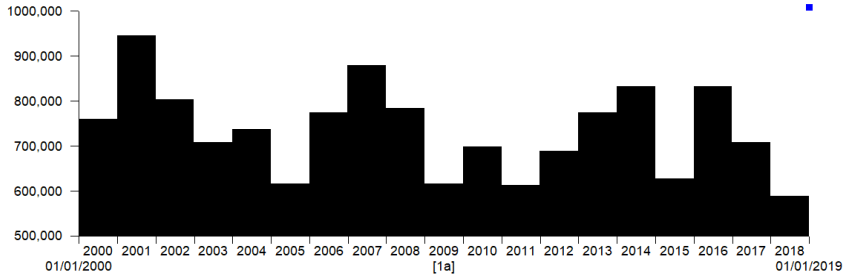


Figure 8 : Cumuls pluviométriques annuels à Bourges (données Météo France).

Le territoire est peu vallonné et correspond à l'extrémité orientale de la Champagne Berrichonne, connue pour ses sols calcaires. Le point culminant se situe sur les collines du Sancerrois : la Motte d'Humbligny culmine à 429 m. L'altitude moyenne du bassin est de 186 m. En amont de Bourges, le bassin de l'Yèvre couvre une superficie d'environ 1 779 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. Les surfaces associées aux bassins topographique des affluents de l'Yèvre sont présentées dans le Tableau 1.

Cours d'eau	Station Hydro	Code BD Hydro	Superficie topo (km2)	Période d'observation
Yèvre	Saint Doulchard	K570232001	1 779	2008-04 / 2018 -12
Yèvre	Savigny	K555230001	543	2000-01 / 2018-12
Moulon	Asnières	K557410001	104	2000-01 / 2018-12
Ouatier	Maubranche	K555458001	160	2004-01 / 2018-12
Airain	Crosses	K554301001	305	2000-01 / 2014-04
Auron	L'Ormediot	K565301001	589	2000-01 / 2018-12

Tableau 1 : Affluents et superficies du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges.

3.2. GEOLOGIE

Le contexte géologique régional s'inscrit dans celui du bassin Parisien avec des formations sédimentaires. Le bassin de l'Yèvre se situe 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 9) :

- 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 plus bas sur une coupe, 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.

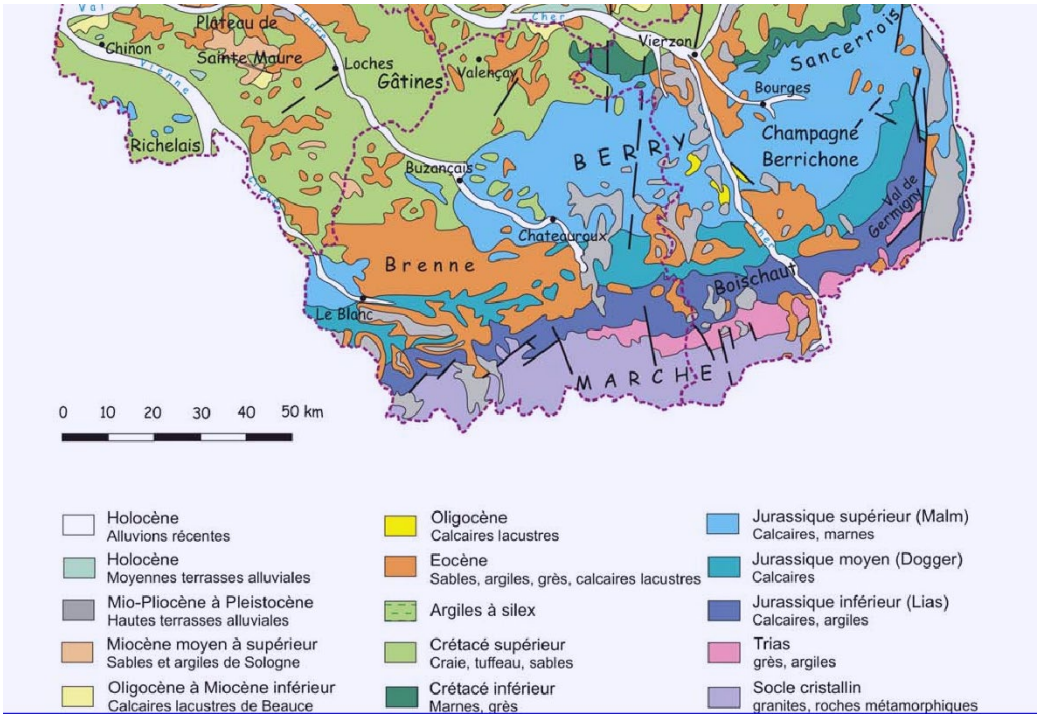


Figure 9: Carte géologique simplifiée du Berry (d'après D. Vaslet, 2001).

La Figure 10 présente une coupe schématique d'axe nord-ouest sud-est de la région. La coupe illustre la succession des formations du Jurassique, du Crétacé et du Quaternaire. À 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). Au sud les calcaires reposent sur des marnes de l'Oxfordien inférieur qui reposent elles même sur une alternance de marnes et de calcaires du Dogger. À l'extrême sud, avant les couches du Trias, on trouve des calcaires du Dogger (Bajocien et Bathonien moyen). Ces calcaires affleurant constituent des zones de recharge de l'aquifère (notamment dans partie amont du bassin de l'Auron) 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.

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 d'autres fluvio-lacustres de l'Éocène. Ces dépôts relativement imperméables sont favorables au développement de territoire de bocage et de forêts, comme ceux au nord de Gron où l'Yèvre prend sa source.

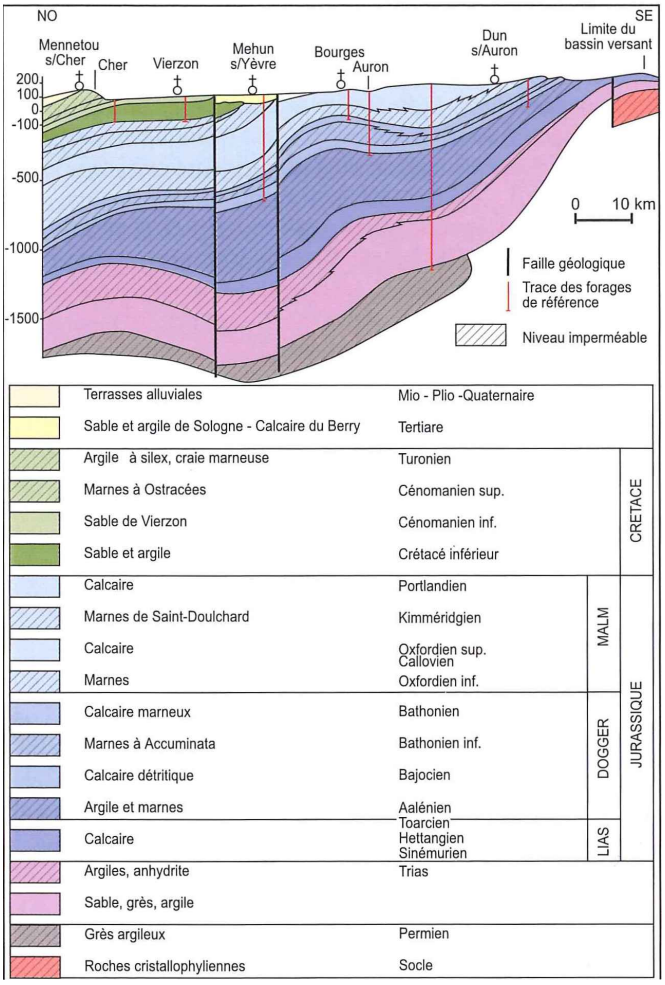


Figure 10 : Coupe géologique suivant la vallée du Cher et de l'Auron (d'après Martin & Maget (1998) et Maget et al. (2002)).

3.3. HYDROLOGIE

Le réseau hydrographique du bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges est peu dense (Figure 11). La morphologie du réseau est intimement liée à la nature des terrains traversés : les calcaires d'âge Jurassique à faible pendage de la Champagne berrichonne. À 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. Le lit de l'Yèvre est relativement plat et sculpte des terrains peu vallonnés (Boirat, 1993).

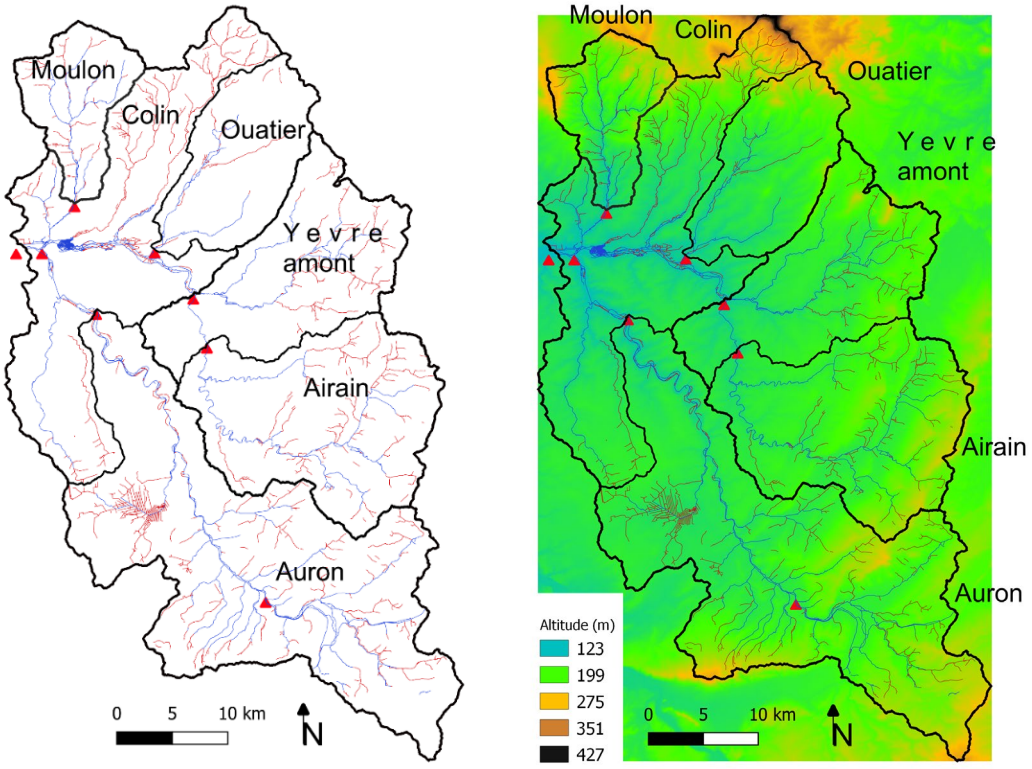


Figure 11 : Bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges et principaux sous-bassins topographiques, carte topographique dans le bassin de l'Yèvre. Le réseau hydrographique distingué en rouge est intermittent (BD TOPO et MNT 25m, données IGN ©).

Les différentes morphologies rencontrées dans les sous-bassins trouvent en partie leur origine dans la variété des lithologies rencontrées (SAGE, 2005) .Trois groupes de sous-bassins sont identifiés :

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 ;
3. le Moulon prend sa source sur les terrains du Crétacé constitués d'une alternance d'argile et de sables. Le cours d'eau du Moulon coule sur des terrains imperméables du Crétacé puis rejoint les couches marneuses du Jurassique Supérieur (Kimméridgien, marnes de Saint-Doulchard).

À 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. 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 Étiages) pour 13 stations réparties sur le territoire (à l'exception du Moulon). Les phases d'écoulements sont visibles en fin de période de hautes eaux (à la fin du printemps) et les assecs sont fréquents en fin de période estivale (septembre).

Afin de quantifier les pertes et gains d'eau en lien avec les échanges entre eau de surface et eau souterraine, l'Airain et l'Auron ont fait l'objet d'une étude (2008) par jaugeages le long des cours d'eau (EDREE, 2010). Pour l'Airain, l'étude montre des différences significativement négatives qui mettent en évidence trois zones de pertes. Pour l'Auron, deux zones d'apports ont été identifiées.

Le recensement des crues historiques présentées 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 récents ont eu lieu en mai 2008, février et novembre 2013, mai 2015 et mai-juin 2016. Deux périodes sont propices aux crues (i) en hiver, en février et (ii) à la fin du printemps, en mai.

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. 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, souvent à sec, qui alimente l'Auron est la Rampenne. L'Airain est le second affluent de l'Yèvre en rive gauche.

L'analyse des temps de propagations des ondes de crues par le SAGE Yèvre-Auron met en évidence une arrivée marquée des ondes de crues à la station de Bourges. La Figure 12 montre une crue d'hiver (février 2009). Dans l'ordre d'arrivée, les principaux sous bassins contribuant au débit de l'Yèvre sont : le Moulon, l'Auron et l'Airain. Les plus fortes contributions au débit sont assurées par l'Auron et l'Airain. En général à la confluence entre l'Auron et l'Yèvre, 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.

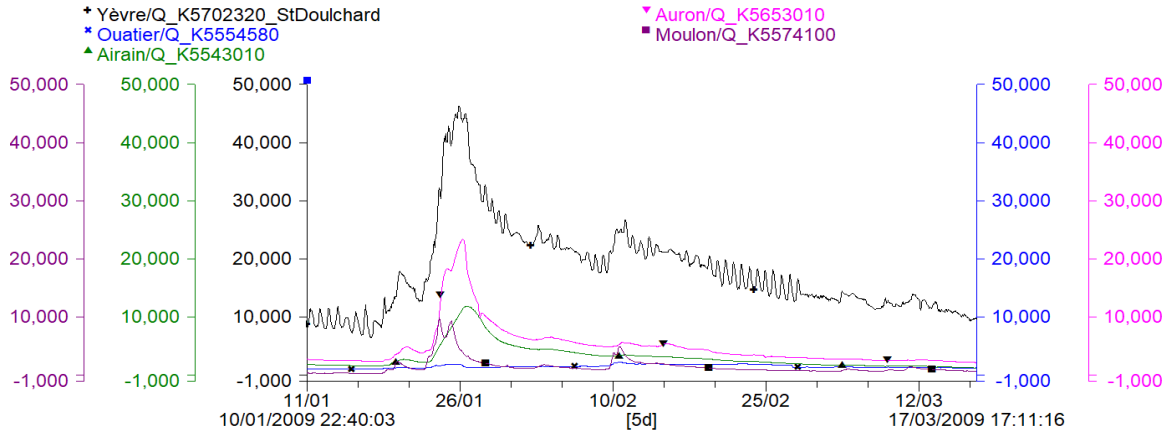


Figure 12 : Débits de crue ($m^3.s^{-1}$) hivernale de l'Yèvre à Bourges et sur les principaux affluents de l'Yèvre à l'amont de Bourges. La figure montre la prépondérance des débits de l'Auron et de l'Airain aux débits de l'Yèvre ainsi que la succession des ondes de crues enregistrées à Bourges.

3.4. HYDROGEOLOGIE

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 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 135AC de la BDLISA (Brugeron, Paroissien, & Tillier, 2018; Petit, Hanot, & Pointet, 2003). 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. Du fait de l'hétérogénéité des propriétés hydrauliques des calcaires, les fluctuations piézométriques peuvent être décamétriques. 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. Les vitesses de transfert de masse (traceur) restent néanmoins tout à fait similaires.

Sur certaines parties du territoire, des traçages artificiels ont été réalisés afin de préciser les modalités d'interactions entre les eaux de surface et 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 Vornay et de l'Airain) et l'Auron (Ormediot), au moment de l'expérience[1]. Des processus de pertes et d'apports entre les cours d'eau de l'Airain et de l'Auron ont été identifiés par jaugeages différentiels. Par ailleurs au Nord, des traçages effectués dans le lit du Colin aux Aix-d'Angillon ont mis en évidence un transfert partiel des écoulements vers l'Ouatier avec une résurgence à Valentigny. La combinaison de ces informations de traçage et des valeurs d'indice de développement de persistance des réseaux a permis de revoir l'extension du bassin d'alimentation de l'Ouatier (Hakoun, 2020).

3.5. DONNEES UTILISEES

Dans cette étude, nous utiliserons des données temporelles acquises sur le territoire. Ces données portent sur :

- les précipitations aux stations météorologiques de Meteo-France 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.

Le Tableau 4 en Annexe 1 présente le détail des codes des stations météorologiques, leurs localisations, altitudes et appartenance aux bassin hydrographiques. La Figure 13 présente l'emplacement des stations hydrométriques et météorologiques (gauche) et les piézomètres (droite) situés dans la zone d'étude.

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

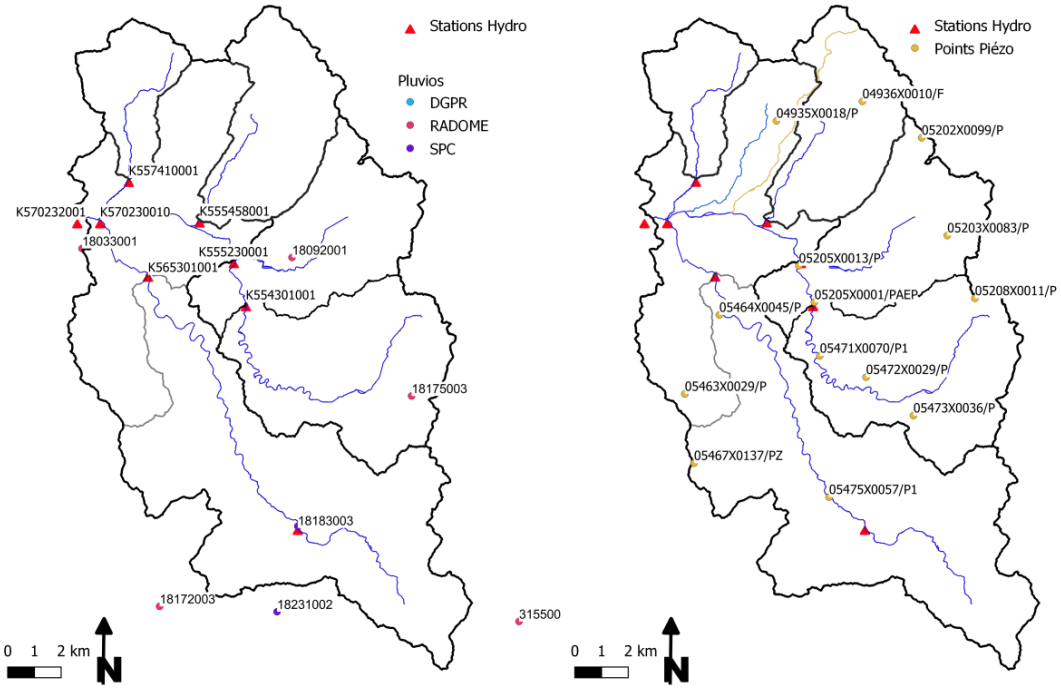


Figure 13 : Cartes des points de mesures des cumuls pluviométriques, des stations hydrométriques (à gauche) et des piézomètres dans le bassin de l'Yèvre à l'amont de Bourges (à droite).

Bassin	alti pz (mNGF)	prof pz (mNGF)	min pz (mNGF)	max pz (mNGF)	Nom PZ	Reference ADES
Airain						
altitude station	158.24	9.9	148.67	157.25	Vornay	05471X0070/P1
146 mNGF	189.27	18.6	172.5	185.7	Osmery	05472X0029/P
	181.38	11.05	171.99	180.57	Blet	05473X0036/P
	186.48	**6.4**	182.18	186.4	Nerondes	05208X0011/P
	148.12	**6.5**	143.84	149.3	Crosses	05205X0001/PAEP
Auron						
altitude station	163.43	51	162.3	165.64	Verneuil	05475X0057/P1
129.8 mNGF	168.17	32.8	137.7	160.17	Plaimpied	05464X0045/P
Ouatier						
altitude station	193.23	32.5	171.52	182.02	Rians	04936X0010/F
141mNGF	180.76	23.6	158.68	172	Soulangis	04935X0018/P
Yevre St D						
altitude station	163.43	51	162.3	165.64	Verneuil	05475X0057/P1
120mNGF	168.17	32.8	137.7	160.17	Plaimpied	05464X0045/P
	177.31	18.75	164.13	177.57	Levet	05463X0029/P
	158.24	9.9	148.67	157.25	Vornay	05471X0070/P1
	189.27	18.6	172.5	185.7	Osmery	05472X0029/P
	181.38	11.05	171.99	180.57	Blet	05473X0036/P
	186.48	6.4	182.18	186.4	Nerondes	05208X0011/P
	148.12	6.5	143.84	149.3	Crosses	05205X0001/PAEP
	162.51	22.7	140.72	156.65	Savigny	05205X0013/P
	206.02	18.2	188.62	202.67	Villequiers	05203X0083/P
	193.23	32.5	171.52	182.02	Rians	04936X0010/F
	180.76	23.6	158.68	172	Soulangis	04935X0018/P
	184.42	26.3	164.58	173.5	Etrechy	05202X0099/P

Tableau 2 : Récapitulatif des altitudes et références des stations hydrométriques et des piézomètres

4. Analyse évenementielle des crues de l'Yèvre

4.1. INTRODUCTION

Afin d'identifier si une information relative à l'état de remplissage de l'aquifère karstique permet de mieux comprendre les processus de crues sur les sous bassins de l'Yèvre, cette partie porte sur une analyse évènementielle des épisodes de crue. L'analyse est centrée sur trois indicateurs de crue : le débit maximal (Qx), le coefficient de ruissellement (RC) et le volume de crue (Q), chacun étant analysé au regard des cumuls de précipitations (P) de chaque sous bassin. De plus, des éléments complémentaires sont utilisés afin de caractériser la saisonnalité et l'état initial de saturation relative superficielle (sol) et profonde (remplissage du karst) : la date, le débit initial et le niveau d'eau dans l'aquifère au début de l'épisode de crue.

La sélection d'épisodes porte sur une quinzaine d'évènements pluvieux, sélectionnés sur la période de 2000 à 2018 pour les bassins du Moulon, de l'Ouatier, de l'Auron, et de l'Yèvre et sur la période 2001-2014 de l'Airain. Une sélection a été réalisée en deux temps : 1) de manière automatique sur la base des cumuls pluviométriques enregistrés sur 86 heures et 2) sur la base des allures des courbes de débits enregistrés (élimination des épisodes multi-pics). La durée du temps de cumul pour la sélection correspond à un temps caractéristique déterminé empiriquement pour les évènements « pluvieux » majeurs du territoire de Champagne Berrichonne. L'élimination des épisodes avec plusieurs pics de crue a été réalisée sur la base de la durée entre deux pics (<24 ou 48h) et de leur intensité, ceci afin d'éviter de prendre en compte des épisodes pluvieux ayant lieu au cours d'une crue. A titre d'exemple, la crue multi-pics présentée Figure 12 a été retenue. Cette sélection d'évènements sur base des cumuls pluviométriques est justifiée afin d'évaluer l'impact d'importants cumuls sur les réponses hydrologiques pour différents états initiaux, en évitant un biais induit sur l'analyse seule menée sur les « crues aux plus forts débits ».

4.2. RESULTATS

4.2.1. Bassin de l'Airain

L'Airain présente de nombreux épisodes d'assecs estivaux et des périodes d'écoulement pendant l'hiver. La Figure 15 présente un aperçu de la chronique des pluies, débit et piézométrie sur la période de 2001 à 2014 et un exemple de crue hivernale en 2009. La piézométrie observée montre des effets de seuils, pendant la période de basses eaux (été) avec des périodes où les niveaux d'eau diminuent fortement. L'exemple de crue hivernale de février 2009 montre que les évolutions des débits de l'Airain et des niveaux piézométriques sont relativement synchronisées.

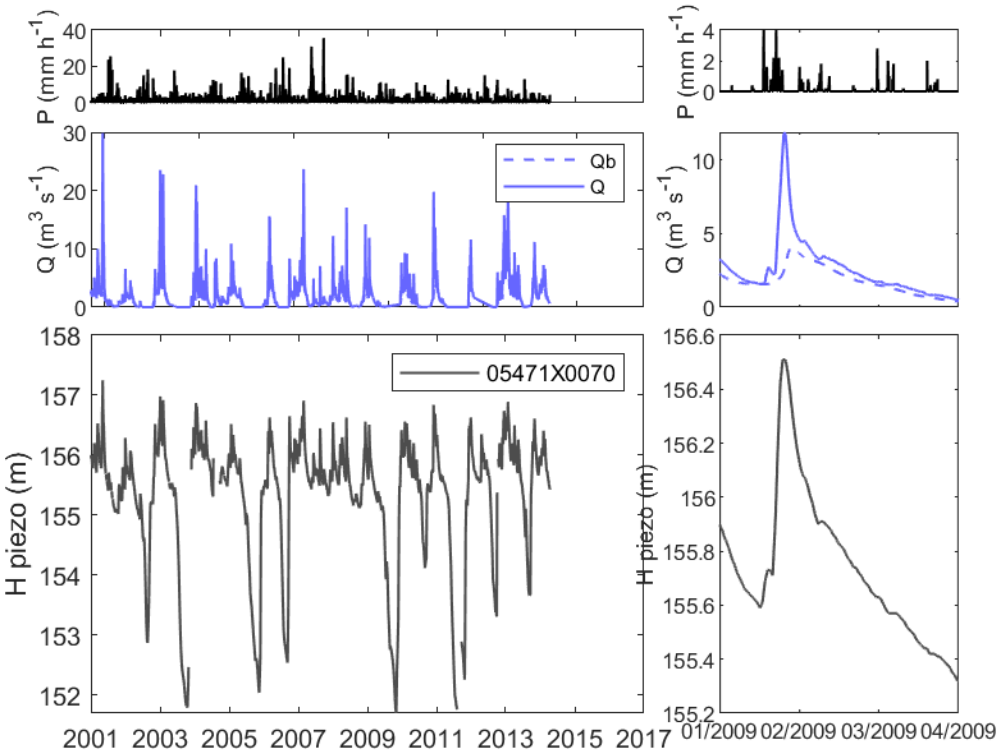


Figure 14 : Chronique des débits de l'Airain (Crosses - K554301001) et de la piézométrie au piézomètre 05471X0070 – Vornay . Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

La Figure 15 présente la dépendance entre les cumuls pluviométriques, et les trois variables hydrologiques d'intérêt (coefficient de ruissellement, volume de crue et débit maximal) en fonction de la saison (1ère ligne), de l'état initial du débit du cours d'eau (2ème ligne) et de la piézométrie initiale (3ème ligne). Les évènements analysés sont répartis sur l'année : une occurrence groupée en octobre et des épisodes répartis sur la période d'avril à mai. Un épisode en décembre 2010 marque un évènement exceptionnel pendant la période hivernale. Les résultats montrent que les volumes de crues écoulés sont inférieurs aux volumes précipités (points situés sous la droite de pente unitaire), ce qui suggère que la part d'infiltration est importante sur ce bassin ; ceci est cohérent avec le contexte hydrogéologique de dominance des calcaires sur le bassin et l'intermittence des écoulements dans le lit de la rivière.

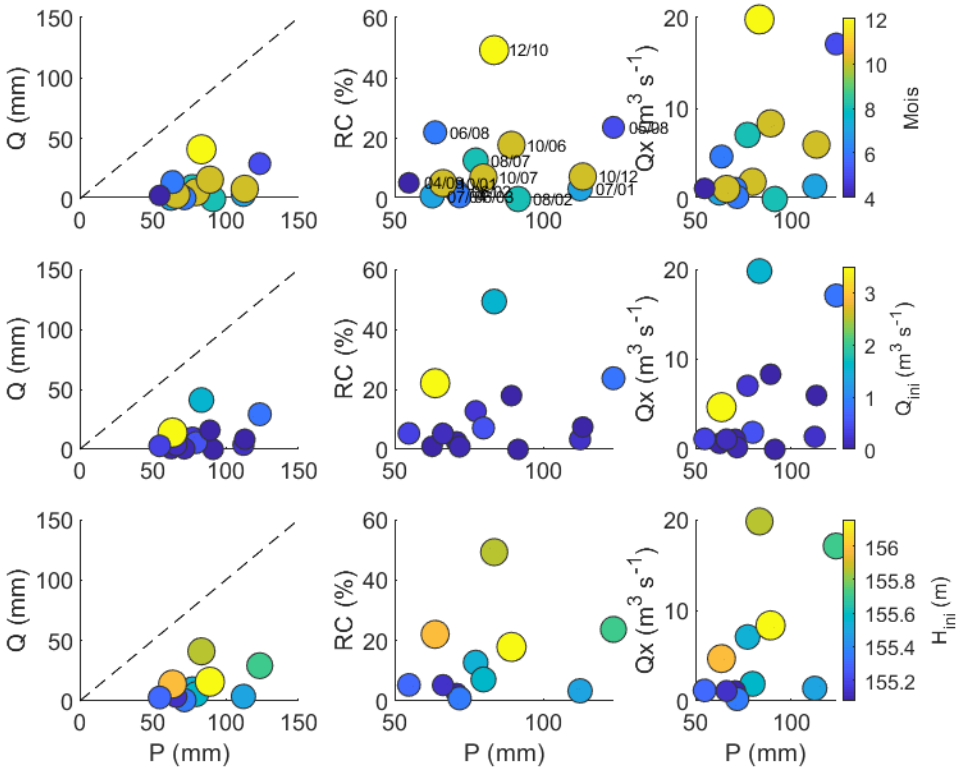


Figure 15 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Airain. Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial du cours d'eau et (bas) de la piézométrie initiale au point 05471X0070 – Vornay.

La Figure 15 montre que pour des épisodes de pluies similaires (cumuls de 70mm), les volumes de crue, les coefficients de ruissèlement et les débits maximaux sont plus importants lorsque les niveaux d'eau souterraine initiaux au point (05471X0070 - Vornay) sont élevés.

L'analyse spécifique des niveaux du piézomètre (05471X0070 - Vornay) montre un changement de dynamique en fonction d'un seuil à 155.6 m NGF (Figure 14). Au-delà du seuil, les débits de rivière et des niveaux d'eau souterraine sont synchrones. Ce changement de dynamique suggère que localement, lorsque le niveau de remplissage de l'aquifère est supérieur au seuil, la nappe alimente le cours d'eau. Cette situation n'est pas nécessairement identique en tout point de l'aquifère. Sur les autres points de mesure des niveaux d'eau souterraine présents dans le bassin, l'analyse spécifique des fluctuations des niveaux piézométriques ne met pas en évidence de niveaux seuil ni de comportement de connexion-déconnexion. Elles montrent en revanche que le niveau d'eau dans l'aquifère est localement plus élevé ou similaire à celui du cours d'eau. Nous verrons dans la section dédiée à la modélisation (Section 5.1) que la prise en compte des effets de seuil est nécessaire pour une approche pluie-débit-piézométrie.

L'analyse croisée des variables hydrologiques et de l'état de remplissage de l'aquifère permet de proposer un schéma de fonctionnement des contributions des eaux souterraines aux écoulements pendant les crues. Lorsque l'aquifère est rempli, la capacité d'infiltration de l'aquifère est réduite (voir impossible localement) et les processus de ruissellement sont amplifiés. À l'inverse, lorsque l'aquifère est relativement moins rempli, la capacité d'infiltration est plus importante et l'aquifère peut contribuer à atténuer un cumul pluviométrique important.

4.2.2. Bassin de l'Auron

Dans le bassin de l'Auron, deux points d'observations des niveaux d'eau souterraine sont présents : les piézomètres 05475X0057/P1 – Verneuil, à l'amont, et 05464X0045/P – Plaimpied, situé à l'aval (Figure 13). Le premier voit ses niveaux évoluer de manière synchrone au débit de rivière (Hakoun, 2020), ce qui limite les possibilités d'évaluation de l'état de remplissage de l'aquifère. Le second permet d'évaluer la dynamique locale de l'aquifère à l'aval du bassin. La Figure 17 montre une comparaison des chroniques de pluviométrie, des débits de l'Auron et de la piézométrie pour ce piézomètre. Les fluctuations annuelles sont supérieures à dix mètres. Sur l'épisode de 2016, suite à une première crue, la hausse des niveaux est de l'ordre de 4 mètres. Globalement, les niveaux sont fréquemment supérieurs à 140 m NGF et à la côte du lit de la rivière (138-139 mNGF). Cette différence met en évidence une alimentation continue du cours d'eau via des apports d'eau souterraine diffus.

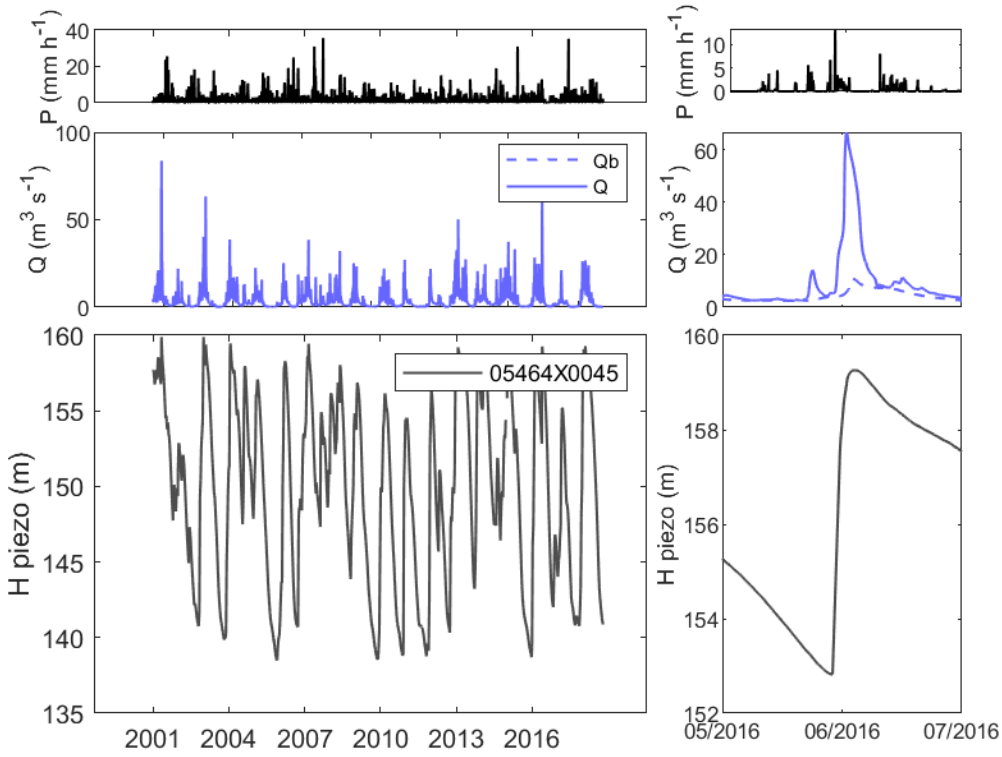


Figure 16 : Chronique pluie, débit de l'Auron (Ormediot - K565301001) et piézométrie du point 05464X0045/P – Plaimpied. Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

La Figure 18 montre les relations entre pluviométrie et volume de crue, coefficient de ruissellement et débit maximaux, au regard de la saison, des valeurs de débit et de piézométrie à l'initiation des crues résultantes des plus importants cumuls de pluie sur 86h. La distribution temporelle des évènements pluvieux montre que les réponses hydrologiques sont relativement plus importantes pour les épisodes du printemps, pendant la période de haute eaux (bleu), et qu'en été les réponses sont plus faibles (turquoise).

La comparaison des états initiaux des débits de crue et de piézométrie met en évidence que la valeur initiale du débit permet de distinguer une typologie avec des réponses marquées pour des débits initiaux supérieurs à 2.1 $m^3.s^{-1}$ et lorsque la piézométrie est élevée. Cependant, comme le montre le débit maximal faible concomitant à une piézométrie élevée (point de piézométrie jaune), la condition de piézométrie élevée au piézomètre de Plaimpied ne semble pas être une condition suffisante pour l'occurrence de fortes crues.

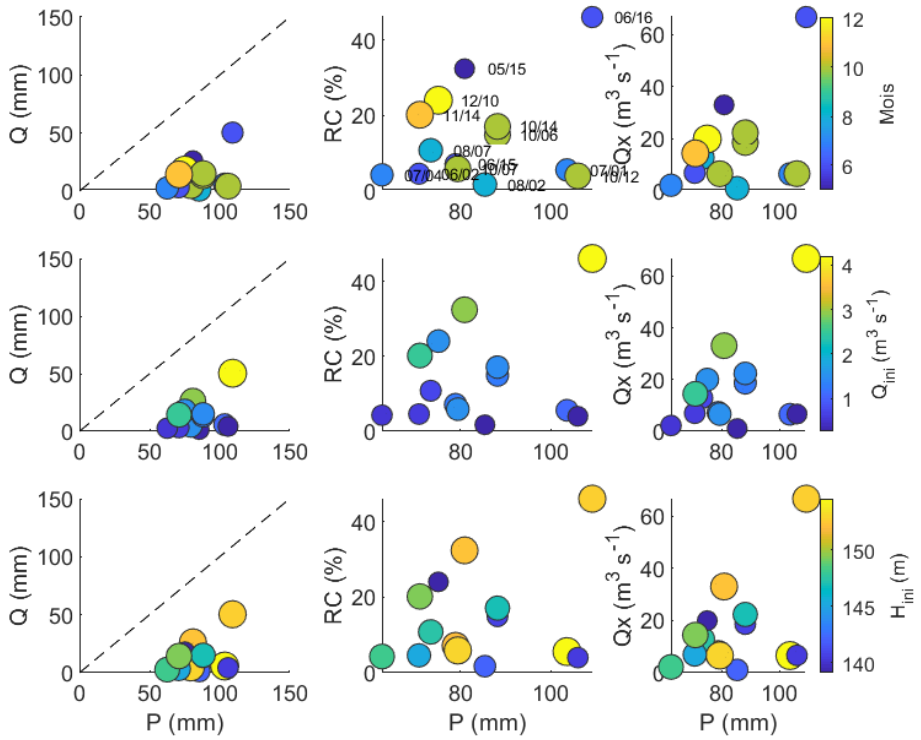


Figure 17 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Auron. Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial et de la piézométrie au point 05464X0045/P – Plaimpied.

Les possibles échanges interbassins entre l'Auron et l'Airain identifiés par jaugeages différentiels (EDREE, 2010; Hakoun, 2020), suggèrent d'explorer si les niveaux d'eau souterraine dans le bassin de l'Airain apportent des informations pertinentes pour expliquer une part de variabilité des réponses hydrologiques de l'Auron. La Figure 18 montre que les niveaux d'eau enregistrés au piézomètre 05471X0070 – Vornay mettent en évidence une valeur seuil du niveau d'eau souterraine à 155.6 m NGF. En fonction du dépassement du seuil, deux types de réponses hydrologiques existent pour un cumul de pluie semblable. Un remplissage de l'aquifère de l'Airain plus important (faible) amplifie (atténue) partiellement les crues de l'Auron.

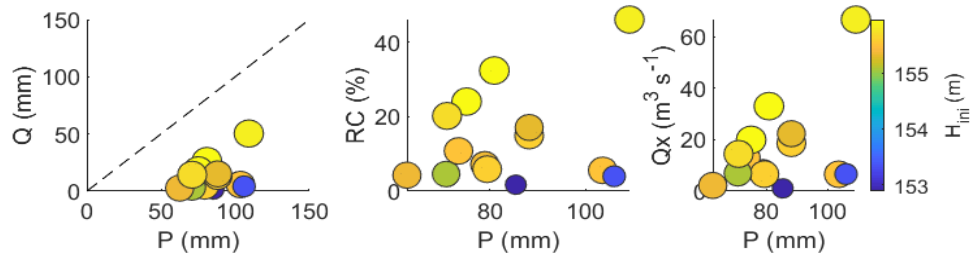


Figure 18 : En fonction d'un seuil à 155.6m NGF, le niveau d'eau initial dans le piézomètre 05471X0070 – Vornay du bassin de l'Airain permet d'identifier une réponse hydrologique différente de l'Auron.

4.2.3. Bassin de l'Ouatier

Une analyse similaire à celles conduites précédemment est menée dans le bassin de l'Ouatier avec le suivi des niveaux d'eau au piézomètre 04936X0010 – Rians situé dans la partie amont du bassin. Les niveaux d'eau au point 04935X0018 – Soulangis situé à l'Est sur le bassin mitoyen du Colin ont aussi été analysés et les résultats sensiblement identiques ne sont pas présentés ci-dessous.

La Figure 19 montre les réponses des débits de l'Ouatier et de la piézométrie (04936X0010 – Rians) en fonction du régime pluviométrique sur la période 2005-2018. Les débits de l'Ouatier sont bien plus faibles que ceux rencontrés sur l'Auron et l'Airain, du fait notamment d'une forte capacité d'infiltration identifiée sur ce bassin. La chronique piézométrique ne montre pas de signe spécifique de débordement (p. ex. écrêtage) et l'amplitude des fluctuations saisonnières est similaires à celle du débit, reflétant ainsi la variabilité interannuelle des précipitations. La part d'écoulement liée au débit de base est très importante comparée à celles rencontrées sur les bassins de l'Airain et de l'Auron, indiquant une forte contribution des eaux souterraines aux écoulements de surface.

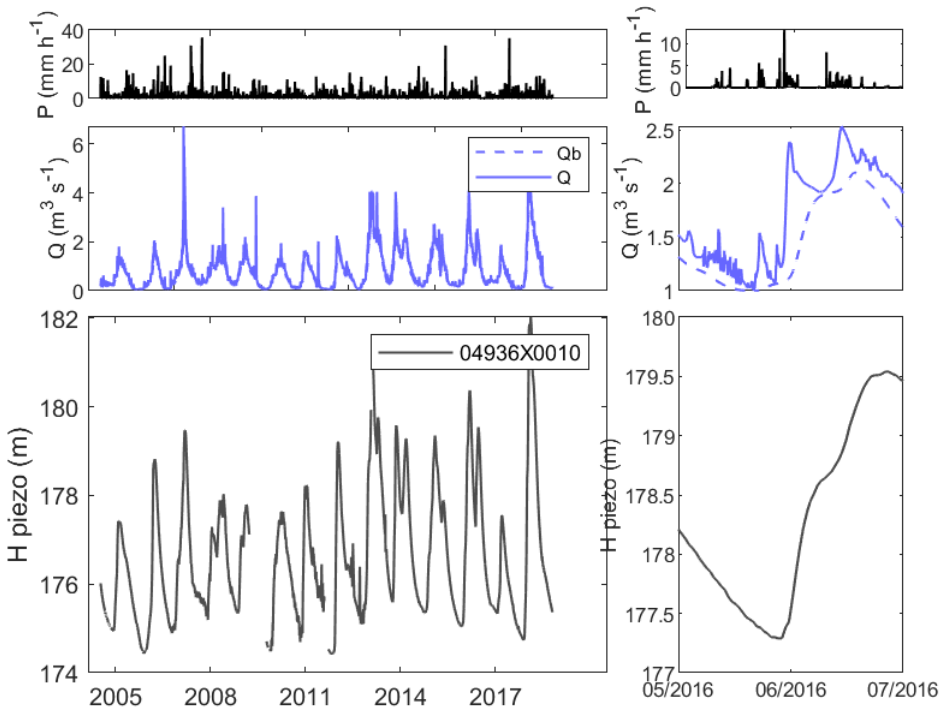


Figure 19 : Chronique des pluies, debits de l'Ouatier (Maubranche - K555458001) et piézométrie du point 04936X0010 – Rians. Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

La Figure 20 montre les résultats de l'analyse évènementielle, pour différentes périodes de l'année, les débits et la piézométrie au début des crues. A la différence des deux sous bassins précédents, une typologie des réponses en fonction des saisons apparait pour l'Ouatier. Les coefficients de ruissellement et les débits maximaux sont décomposés en trois groupes : les crues de reprises à l'automne avec des pluies intenses sont faibles à modérées, les crues d'hiver avec des pluies moins intenses sont modérées, et les crues de fin de période de hautes eaux (mai-juin), aux cumuls de pluie variables, sont supérieures aux deux cas précédents. Cette décomposition indique un effet d'accumulation dans le bassin au cours du cycle hydrologique.

L'analyse des valeurs de débit et de piézométrie au début des crues (lignes du milieu et du bas) montre une excellente concordance qui reflète la forte relation entre le débit de l'Ouatier et la piézométrie (04936X0010 – Rians). Sur ce piézomètre peu influencé par les relations nappe-rivière, ce type de relation met en évidence une forte capacité d'infiltration de l'aquifère avec une restitution à l'aval ou une fuite hors bassin via des transferts souterrains. Cette interprétation est confirmée par la contribution très élevée du débit de base au débit du cours d'eau, indépendamment de la situation hydrologique (Figure 19).

Enfin, l'étude détaillée des deux évènements aux coefficients de ruissellement maximaux (05/2008 et 05/2015 en bleu sur la première ligne) permet de mettre en évidence que la distribution temporelle de l'évènement pluvieux peut introduire de la variabilité dans cette typologie. Pour ces deux évènements, la quantité de pluie et les niveaux piézométriques initiaux sont relativement similaires. En revanche, le débit initial de l'évènement au plus fort coefficient de ruissellement est inférieur au second (point orange « 05/15 » au-dessus du jaune (05/08) Figure 20). La distribution temporelle des pluies pour ces deux évènements est très différente : en 2015 (RC max), l'évènement est concentré juste avant le pic de crue ce qui produit un débit de pointe élevé. En 2008, les cumuls sont répartis dans le temps et le débit de pointe est moindre.

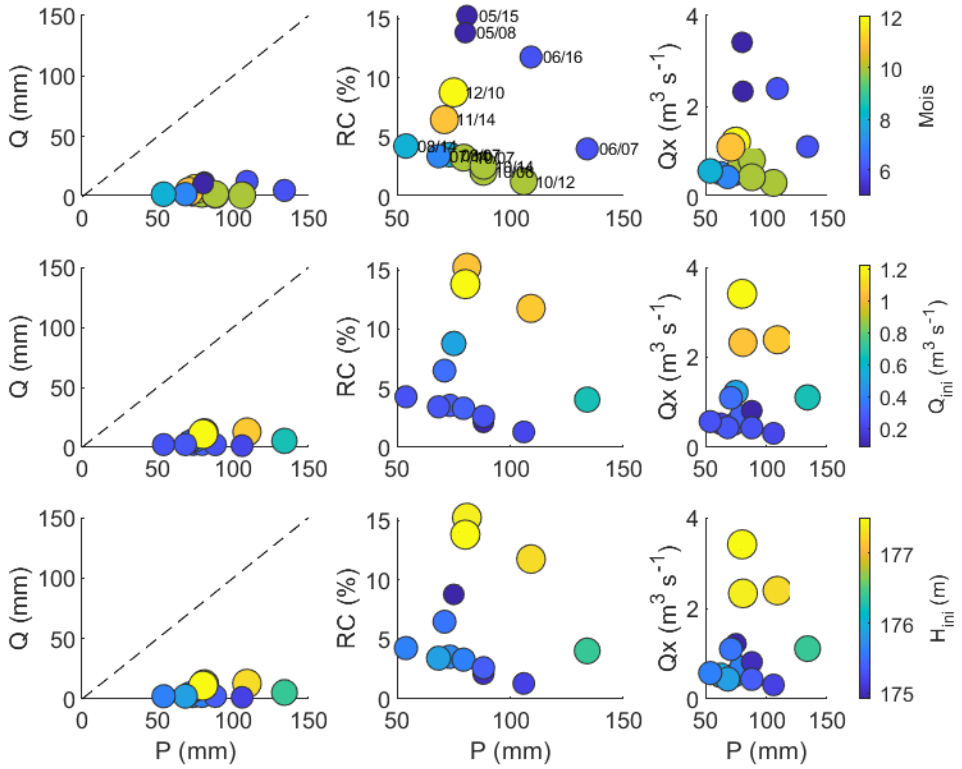


Figure 20 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Ouatier. Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial.

4.2.4. Bassin du Moulon

Dans le cas du Moulon où les terrains sont relativement imperméables, aucun piézomètre n'est présent dans le bassin. La Figure 21 présente une comparaison des débits enregistrés à la station d'Asnières et des niveaux piézométriques enregistrés dans le piézomètre le plus proche situé dans le bassin voisin du Colin (04935X0018 - Soulangis). Cette comparaison montre une concordance des cycles saisonniers entre débit et piézométrie, mais elle met en évidence que l'intensité des crues est peu contrôlée par celle des niveaux piézométriques (le débit maximal du Moulon est atteint pour des valeurs de piézométrie non maximales). En outre, la part du débit de base aux écoulements du Moulon est très faible, indiquant une faible contribution des eaux souterraines aux écoulements en rivière.

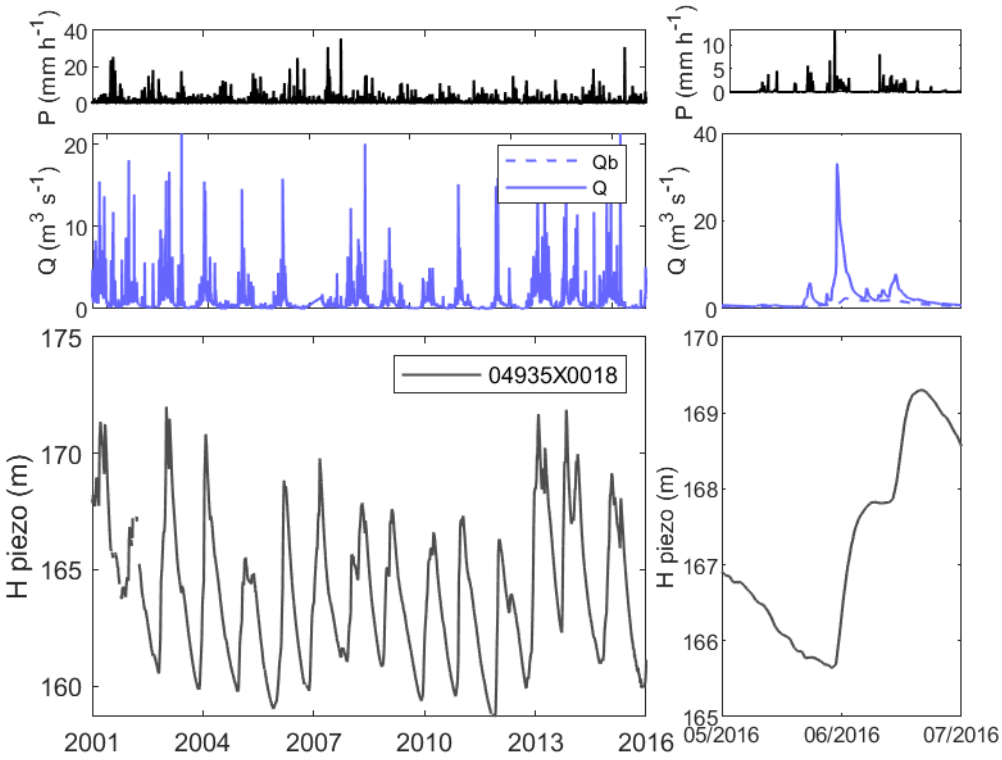


Figure 21 : Chronique des pluies, débits du Moulon (Asnières - K557410001) et piézométrie du point 04935X0018 - Soulangis. Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

Les résultats des extractions des épisodes de crue sur le Moulon sont présentés sur la Figure 22 (les niveaux piézométriques n'y sont pas présentés, du fait de la faible pertinence de l'information). Les volumes de crue des épisodes de fin de hautes eaux, au printemps (mai), et d'hiver (novembre-décembre) apparaissent très proches d'un état conservatif (proche de la droite de pente unitaire sur le premier graphique). Ceci confirme la part importante de ruissellement et le peu d'infiltration sur ce bassin. Les coefficients de ruissellement calculés pour ces évènements sont les plus élevés de cette étude (>30 %).

Dans ce cas où le ruissellement est un processus dominant, les conditions initiales de saturation du bassin expliquent les valeurs maximales des trois variables hydrologiques. En période estivale ou au début de l'automne, les réponses hydrologiques sont variables mais restent relativement faibles, malgré des épisodes de pluies aux cumuls importants. La saturation initiale du bassin est reflétée par la dépendance des réponses hydrologiques vis-à-vis des débits initiaux. Une pré saturation du bassin induisant un débit supérieur à 0.4 $m^3.s^{-1}$ permet d'augmenter les volumes de crues, le coefficient de ruissellement et les débits maximaux.

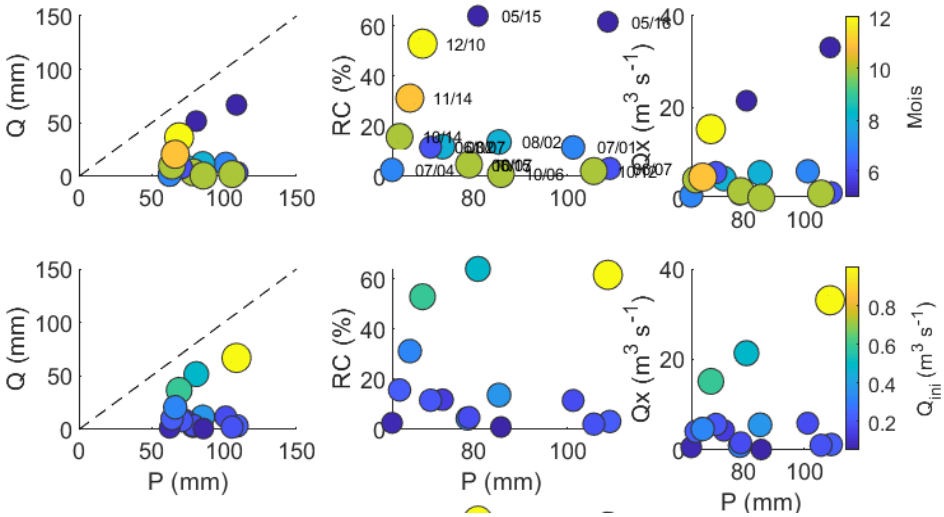


Figure 22 : Coefficient de ruissellement (RC), volume de crue (Vol. Q) et débits maximaux (Qx) du bassin du Moulon en fonction des intensités pluviométriques.

4.2.5. Bassin de l'Yèvre

Cette dernière partie considère les épisodes de crue de l'Yèvre à deux stations hydrométrique : la station de Savigny à l'amont et celle de Saint-Doulchard à Bourges. Pour la première station, trois piézomètres situés ont été considérés (). Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus avec le piézomètre 05203X0083 – Villequiers. Pour la seconde station, il est rappelé qu'elle est située à l'aval des sous-bassins étudiés précédemment et que la dynamique des écoulements à cette station résulte de la propagation des crues des sous bassins sur le territoire de l'Yèvre. Les résultats des analyses précédentes ont permis de mettre en évidence que l'état de remplissage des calcaires du territoire pouvait être en partie appréhendé par le piézomètre 05471X0070 – Vornay et qu'une valeur seuil de 155.6 mNGF indiquait un remplissage important de l'aquifère. Sur le bassin amont de l'Yèvre, un piézomètre complémentaire peut être considéré : 05205X0013/P – Savigny. Cette section explore les liens entre débits et piézométrie pour ces deux stations à l'échelle évènementielle.

1) Station amont – Savigny

La Figure 23 présente un aperçu des chroniques de pluie, débit et piézométrie sur la période de 2008 à 2018 pour la station de l'Yèvre à Savigny et pour le piézomètre 05203X0083/P – Villequiers. Les chroniques montrent une anticipation des fluctuations de la piézométrie vis-à-vis des débits. La variabilité des niveaux maximaux de ce piézomètre montre qu'il n'y a pas de troncature lié à des débordements, ce qui suggère que l'eau s'infiltre localement en toute circonstance. Ceci permet de considérer le piézomètre comme indicateur « continu » de l'état de remplissage de l'aquifère dans la zone amont de l'Yèvre. En outre, la dynamique relativement semblable des niveaux du piézomètre et du débit de base, suggère que les eaux souterraines soutiennent le débit du cours d'eau.

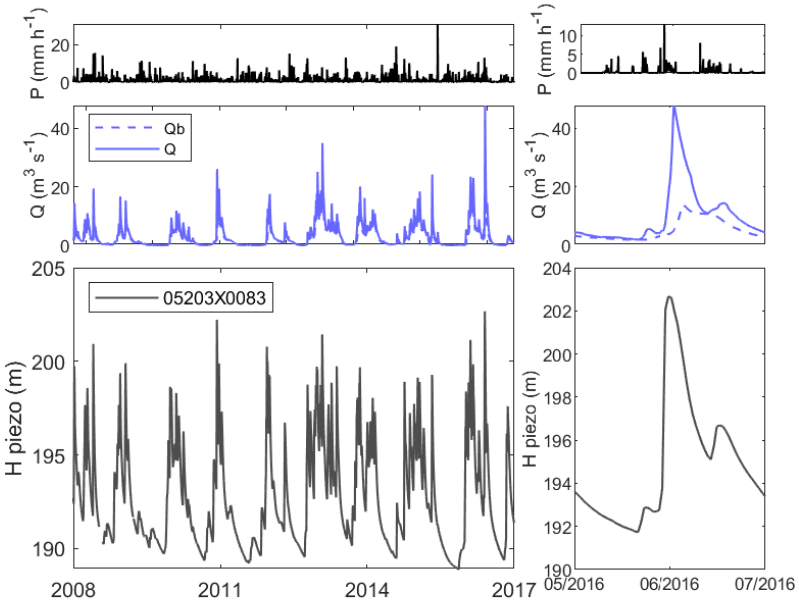


Figure 23 : Chronique des pluies, des débits de l'Yèvre (Savigny - K5552300) et piézométrie du point 05203X0083/P – Villequiers. Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

Les résultats des extractions des épisodes de crue pour la station de l'Yèvre à Savigny et du piézomètre 05203X0083/P – Villequiers sont présentés sur la Figure 24. L'analyse montre que la saisonnalité des réponses n'explique pas toute la variabilité des réponses hydrologiques. Des réponses très distinctes (avec des coefficients de ruissèlement et des débits de pointes) sont observées lorsque les valeurs de débits et de piézométrie initiales sont élevées (>192 m NGF). Ces groupes de points mettent en évidence que l'état de remplissage de l'aquifère permet d'atténuer ou d'amplifier la réponse hydrologique dans la partie amont de l'Yèvre.

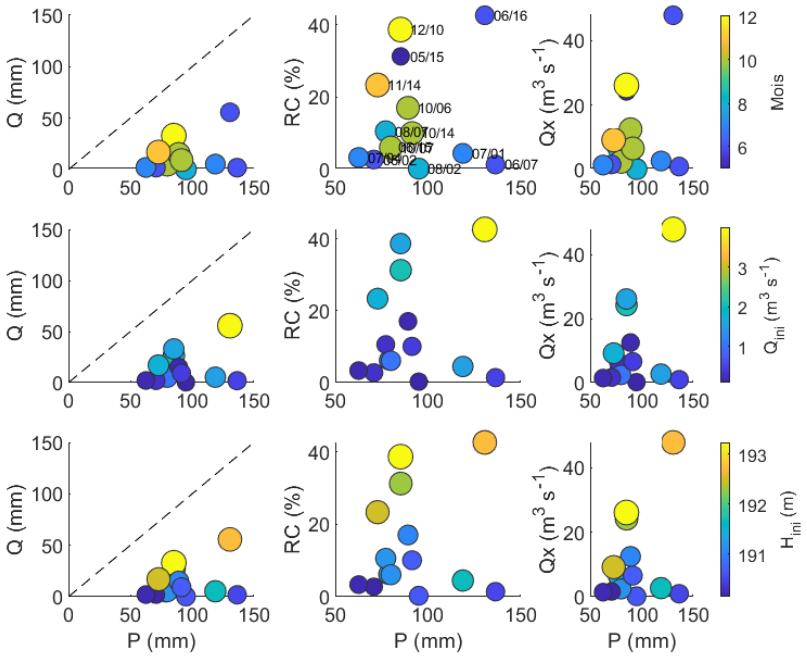


Figure 24 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Yèvre (station de Savigny) (période 2008-2018). Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial et de la piézométrie initiale au point 05203X0083/P – Villequiers. Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal.

2) Station aval – Saint Doulchard

La Figure 25 présente un aperçu des chroniques de pluie, débit et piézométrie sur la période de 2008 à 2018 pour la station de l'Yèvre à Saint Doulchard et pour le piézomètre 05205X0013/P – Savigny. Les chroniques montrent une cohérence des débits et de la piézométrie, suggérant que ce piézomètre est représentatif du comportement du bassin. On note, notamment avec l'évènement de 2016 que ce piézomètre ne semble pas présenter de seuil « haut » et qu'il permet de décrire l'état de remplissage de l'aquifère au centre du territoire.

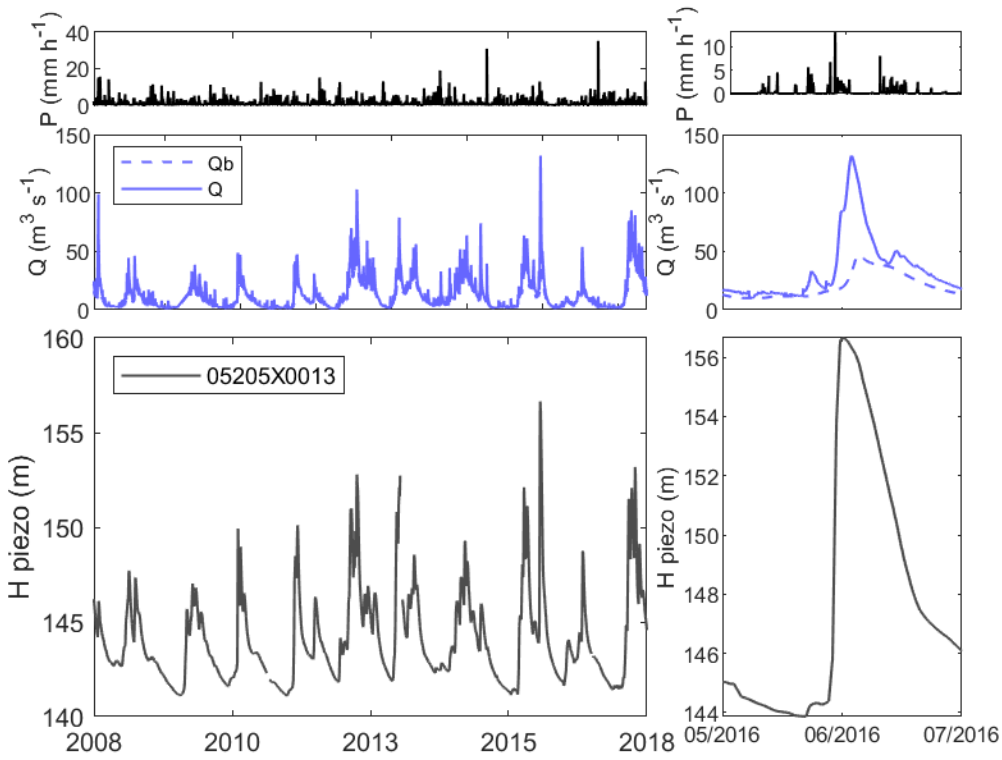


Figure 25 : Chronique des pluies, des débits de l'Yèvre (Saint-Doulchard - K570232001) et piézométrie du point 05205X0013/P – Savigny. Source des données : Météo France, Banque Hydro et ADES / BRGM.

Les résultats des extractions des épisodes de crue sur l'Yèvre sont présentés sur la Figure 24 avec la piézométrie au point 05205X0013/P – Savigny. Du fait de nombreux épisodes à plusieurs pics, la sélection d'évènements est plus restreinte (8 épisodes) que sur les sous-bassins et le nombre d'évènements par saison est relativement limité. Ces résultats confirment que les épisodes de crues majeures ont lieu pendant la période de hautes eaux, en mai-juin et en hiver (décembre). En outre une comparaison entre évènements de même intensité de pluie et selon différentes conditions hydrologiques est possible.

Les épisodes de crues majeures sont marqués par les conditions hydrologiques initiales, à la fois par les débits (Qini >10$m^3.s^{-1}$) et les niveaux piézométriques. Si ceux-ci sont relativement élevés (Hini >143.5mNGF pour 05205X0013/P – Savigny), les trois variables d'intérêt, débit maximal, volume de crue, et coefficient de ruissellement, sont plus élevées qu'en condition de débit ou niveau « bas ». Ceci tend à suggérer que l'état saturé du bassin et de l'aquifère réduit les capacités d'infiltration et favorise le ruissellement. La chronique de piézométrie ne montrant pas de seuil « haut », on peut supposer qu'une part d'infiltration reste localement possible. Ainsi, les eaux souterraines participeraient aux décrues (comme le montre la contribution du débit de base après le pic de crue, voir Figure 23).

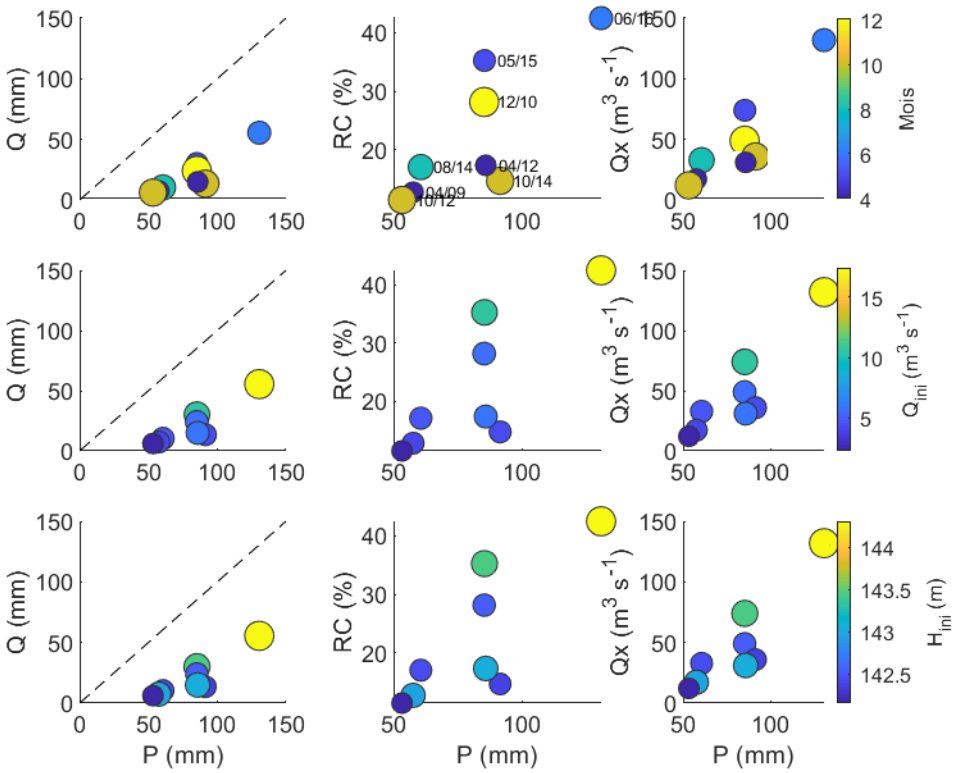


Figure 26 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Yèvre (station de Saint-Doulchard) (période 2008-2018). Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial et de la piézométrie initiale au point 05205X0013/P – Savigny.

La Figure 25 montre les relations entre variables hydrologiques et les niveaux d'eau sur l'autre piézomètre 05471X0070/P –Vornay qui présente un seuil haut. Comme vu précédemment pour les sous bassins de l'Auron et de l'Airain, la réponse hydrologique est plus importante au-delà du seuil de 155.6 mNGF.

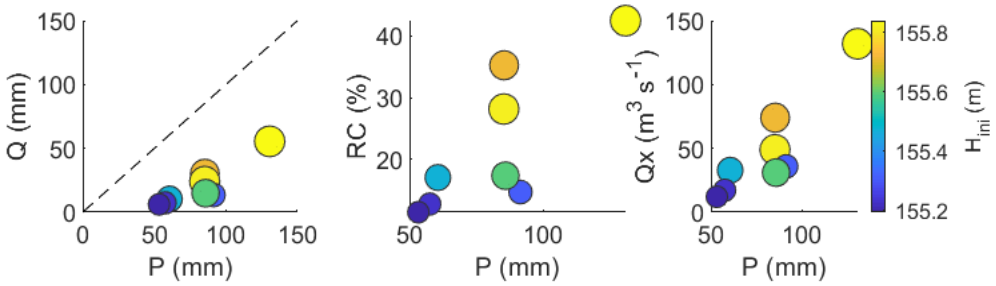


Figure 27 : Relations entre cumuls pluviométriques et volume de crue (Qmm), coefficient de Ruissellement (RC) et débit maximal obtenus à partir d'une sélection de crues sur le bassin de l'Yèvre (station de Saint-Doulchard) (période 2008-2018). Colorimétrie en fonction (haut) du mois, (milieu) du débit initial et de la piézométrie initiale au point 05471X0070/P –Vornay.

4.3. SYNTHESE

En synthèse, les résultats présentés ci-dessus permettent de mettre en évidence des relations entre l'état de remplissage du karst et les sous bassin de l'Auron, de l'Airain et de l'Ouatier et de manière plus globale à l'échelle du bassin de l'Yèvre. L'impact des conditions initiales, notamment du remplissage de l'aquifère, sur la réponse hydrologique à l'échelle évènementielle est relativement variable pour chaque sous bassin.

Dans le cas du principal affluent de l'Yèvre, l'Auron, les réponses sont marquées par la valeur des débits initiaux ce qui suggère que le ruissellement peut être favorisé lorsque le sol est saturé sur ce bassin. En outre, l'état de remplissage du karst tel qu'il est observé au point 05464X0045/P – Plaimpied et les directions d'écoulement ont mis en évidence une alimentation continue de la rivière par les eaux souterraines. Cette alimentation pourrait être amplifiée, par des apports externes plus importants comme l'a montré la typologie de réponse établie en fonction du dépassement de seuil pour les niveaux d'eau observés dans le piézomètre 05471X0070 – Vornay (situé dans le bassin mitoyen de l'Airain).

Dans le cas du bassin de l'Airain, les réponses hydrologiques sont nettement marquées par l'état de saturation de l'aquifère. Sous le seuil de connexion entre la rivière et les eaux souterraines, le ruissèlement semble réduit et l'infiltration vers l'aquifère semble favorisé. Au-delà du seuil de niveau 155.6 mNGF au piézomètre 05471X0070 – Vornay, la nappe est en connexion avec la rivière et les réponses hydrologiques sont marquées par des débits plus importants.

Dans le cas de l'Ouatier, les réponses hydrologiques sont aussi marquées par les niveaux d'eau souterraine (04936X0010 – Rians) et une typologie saisonnière a été identifiée. Les réponses du cours d'eau se décomposent entre (i) des crues de reprises, après une période de basses eaux, (ii) des crues d'hiver pendant des états de saturation intermédiaire et (iii) des crues de hautes eaux, avec des états de saturation élevé. Lorsque l'aquifère est saturé (hautes eaux), la contribution des eaux souterraines au cours d'eau est plus importante que dans les deux autres cas.

Le cas du sous bassin très réactif du Moulon est singulier car il présente peu d'interaction avec les eaux souterraines, du fait de la configuration géologique et des terrains relativement imperméables. La réponse hydrologique semble être contrôlée par un état de saturation du sol qui est reflété par le débit initial du cours d'eau.

Enfin, pour le comportement de l'Yèvre en général, les réponses hydrologiques sont impactées par la combinaison des différentes réponses hydrologiques des sous bassins. Les réponses de l'Auron et de l'Airain situés en rive gauche et principaux affluents de l'Yèvre ainsi que celle de l'Yèvre dans sa partie amont sont marquées par l'état de saturation de l'aquifère. Ainsi, la réponse de l'Yèvre est en partie fonction de l'état de saturation de l'aquifère ; un état de saturation plus important favoriserait l'importance des crues. D'un point de vue opérationnel, l'état de saturation du karst peut être évalué avec les piézomètres 05471X0070 – Vornay (avec effet de seuil) et 05205X0013/P – Savigny (sans effet de seuil), et 05203X0083– Villequiers dans la partie amont.

D'un point de vue opérationnel, ces résultats permettent de proposer des pistes d'amélioration des modèles hydrologiques vis-à-vis de la sensibilité à l'état de remplissage de l'aquifère pour les sous-bassins de l'Auron, de l'Airain, de l'Ouatier, et potentiellement de l'Yèvre amont. Une étude de sensibilité à l'état de saturation initial des modèles, avec une prise en compte des hauteurs piézométrique aux piézomètres identifiés pour les sous-bassins, pourrait être envisagée pour évaluer l'impact sur les prévisions.

5. Approche par modélisation

5.1. INTRODUCTION

Dans cette section, une approche par modélisation à réservoirs pluie-débit et pluie-débit-piézométrie est utilisée pour simuler le fonctionnement des sous bassins de l'Yèvre, en tenant compte de la dynamique des eaux souterraines.

La modélisation a pour objectif de simuler les débits journaliers aux stations amont à l'Yèvre à Saint-Doulchard, en portant une attention particulière à la prise en compte du contrôle de l'état de saturation de l'aquifère Jurassique. Pour ce faire, le logiciel GARDÉNIA est utilisé afin d'intégrer les processus hydrogéologiques avec plusieurs degrés de complexité (cf. section 2). Les éléments de modèle retenus sont les suivants :

- fonction de production contrôlée par la saturation du sol (type RFU), et par la saturation de l'aquifère ;
- composante de débit rapide pour simuler le ruissellement issu des versants ;
- composante de débit lente pour simuler le débit issu des réserves de l'aquifère du Jurassique ;
- échanges avec l'extérieur du bassin pour simuler les écoulements souterrains échangés entre bassins, en option.

Les modèles développés sont utilisés au pas de temps journaliers (débits moyens journaliers) pour utiliser l'information piézométrique disponible (hauteur piézométrique journalière). Les termes du bilan pour ces modèles et chaque sous bassin sont présentés en Annexe 3. En complément, nous avons réalisé des simulations au pas de temps horaire sur un bassin très réactif (le Moulon, station d'Asnières) et sur le bassin de l'Yèvre à Bourges (station de Saint Doulchard), pour évaluer les capacités de modélisation de GARDÉNIA avec un pas de temps opérationnel.

5.2. RESULTATS

5.2.1. Bassin de l'Airain

Sur le bassin de l'Airain, le piézomètre de Vornay peut être retenu pour la modélisation pluie-débit-piézométrie. Cet ouvrage a un comportement particulier avec un seuil bas qui reflète un état de déconnexion hydraulique entre le niveau d'eau dans l'aquifère et la rivière.

Ce comportement spécifique à seuil nécessite un schéma de modèle plus complexe qu'une simple vidange de réservoir souterrain unique. Un modèle à réservoir unique avec seuil a donc été utilisé. Pour rappel, un niveau d'eau dépassant le seuil donné/calibré engendre une contribution « supplémentaire » au débit de rivière et un comportement de vidange spécifique (cf. section 2).

La Figure 26 compare les résultats de simulations des débits et des niveaux piézométriques aux débits et niveaux piézométriques observés. Les simulations sont bonnes avec des valeurs de Nash >0.8 pour les débits et >0.7 pour les niveaux piézométriques simulés. La bonne calibration du modèle, notamment de la piézométrie, permet de contraindre les contributions du réservoir souterrain aux écoulements en rivière. Selon le schéma de modélisation employé ici, les eaux souterraines contribuent à hauteur de 11 % aux écoulements de rivière.

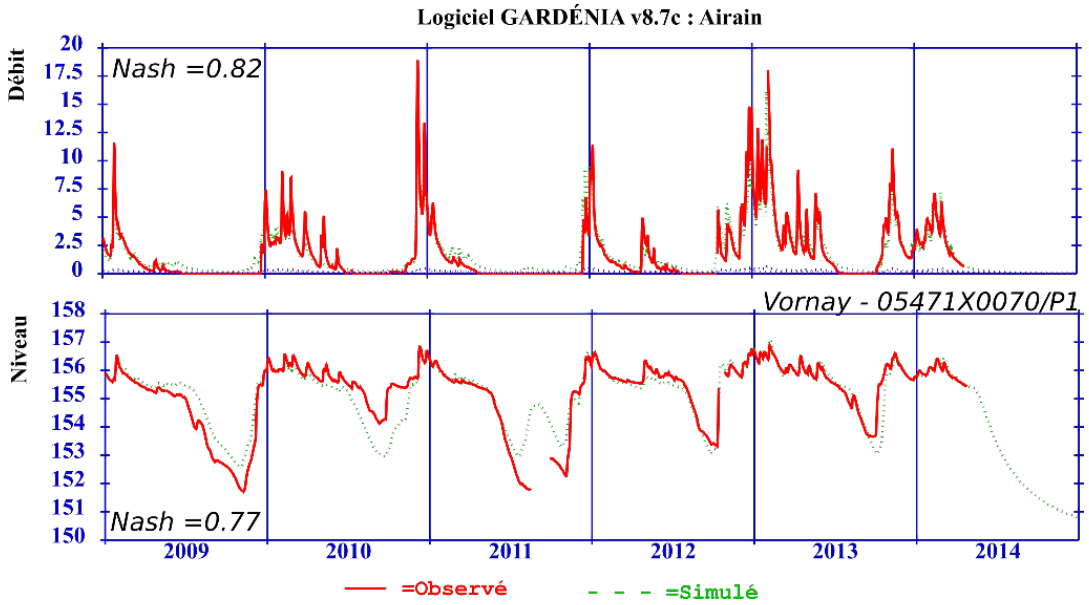


Figure 28 : Simulations GARDÉNIA du débit moyen journalier (haut) de l'Airain à Crosses (K5543010) et de la piézométrie (bas) au piézomètre de Vornay (05471X0070/P1) obtenues avec GARDÉNIA.

5.2.2. Bassin de l'Auron

Pour les simulations sur le bassin de l'Auron, le piézomètre de Plaimpied (05464X0045/P – Plaimpied) a été retenu dans un premier temps pour l'approche pluie-débit-piézométrie. Les résultats de simulation avec des structures de modèles à réservoir unique ou double ont mis en évidence une surestimation des maximums de niveaux piézométriques simulés. Ceci suggère qu'un effet de saturation de l'aquifère impacte la dynamique de la piézométrie. De ce fait, le schéma de modélisation retenu est un réservoir à seuil et une association du niveau piézométrique au réservoir supérieur.

Les résultats obtenus avec ce schéma à seuil sont représentés sur la Figure 27. La calibration du modèle est relativement bonne avec des valeurs simulées de débit et de piézométrie très cohérentes (Nash >0.7 pour le débit et >0.9 pour la piézométrie).

La décomposition des contributions aux écoulements montre que la part des écoulements lents est relativement restreinte avec ce schéma (6.5 %). Ce résultat contraste avec une approche de modélisation pluie-débit du même bassin dans laquelle les contributions d'écoulements lents étaient > 80 % (Martin, 2005). Cette différence trouve son origine d'une part dans la prise en compte d'un débit de fuite et/ou la non prise en compte d'observations de niveaux de piézométrie dans l'étude de Martin (2005) et d'autre part dans la représentativité du piézomètre de Plaimpied utilisé dans notre étude et dans la structure de modélisation utilisée. Avec un schéma sans seuil, (modèle initial), les contributions souterraines s'élèvent à environ 25 %. Afin de vérifier ces contributions à l'aide d'une information de remplissage de l'aquifère différente, nous avons cherché à prendre en compte dans la modélisation les niveaux d'eau du piézomètre de Vornay (05471X0070 – Vornay) situé dans le bassin mitoyen de l'Airain. Les résultats obtenus avec ce piézomètre montrent que la contribution des écoulements souterrains serait de 12 %. Ces deux contributions liées à la structure du modèle ou à la représentativité du point de mesure sont plus importantes que 6.5 %, mais elles restent nettement inférieures à celle estimée dans l'étude de Martin (2005).

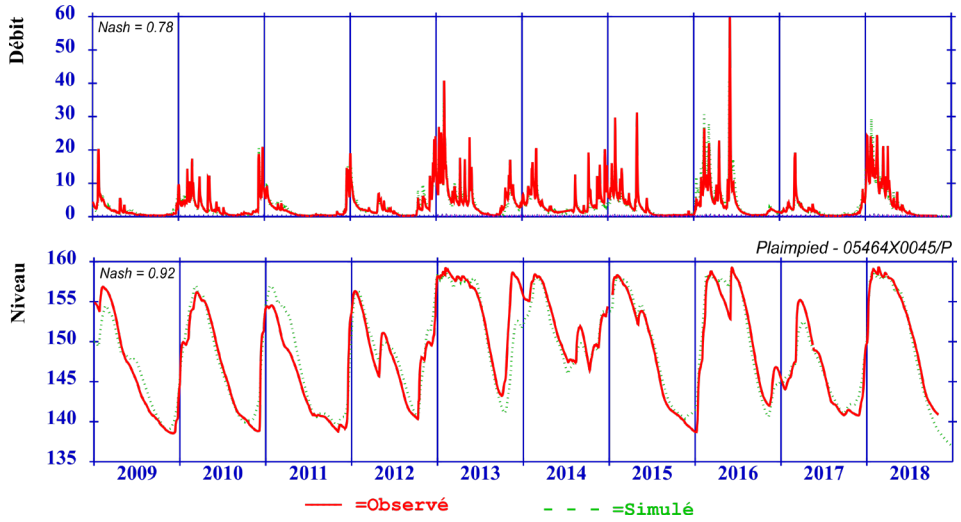


Figure 29 : Simulations du débit moyen journalier de l'Auron à Ormediot (K5653010) et de la piézométrie au piézomètre de Plaimpied (05464X0045/P) obtenues à l'aide de l'outil GARDÉNIA :

5.2.3. Bassin de l'Ouatier

Pour les simulations sur le bassin de l'Ouatier, le piézomètre situé à l'amont du bassin (Rians – 04936X0010) a été retenu pour une approche pluie-débit-piézométrie. Pour ce bassin, les niveaux piézométriques ne présentent pas de valeurs seuil comme vus précédemment sur les cas de l'Airain et de l'Auron. Le schéma de modélisation retenu utilise un réservoir souterrain unique.

La Figure 28 présente les résultats des simulations de débits de l'Ouatier et de niveaux piézométriques du piézomètre 04936X0010 – Rians. Les performances de simulations sont bonnes pour les débits et la piézométrie (0.8<Nash<0.95). En outre, la décomposition des débits met en évidence une part significative (48 %) d'écoulement associée au réservoir souterrain (courbe bleue). Cette contribution des écoulements souterrains relativement élevée est en accord avec les processus d'alimentation du cours d'eau par les eaux souterraines identifiés pour l'Ouatier (Hakoun, 2020) et mis en évidence par décomposition des débits en section 4.2.3. Enfin, bien que la direction des écoulements souterrains suggère des transferts entre bassins (voir carte piézométrique en Annexe 2), notre capacité actuelle à évaluer la part précise des apports via les bassins avoisinants (notamment le Colin à l'Est) est à ce jour limitée. De telles précisions pourraient être obtenues via un suivi spécifique des échanges nappe-rivière sur l'Ouatier.

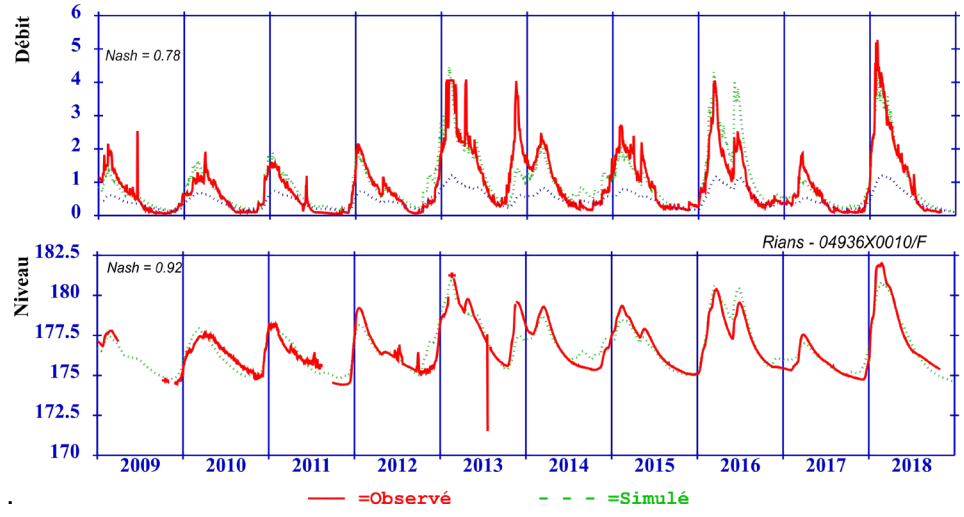


Figure 30 : Simulations du débit moyen journalier de l'Ouatier à Moulins sur Yèvre (Maubranche - K5554580) et de la piézométrie au piézomètre de Rians (04936X0010/F) obtenues avec GARDÉNIA.

5.2.4. Bassin du Moulon

Pour le bassin du Moulon, aucun piézomètre n'est disponible pour réaliser la modélisation pluie-débit-piézométrie. Un schéma pluie-débit a été utilisé pour simuler les débits moyens journaliers. Ce schéma est parcimonieux et comporte un unique réservoir souterrain.

Résultats débit moyen journalier

La Figure 29 présente une comparaison des débits moyens journaliers observés et simulés avec GARDÉNIA. Les résultats montrent que les épisodes de crue sont synchrones, et que les débits de pointe sont légèrement sous-estimés.

Les résultats d'optimisation montrent une performance de simulation de GARDENIA satisfaisante (Nash >0.6). L'analyse détaillée des paramètres optimisés montre que les temps de ½ percolation et de vidange du réservoir d'écoulement lent sont relativement faibles (87j. et 9j. respectivement), en lien avec la dynamique hydrologique très marquée par l'intensité des pluies pour ce bassin. En ce sens, le réservoir d'écoulement lent du modèle ne représente plus un écoulement qui pourrait être lié à l'aquifère mais une composante d'écoulement retardée. Sur ce bassin très réactif, s'est posée la question de la prise en compte des dynamiques infra-journalières dans la modélisation.

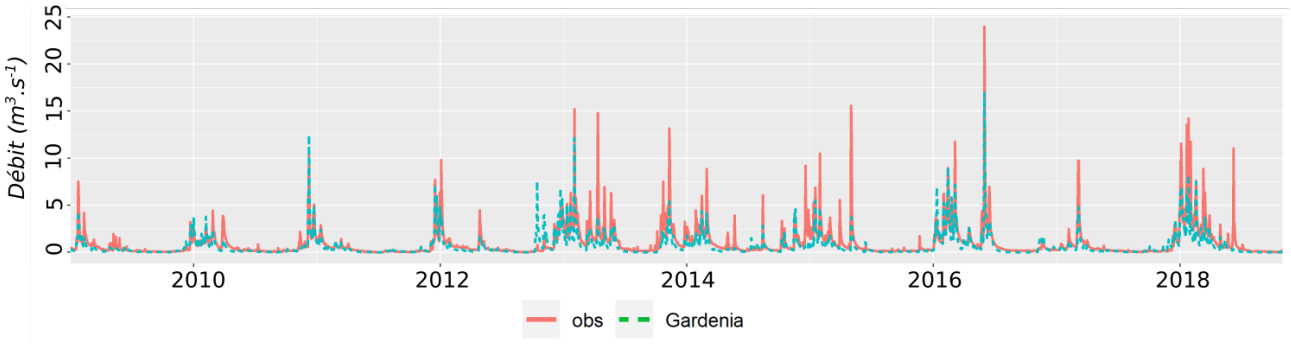


Figure 31:Simulations du débit moyen journalier du Moulon à Bourges (Asnières - K5574100)

Résultats débit horaire

Pour explorer la problématique de modélisation infra-journalière, nous avons comparé les performances d'un modèle GARDÉNIA à celles d'un modèle GR au pas de temps horaire. Nous utilisons GR4 (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003) qui est similaire au modèle GRP utilisé en opérationnel pour la simulation du débit horaire du Moulon. Pour GR4 et GARDÉNIA, le nombre de paramètres à optimiser est identique (4 paramètres).

La Figure 30 présente les débits simulés avec ces deux modèles. En terme de critère de Nash, les performances obtenues avec les deux approches sont similaires (0.66<Nash<0.68). Qualitativement on peut noter que la synchronisation des pointes de crues est bien reproduite et que les crues d'amplitude « moyenne » sont très bien reproduites par les deux modèles. Pour les crues extrêmes (voir juin 2016 sur la Figure 30), le modèle GR est relativement plus performant, les deux modèles semblent néanmoins sous-estimer les débits de pointes.

Si les deux approches donnent des valeurs de capacité de réserves du sol progressive semblables (140mm), les autres paramètres sont peu comparables. Pour GARDENIA, la diminution du pas de temps de simulation a pour conséquence une diminution des valeurs optimisés pour le temps de ½ percolation vers la nappe et celui de ½ tarissement réservoir G1. Le temps de ½ percolation vers la nappe passe à 81h (87j en journalier), et le temps de ½ tarissement passe à 5.1h (9j en journalier). Ces différences pourraient correspondre à un ajustement pour reproduire les dynamiques des crues accentuées par le pas de temps subjournalier. Ceci a été identifié récemment sur les modèles GRs (Ficchì, Perrin, & Andréassian, 2016) et une étude de sensibilité avec GARDENIA pourrait être mise en œuvre pour approfondir cette hypothèse.

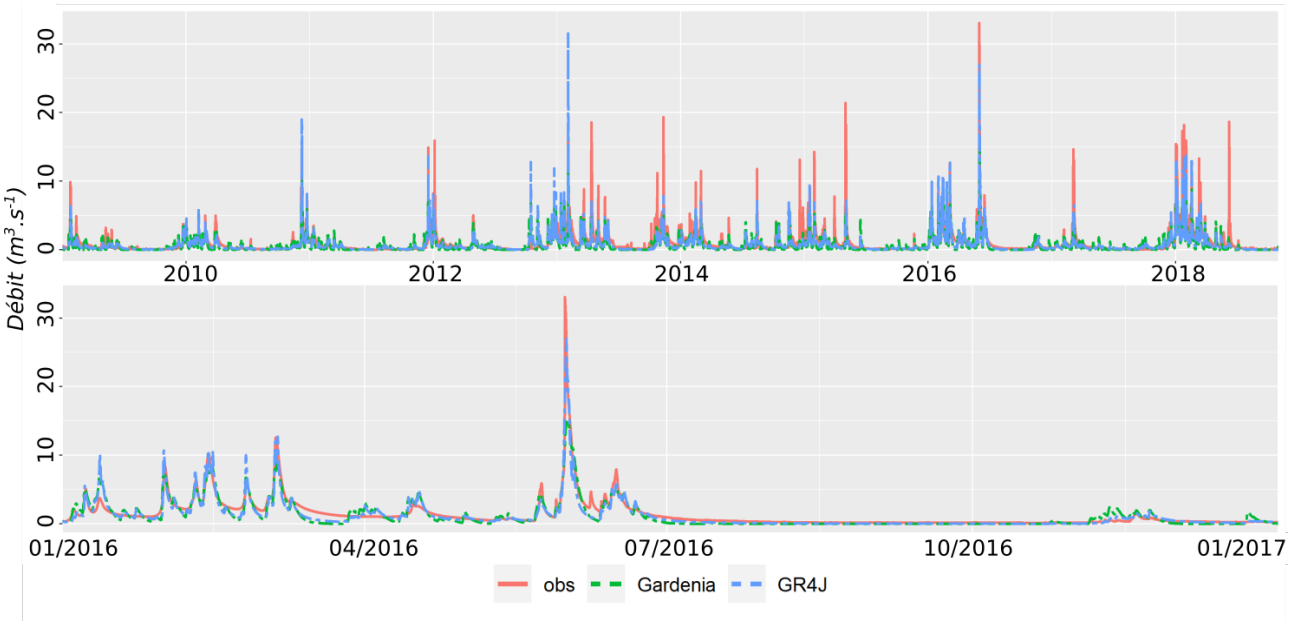


Figure 32: Comparaison des simulations GARDENIA et GR4J au pas de temps horaire sur le bassin du Moulon. Haut : Chronique complète. Bas : Détail du premier semestre 2016.

En conclusion, pour la simulation des débits de crue du Moulon, les deux approches de modélisation GR4 ou GARDENIA semblent offrir des résultats de simulations comparables. Le changement d'échelle (temporelle) de modélisation induit une modification des valeurs de paramètres optimisés pour GARDENIA. Par ailleurs, le contexte de modélisation sur un bassin réactif modifie la « représentativité » des différents sous réservoirs utilisés par GARDENIA : les réservoirs associés à des composantes souterraines sur un bassin peu réactif sont associés à des écoulements plus lents, mais pas spécifiquement souterrain.

5.2.5. Bassin de l'Yèvre

Pour conclure cette approche de modélisation nous proposons de considérer le bassin de l'Yèvre dans son intégralité (station de Saint Doulchard à Bourges - K5702320). Pour la réalisation d'une modélisation pluie-débit-piézométrie, nous utilisons les ouvrages identifiés comme porteurs d'informations sur les processus de crue dans les principaux sous-bassins de l'Yèvre : l'Airain, l'Auron et la partie amont de l'Yèvre (Savigny).

Les analyses évènementielles et les modèles pluie-débit-piézométrie développés précédemment permettent d'identifier les piézomètres de Vornay (Airain), Plaimpied (Auron) et de Savigny (Yèvre amont) comme représentatifs de l'état de saturation de l'aquifère et pertinents pour contraindre la modélisation GARDENIA. Dans cette modélisation, les schémas employés précédemment pour ces bassins sont maintenus à l'identique. Pour le modèle utilisant la piézométrie à Savigny (05205X0013/P - Savigny), l'absence de niveau seuil « haut » permet d'utiliser un schéma de modélisation simple à un réservoir. Notons toutefois que les niveaux « bas » dans ce piézomètre semblent être tronqués (piézomètre à sec) ce qui peut impacter les processus de vidange modélisé et la caractérisation des sécheresses.

Résultats débit moyen journalier

La Figure 31 montre les simulations de débit moyen journalier et de la piézométrie pour les trois piézomètres considérés sur le territoire de l'Yèvre. Globalement, bien que les pointes de crues extrêmes soient sous-estimées, tous les modèles reproduisent fidèlement les dynamiques des débits et des niveaux piézométriques.

En terme de performances, toutes les simulations ont de bons critères de Nash : > 0.80 pour les débits et > 0.73 pour la piézométrie. La comparaison des relations non linéaires débit-piézométrie observées et simulées et les bonnes performances obtenues, en particulier pour la piézométrie, montrent que les schémas de modélisation employés sont cohérents avec les principales caractéristiques de fonctionnement de l'aquifère. Le nombre réduit de paramètres utilisés pour le schéma « simple » (avec un réservoir) avec la piézométrie de Savigny rend ce modèle parcimonieux et relativement robuste. La suite présente les simulations obtenues au pas de temps horaire.

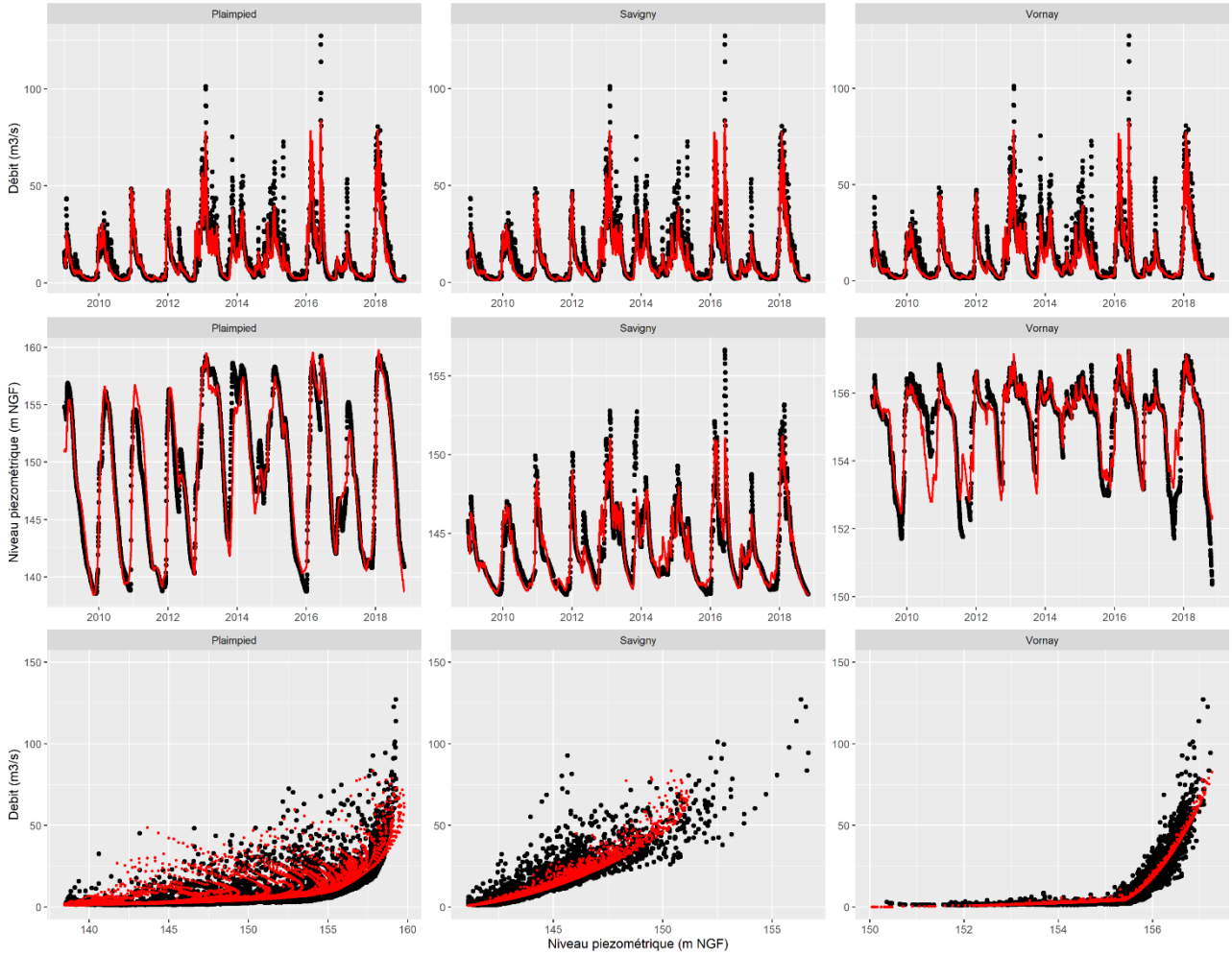


Figure 33 : Simulations pluie-débit-piézométrie du débit journalier de l'Yèvre à Saint Doulchard (Bourges) et dans trois piézomètres du bassin de l'Yèvre. Les simulations sont en rouge, les observations sont en noir.

Résultats débit horaire

La Figure 32 (haut) présente les débits simulés à la station de Saint Doulchard au pas de temps horaire avec les trois modèles simples (un réservoir). La cohérence entre débits observés et simulés pour ce pas de temps est relativement bonne. Les critères de Nash obtenus sur la calibration sont de 0.85 pour les débits et compris entre 0.92 et 0.77 pour la piézométrie (ordre décroissant de performance : Plaimpied, Savigny et Vornay). Bien que des sous estimations de débits de pointe soient présentes, le modèle issu de l'intégration de la piézométrie de Plaimpied semble plus performant sur les pics de crue (voir pics de 2013, 2016 et 2018). Dans leur globalité, les modèles développés reproduisent les principaux pics de crue, les volumes et les temps d'occurrence et l'intégration de l'information de piézométrie ne diminue pas la qualité des simulations.

Les simulations des niveaux piézométriques et des effets de seuil sont satisfaisantes (Figure 32 - milieu et bas). Ceci confirme que le schéma de modélisation choisi (à seuil pour les piézomètres de Plaimpied et de Vornay et simple pour le piézomètre de Savigny) permet de reproduire les principales caractéristiques du fonctionnement « débit-piézométrie » sur le bassin. En outre, l'intégration des données de piézométrie permet de contraindre spécifiquement la part d'écoulement liée aux réservoirs souterrains (comprise entre 33 et 50 % pour ces modèles horaires).

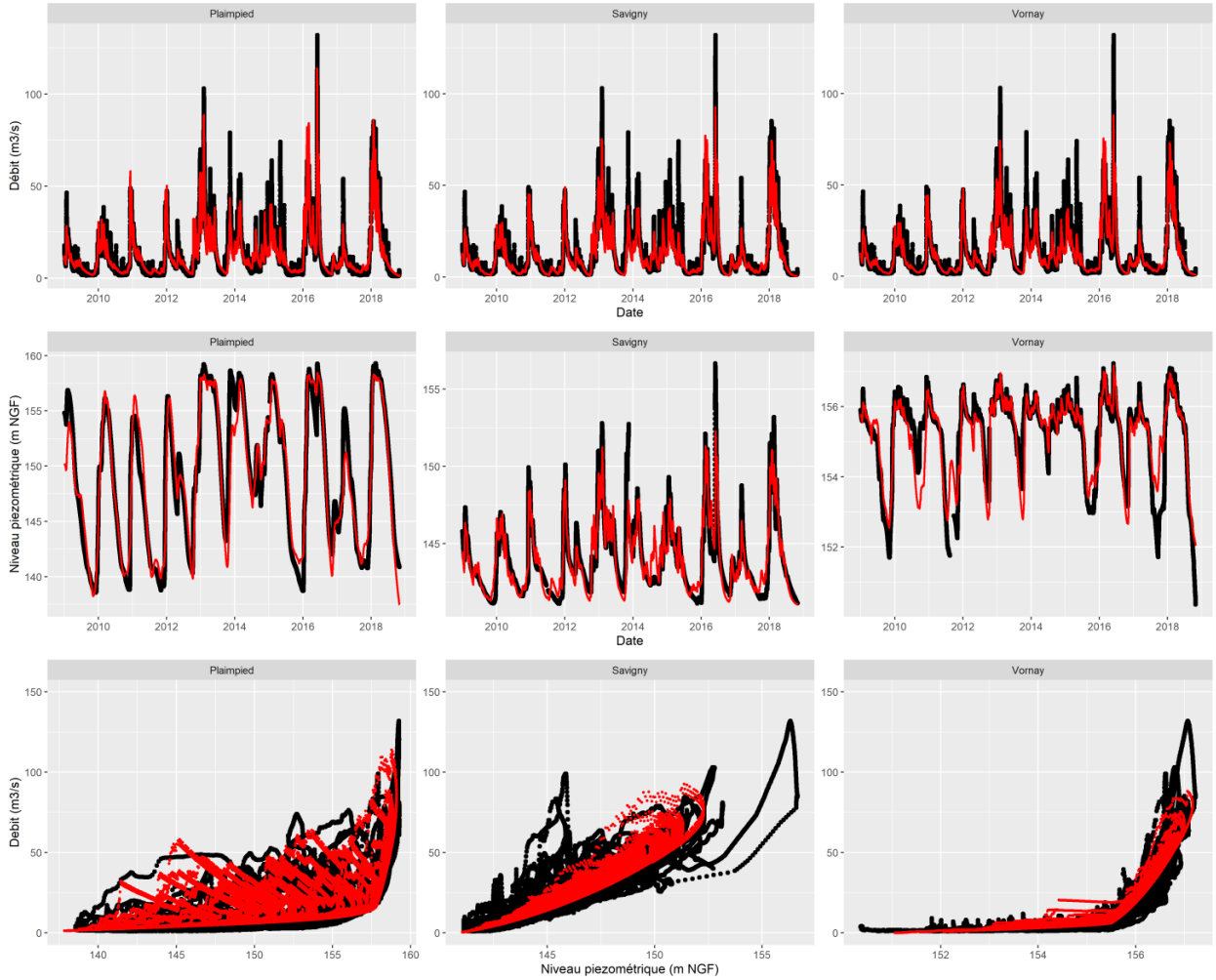


Figure 34 : Simulations pluie-débit-piézométrie du débit horaire de l'Yèvre à Saint Doulchard (Bourges) et dans trois piézomètres du bassin de l'Yèvre. Les simulations sont en rouge, les observations sont en noir. Haut : débits. Milieu : piézométrie. Bas : relations débit- piézométrie.

5.3. ECHANGES LATERAUX SOUTERRAINS ET OPTIMISATION DES SURFACES D'ALIMENTATION DES BASSINS

Les facteurs d'échanges latéraux souterrains et les surfaces d'alimentation des bassins peuvent être utilisés comme paramètres à optimiser dans GARDENIA. Ces deux paramètres permettent de renseigner sur les déficit ou excès du bilan hydrologique à l'échelle du bassin. Par exemple, un facteur d'échange souterrain optimisé >0 ou un facteur d'échelle d'aire optimisé >1 suggère un apport d'eau dans le bassin. L'introduction des paramètres des facteurs d'échanges latéraux ou d'ajustement de la surface de bassin, ajoute un degré de liberté pour la calibration des modèles. Dans ces nouvelles simulations au pas de temps journalier, chaque facteur a été optimisé indépendamment (l'un puis l'autre). Ceci permet d'éviter une compensation entre l'un et l'autre paramètre. En parallèle, les autres paramètres des modèles ont été de nouveau ajustés.

Le Tableau 3 présente un résumé des valeurs obtenues pour les facteurs d'échange souterrain (F. Éch %) et d'aire de bassin (F. Aire %) ainsi que les fractions de contributions des eaux souterraines aux écoulements. Globalement, on note que l'optimisation des facteurs d'échange sont relativement concordant aux résultats d'optimisation du facteur d'aire. Dans le cas de l'Auron, des

gains sont confirmés (bien que le facteur d'aire soit proche de 1). Dans le cas de l'Airain les facteurs d'échanges et d'aire ont des valeurs contradictoires. Pour l'Yèvre, une tendance à l'import (échanges >0) émerge pour l'Yèvre. À l'inverse, une tendance à l'export (échanges <0) est à noter pour l'Ouatier. Ce dernier résultat contraste avec les informations issues de la piézométrie (voir Annexe 2) et de données de traçages qui montrent que des apports externes, via les eaux souterraines, ont été identifiés dans la partie amont du bassin (Hakoun, 2020). Le bilan obtenu ici par modélisation suggère que la lame d'eau écoulée en surface est moins importante que celle précipitée, ce qui suggère des exports souterrains. Ces exports pourraient être dirigés vers l'aquifère plus en profondeur et vers l'Yèvre à l'aval du bassin (Annexe 2). Ces exports sont cohérents avec les écoulements intermittents sur le bassin de l'Ouatier, et la nature calcaire du territoire.

D'un point de vue opérationnel, ces résultats permettent de proposer des pistes d'amélioration des modèles hydrologiques vis-à-vis de la sensibilité à l'aire des bassins versants. Une étude de sensibilité prenant compte des facteurs d'aires optimisés dans ce travail pourrait être envisagée pour évaluer l'impact sur les prévisions.

Bassin	Piézomètre	F. Éch (%)	F. Aire (%)	Contrib. Sout (%)	Contrib. Sout.* (%)
Auron	Plaimpied	-	0.99	6.5	6.6
		4.2	-	10.1	
	Vornay	-	1.07	11.0	12.1
		6.8		17	
Airain	Vornay	-	1.11	8.9	10.6
		-0.1	-	8.3	
Ouatier	Rians	-	0.92	56.9	48.3
		-8.3	-	47.7	
Yèvre	Plaimpied	-	1.23	33.7	10.9
		7.4	-	16.2	
	Vornay	-	1.17	10.1	8.2
		6.5	-	16.2	
	Savigny		1.15	18.4	17.4
		22		40.3	

Tableau 3 : Résumé des résultats d'optimisation des paramètres controlant les facteurs d'échanges souterrains (F. Éch) et d'agrandissement d'aire (F. Aire) pour les sous-bassins de l'Yèvre et l'Yèvre et impact sur les parts de contribution des eaux souterraines aux écoulements en rivière. Contrib. Sout. indique la contribution de référence, pour un modèle sans optimisation d'un facteur d'échange ou d'aire de recharge.*

5.4. CONCLUSION

Les résultats de modélisation présentés ci-dessus permettent de vérifier que le schéma de fonctionnement supposé des différents sous bassins de l'Yèvre est cohérent. Cette vérification se base sur des modèles « pluie-débit-piézométrie » avec l'outil GARDENIA. L'approche de modélisation permet aussi d'explorer de possibles pistes d'amélioration des modèles hydrologiques, notamment en tenant compte de la dynamique des eaux souterraines ou par le biais d'ajustements de l'aire du bassin versant ou d'échanges souterrains.

Les schémas de fonctionnement retenus pour les modèles pluie-débit-piézométrie sont les suivants :

- pour l'Airain et l'Auron, un schéma de fonctionnement à seuil. Pour l'Ouatier, un schéma simple à réservoir unique avec des valeurs de paramètres de calibration du réservoir « lent » reflétant des écoulements souterrains. Pour l'Yèvre, des simulations basées sur deux schémas conceptuels ont été explorés (avec ou sans seuil de piézométrie), en fonction des hauteurs d'eau dans trois piézomètres. Pour l'Yèvre, l'analyse des résultats montre qu'une approche robuste des simulations des crues est obtenue avec un modèle parcimonieux, à réservoir unique sans seuil, qui tient compte des niveaux d'eau au piézomètre de Savigny (05205X0013/P – Savigny) ;
- pour le sous bassin du Moulon un modèle GARDENIA du type « pluie-débit » a été utilisé compte tenu de la nature relativement imperméable des formations géologiques. Ce modèle comprend un unique réservoir « lent » et les résultats de calibration montrent que la paramétrisation du modèle, en particulier le bref ½ temps de vidange du réservoir, est représentative d'écoulements hypodermiques / du sol en l'absence d'écoulements souterrains significatifs.

Ces schémas ont permis de simuler les débits de chaque sous bassin avec des valeurs de critères d'ajustement (Nash) relativement satisfaisants (gamme 0.6-0.85). Au pas de temps journaliers et pour les modèles pluie-débit-piézométrie, ces critères sont tous supérieurs à 0.7.

La prise en compte des niveaux d'eau souterraine dans la modélisation apporte une contrainte à la fois sur le schéma conceptuel de modélisation mis en œuvre et sur la paramétrisation des modèles. Cette contrainte de paramétrisation a permis de préciser les dynamiques et amplitudes des contributions des eaux souterraines pour les sous bassins de l'Auron, de l'Airain, de l'Ouatier et de l'Yèvre (à l'amont de Bourges) selon les différents schémas de modélisation employés. Dans cette étude, les parts d'écoulement souterrain les plus importantes (>40 %) ont été identifiées pour le sous bassin de l'Ouatier, confirmant ainsi les résultats obtenus dans une étude antérieure (Hakoun, 2020). Les contributions sont plus modestes (entre 7 et 16 %) pour l'Auron, l'Airain et l'Yèvre (station de Saint-Doulchard).

Enfin, la possibilité d'optimisation des facteurs d'aires et d'échanges avec les eaux souterraines implémentée dans GARDENIA a permis de mettre en évidence des déficits/excès d'eau entre les lames d'entrée et de sortie des modèles (recharge et débit aux stations). Les résultats les plus robustes montrent que l'Ouatier exporte probablement une fraction de volume d'eau rechargée, via des transferts souterrains, et qu'à l'inverse, l'Auron et l'Yèvre sont dans des situations d'imports. Dans le contexte hydrogéologique de l'Ouatier, la destination des exports est probablement l'Yèvre.

D'un point de vue opérationnel, ces résultats permettent de proposer des pistes d'amélioration des modèles hydrologiques vis-à-vis de la structure des modèles d'écoulement avec une prise en compte du compartiment souterrain, et de l'ajustement d'aire d'alimentation avec prise en compte des exports et imports mis en évidence dans ce travail.

6. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'approfondir les connaissances du rôle du karst dans la genèse des crues en adoptant une approche évènementielle et une approche par modélisation.

L'approche évènementielle a permis de montrer que l'impact des conditions initiales, notamment du remplissage de l'aquifère, sur la réponse hydrologique à l'échelle évènementielle est relativement variable pour chaque sous bassin.

Les sous-bassins dont la réponse semble la plus marquée par le remplissage du karst sont l'Airain et l'Ouatier, avec des réponses hydrologiques distinctes liées au contexte hydrogéologique de chacun des sous-bassins. Pour l'Airain, l'état de saturation initial de l'aquifère peut être identifié via le piézomètre 05471X0070 – Vornay dont les fluctuations mettent en évidence un seuil de connexion entre la rivière et les eaux souterraines (connexion au-delà du niveau 155.6 mNGF); cet état de remplissage pouvant amplifier ou atténuer des épisodes de pluie intenses. Dans le cas de l'Ouatier, les réponses hydrologiques sont aussi marquées par les niveaux d'eau souterraine initiaux (04936X0010 – Rians) et une typologie saisonnière a été identifiée. Les réponses du cours d'eau se décomposent entre (i) des crues de reprises, après une période de basses eaux, (ii) des crues d'hiver pendant des états de saturation intermédiaire et (iii) des crues de hautes eaux, avec des états de saturation élevé. Lorsque l'aquifère est saturé (hautes eaux), la contribution des eaux souterraines au cours d'eau est relativement plus importante.

Dans le cas du principal affluent de l'Yèvre, l'Auron, les réponses évènementielles sont marquées par la valeur des débits initiaux ce qui suggère que le ruissellement peut être favorisé lorsque le sol est saturé. En outre, l'état de remplissage du karst tel qu'il est observé au point 05464X0045/P – Plaimpied et les directions d'écoulement ont mis en évidence une alimentation continue de la rivière par les eaux souterraines. Cette alimentation pourrait être amplifiée, par des apports externes plus importants comme l'a montré la typologie de réponse établie en fonction du dépassement de seuil pour les niveaux d'eau observés dans le piézomètre 05471X0070 – Vornay (situé dans le bassin mitoyen de l'Airain).

Le bassin du Moulon présente peu d'interaction avec les eaux souterraines, du fait de la configuration géologique et des terrains relativement imperméables. Sa réponse hydrologique semble être contrôlée par un état de saturation du sol, reflété par le débit initial du cours d'eau.

Enfin, pour l'Yèvre en général, les réponses hydrologiques sont impactées par la combinaison des différentes réponses hydrologiques des sous bassins. Les réponses de l'Auron et de l'Airain situés en rive gauche et principaux affluents de l'Yèvre sont marquées par l'état initial de saturation de l'aquifère, comme décrit précédemment. Ainsi, la réponse de l'Yèvre est en partie fonction de l'état de saturation de l'aquifère ; un état de saturation initial élevé favoriserait des crues plus importantes. D'un point de vue opérationnel, l'état de saturation du karst peut être évalué avec les piézomètres 05471X0070 – Vornay (avec effet de seuil) et 05205X0013/P – Savigny (sans effet de seuil).

L'approche par modélisation a permis de vérifier la cohérence des schémas de fonctionnement des différents sous bassins de l'Yèvre, via la conception et la calibration de modèles GARDENIA « pluie-débit-piézométrie ».

Les schémas de fonctionnement retenus pour les modèles pluie-débit-piézométrie sont les suivants :

Pour l'Airain et l'Auron, un schéma de fonctionnement à seuil. Pour l'Ouatier, un schéma simple à réservoir unique avec des valeurs de paramètres de calibration du réservoir « lent » reflétant des écoulements souterrains. Pour l'Yèvre, des simulations basées sur deux schémas conceptuels ont été explorés (avec ou sans seuil de piézométrie), en fonction des hauteurs d'eau dans trois piézomètres. L'analyse des résultats montre que le débit de l'Yèvre (et la piézométrie dans l'aquifère sous-jacent) est simulé de manière satisfaisante avec un modèle parcimonieux, à réservoir unique sans seuil, qui tient compte des niveaux d'eau au piézomètre de Savigny (05205X0013/P – Savigny).

Pour le sous bassin du Moulon un modèle GARDENIA du type « pluie-débit » a été utilisé compte tenu de la nature relativement imperméable des formations géologiques. La paramétrisation de l'unique réservoir « lent » utilisé dans ce modèle est représentative d'écoulements hypodermiques.

La prise en compte des niveaux d'eau souterraine dans la modélisation a permis de contraindre à la fois le schéma conceptuel de modélisation pour les sous bassin et l'optimisation des paramètres des modèles. Cette contrainte de paramétrisation a permis de préciser les dynamiques et part des contributions des eaux souterraines pour les sous-bassins de l'Auron, de l'Airain, de l'Ouatier et de l'Yèvre (à l'amont de Bourges). Les parts d'écoulement les plus importantes (>40 %) ont été identifiés pour le sous bassin de l'Ouatier. Pour l'Auron, l'Airain et l'Yèvre (station de Saint Doulchard), les contributions qui y ont été identifiés sont inférieures (entre 7 et 16 %) mais restent non négligeables.

Enfin, la possibilité d'optimisation des facteurs d'aires et d'échanges avec les eaux souterraines implémentée dans GARDENIA a permis de mettre en évidence des déficits/excès d'eau entre les lames d'entrée et de sortie des modèles (recharge et débit aux stations). Les résultats les plus robustes montrent que l'Ouatier exportent probablement une fraction des volumes d'eau rechargés sur son bassin d'alimentation, via des transferts souterrains, et qu'à l'inverse, l'Auron et l'Yèvre sont dans des situations d'imports.

En terme de préconisations pour l'amélioration de la prévision de crues, ce travail met en évidence que l'intégration du suivi des eaux souterraines pour les sous-bassins de l'Airain et de l'Ouatier, (et potentiellement pour l'Yèvre amont à Savigny et l'Auron) pourrait permettre d'améliorer les prévisions évènementielles en tenant compte de l'état de remplissage de l'aquifère.

Une préconisation complémentaire serait d'intégrer l'optimisation de l'aire du bassin d'alimentation. Cette intégration vise à ajouter l'aire des bassins d'alimentation comme variable à ajuster au cours de l'optimisation. Sur la base des résultats obtenus dans cette étude, l'aire de l'Ouatier pourrait être réduite et les aires de l'Auron et de l'Yèvre (Saint-Doulchard) pourraient être agrandies.

Enfin, en perspective à ces préconisations, les modèles développés dans ce travail pourraient être utilisés pour proposer une gamme de réponses de crues « types » en fonction de l'état de remplissage de l'aquifère et de l'intensité (et de la distribution temporelle) des pluies.

7. 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

Brugeron, A., Paroissien, J. B., & Tillier, L. (2018). *Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2: Principes de construction et évolutions. BRGM/RP-67489-FR*. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67489-FR.pdf

Charlier, J.-B. (2017). *Modélisation des crues sur bassin karstique par une approche Pluie-Piézo-Débit (bassin du Gapeau à Solliès-Pont). BRGM RP-67523-FR.* Retrieved from https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67523-FR.pdf

Edijatno, & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, (2), 113–122.

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

Ficchì, A., Perrin, C., & Andréassian, V. (2016). Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: An analysis based on 2400 flood events. *Journal of Hydrology*, *538*, 454–470. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.016

Hakoun, V. (2020). *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). BRGM RP-69925-FR*.

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.

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 http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53169-FR.pdf

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

Petit, V., Hanot, F., & Pointet, T. (2003). *Référentiel hydrogéologique BD RHF Guide méthodologique de découpage des entités. BRGM/RP-52261-FR*. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52261-FR.pdf

Rosenbrock, H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, *3*(3), 175–184.

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

Thiery, D. (2014). *Logiciel GARDENIA version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM RP-62797-FR*. Retrieved from http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf

Annexe 1 : Tableau des stations météorologiques

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

Annexe 2 : Cartes piézométriques de l'Ouatier

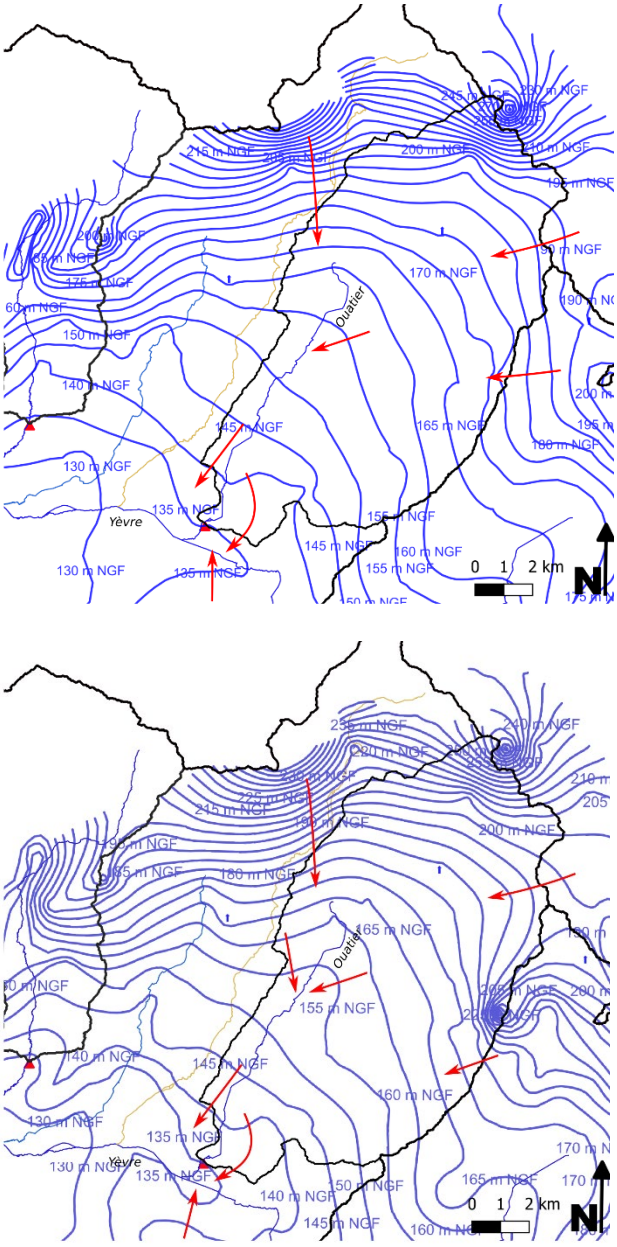


Figure 35 : Cartes piézométriques basses et hautes eaux sur le bassin de l'Ouatier. Les flèches indiquent les directions d'écoulements souterrains : les flancs amonts du bassin sont alimentés par des apports externes, la partie sud exporte vers l'Yèvre.

Annexe 3 :Tableau des résultats GARDENIA

Bilans hydrologiques journaliers issus de la modélisation GARDENIA

Bassin	piézomètre	pas de temps	schéma	Pluie	ETR	Pluie Effic	Cap. R. Sol. Prog	Q Rapide	Q Lent1	Q Lent 2	%Q Rapide	%Q Lent
Auron	Plaimpied	Journalier	1 réservoir à seuil	697.8	524.9	179.8	143.7	169.2	0.8	11.2	94.1	6.6
	Vornay	Journalier	1 réservoir à seuil	697.8	531.5	173.7	157.6	153.9	6.1	15.1	88.6	12.1
Airain	Vornay	Journalier	1 réservoir à seuil	595.5	436.4	169.2	105.3	154.3	7.5	10.8	91.2	10.6
Ouatier	Rians	Journalier	1 réservoir	697.8	513.2	190.4	121.1	100.2	93.6	0.0	52.6	48.3
Yèvre	Plaimpied	Journalier	1 réservoir à seuil	687.2	485.1	201.8	91.7	181.5	1.7	20.5	90.0	10.9
	Vornay	Journalier	1 réservoir à seuil	687.2	495.9	191.9	109.0	177.9	4.1	11.8	92.7	8.2
	Savigny	Journalier	1 réservoir	687.2	494.5	193.3	106.0	160.9	34.0	0.0	83.3	17.4
Moulon		Journalier	1 réservoir	697.8	499.2	203.1		186.1	17.7	0.0	91.6	8.7



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