

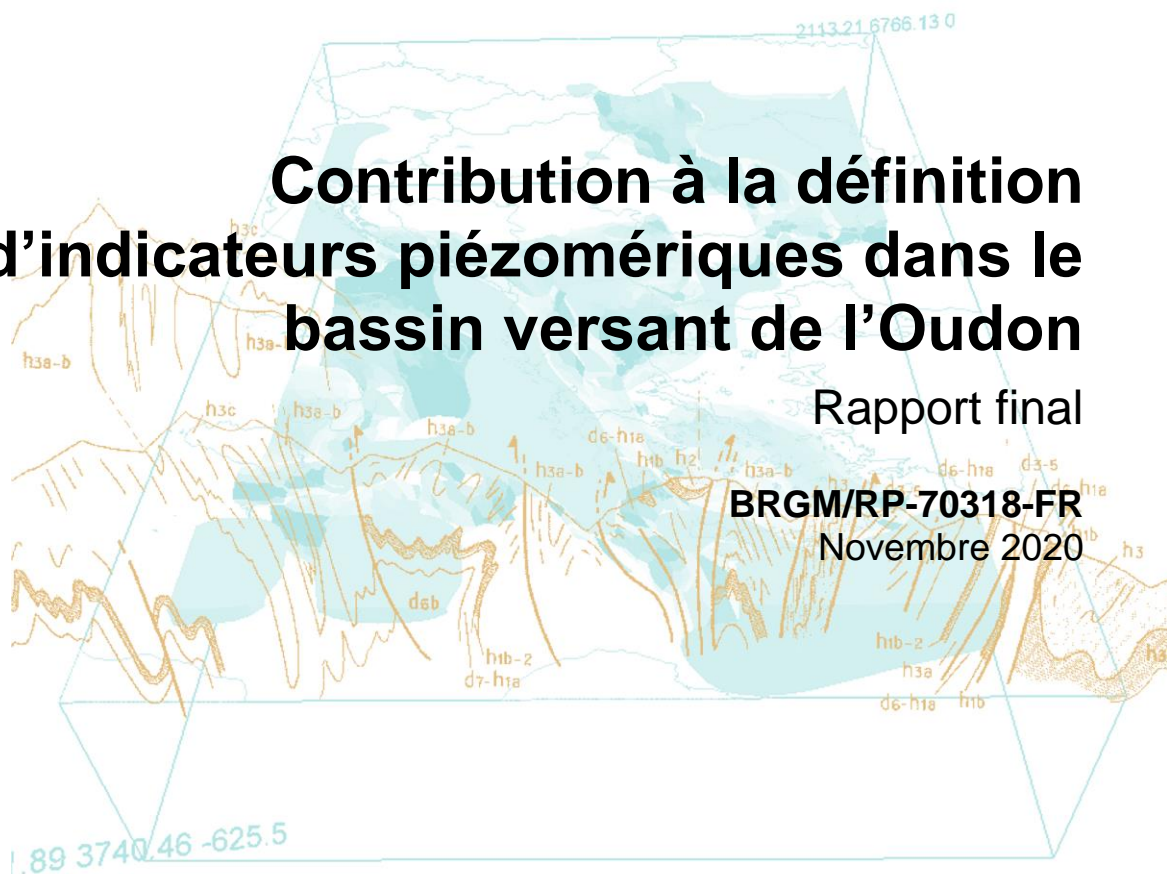


Contribution à la définition d'indicateurs piézométriques dans le bassin versant de l'Oudon

Rapport final

BRGM/RP-70318-FR

Novembre 2020



Contribution à la définition d'indicateurs piézométriques dans le bassin versant de l'Oudon

Rapport final

BRGM/RP-70318-FR

Novembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM pour l'année 2019

P. Chrétien & J.-C. Manceau

Vérificateur :

Nom : M. Laurencelle

Fonction : Hydrogéologue

Date : 04/12/2020



Approbateur :

Nom : Xavier Rachez

Fonction : Directeur régional Pays-
de-la-Loire

Date : 04/12/2020



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



Mots-clés : gestion ressource eau, indicateur, piézométrie, analyse statistique, analyse fréquentielle, modèle GARDENIA, étiage, sécheresse, Oudon, Mayenne, Maine-et-Loire, Pays-de-la-Loire.

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

Chrétien P. & Manceau J.-C. (2020) – Contribution à la définition d'indicateurs piézométriques dans le bassin versant de l'Oudon. Rapport final. BRGM/RP-70318-FR, 60 p., 15 ill., 11 tabl., 3 ann.

Synthèse

Dans le cadre de la démarche d'harmonisation interdépartementale des arrêtés cadres sécheresse (ACS) impulsée par la DREAL Pays-de-la-Loire en 2018, le bassin versant de l'Oudon fait l'objet d'une réflexion de la part des Directions départementales du Maine-et-Loire et de la Mayenne visant à parvenir à la mise en œuvre d'un arrêté cadre sécheresse interdépartemental unique pour l'ensemble du bassin versant.

Depuis les travaux du BRGM de 2013 révisés en 2018 (Chrétien 2013 et Chrétien 2018), la DDT du Maine-et-Loire a ajouté à son ACS départemental un volet « eaux souterraines ». Le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère (indice national 04222X0108/PZ) a été choisi comme indicateur piézométrique de la ressource en eau souterraine du bassin versant de l'Oudon (dans sa partie angevine). Cependant, le comportement de la nappe de socle est localement particulièrement inertiel et la représentativité de cet indicateur au regard des autres indicateurs établis en domaine de socle en Maine-et-Loire et en Mayenne interroge les services de l'État et les usagers.

Dans une première partie introductive, nous présentons les règlements en vigueur dans le bassin versant de l'Oudon en matière de gestion quantitative. Ils s'articulent autour de deux documents principaux : l'arrêté cadre sécheresse pour la gestion conjoncturelle des ressources, et le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne (au travers notamment de la disposition 7B-3).

Le contexte hydrogéologique du bassin de l'Oudon est caractéristique des aquifères du Massif Armoricaïn. Partout présents, les aquifères des roches du socle peuvent contenir des ressources en eau intéressantes lorsque le degré de fracturation (lié à la déformation) et d'altération de la roche est suffisant. Ces aquifères de socle sont dans le cas général des aquifères continus multicouches, libres, connectés au réseau hydrographique de surface, et caractérisés par un niveau piézométrique peu profond. La nappe du socle peut être localement en connexion hydraulique avec des placages de sables pliocènes, peu étendus mais productifs lorsque leur épaisseur est suffisante. Ils constituent une ressource intéressante.

Différents traitements de séries temporelles de débits et de niveaux piézométriques sont exposés dans le rapport. Ils ont été réalisés au moyen de l'outil de calcul ESTHER développé en langage R par le BRGM (Seguin et collab., 2018) à partir des données journalières de débits et niveaux piézométriques. Ces traitements ont permis de confirmer le comportement atypique du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère, en mettant en avant sa forte inertie, sa dynamique à dominante pluriannuelle et sa mauvaise corrélation avec les débits des rivières du bassin. Les autres piézomètres du bassin sont au contraire réactifs et bien corrélés avec les débits des cours d'eau. Il ressort également de l'analyse que le piézomètre de Ballots est le plus représentatif des piézomètres du bassin de l'Oudon.

Huit modèles globaux pluies – niveaux piézométriques – débits ont été construits au moyen du logiciel GARDENIA. Ils ont permis d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par l'élaboration d'un bilan hydrologique. Les modèles globaux sont mis à profit pour apporter des éléments complémentaires aux traitements exposés précédemment, afin de valider le choix de certains piézomètres en tant qu'indicateurs piézométriques potentiels. Ils permettent notamment de quantifier la contribution moyenne mensuelle des nappes au débit du cours d'eau. Les bilans hydrologiques établis grâce aux modèles globaux montrent ainsi que le rôle des eaux souterraines pour le soutien d'étiage de l'Oudon est variable selon les piézomètres et stations hydrométriques retenus pour la modélisation, mais toujours significatif.

Pour conclure, nous dressons la liste des arguments principaux pour ou contre l'intégration d'un volet eaux souterraines spécifique dans le futur arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin versant de l'Oudon, afin que l'administration fasse son choix de façon éclairée. Le piézomètre de Ballots est le meilleur candidat dans ce choix d'un piézomètre indicateur de la ressource en eau souterraine du bassin versant. L'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques de cet ouvrage a permis de calculer les niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5 ans sec, 10 ans sec et 15 ans sec.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	9
1.2. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES	10
1.2.1. Un bassin versant, deux arrêtés cadre sécheresse en 2019 : ACS 49 et ACS 53 10	
1.2.2. Le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne (2016-2021) : disposition 7B-3.....	11
2. Contexte hydrogéologique	13
2.1. HYDROGRAPHIE	13
2.2. GÉOLOGIE	14
2.3. HYDROGÉOLOGIE	16
3. Étude des séries temporelles : débits et niveaux piézométriques	19
3.1. HYDROMÉTRIE	20
3.1.1. Présentation des stations hydrométriques	20
3.1.2. Corrélation des débits moyens journaliers	20
3.2. PIÉZOMÉTRIE.....	21
3.2.1. Corrélation des niveaux piézométriques journaliers	22
3.2.2. Inertie des piézomètres.....	23
3.2.3. Corrélation débits-niveaux piézométriques	24
4. Modélisations globales	27
4.1. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES MODÈLES CONÇUS	27
4.1.1. Données utilisées	28
4.1.2. Calage des modèles	30
4.2. RÉSULTATS.....	31
5. Opportunité d'intégrer un indicateur piézométrique dans l'arrêté sécheresse interdépartemental.....	33
5.1. ÉLÉMENTS À LA DISPOSITION DE L'ADMINISTRATION	33
5.2. ANALYSE FRÉQUENTIELLE ET PÉRIODES DE RETOUR DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES DE BALLOTS	34
5.2.1. Analyse fréquentielle.....	34
5.2.2. Périodes de retour des niveaux piézométriques de Ballots	34

6. Conclusion	37
7. Bibliographie.....	39

Liste des figures

Illustration 1 : carte administrative du bassin versant de l'Oudon	10
Illustration 2 : l'Oudon et ses affluents.....	13
Illustration 3 : débits moyens mensuels de l'Oudon à Châtelais et à Segré	14
Illustration 4 : débits instantanés maximaux annuels (source : Banque Hydro).....	14
Illustration 5 : carte géologique au 1 / 1 000 000 du bassin versant de l'Oudon.....	15
Illustration 6 : schéma conceptuel des aquifères de socle (Lachassagne et collab., 2014)	16
Illustration 7 : carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant de l'Oudon.....	17
Illustration 8 : réseaux de surveillance piézométrique et hydrométrique dans le bassin versant de l'Oudon	19
Illustration 9 : exemple de corrélation croisée : débits moyens journaliers de Châtelais et Segré	21
Illustration 10 : exemple de corrélation croisée : niveaux piézométriques journaliers de Noyant-la-Gravoyère et Ballots	22
Illustration 11 : autocorrélogramme et périodogramme mensuels du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère	24
Illustration 12 : données utilisées pour la conception des modèles globaux.....	28
Illustration 13 : situation des stations de mesures utilisées pour l'élaboration des modèles globaux	29
Illustration 14 : schéma GARDENIA à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b).....	30
Illustration 15 : chronique de Ballots et seuils de gestion mensuels proposés	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : coefficient de corrélation croisée maximal des débits moyens journaliers du bassin de l'Oudon	20
Tableau 2 : coefficient de corrélation croisée maximale des niveaux piézométriques journaliers du bassin de l'Oudon. Le deuxième nombre représente le décalage temporel en jours pour obtenir cette corrélation maximale. Lorsque la valeur du décalage est positive, la variable de la ligne est en avance sur la variable de la colonne.....	22
Tableau 3 : informations sur l'inertie et la cyclicité des piézomètres du bassin versant de l'Oudon	23
Tableau 4 : corrélation des débits moyens journaliers et des niveaux piézométriques journaliers	25
Tableau 5 : corrélation des débits moyens mensuels et des niveaux piézométriques moyens mensuels.....	25
Tableau 6 : décalage en mois pour obtenir la meilleure corrélation entre les débits moyens mensuels et les niveaux piézométriques moyens mensuels (mesure du retard moyen des niveaux piézométriques par rapport aux débits)	25
Tableau 7 : coefficients d'ajustement R des 8 modèles globaux	31

Tableau 8 : extrait des bilans hydrologiques établis grâce aux des modèles globaux	32
Tableau 9 : éléments pour ou contre l'intégration d'un indicateur piézométrique dans l'arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin de l'Oudon	33
Tableau 10 : niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5, 10 et 15 ans sec	35
Tableau 11 : niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5 et 15 ans sec et niveaux piézométriques mensuels intermédiaires calculés à partir de ceux-ci	35

Liste des annexes

Annexe 1 Inertie des piézomètres du bassin versant de l'Oudon	41
Annexe 2 Description du logiciel GARDENIA	45
Annexe 3 Modélisations globales : débits et niveaux piézométriques observés et simulés	51
Annexe 4 Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Oudon – Sous-bassins versants de Segré, Châtelais et Cossé-le-Vivien	61
Annexe 5 Compléments théoriques sur l'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques ...	67

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Dans le cadre de la démarche d'harmonisation interdépartementale des arrêtés cadres sécheresse (ACS) impulsée par la DREAL Pays-de-la-Loire en 2018, la Direction Départementale des Territoires de la Mayenne (DDT 53) s'interroge sur la pertinence d'intégrer au futur arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin de l'Oudon un volet « eaux souterraines » qui comporterait des zones d'alerte où s'appliqueraient des mesures spécifiques, éventuellement associées à la mise en place d'indicateurs piézométriques (déclenchement de restrictions d'usage lors du passage d'un seuil piézométrique par exemple).

Cette réflexion s'inscrit donc dans le souhait de la DDT 53 d'harmoniser les ACS 53 et 49 (l'ACS du Maine-et-Loire comportant depuis 2013 un volet eaux souterraines). Elle porte tout particulièrement sur le bassin de l'Oudon (bassin versant interdépartemental), qui connaît des déficits quantitatifs répétés : les débits de seuil d'alerte (DSA) et de crise (DCR) sont franchis chaque année. Le débit d'objectif d'étiage (DOE) n'est pas respecté une année sur deux, loin des objectifs du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021 (1 année sur 5). Le bassin versant de l'Oudon est concerné par l'application de la disposition 7B-3 du SDAGE. La station hydrométrique de référence pour le bassin versant de l'Oudon en Mayenne est celle de Châtelais (M3771810) tandis que dans le Maine-et-Loire, c'est la station de l'écluse de Maingué à Segré-en-Anjou Bleu (code M3851810).

Par ailleurs, depuis les travaux du BRGM de 2013 révisés en 2018 (Chrétien 2013 et Chrétien 2018), la DDT du Maine-et-Loire a ajouté à son ACS départemental un volet « eaux souterraines ». Le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère (indice national 04222X0108/PZ) a été choisi comme indicateur piézométrique de la ressource en eau souterraine du bassin versant de l'Oudon. Cependant, le comportement de la nappe de socle est localement particulièrement inertiel et la représentativité de cet indicateur au regard des autres indicateurs établis en domaine de socle en Maine-et-Loire et en Mayenne interroge les services de l'État et les usagers.

L'étude consiste à fournir à la DDT 53 des informations utiles pour évaluer la pertinence d'introduire des zonages et des mesures spécifiques aux eaux souterraines dans les arrêtés cadre sécheresse sur le bassin versant de l'Oudon en Mayenne et en Maine-et-Loire, au regard notamment des éléments suivants :

- une évaluation de la représentativité du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère comme indicateur piézométrique pour le bassin de l'Oudon,
- une estimation des prélèvements d'eau du bassin versant de l'Oudon par nature de la ressource (eau superficielle/eau souterraine) et par usages (AEP, irrigation, industriel), basée sur les données redevance de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne,
- une modélisation globale des niveaux et des débits du bassin de l'Oudon à partir des pluies, de l'ETP et des prélèvements connus dans le bassin,
- une estimation de la contribution des nappes au débit d'étiage de l'Oudon,
- la caractérisation de la corrélation entre niveaux de nappe et débits de l'Oudon,
- les périodes de retour 5 ans sec, 10 ans sec et 15 ans sec (dans la mesure du possible) des niveaux des piézomètres indicateurs (cf. § 5.2.1 et Annexe 5 pour la définition des concepts)

1.2. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Le bassin versant de l'Oudon s'étend principalement en Mayenne (53) et Maine-et-Loire (49). Les départements de la Loire-Atlantique (44) et de l'Ille-et-Vilaine (35) ne sont concernés que marginalement.

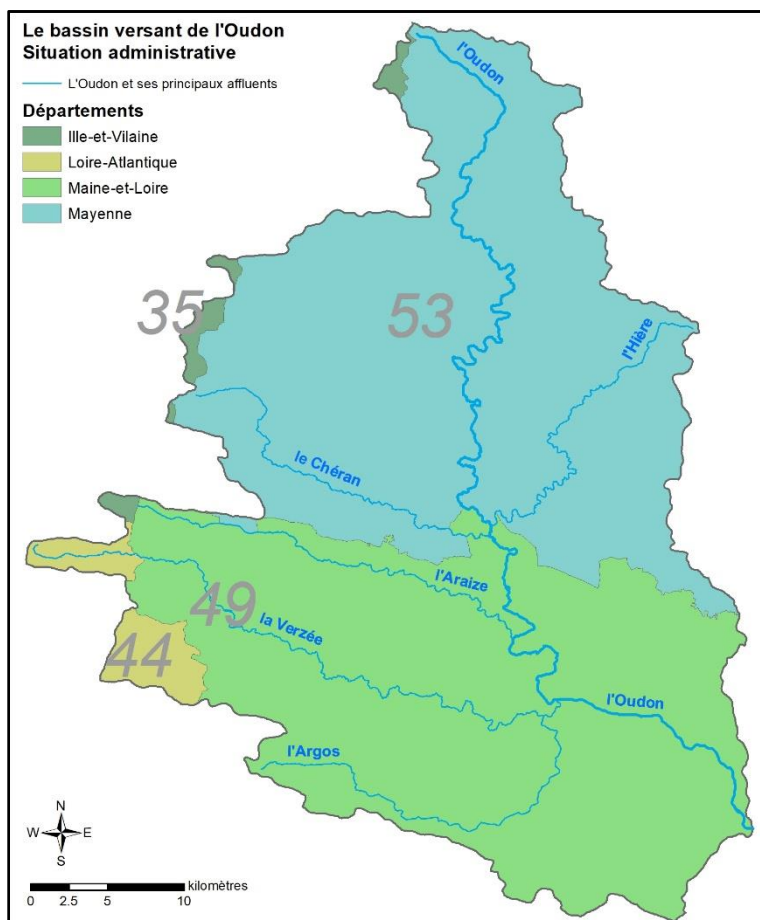


Illustration 1 : carte administrative du bassin versant de l'Oudon

1.2.1. Un bassin versant, deux arrêtés cadre sécheresse en 2019 : ACS 49 et ACS 53

ACS du Maine-et-Loire (49)

L'ACS en vigueur dans le Maine-et-Loire est signé du 3 juillet 2019. Deux zones d'alerte sont définies pour le bassin versant de l'Oudon :

- Une zone d'alerte eau superficielle dont la station de référence est celle de l'écluse de Maingué à Segré. Quatre seuils sont définis : vigilance ($1,0 \text{ m}^3/\text{s}$), alerte ($0,6 \text{ m}^3/\text{s}$), alerte renforcée ($0,3 \text{ m}^3/\text{s}$) et crise ($0,1 \text{ m}^3/\text{s}$). En cas de franchissement de ces seuils, l'ACS limite, voire interdit, les usages de l'eau superficielle, y compris les eaux souterraines issues des « nappes d'accompagnement ».
- Une zone d'alerte eau souterraine dont l'indicateur de référence est le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère. Quatre seuils sont définis : vigilance (49,56 m NGF), alerte (49,41 m NGF), alerte renforcée (49,32 m NGF) et crise (49,21 m NGF). En cas de

franchissement de ces seuils, l'ACS limite, voire interdit, les usages de l'eau souterraine, à l'exclusion des eaux souterraines issues des « nappes d'accompagnement ».

Les usages prioritaires ne sont pas concernés par l'ACS (alimentation en eau potable, sécurité incendie, santé et salubrité publique, besoins des milieux naturels). La notion de nappe d'accompagnement n'est pas définie dans l'ACS.

ACS de la Mayenne (53)

L'ACS en vigueur en Mayenne est signé du 18 juin 2019. Une zone d'alerte superficielle est définie pour le bassin de l'Oudon, dont la station de référence est celle de Châtelais. Quatre seuils sont définis : vigilance (0,5 m³/s), alerte (0,3 m³/s), alerte renforcée (0,15 m³/s) et crise (0,01 m³/s). En cas de franchissement de ces seuils, l'ACS limite, voire interdit, les usages non prioritaires, quelle que soit leur origine (superficielle ou souterraine).

Pour mémoire : ACS de l'Ille-et-Vilaine (35) et de la Loire-Atlantique (44)

Nous ne les détaillerons pas, car parmi les 110 communes du bassin versant de l'Oudon, seules cinq communes de Loire-Atlantique et sept communes d'Ille-et-Vilaine sont concernées par ces documents.

1.2.2. Le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne (2016-2021) : disposition 7B-3

Afin d'assurer l'équilibre entre la ressource et les besoins à l'étiage, le bassin versant de l'Oudon est concerné par la disposition 7B-3 du SDAGE : « Bassins avec un plafonnement au niveau actuel des prélèvements à l'étiage pour prévenir l'apparition d'un déficit quantitatif ».

Dans les secteurs où les étiages naturels sont sévères et ne doivent pas être aggravés par une augmentation de prélèvements en dehors de la période hivernale, ainsi que dans les secteurs faisant déjà l'objet de prélèvements importants à l'étiage sans qu'un déséquilibre soit encore avéré, le classement en zone de répartition des eaux n'est pas justifié. **Les prélèvements à l'étiage, autres que ceux destinés à l'alimentation en eau potable ou à la sécurité civile, sont globalement plafonnés à leur niveau actuel (maximum antérieurement prélevé).**

La mise en place d'une gestion coordonnée des prélèvements est recommandée pour contribuer à une utilisation plus rationnelle de l'eau et au développement éventuel d'usages nouveaux sans augmentation du prélèvement global. Pour tous les usages, sont recherchées et mises en œuvre des mesures permettant ou incitant à la réduction des prélèvements hors de la période hivernale. Le SAGE peut fixer des objectifs de réduction par usage. **Sont concernés les prélèvements dans les cours d'eau et leurs annexes, dans les sources et dans les nappes souterraines contribuant à l'alimentation des cours d'eau ou des zones humides.**

2. Contexte hydrogéologique

2.1. HYDROGRAPHIE

L'Oudon, rivière de 80 km de long, est le principal affluent de la rive droite de la Mayenne. Il prend sa source en Mayenne, à la Gravelle, et se jette dans la rivière Mayenne au Lion d'Angers et à Grez-Neuville. Les principaux affluents de l'Oudon sont le Chéran, l'Hière, l'Usure, la Mée, l'Araize, le Misengrains, la Sazée et la Verzée (cf. Illustration 2).

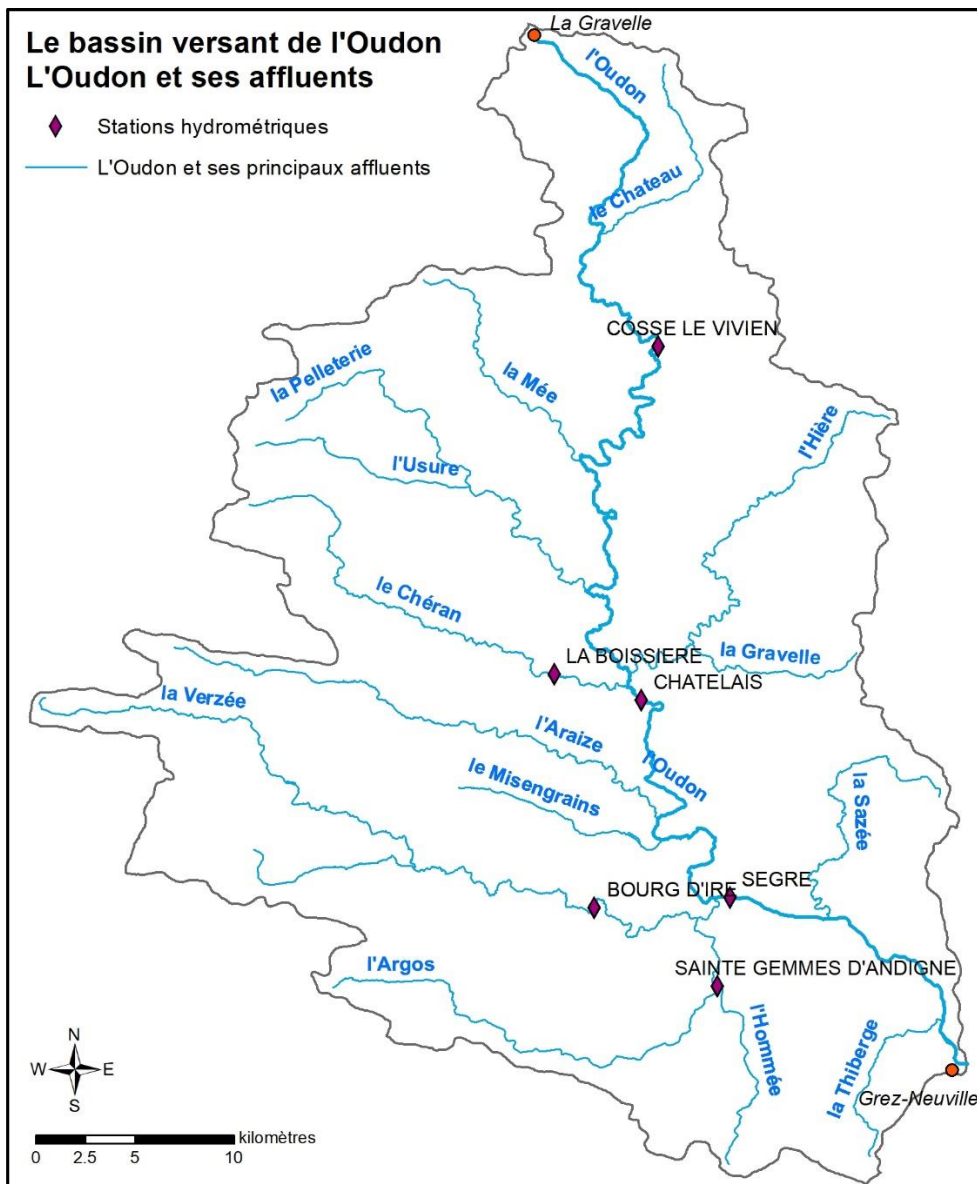


Illustration 2 : l'Oudon et ses affluents

L'Oudon peut atteindre 4,5 mètres de profondeur. Son cours est marqué par la présence de nombreux biefs et plans d'eau. Il se caractérise notamment par un régime hydraulique contrasté,

avec des étiages sévères (cf. Illustration 3) et des crues soudaines et très marquées (cf. Illustration 4)

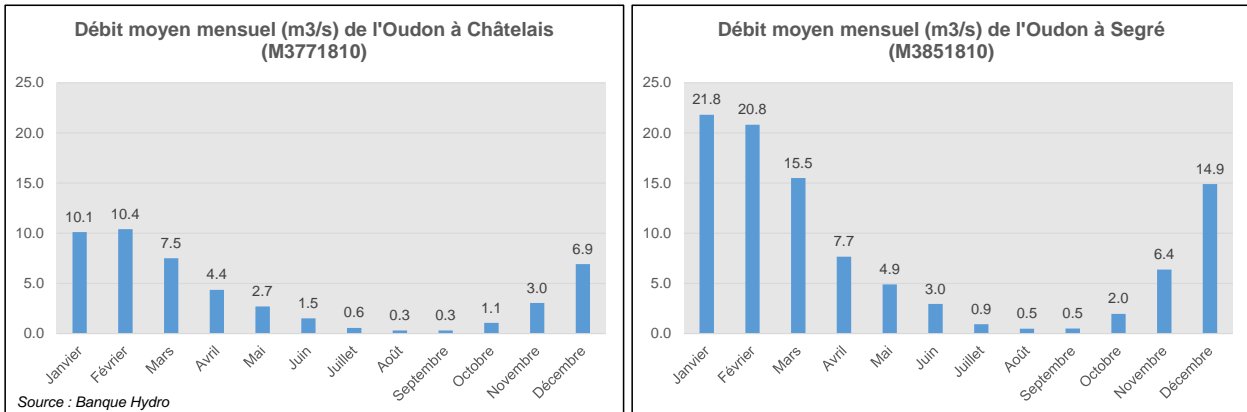


Illustration 3 : débits moyens mensuels de l'Oudon à Châtellais et à Segré

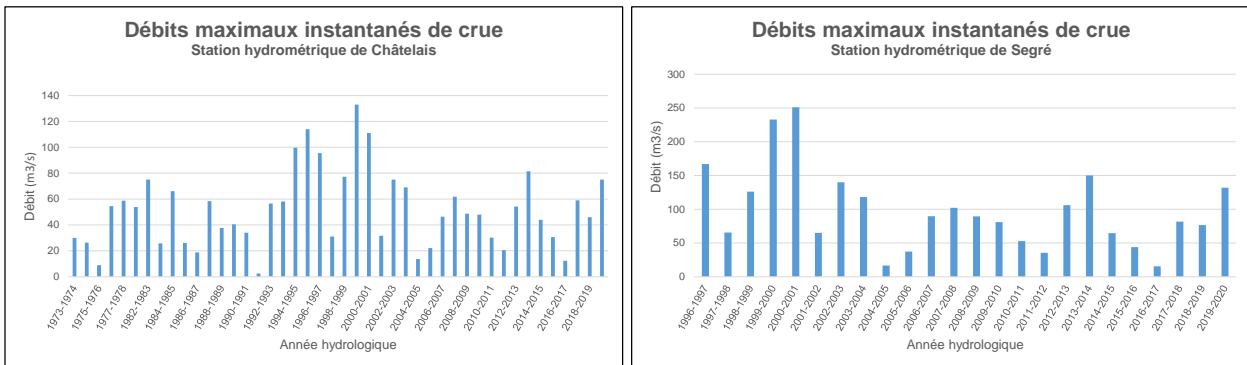


Illustration 4 : débits instantanés maximaux annuels (source : Banque Hydro)

2.2. GÉOLOGIE

Du point de vue géologique, le bassin de l'Oudon repose sur des terrains appartenant au Massif Armoricaire, sur l'unité de Bretagne Centrale, entre la limite sud du Cisaillement Nord-Armoricain (CNA) et la branche nord du Cisaillement Sud-Armoricain (BNCSA). Le territoire du SAGE est essentiellement composé de schistes grésio-argileux d'âge Briovérien, peu ou pas métamorphisés (Chrétien et collab, 2014).

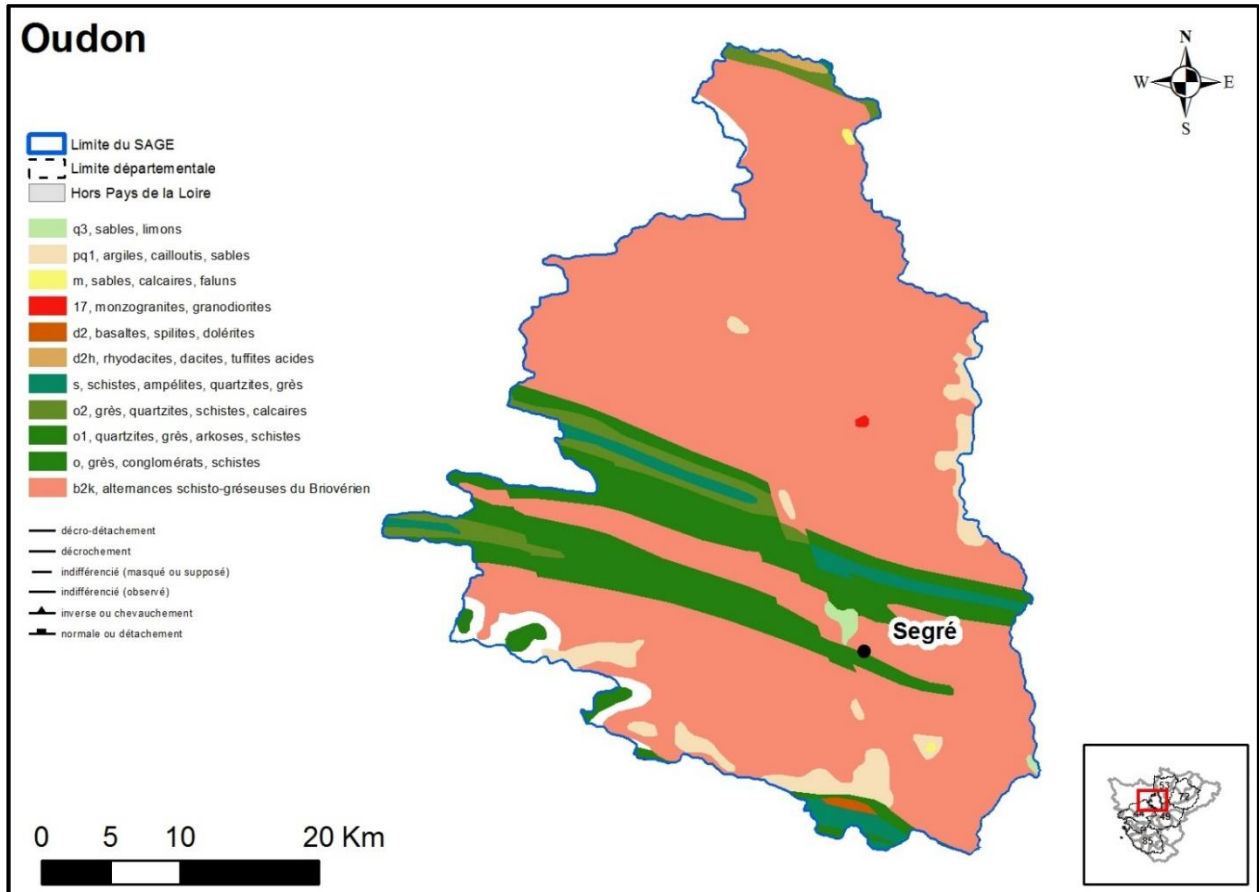


Illustration 5 : carte géologique au 1 / 1 000 000 du bassin versant de l'Oudon

Ces formations sédimentaires anciennes sont affectées par des plis synschisteux liés à l'orogénèse hercynienne, et sont également recoupées par des filons ou massifs acides à basiques et affectés par des failles. A l'extrême nord du bassin, on retrouve le massif du Pertre, correspondant à un leucogranite qui se serait mis en place au Carbonifère inférieur.

Dans la partie médiane du bassin, on trouve des séries sédimentaires d'âge Paléozoïque (Ordovicien, Silurien, Dévonien) correspondant aux synclinaux du sud de Rennes, constituées de la base au sommet par (synclinoriums de Martigné-Ferchaud et de Châteauneuf-sur-Sarthe, synclinal de Segré) :

- la formation de Pont-Réan (schistes rouges),
- la formation du Grès Armoricaïn (grès et quartzites clairs),
- la formation de Traveuzot (schistes noirs ardoisiers),
- la formation de Riadan-Renazé (schistes, grès et quartzites),
- la formation de la Chesnaie et de Poligné (schistes et quartzites).

Au Tertiaire, de petits fossés d'effondrement se sont individualisés et se sont remplis de sables et de graviers. Les formations de socle sont localement recouvertes de formations sablo-graveleuses d'âge indéterminé (probablement Crétacé à Pliocène), notamment à l'est du bassin de l'Oudon, au nord de Chemazé (Bazouges, Château-Gontier). Il s'agit de dépôts de sables, fins à grossiers, plus ou moins argileux et accompagnés de graviers, présents sous la forme de placages d'épaisseur variable. On trouve également quelques placages de sables rouges pliocènes, d'épaisseur variable.

Du point de vue des structures tectoniques, l'Oudon recoupe des plis orientés est-ouest d'âge hercynien et des structures plus récentes, post-hercyniennes à oligocènes : failles décrochantes à jeux normaux et orientées nord-sud (entre N020 et N150).

2.3. HYDROGÉOLOGIE

Deux aquifères principaux, aux caractéristiques très différentes, se distinguent sur le bassin versant de l'Oudon :

- Partout présents, les **aquifères des roches du socle** peuvent contenir des ressources en eau intéressantes lorsque le degré de fracturation (lié à la déformation) et d'altération de la roche est suffisant. Les fractures vont permettre à l'eau de circuler tandis que les altérites sus-jacentes, parfois épaisses de plusieurs dizaines de mètres, vont constituer la majeure partie du réservoir de l'aquifère. Au sein du bassin, les forages implantés dans ces terrains ont mis en évidence des débits allant jusqu'à 20 à 30 m³/h, bien qu'en général ils restent bien inférieurs à 20 m³/h. Il a été décrit dans la littérature¹ que ces aquifères de socle sont dans le cas général :
 - des aquifères continus multicouches ;
 - libres ;
 - connectés au réseau hydrographique de surface ;
 - caractérisés par un niveau piézométrique peu profond.

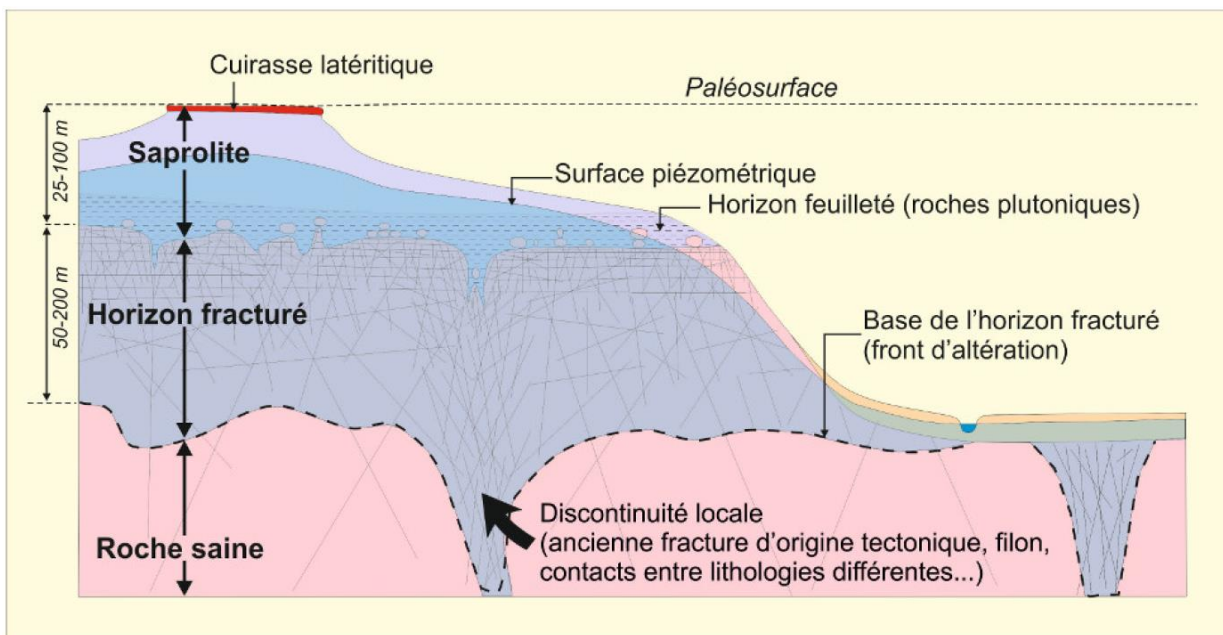


Illustration 6 : schéma conceptuel des aquifères de socle (Lachassagne et collab., 2014)

- Les **aquifères tertiaires**, dans les terrains sablo-graveleux du Pliocène et dotés d'une porosité d'interstice susceptible de fournir des débits intéressants selon leur épaisseur, sont exploités localement. Bien que faiblement étendues puisque présentes sous forme de placages (elles ne recouvrent en effet que 7% du territoire), ce sont les formations aquifères les plus intéressantes du bassin grâce à leur productivité, souvent supérieure à

¹ cf. Lachassagne et collab. (2001), Caballero et collab. (2007) et Mougin et collab. (2008).

30 m³/h. Néanmoins, les nappes qu'elles contiennent, de type libre, sont vulnérables aux pollutions.

Le bassin de l'Oudon ne contient pas de **nappes alluviales** d'intérêt économique. En effet, les alluvions de l'Oudon ou de ses affluents sont peu étendues, avec une épaisseur faible et une forte proportion d'argile.

Il est intéressant de noter que **les galeries des anciennes mines de fer de Chazé-Henri** constituent une ressource non négligeable et font l'objet d'une exploitation pour la production d'eau potable.

Les ressources en eaux souterraines du bassin de l'Oudon présentent généralement une faible inertie (à l'exception notable du secteur de Noyant-la-Gravoyère comme nous le verrons) et sont très dépendantes des précipitations, les réserves étant limitées et donc facilement épuisables dans le cas d'une insuffisance prolongée de la recharge liée à un déficit pluviométrique. Actuellement, plus de la moitié de l'eau potable consommée sur le bassin est importée, principalement depuis la rivière Mayenne.

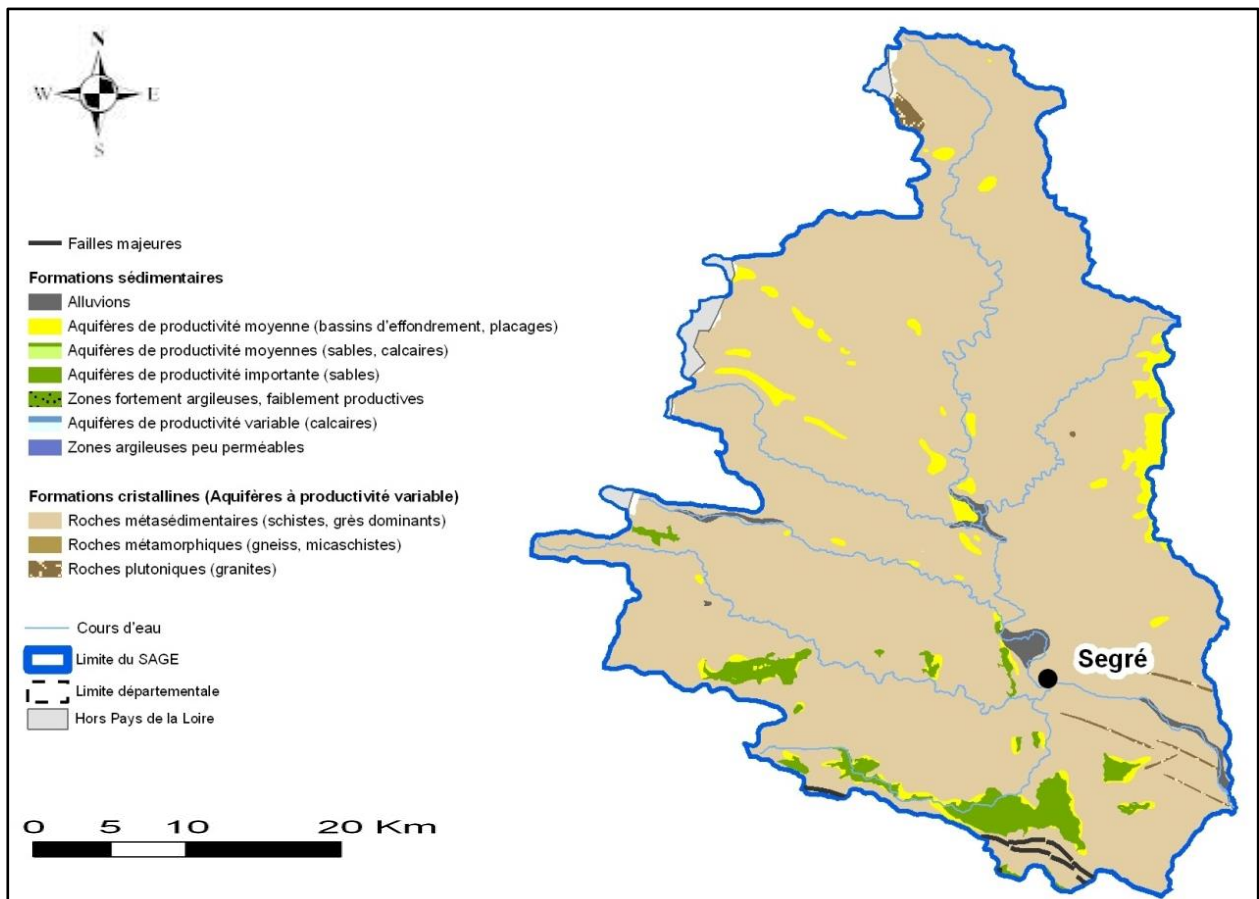


Illustration 7 : carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant de l'Oudon

3. Étude des séries temporelles : débits et niveaux piézométriques

Les différents traitements exposés dans ce chapitre ont été réalisés au moyen de l'outil de calcul ESTHER² développé en langage R par le BRGM (Seguin et collab., 2018) à partir des données journalières de débits et de niveaux piézométriques.

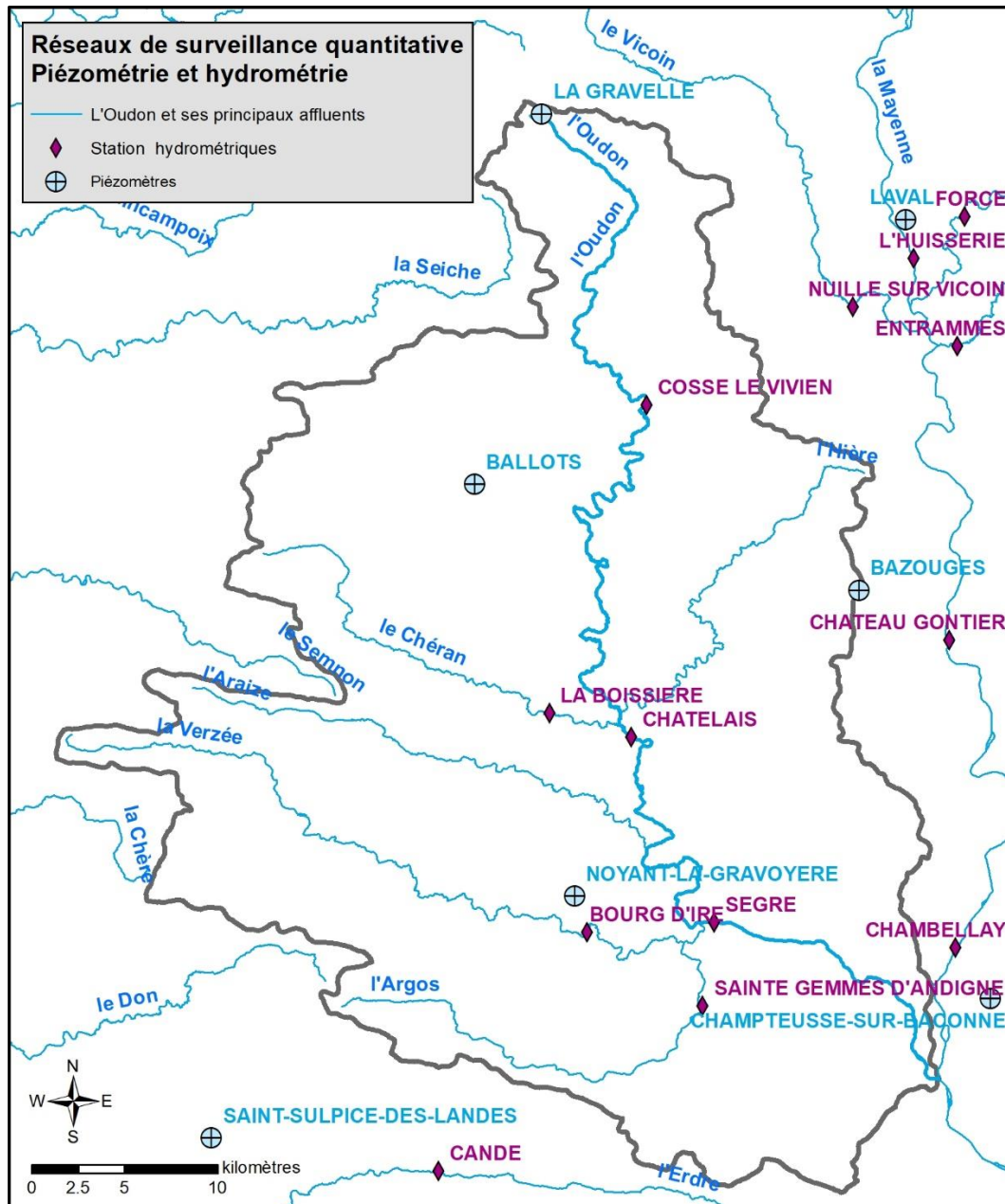


Illustration 8 : réseaux de surveillance piézométrique et hydrométrique dans le bassin versant de l'Oudon

² Étude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R

3.1. HYDROMÉTRIE

3.1.1. Présentation des stations hydrométriques

Les stations de mesures de débits des cours d'eau du bassin versant sont entretenues par la DREAL des Pays-de-la-Loire. En 2020, on en compte six dans le bassin versant de l'Oudon :

- Cossé-le-Vivien M37111810 sur l'Oudon, suivi depuis 1988 ;
- Châtelais M3771810 sur l'Oudon, suivi depuis 1973 ;
- Segré M3851810 sur l'Oudon, suivi depuis 1995 ;
- La Boissière M3774010 sur le Chéran, suivi depuis 1971 ;
- Bourg d'Iré M3823010 sur la Verzée, suivi depuis 1990 ;
- Sainte-Gemmes-d'Andigné M3834030 sur l'Argos, suivi depuis 1982.

3.1.2. Corrélation des débits moyens journaliers

Une corrélation est d'autant plus forte qu'elle est proche de 1. Un corrélogramme caractérise le degré de corrélation qui existe entre deux points d'une série distants de N jours. Il s'agit d'autocorrélation si les deux points appartiennent à une même série. S'il s'agit de deux séries distinctes, on parle de corrélation croisée. Les débits moyens journaliers de ces stations sont tous corrélés entre eux, comme le montre le Tableau 1 :

Stations hydrométriques		Cossé-le-Vivien	Châtelais	Segré	la Boissière	Bourg-d'Iré	Sainte-Gemmes-d'Andigné
		l'Oudon	l'Oudon	l'Oudon	le Chéran	la Verzée	l'Argos
Cossé-le-Vivien	l'Oudon		~1	0.92	0.89	0.88	0.86
Châtelais	l'Oudon	~1		0.99	0.91	0.95	0.89
Segré	l'Oudon	0.92	0.99		0.91	0.97	0.92
la Boissière	le Chéran	0.89	0.91	0.91		0.9	0.93
Bourg-d'Iré	la Verzée	0.88	0.95	0.97	0.9		0.92
Sainte-Gemmes-d'Andigné	l'Argos	0.86	0.89	0.92	0.93	0.92	

Tableau 1 : coefficient de corrélation croisée maximal des débits moyens journaliers du bassin de l'Oudon

Ces corrélations sont observées sans décalage (le même jour, ou à J+1 dans deux cas).

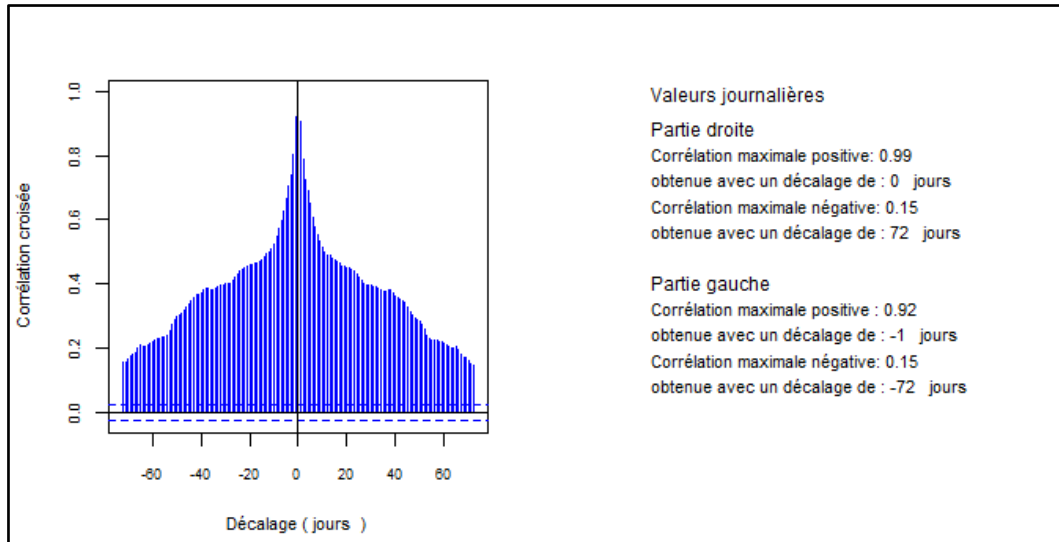


Illustration 9 : exemple de corrélation croisée : débits moyens journaliers de Châtelais et Segré

Les corrélations les plus fortes sont obtenues avec les débits moyens journaliers des couples de stations suivantes :

- Châtelais et Cossé-le-Vivien
- Châtelais et Segré
- Segré et Bourg d'Iré (rivière la Verzée)
- Châtelais et Bourg d'Iré

La station de Châtelais (M3771810) est celle dont la moyenne des corrélations est la plus élevée. Elle pourrait donc à ce titre constituer peut-être le meilleur choix de station de référence pour le bassin versant de l'Oudon s'il ne devait y en avoir qu'une seule de retenue.

3.2. PIÉZOMÉTRIE

Les piézomètres du bassin versant de l'Oudon appartenant au réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la région Pays-de-Loire (RRESOUPBRGMPAL) sont les suivants :

- La Gravelle 03195X0513/PZ (aquifère du socle) suivi depuis 2006 ;
- Ballots 03555X6010/PZ1 (aquifère du socle) suivi depuis 2004 ;
- Bazouges 03904X0064/PZ (aquifère des sables pliocènes) suivi depuis 2006 ;
- Noyant-la-Gravoyère 04222X0108/PZ (aquifère du socle) suivi depuis 2008 ;
- Champteussé-sur-Baconne 04281X0089/PZ (aquifère du socle) suivi depuis 2006.

Le piézomètre de Champteussé n'est pas situé dans le bassin versant de l'Oudon mais dans celui de la Mayenne. Il est néanmoins suffisamment proche du bassin de l'Oudon, dans un contexte hydrogéologique comparable, pour être pris en considération dans la recherche d'un piézomètre indicateur de la situation des ressources en eau souterraine du bassin de l'Oudon. Il présente en outre l'intérêt d'être situé à proximité de l'exutoire du bassin versant de l'Oudon (5 km).

Les chroniques piézométriques figurent dans les fiches de l'Annexe 1.

3.2.1. Corrélation des niveaux piézométriques journaliers

Dans cette étude, le seuil de significativité de la corrélation pour les niveaux piézométriques a été fixé à 0,7. Les niveaux piézométriques journaliers sont corrélés entre eux avec un décalage compris entre 0 et 45 jours comme le montre le Tableau 2. Par exemple, le coefficient de corrélation maximale des niveaux piézométriques journaliers enregistrés au droit des piézomètres de Noyant-la-Gravoyère et Ballots est de 0,7 avec un décalage de 45 jours.

Piézomètres du réseau RRESOUPBRGMPAL		La Gravelle	Ballots	Bazouges	Noyant-la-Gravoyère	Champteussé-sur-Baconne
		Socle	Socle	Sables pliocènes	Socle	Socle
La Gravelle	Socle		0.88/0	0.86/-12	0.59/-58	0.81/-21
Ballots	Socle	0.88/0		0.89/-6	0.70/-45	0.84/-10
Bazouges	Sables pliocènes	0.86/12	0.89/6		0.68/-42	0.82/-8
Noyant-la-Gravoyère	Socle	0.59/58	0.70/45	0.68/42		0.75/25
Champteussé-sur-Baconne	Socle	0.81/21	0.84/10	0.82/8	0.75/-25	
Moyenne (valeur absolue des décalages)		0.79/23	0.83/15	0.81/17	0.68/43	0.81/16

Tableau 2 : coefficient de corrélation croisée maximale des niveaux piézométriques journaliers du bassin de l'Oudon. Le deuxième nombre représente le décalage temporel en jours pour obtenir cette corrélation maximale. Lorsque la valeur du décalage est positive, la variable de la ligne est en avance sur la variable de la colonne.

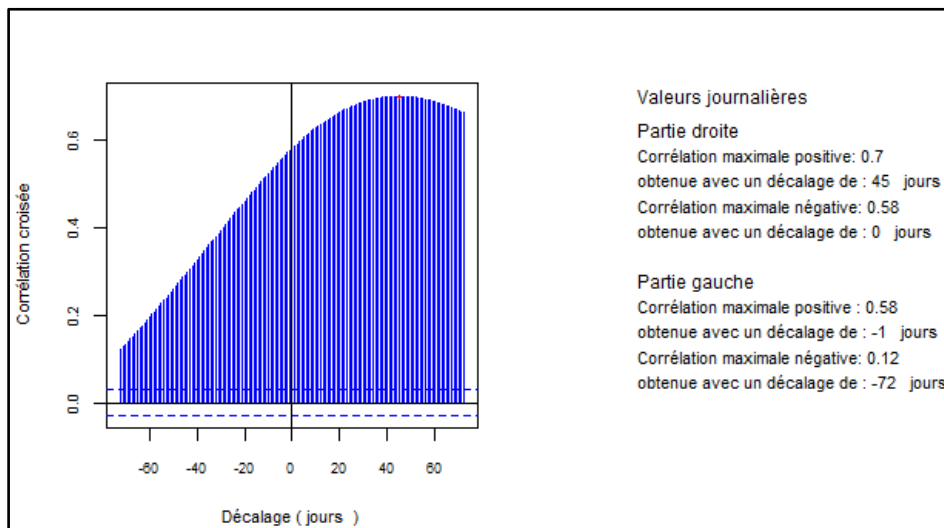


Illustration 10 : exemple de corrélation croisée : niveaux piézométriques journaliers de Noyant-la-Gravoyère et Ballots

Le piézomètre de Ballots est celui dont la moyenne des corrélations est la plus élevée. À l'exception notable de ceux enregistrés par le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère, les niveaux piézométriques journaliers des piézomètres du bassin versant de l'Oudon (y compris Champteussé) montrent une corrélation significative entre eux, avec un décalage compris entre 0 et 21 jours. Par comparaison, le meilleur coefficient de corrélation obtenu avec les données de Noyant-la-Gravoyère (avec Champteussé : 0,75 pour 25 jours de décalage) :

- est inférieur au coefficient de corrélation le plus faible (0,81) obtenu entre n'importe quel autre couple de piézomètres ;
- présente un décalage temporel supérieur au décalage le plus élevé (21 jours) obtenu entre n'importe quel autre couple de piézomètres.

3.2.2. Inertie des piézomètres

Pour une chronique piézométrique, l'auto-corrélogramme (ou variogramme temporel) peut être défini de la manière suivante :

« Dans une chronique de mesures piézométriques journalières, il existe une corrélation entre les valeurs successives de la série jusqu'à une certaine « portée » temporelle, fonction de l'inertie de la nappe. Cette corrélation peut se mesurer par l'intermédiaire d'un coefficient d'autocorrélation qui représente la corrélation de la série avec elle-même mais décalée d'un certain intervalle de temps. Les valeurs du coefficient d'autocorrélation en fonction du décalage temporel permettent d'établir un graphique appelé corrélogramme »³.

Le périodogramme quant à lui permet de détecter des périodicités dans la chronique piézométrique. On peut l'interpréter comme une décomposition de la variance de la série dans l'espace des fréquences. Le périodogramme représente graphiquement la « puissance spectrale du signal », appellation provenant de la théorie des signaux électriques, en fonction de la période (l'inverse de la fréquence). Il est alors possible de détecter quelles sont les périodes (fréquences) qui contribuent le plus à la dynamique de la série. Le périodogramme que nous présentons dans cette étude est le périodogramme de Lomb-Scargle. À Noyant-la-Gravoyère, la fréquence de 6 ans (cycles) est prépondérante sur celle d'un an.

Le temps de demi-décroissance correspond au temps nécessaire pour que, sans apport, la nappe diminue de moitié sa charge hydraulique par rapport à un niveau de base (qui doit généralement être estimé). Il dépend des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité, coefficient d'emmagasinement) et de sa taille. Le temps de ½ décroissance obtenu constitue un indicateur qualitatif de l'inertie quand l'ajustement entre la courbe de vidange simulée et la courbe de vidange observée est correct (cf. Annexe 1). Plus il est élevé, plus la dynamique de tarissement de la nappe sera lente et meilleure sera l'aptitude de l'aquifère à résister à un déficit de recharge (Manceau et collab., 2020).

Piézomètres du réseau RRESOUPBRGMPAL		Corrélation non significative	Fréquence la plus significative (cycles)	Temps de 1/2 décroissance
La Gravelle	Socle	à +2 mois	1 an	70 j
Ballots	Socle	à +2 mois	1 an	120 j
Bazouges	Sables pliocènes	à +2 mois	1 an	130 j
Noyant-la-Gravoyère	Socle	à + 5 mois	6 ans	1000 j
Champteussé-sur-Baconne	Socle	à +3 mois	1 an	75 j

Tableau 3 : informations sur l'inertie et la cyclicité des piézomètres du bassin versant de l'Oudon

³ Cf. J.J. Seguin (2010), rapport [BRGM/RP-58139-FR](#)

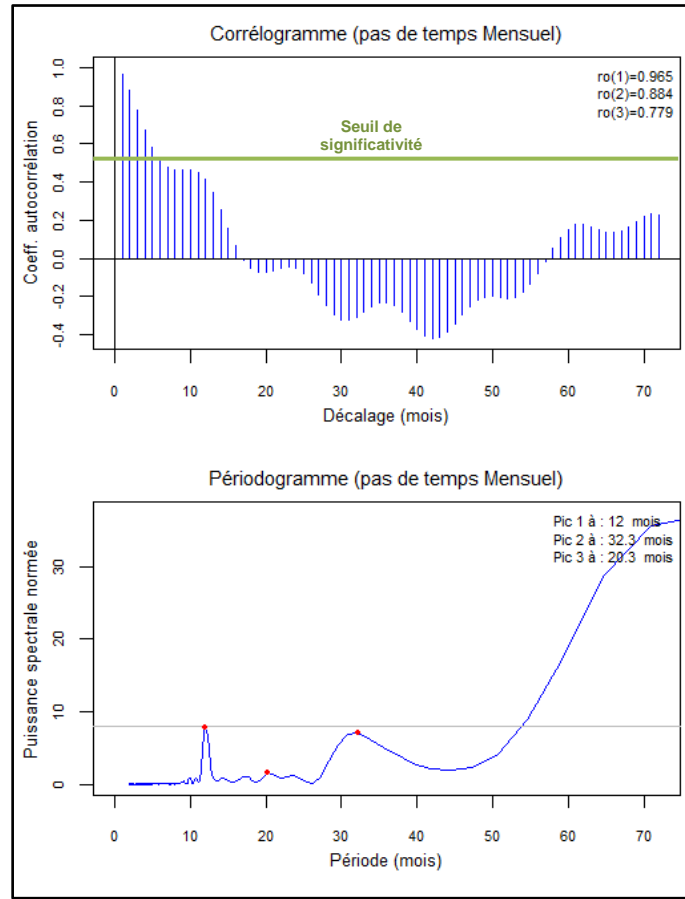


Illustration 11 : autocorrélogramme et périodogramme mensuels du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère

La mauvaise corrélation des niveaux piézométriques journaliers observés à Noyant-la-Gravoyère avec ceux des autres piézomètres s'explique donc sans doute principalement par l'inertie qui caractérise ce piézomètre. Contrairement aux piézomètres de Ballots, la Gravelle et Bazouges qui présentent une dynamique à cycles annuels dominants (cf. Tableau 3), le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère se distingue par :

- une dynamique à cycles pluriannuels dominants (Laurencelle et collab., 2020),
- avec en outre une autocorrélation significative jusqu'au mois $n+4$ comme le montre l'illustration 11,
- et un temps de demi-décroissance environ 10 fois supérieur à ceux des autres piézomètres.

Le piézomètre de Noyant-la-Gravoyère est donc révélateur d'un comportement singulier de la nappe au sein du bassin versant de l'Oudon.

3.2.3. Corrélation débits-niveaux piézométriques

Les corrélations entre les débits moyens de l'Oudon ou de ses affluents et les niveaux piézométriques des nappes ne sont significatives que si l'on compare les valeurs moyennes mensuelles (cf. Tableau 4 et Tableau 5). Pour tous les couples débits/niveaux piézométriques étudiés, la meilleure corrélation est toujours obtenue avec les débits précédant les niveaux piézométriques (en général : retard de 1 mois des niveaux par rapport aux débits, cf. Tableau 6).

Piézomètres du réseau RRESOUPBRGMPAL		La Gravelle	Ballots	Bazouges	Noyant-la-Gravoyère	Champteussé-sur-Baconne
Stations hydrométriques		Socle	Socle	Sables pliocènes	Socle	Socle
Cossé-le-Vivien	l'Oudon	0.61	0.56	0.62	0.41	0.48
Châtelais	l'Oudon	0.59	0.53	0.62	0.44	0.46
Segré	l'Oudon	0.60	0.54	0.63	0.45	0.49
la Boissière	le Chéran	0.49	0.47	0.53	0.36	0.39
Bourg-d'Iré	la Verzée	0.57	0.53	0.62	0.45	0.46
Sainte-Gemmes-d'Andigné	l'Argos	0.50	0.46	0.54	0.37	0.39
Moyenne		0.56	0.52	0.59	0.41	0.45

Tableau 4 : corrélation des débits moyens journaliers et des niveaux piézométriques journaliers

Piézomètres du réseau RRESOUPBRGMPAL		La Gravelle	Ballots	Bazouges	Noyant-la-Gravoyère	Champteussé-sur-Baconne
Stations hydrométriques		Socle	Socle	Sables pliocènes	Socle	Socle
Cossé-le-Vivien	l'Oudon	0.80	0.74	0.80	0.56	0.62
Châtelais	l'Oudon	0.76	0.71	0.81	0.59	0.60
Segré	l'Oudon	0.77	0.72	0.81	0.60	0.64
la Boissière	le Chéran	0.76	0.70	0.78	0.56	0.59
Bourg-d'Iré	la Verzée	0.73	0.68	0.78	0.60	0.58
Sainte-Gemmes-d'Andigné	l'Argos	0.74	0.69	0.80	0.58	0.59
Moyenne		0.76	0.71	0.80	0.58	0.60

Tableau 5 : corrélation des débits moyens mensuels et des niveaux piézométriques moyens mensuels

Piézomètres du réseau RRESOUPBRGMPAL		La Gravelle	Ballots	Bazouges	Noyant-la-Gravoyère	Champteussé-sur-Baconne
Stations hydrométriques		Socle	Socle	Sables pliocènes	Socle	Socle
Cossé-le-Vivien	l'Oudon	1	1	1	3	2
Châtelais	l'Oudon	1	1	1	3	2
Segré	l'Oudon	1	1	1	3	2
la Boissière	le Chéran	1	1	2	3	3
Bourg-d'Iré	la Verzée	1	1	1	3	2
Sainte-Gemmes-d'Andigné	l'Argos	1	1	1	3	2
Moyenne		1	1	1.2	3	2.2

Tableau 6 : décalage en mois pour obtenir la meilleure corrélation entre les débits moyens mensuels et les niveaux piézométriques moyens mensuels (mesure du retard moyen des niveaux piézométriques par rapport aux débits)

4. Modélisations globales

Des modèles pluies – niveaux piézométriques – débits ont été construits au moyen du logiciel GARDENIA, version 8.6 (Thiéry, 2014). Ils permettent d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par l'élaboration d'un bilan hydrologique. Les modèles globaux sont mis à profit pour apporter des éléments complémentaires aux traitements exposés dans le chapitre précédent, afin de valider le choix de certains piézomètres en tant qu'indicateurs piézométriques potentiels. Ils permettent notamment de quantifier la contribution moyenne mensuelle des nappes au débit du cours d'eau.

Le logiciel [GARDENIA](#), conçu par le BRGM, est utilisé pour bâtir des modèles globaux à réservoirs qui mettent en relation un signal d'entrée (pluies et évapotranspiration potentielle) et un signal de sortie (débit de cours d'eau et/ou niveau piézométrique). Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Celles-ci correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant étudié sont pris en compte.

Le calage du modèle s'appuie notamment sur un coefficient de répartition de l'eau dans le sol entre ruissellement et infiltration. Les termes du bilan hydrologique que ces modèles permettent d'obtenir sont : les précipitations efficaces, la production d'un écoulement rapide que l'on pourra attribuer au ruissellement superficiel et un écoulement lent que l'on associera à l'écoulement souterrain. Il convient cependant de rappeler que la décomposition entre écoulements superficiels et souterrains doit être analysée avec précaution (Thiéry, 2014).

Une description plus complète du logiciel est détaillée en Annexe 2. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.1. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES MODÈLES CONÇUS

Nous présentons les résultats de huit modèles globaux pluies – niveaux piézométriques – débits qui ont été construits dans le cadre de la présente étude.

Désignation du modèle	Période modélisée	Données en entrée (stations climatiques)		Signal en sortie		Choix du nombre de réservoirs
		Pluies	ETP	Station hydrométrique	Piézomètre	
Modèle 1 : Q_Segré_Pz_NG_1Rés	2008-2020	Angré	Arbrissel	Segré	Noyant-la-Gravoyère	1
Modèle 2 : Q_Segré_Pz_NG_2Rés	2008-2020	Angré	Arbrissel	Segré	Noyant-la-Gravoyère	2
Modèle 3 : Q_Segré_Pz_Champ_1Rés	2006-2020	Angré	Arbrissel	Segré	Champteussé	1
Modèle 4 : Q_Segré_Pz_Champ_2Rés	2006-2020	Angré	Arbrissel	Segré	Champteussé	2
Modèle 5 : Q_Châtélais_Pz_Bal_1Rés	2004-2020	Ballots	Arbrissel	Châtélais	Ballots	1
Modèle 6 : Q_Châtélais_Pz_Bal_2Rés	2004-2020	Ballots	Arbrissel	Châtélais	Ballots	2
Modèle 7 : Q_Cossé_Pz_Bal_1Rés	2004-2020	Ballots	Arbrissel	Cossé-le-Vivien	Ballots	1
Modèle 8 : Q_Cossé_Pz_Bal_2Rés	2004-2020	Ballots	Arbrissel	Cossé-le-Vivien	Ballots	2

Illustration 12 : données utilisées pour la conception des modèles globaux

La période modélisée est contrainte par la longueur de la chronique piézométrique (toujours plus courte que la longueur des chroniques climatiques ou hydrométriques). Selon les piézomètres, la période modélisée ne commence donc qu'en 2004, 2006 ou 2008.

4.1.1. Données utilisées

Données climatiques

Pour modéliser les niveaux de Noyant-la-Gravoyère et Champteussé, les pluies journalières observées à Angré (Maine-et-Loire) ont été utilisées. Elles sont représentatives de la partie méridionale du bassin versant de l'Oudon. Pour modéliser les niveaux de Ballots, les pluies journalières observées à Ballots ont été utilisées.

L'évapotranspiration (ETP) est moins variable géographiquement et seules les données journalières de la station d'Arbrissel (Ille-et-Vilaine) ont été utilisées. Il s'agit de la station disposant de données d'ETP sur la période 2004-2020 la plus proche du bassin versant de l'Oudon.

Données hydrométriques

Les débits moyens journaliers des stations de mesure de débits de l'Oudon suivantes ont été utilisés :

- Cossé-le-Vivien M3711810
- Châtélais M3771810
- Segré M3851810

Les données de ces stations sont produites par la DREAL Pays-de-la-Loire.

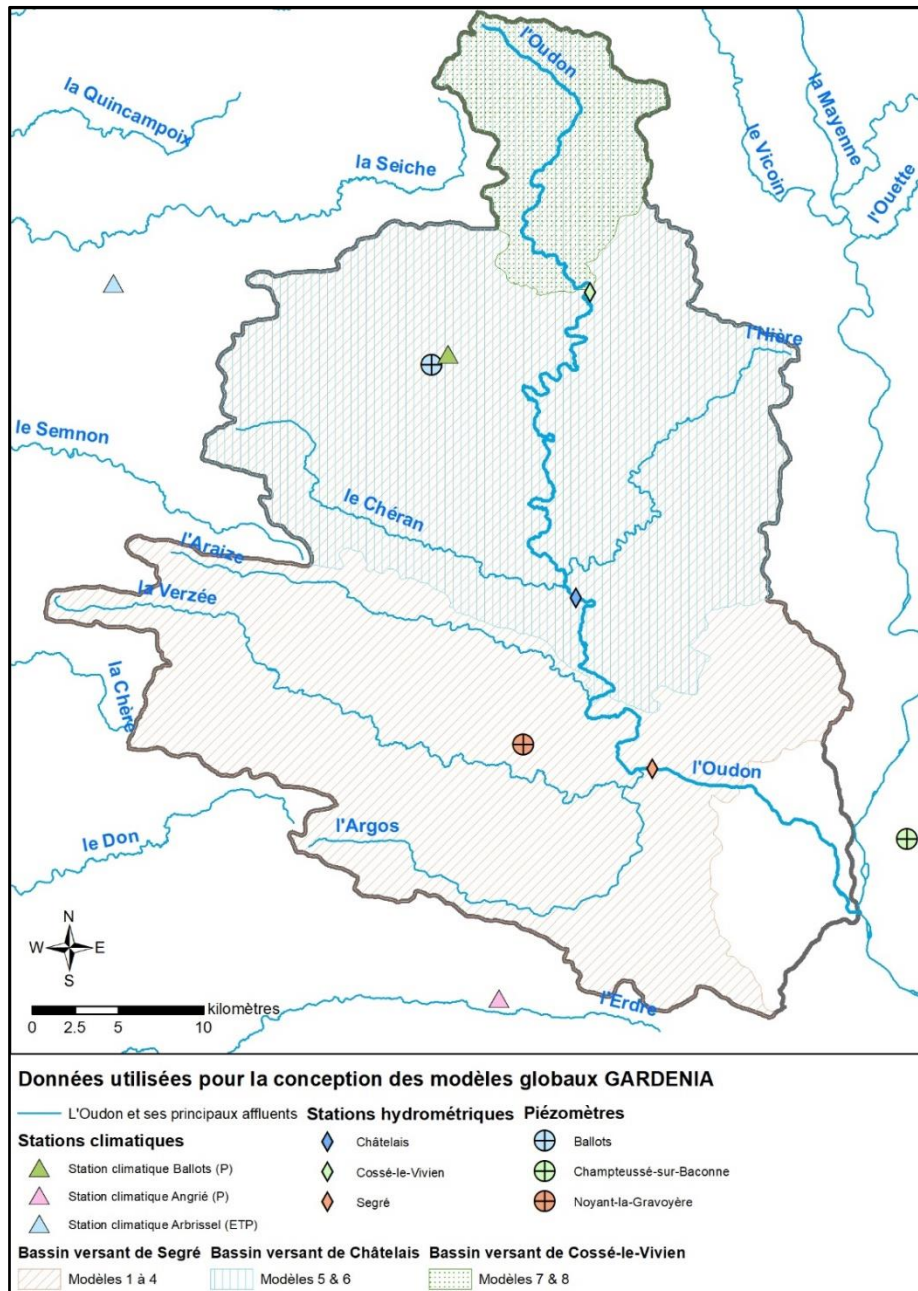


Illustration 13 : situation des stations de mesures utilisées pour l'élaboration des modèles globaux

Données piézométriques

Les niveaux piézométriques journaliers utilisés pour les modèles proviennent du réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la région Pays-de-Loire (RRESOUPBRGMPAL) :

- Ballots 03555X6010/PZ1 (aquifère du socle) suivi depuis 2004 ;
- Noyant-la-Gravoyère 04222X0108/PZ (aquifère du socle) suivi depuis 2008 ;
- Champteussé-sur-Baconne 04281X0089/PZ (aquifère du socle) suivi depuis 2006.

Données de prélèvements

Les volumes prélevés annuels (tous milieux : souterrain et superficiel) du bassin amont de la station hydrométrique ont été intégrés aux modèles. Ces données sont issues de la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau ([BNPE](#)).

4.1.2. Calage des modèles

Le schéma conceptuel des aquifères de socle décrit plus haut (cf. Illustration 6) distingue deux horizons aux propriétés hydrodynamiques différentes. En cela, il se rapproche du schéma à deux réservoirs proposé dans le logiciel GARDENIA (cf. Illustration 14).

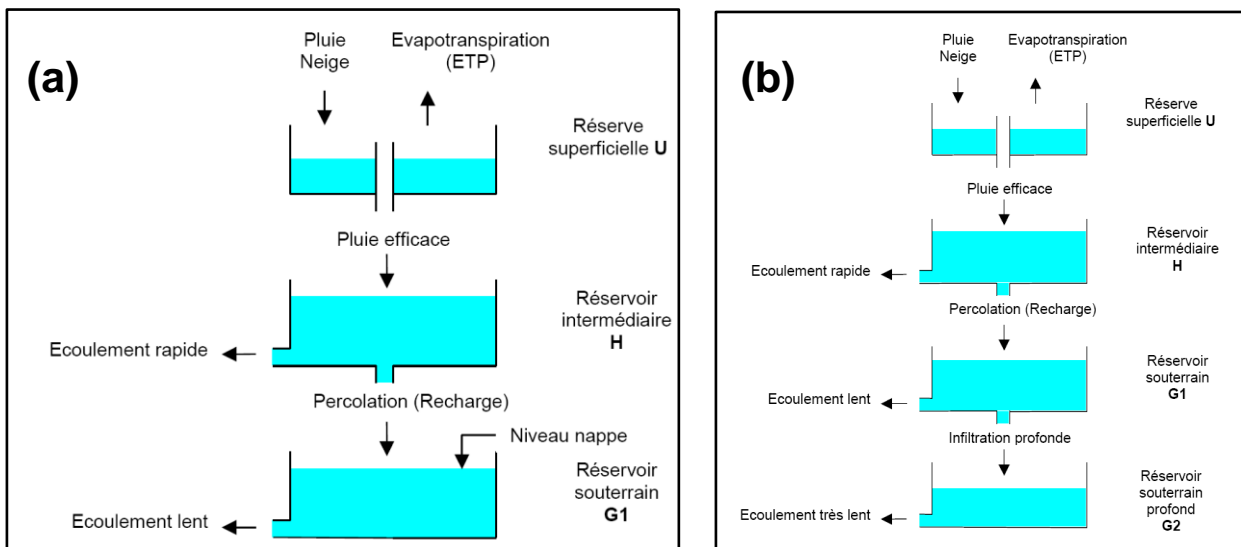


Illustration 14 : schéma GARDENIA à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b)

Dans ce schéma, le deuxième réservoir souterrain peut représenter un aquifère profond ou une partie inférieure de l'aquifère, caractérisé par un écoulement plus lent que le premier réservoir souterrain.

Nous avons testé les deux schémas (un réservoir ou deux réservoirs) et la performance du calage est sensiblement la même dans chaque cas : la différence entre les coefficients d'ajustement R (cf. Annexe 2) n'est pas significative (cf. Tableau 7).

Désignation du modèle	Période modélisée	Choix du nombre de réservoirs	Couple débits/niveaux piézométriques	Coefficients d'ajustement		
				Débits naturels	Niveaux piézométriques	Global
Modèle 1 : Q_Segré_Pz_NG_1Rés	2008-2020	1	Segré/Noyant-la-Gravoyère	0.92	0.97	0.95
Modèle 2 : Q_Segré_Pz_NG_2Rés	2008-2020	2	Segré/Noyant-la-Gravoyère	0.92	0.96	0.94
Modèle 3 : Q_Segré_Pz_Champ_1Rés	2006-2020	1	Segré/Champteussé	0.86	0.86	0.86
Modèle 4 : Q_Segré_Pz_Champ_2Rés	2006-2020	2	Segré/Champteussé	0.94	0.86	0.90
Modèle 5 : Q_Châtellais_Pz_Bal_1Rés	2004-2020	1	Châtellais/Ballots	0.96	0.94	0.94
Modèle 6 : Q_Châtellais_Pz_Bal_2Rés	2004-2020	2	Châtellais/Ballots	0.96	0.94	0.95
Modèle 7 : Q_Cossé_Pz_Bal_1Rés	2004-2020	1	Cossé-le-Vivien/Ballots	0.90	0.95	0.93
Modèle 8 : Q_Cossé_Pz_Bal_2Rés	2004-2020	2	Cossé-le-Vivien/Ballots	0.91	0.95	0.93

Tableau 7 : coefficients d'ajustement R des 8 modèles globaux

L'Annexe 3 présente la comparaison des séries (débits et niveaux piézométriques) observées et simulées. Les coefficients d'ajustement des modèles utilisant les données piézométriques de Champteussé-sur-Baconne, piézomètre situé hors du bassin versant de l'Oudon, sont moins bons (0.86) que ceux des autres modèles. Nous écartons donc ces modèles à ce stade de l'étude.

4.2. RÉSULTATS

Dans la configuration simplifiée retenue pour la modélisation (absence d'échanges souterrains avec l'extérieur du bassin, latéralement ou « sous » la section de jaugeage), le débit moyen mensuel de l'Oudon calculé par le modèle GARDENIA est la somme d'un écoulement rapide et d'un ou deux écoulements lents (un écoulement lent pour chaque réservoir souterrain). La contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit du cours d'eau peut être approchée en calculant le rapport entre le débit des deux écoulements lents et le débit total du cours d'eau simulé. Il est possible d'effectuer le même calcul sur une période d'intérêt donnée, comme la période du 1^{er} juin au 31 août qui correspond en règle générale à la période d'irrigation.

Désignation du modèle	Bassin versant	Superficie du bassin (km2)	Pluies totales (moyenne annuelle, mm)	Pluies efficaces (moyenne annuelle, mm)	Recharge des aquifères (moyenne annuelle, mm)	Ruissellement superficiel (écoulement rapide, mm)	Écoulement souterrain (écoulement lent, mm)	Contribution des eaux souterraines au cours d'eau	
								Contribution moyenne annuelle des eaux souterraines au débit des cours d'eau	Contribution moyenne des eaux souterraines au débit des cours d'eau pendant la période du 1/06 au 31/08
Modèle 1 : Q_Segré_Pz_NG_1Rés	Amont de la station hydrométrique de Segré	1310	692	143	9	136	9	7%	31%
Modèle 2 : Q_Segré_Pz_NG_2Rés	Amont de la station hydrométrique de Segré	1310	692	137	9	130	9	7%	31%
Modèle 5 : Q_Châtellais_Pz_Bal_1Rés	Amont de la station hydrométrique de Châtellais	734	773	196	61	134	63	35%	78%
Modèle 6 : Q_Châtellais_Pz_Bal_2Rés	Amont de la station hydrométrique de Châtellais	734	773	197	67	128	69	39%	81%
Modèle 7 : Q_Cossé_Pz_Bal_1Rés	Amont de la station hydrométrique de Cossé-le-Vivien	133	773	240	33	207	34	15%	42%
Modèle 8 : Q_Cossé_Pz_Bal_2Rés	Amont de la station hydrométrique de Cossé-le-Vivien	133	774	241	29	212	31	14%	34%

Tableau 8 : extrait des bilans hydrologiques établis grâce aux des modèles globaux

Les bilans hydrologiques établis grâce aux modèles globaux montrent ainsi que :

- Le choix d'un schéma à un seul réservoir ou deux réservoirs a peu d'incidence sur les résultats du bilan hydrologique : les ordres de grandeur du ruissellement, de l'écoulement souterrain, de la recharge et de la contribution des nappes au débit des cours d'eau sont similaires. Fort de ce constat et par cohérence avec des modélisations GARDENIA antérieures réalisées en domaine de socle (Mougin 2008 et Chrétien 2019), dans la suite du rapport, seuls les modèles à deux réservoirs seront considérés.
- Le rôle des eaux souterraines pour le soutien d'étiage de l'Oudon est variable selon les piézomètres et stations hydrométriques retenus pour la modélisation :
 - Il est très important pour le soutien des débits de Châtellais, où les eaux souterraines contribuent pour plus d'un tiers du débit total annuel du cours d'eau.
 - Il est plus modéré en tête de bassin versant à Cossé-le-Vivien.
 - À Segré, la faible part des eaux souterraines dans le débit de l'Oudon est probablement le reflet du comportement atypique du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère (forte inertie).

Les contributions mensuelles des eaux souterraines au débit de l'Oudon sont détaillées pour toute la période de modélisation dans l'Annexe 4.

5. Opportunité d'intégrer un indicateur piézométrique dans l'arrêté sécheresse interdépartemental

5.1. ÉLÉMENTS À LA DISPOSITION DE L'ADMINISTRATION

Les modèles conçus dans le cadre de cette étude montrent qu'en période d'étiage, les eaux souterraines contribuent significativement au débit de l'Oudon. Il est donc important que cette fonctionnalité des eaux souterraines du bassin versant de l'Oudon soient préservées, et légitime que les ressources en eau souterraine fassent l'objet de mesures de protection :

- conjoncturelles, telles que celles prévues dans les arrêtés cadre sécheresse départementaux et le futur arrêté interdépartemental ;
- structurelles, telles que celles mises en œuvre par le SDAGE Loire-Bretagne.

Faut-il pour autant que le futur arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin versant de l'Oudon intègre un indicateur piézométrique associé à des seuils de gestion dont le franchissement déclencherait la mise en œuvre de mesures de restriction d'usage des eaux souterraines ? Le tableau ci-dessous dresse la liste des arguments pour et des arguments contre une telle démarche afin que l'administration fasse son choix de façon éclairée.

POUR	CONTRE
Rôle prépondérant des eaux souterraines dans le débit de l'Oudon en période d'étiage, notamment dans le sous-BV en amont de Châtellais	Usages en eau souterraine modérés dans le bassin --> leviers d'actions limités en cas de franchissement de seuil
Pas de corrélation entre niveaux piézométriques de Noyant-la-Gravoyère et stations hydrométriques --> les actions déclenchées par l'indicateur hydrométrique peuvent s'avérer inappropriées.	Mais chronique trop courte pour établir des seuils avec ce piézomètre (3 cycles minimums, cf. rapport BRGM/RP-69867-FR)
Comportement inertiel du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère (dynamique pluri-annuelle) : il constitue un bon indicateur de la sécheresse météorologique pluriannuelle (mais pas saisonnière).	
Le piézomètre de Ballots constitue un bon indicateur de l'état des ressources en eau souterraine du BV de l'Oudon.	Bonne corrélation entre niveaux piézométriques moyens mensuels de Ballots et débits moyens mensuels --> indicateur hydrométrique peut se substituer à l'indicateur piézométrique (avec une avance d'un mois)

Tableau 9 : éléments pour ou contre l'intégration d'un indicateur piézométrique dans l'arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin de l'Oudon

5.2. ANALYSE FRÉQUENTIELLE ET PÉRIODES DE RETOUR DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES DE BALLOTS

5.2.1. Analyse fréquentielle

La définition d'indicateurs piézométriques basée sur une analyse fréquentielle des niveaux piézométriques à l'étiage (détermination de fréquence de dépassement de tel ou tel niveau) a déjà été pratiquée en France dans de nombreux cas⁴, notamment dans les bassins Seine-Normandie et Loire-Bretagne. Lorsque la chronique piézométrique de l'ouvrage de référence considéré est suffisamment longue, il est alors possible de calculer des seuils avec une période de retour pertinente.

On définit un niveau piézométrique mensuel de période de retour "n ans sec" en classant les niveaux piézométriques journaliers du mois considéré, pour toute année disponible, par fréquence cumulée : il correspond à une fréquence de 1/n (la période de retour étant l'inverse de la fréquence).

Les indicateurs ainsi déterminés sont donc des variables de contrôle de l'état quantitatif des ressources en eau souterraine de nature probabiliste. En tant que telles, et en conformité avec la circulaire du 18 mai 2011⁵, une gestion quantitative équilibrée de la ressource en eau souterraine se traduira opérationnellement par le **respect pendant l'étiage des niveaux piézométriques de période de retour 5 ans sec deux années sur dix**.

Des précisions sur l'analyse fréquentielle sont fournies en Annexe 5.

5.2.2. Périodes de retour des niveaux piézométriques de Ballots

Le piézomètre de Ballots ([03555X6010/PZ1](#)) constitue le meilleur indicateur des ressources en eau souterraine du bassin versant de l'Oudon car :

- il enregistre les variations piézométriques de l'aquifère du socle ;
- sa chronique est la plus longue disponible dans le bassin versant ;
- il est le mieux corrélé aux autres piézomètres du bassin, et il est à ce titre le piézomètre le plus représentatif de la situation piézométrique du bassin (cf. Tableau 2) ;
- son utilisation pour concevoir quatre modèles globaux a donné de très bon résultats (cf. Tableau 7).

L'analyse fréquentielle mensuelle des niveaux piézométriques enregistrés à Ballots dans l'aquifère du socle a permis de calculer, au moyen d'un programme en langage Python développé dans une étude antérieure (Chrétien, 2019), des niveaux piézométriques mensuels « seuils » de périodes de retour 5 ans sec, 10 ans sec et 15 ans sec (cf. Tableau 10).

⁴ cf. notamment Seguin et collab. (2009), Lucassou et collab (2015), Seguin (2016), Chrétien (2018 & 2019).

⁵ Circulaire du 18/05/2011 relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse.

Mois	5 ans sec	10 ans sec	15 ans sec
Janvier	82.9	82.46	82.3
Février	83.6	83.36	83.26
Mars	84.32	83.6	83.56
Avril	84.77	83.8	83.59
Mai	84.67	83.92	83.73
Juin	84.12	83.41	83.29
Juillet	83.23	82.71	82.52
Août	82.47	81.95	81.74
Septembre	81.77	81.62	81.34
Octobre	81.65	81.17	81.11
Novembre	81.6	81.02	80.89
Décembre	81.75	81.42	81.21

Tableau 10 : niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5, 10 et 15 ans sec

Les niveaux piézométriques de périodes de retour 10 ans sec et 15 ans sec sont parfois très proches (c'est en particulier le cas en mars, octobre, novembre). Considérant cela, il pourrait s'avérer judicieux, car plus pratique, d'envisager un niveau piézométrique mensuel intermédiaire équidistant (c'est-à-dire qui soit la moyenne) du niveau 5 ans sec et du niveau 15 ans sec (cf. Tableau 11).

Mois	5 ans sec	Moyenne 5-15 ans sec	15 ans sec
Janvier	82.9	82.60	82.3
Février	83.6	83.43	83.26
Mars	84.32	83.94	83.56
Avril	84.77	84.18	83.59
Mai	84.67	84.20	83.73
Juin	84.12	83.71	83.29
Juillet	83.23	82.88	82.52
Août	82.47	82.11	81.74
Septembre	81.77	81.56	81.34
Octobre	81.65	81.38	81.11
Novembre	81.6	81.25	80.89
Décembre	81.75	81.48	81.21

Tableau 11 : niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5 et 15 ans sec et niveaux piézométriques mensuels intermédiaires calculés à partir de ceux-ci

L'illustration 15 présente les trois seuils de gestion mensuels proposés. Seules les chroniques piézométriques des années 2017, 2019 et 2020 figurent sur l'illustration, pour alléger le graphique.

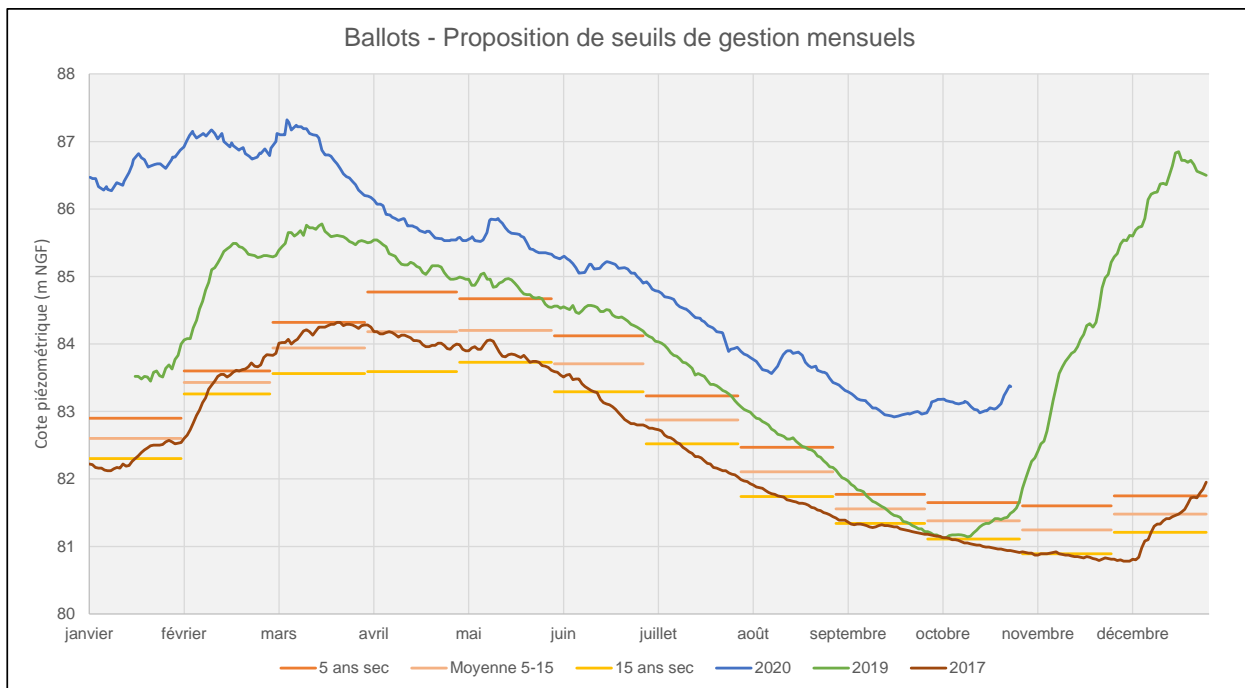


Illustration 15 : chronique de Ballots et seuils de gestion mensuels proposés

6. Conclusion

L'étude menée avec le concours de la DDT de la Mayenne a mis en avant les points suivants :

- Le comportement atypique de Noyant-la-Gravoyère est confirmé par l'analyse des séries temporelles. Sa forte inertie, sa dynamique à dominante pluriannuelle et sa mauvaise corrélation avec les débits des rivières du bassin en font un piézomètre singulier par rapport aux autres piézomètres du bassin versant de l'Oudon.
- Les autres piézomètres du bassin sont au contraire réactifs et bien corrélés avec les débits des cours d'eau. Il ressort également de l'analyse que le piézomètre de Ballots est le plus représentatif des piézomètres du bassin de l'Oudon.
- Le rôle des eaux souterraines pour le soutien d'étiage de l'Oudon est variable selon les piézomètres et stations hydrométriques retenus pour la modélisation :
 - Il est très important pour la modélisation des débits de Châtellais, où les eaux souterraines contribuent pour plus d'un tiers du débit annuel du cours d'eau.
 - Il est plus modéré en tête de bassin versant à Cossé-le-Vivien.
 - À Segré, la faible part des eaux souterraines dans le débit de l'Oudon est probablement le reflet du comportement atypique du piézomètre de Noyant-la-Gravoyère (forte inertie).

Notre analyse ne nous permet pas de conclure de manière univoque pour ou contre l'intégration d'un volet spécifique « eaux souterraines » dans le futur arrêté cadre sécheresse interdépartemental du bassin versant de l'Oudon. Le cas échéant, le choix pour un piézomètre indicateur de la ressource en eau souterraine du bassin versant de l'Oudon devrait se porter sur le piézomètre de Ballots. L'analyse fréquentielle mensuelle des niveaux piézométriques de cet ouvrage a permis de calculer les niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5 ans sec, 10 ans sec et 15 ans sec.

Les modèles globaux élaborés dans le cadre de l'étude peuvent désormais être utilisés en mode prévision, pour simuler les débits de l'Oudon à Segré et Châtellais et les niveaux piézométriques à Noyant-la-Gravoyère, Ballots et Cossé selon des scénarios climatiques pour les mois ou années à venir. Ils pourraient notamment être mis à profit pour disposer de la situation des nappes dans le futur, dans le cadre du programme scientifique « MétéEAU Nappes » développé par le BRGM.

7. Bibliographie

Caballero Y., Wyns R., Miehe J.M. et collab. (2007) – Estimation de la réserve en eau souterraine participant au soutien d'étiage des rivières, dans le socle granitique de corse. Application au bassin versant du haut-Rizzanese. Rapport final. BRGM/RP-55121-FR, 105 p., 65 ill., 1 ann.

Chrétien P. (2013) – Contribution à l'élaboration d'indicateurs pour la gestion des eaux souterraines en période d'étiage dans le Maine-et-Loire. Rapport final. BRGM/RP-62013-FR, 76 p., 19 ill., 15 tab., 4 ann.

Chrétien P., Lucassou F. Rouxel E. et collab. (2014) – Synthèse hydrogéologique des Pays-de-la-Loire. Rapport final. BRGM/RP-64044-FR, 123 p.

Chrétien P. (2018) – Révision des indicateurs piézométriques du Maine-et-Loire. Rapport final. BRGM/RP- 68436-FR, 46 p., 1 ill., 15 tabl., 1 ann.

Chrétien P. (2019) – Définition d'indicateurs piézométriques en Loire-Atlantique. Rapport final. BRGM/RP-69140-FR, 160 p., 131 ill., 18 tabl., 2 ann.

Lachassagne P. et collab. (2001) – Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers : downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Groundwater*, vol.39, (4), pp. 568-581.

Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R. (2014). The conceptual model of weathered hard rock aquifers and its practical applications, in "Fractured Rock Hydrogeology", N°20 International Association of Hydrogeologists Selected Papers, Editor J.

M. Sharp, Jr, CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 13-46

Laurencelle M., Allier D., Henriot A., Manceau J.C. (2020) – Calcul de l'inertie des aquifères de France métropolitaine à partir de chroniques piézométriques. Rapport final. BRGM/RP-70030-FR, 35 p., 3 fig., 6 tabl., 2 ann.

Lucassou F., Mougin B., avec la collaboration de Stollsteiner P. (2015) – Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor. Rapport final. BRGM/RP-64123-FR, 156 p. 74 ill. 6 ann.

Manceau J.C., Allier D., Buscarlet E. (2020) – Analyse de la sécheresse hydrogéologique dans la région Grand Est – Phase 2 : amélioration des indicateurs de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69867-FR, 371 p. 29 ill., 4 tabl., 5 ann., 1CD.

Mougin B., Allier D. Blanchin A., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E. et collab. (2008) – SILURES Bretagne – Rapport final – Année 5 - BRGM/RP-56457-FR. 129 p., 37 ill., 7 ann. dont 2 planches.

Nash, J.E. and Sutcliffe J.V. (1970) – River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp. 282-290.

Rosenbrock H.H. (1960) – An automatic method for finding the greatest or the least value of a function. *Computer journal* 3.3., pp. 175-184, Oct. 1960.

Seguin J.J., Gomez E., Wuilleumier A. (2009) – Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR.

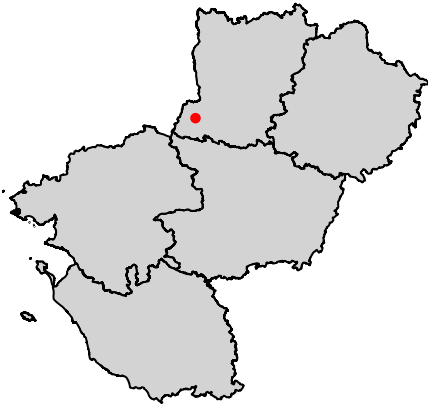
Seguin J.J. (2016) – Analyse de quinze séries piézométriques de la nappe des Calcaires de Beauce. Rapport final. BRGM/RP-65964-FR. 110 p., 71 fig., 3 ann.

Seguin J.J., Allier D., Croiset N., Klinka T. et Manceau J.C. (2018) – ESTHER. Études de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final BRGM/RP-67518-FR, 299 p., 126 fig., 10 ann.

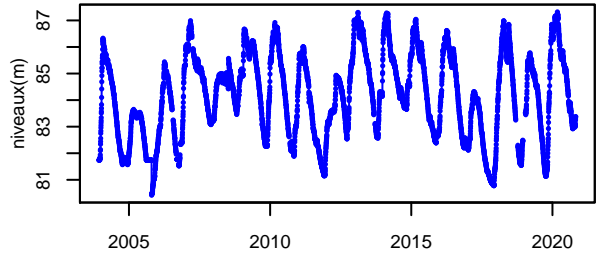
Thiéry D. (2014) – Logiciel GARDENIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 128 p., 65 fig., 2 ann.

Annexe 1

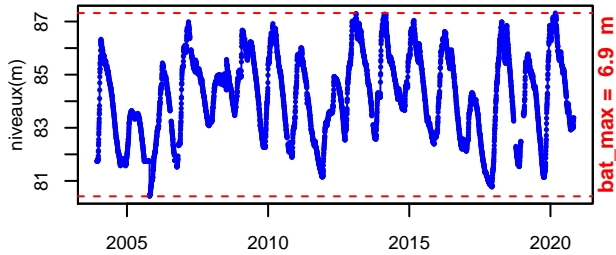
Inertie des piézomètres du bassin versant de l'Oudon



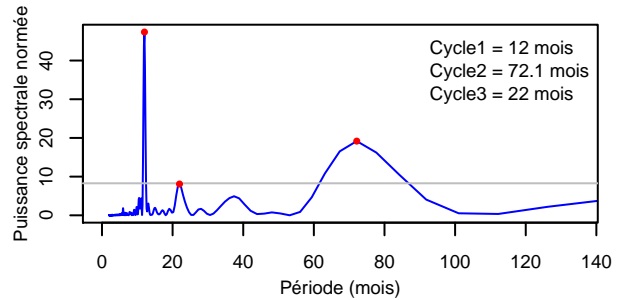
Chronique brute initiale



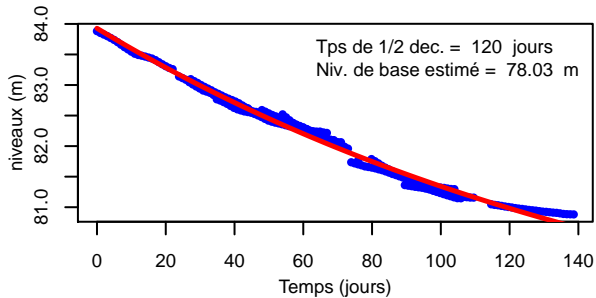
Chronique prise en compte et battement max.

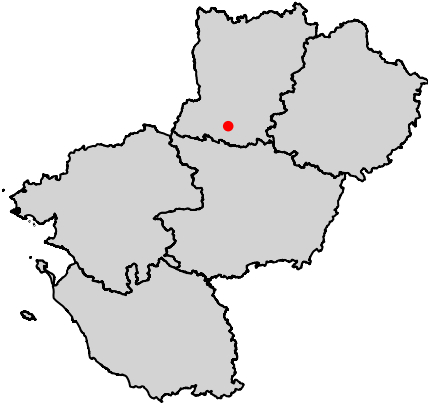


Périodogramme

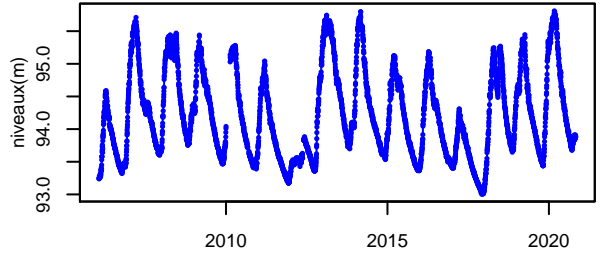


Courbe de décharge

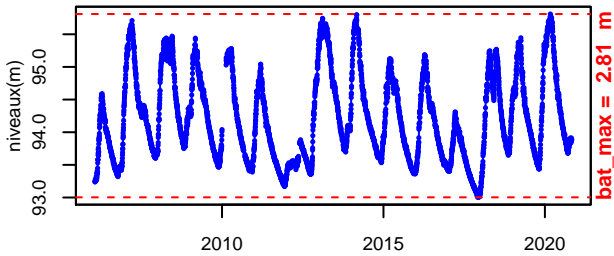




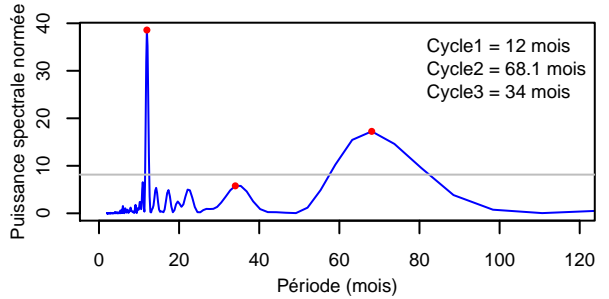
Chronique brute initiale



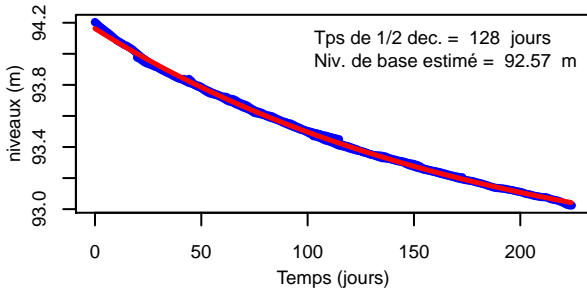
Chronique prise en compte et battement max.

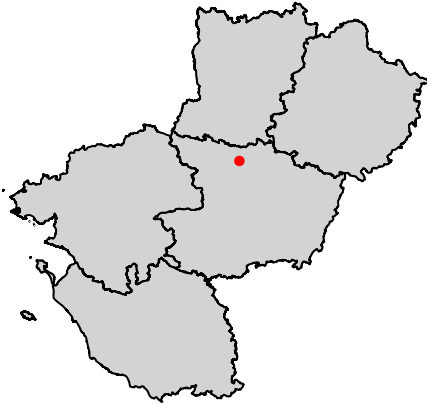


Périodogramme

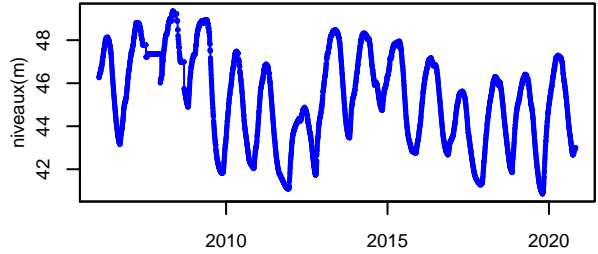


Courbe de décharge

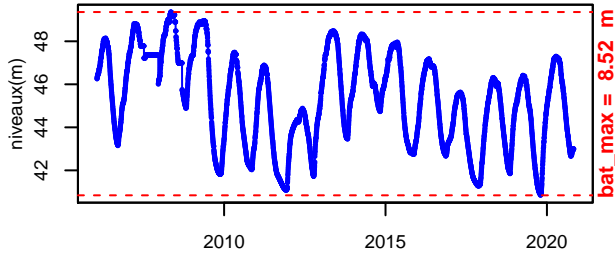




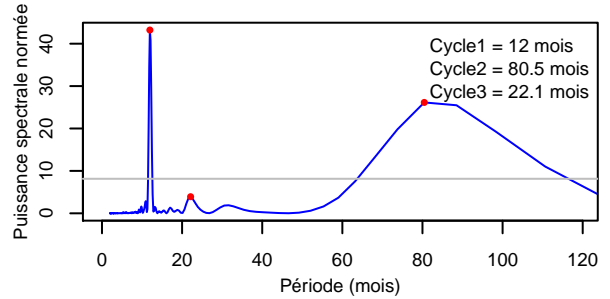
Chronique brute initiale



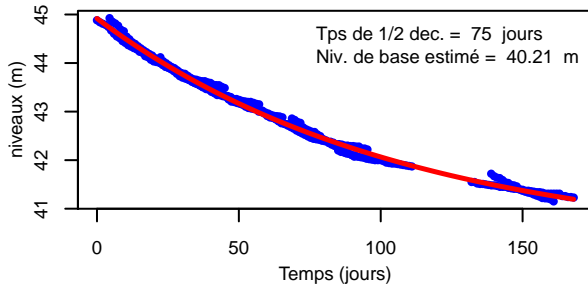
Chronique prise en compte et battement max.

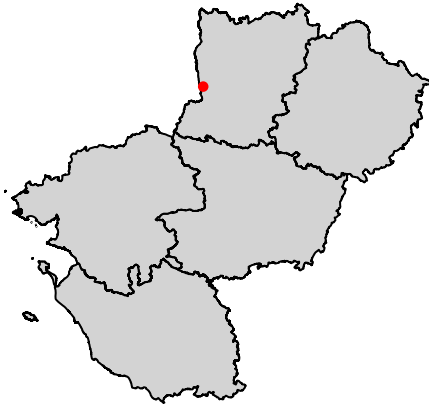


Périodogramme

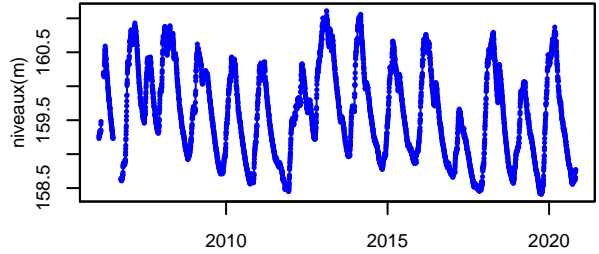


Courbe de décharge

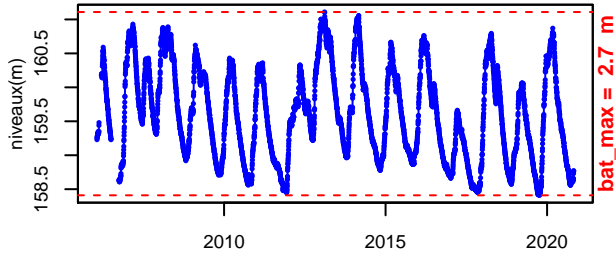




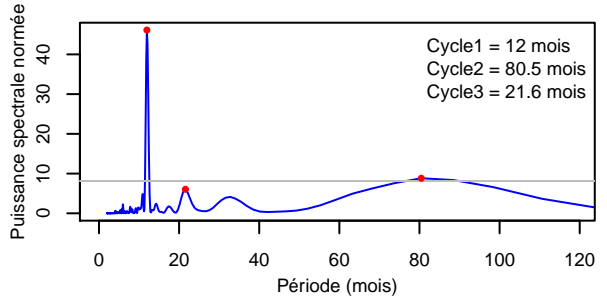
Chronique brute initiale



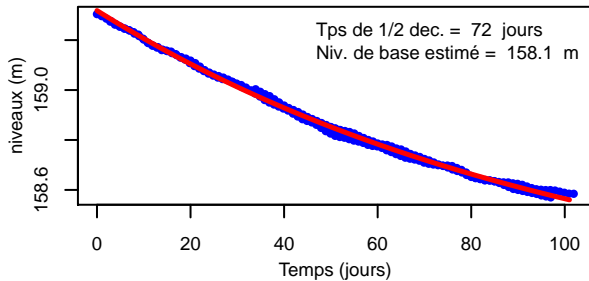
Chronique prise en compte et battement max.

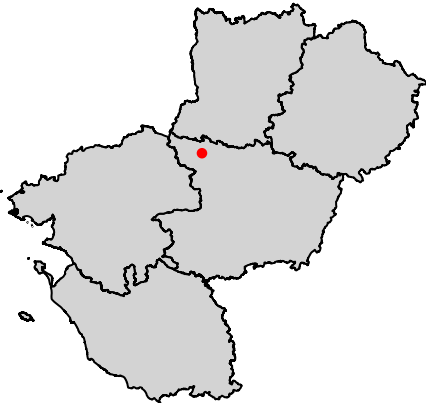


Périodogramme

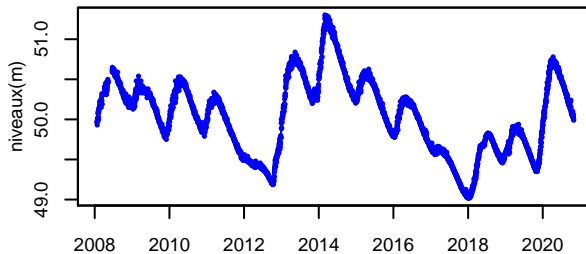


Courbe de décharge

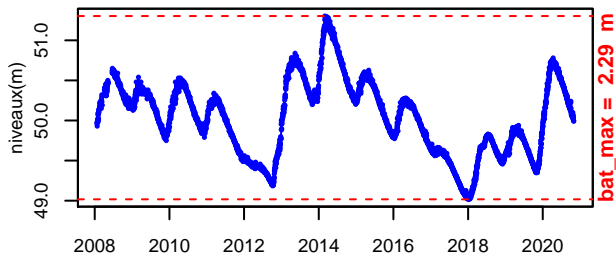




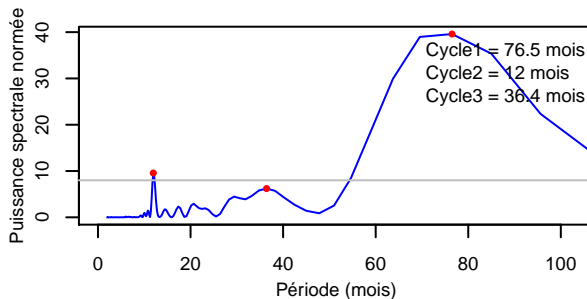
Chronique brute initiale



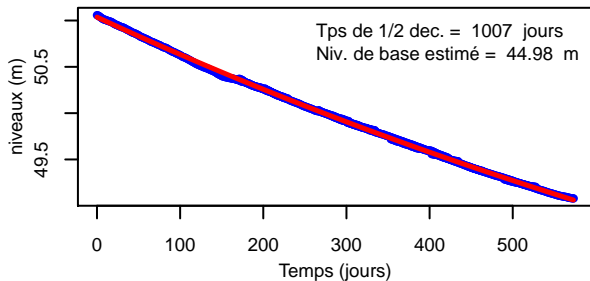
Chronique prise en compte et battement max.



Périodogramme



Courbe de décharge

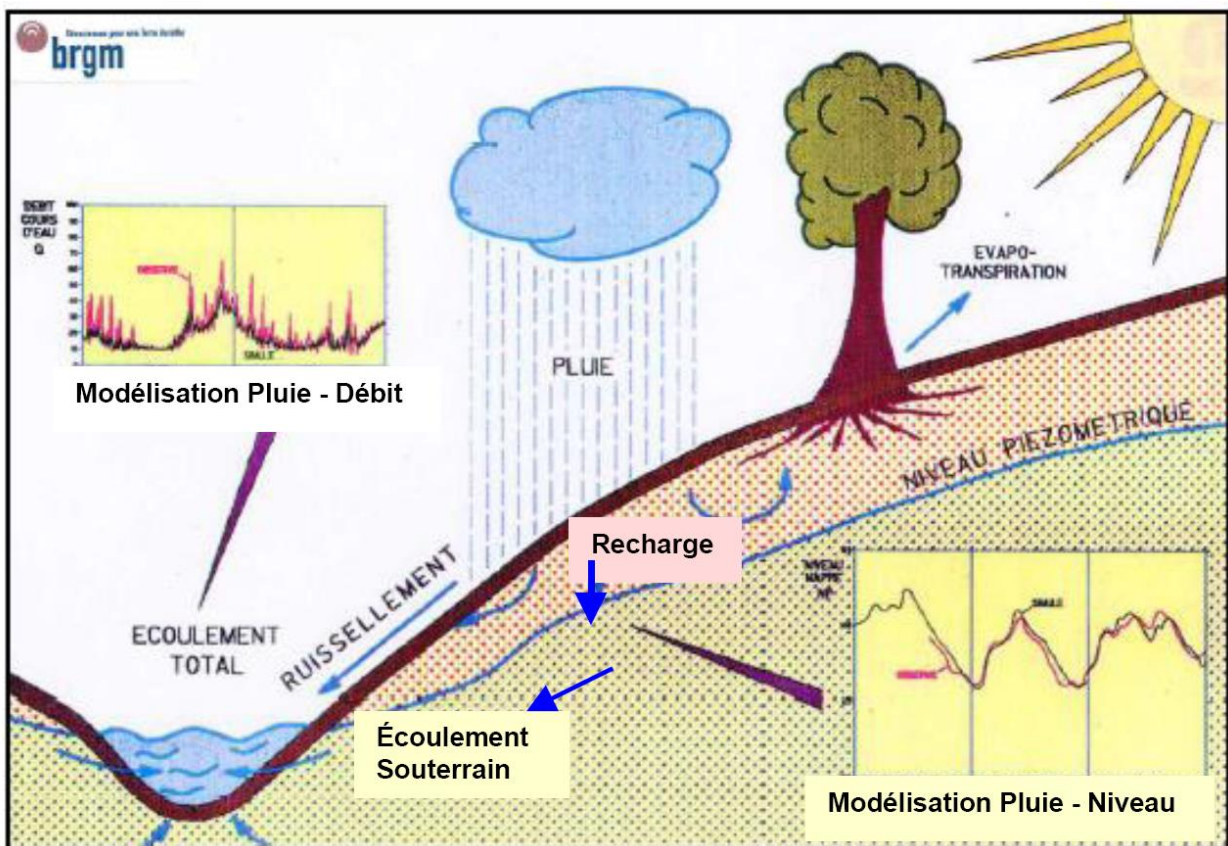


Annexe 2

Description du logiciel GARDENIA

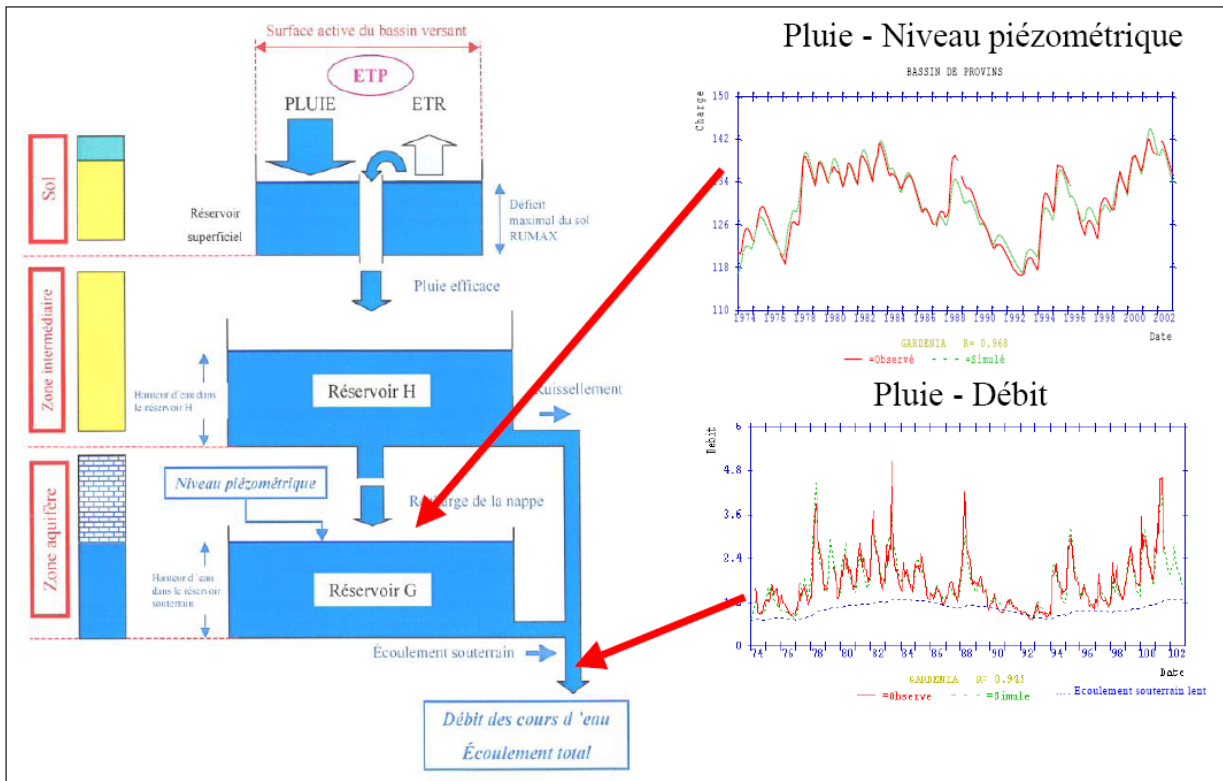
(Le contenu de cette annexe est adapté du rapport BRGM/RP-64123-FR de Lucassou et collab., 2015.)

La compréhension d'un hydro-système peut être facilitée par la mise en place d'un modèle représentant de manière schématisée la réalité. Le logiciel de modélisation GARDENIA® (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères), développé par le BRGM, est utilisé dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et éventuellement prévoir des niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant (Thiéry, 2014 : rapport BRGM/RP-62797-FR). Il permet de modéliser le fonctionnement d'un hydro-système, tel que celui schématisé sur l'illustration ci-dessous.



Il permet de simuler le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou jusqu'au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique). Ce modèle est « global » car il considère des données d'entrée non spatialisées, pluie et évapotranspiration potentielle, et en sortie, débit à l'exutoire et/ou niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Le logiciel GARDENIA simule le cycle de l'eau en utilisant plusieurs réservoirs « en cascade ».



Les modélisations de la présente étude ont été réalisées avec un modèle à un ou deux réservoirs pour simuler les différents régimes d'écoulement souterrain existant dans les aquifères du bassin versant de l'Oudon. Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant. Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les valeurs de ses paramètres de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits et/ou des niveaux piézométriques aussi proches que possible des débits et/ou des niveaux piézométriques observés (Thiéry, 2014) en exploitant l'ensemble des données disponibles tout en veillant à conserver des paramètres aussi réalistes que possible. Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés. L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960). Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées (coefficient d'ajustement R). Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur, qui peut le contraindre notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Le coefficient d'ajustement R est égal à la racine du coefficient de Nash-Sutcliffe (1970). Le coefficient de Nash (NTD) est défini par :

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

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

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

Le critère de Nash varie entre $-\infty$ et 1. Pour un modèle parfait ce coefficient est égal à 1. Un coefficient égal à 0 indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que l'utilisation de la moyenne des données observées. **On considère généralement que la simulation est correcte (exploitable) à partir de valeurs du critère de Nash supérieures à 0.7.**

Une fois calé, le modèle est en mesure de :

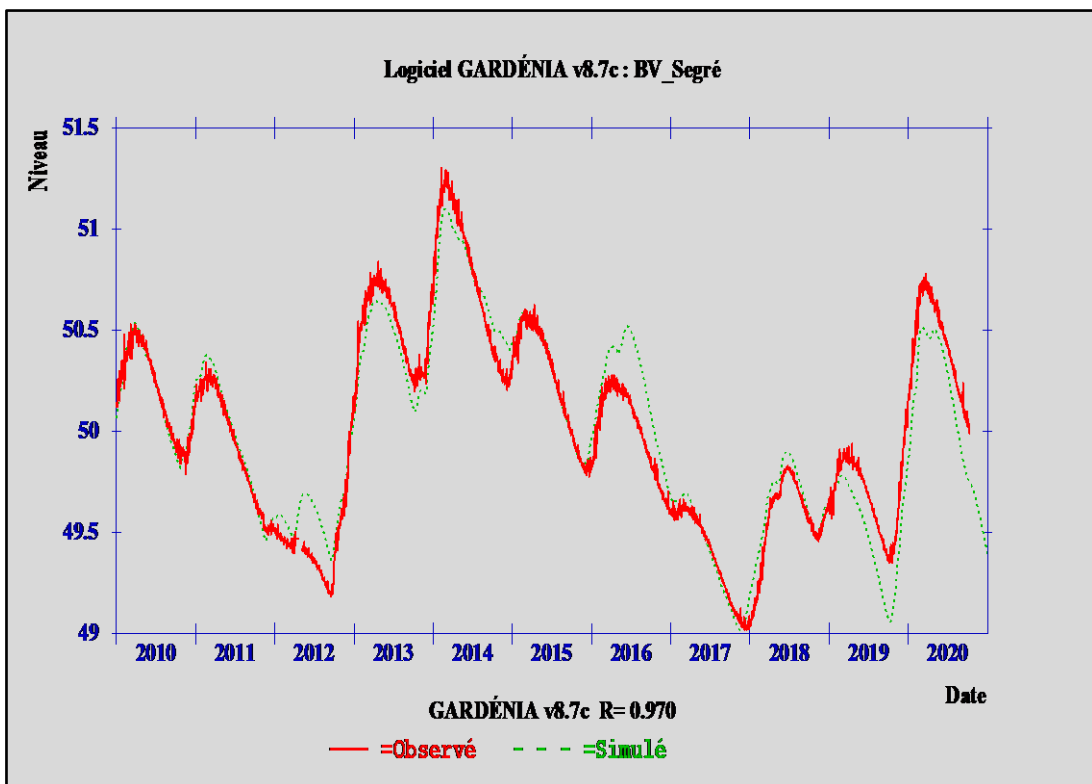
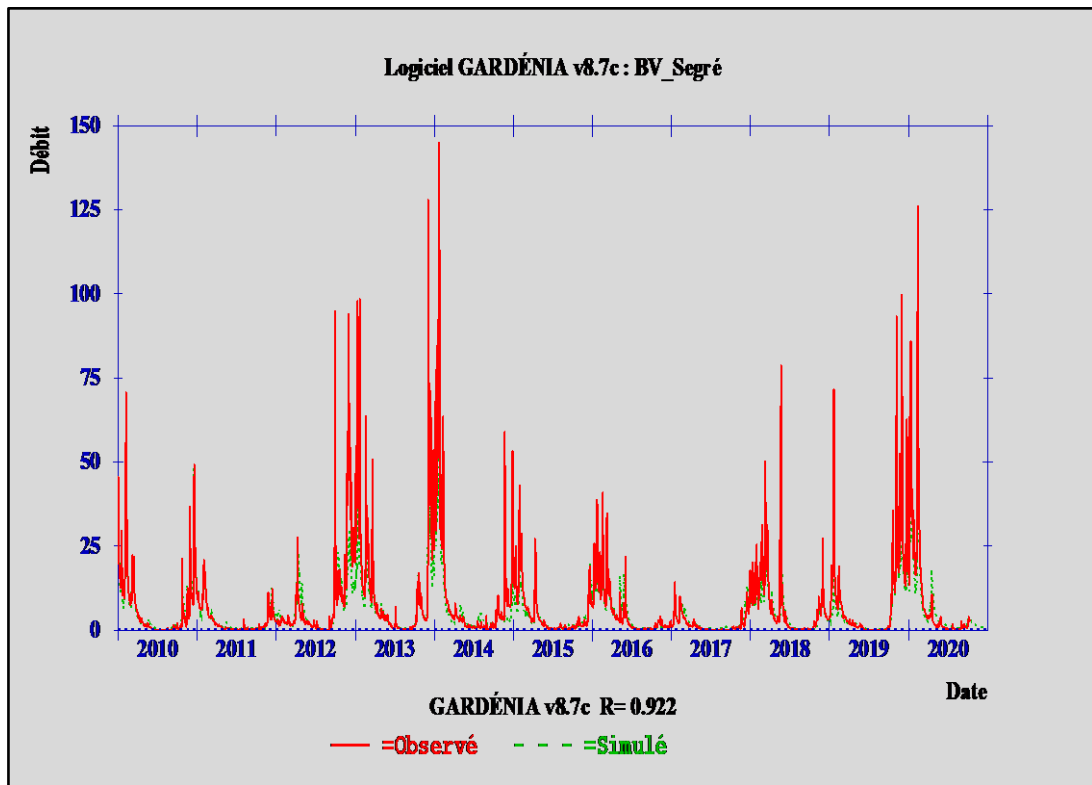
- Calculer les différents termes du bilan hydrologique en permettant notamment, dans une certaine mesure, de différencier les deux composantes de l'écoulement :
 - celle rapide que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel (et à la composante rapide des écoulements karstiques dans un milieu sédimentaire)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

Dans le cadre de cette étude, les modélisations des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques ont été réalisées simultanément au pas de temps journalier à partir des données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (données météorologiques journalières). Les prélèvements moyens, issus des données annuelles de redevance de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne pour les années 1999 à 2018, ont également été intégrés. Pour les usages « irrigation », les prélèvements ont été ventilés sur 100 jours du 24 mai au 31 août, et ramenés à un débit instantané (moyen) exprimé en m^3/s . Pour les usages industries, eau potable et cheptel, les usages ont été moyennés sur 365 jours et ramenés à un débit instantané (moyen) exprimé en m^3/s . Par exemple, le prélèvement d'un irrigant de $10\,000\ m^3$ pour l'année 2018 est introduit dans le modèle GARDENIA par un débit sortant (négatif) instantané de $-\frac{10\,000}{100 \times 24 \times 3600} = -0,00116\ m^3/s$. Un prélèvement d'eau potable de $500\,000\ m^3$ pour l'année 2015 est introduit dans le modèle GARDENIA par un débit sortant (négatif) instantané de $-\frac{500\,000}{365 \times 24 \times 365} = -0,01585\ m^3/s$.

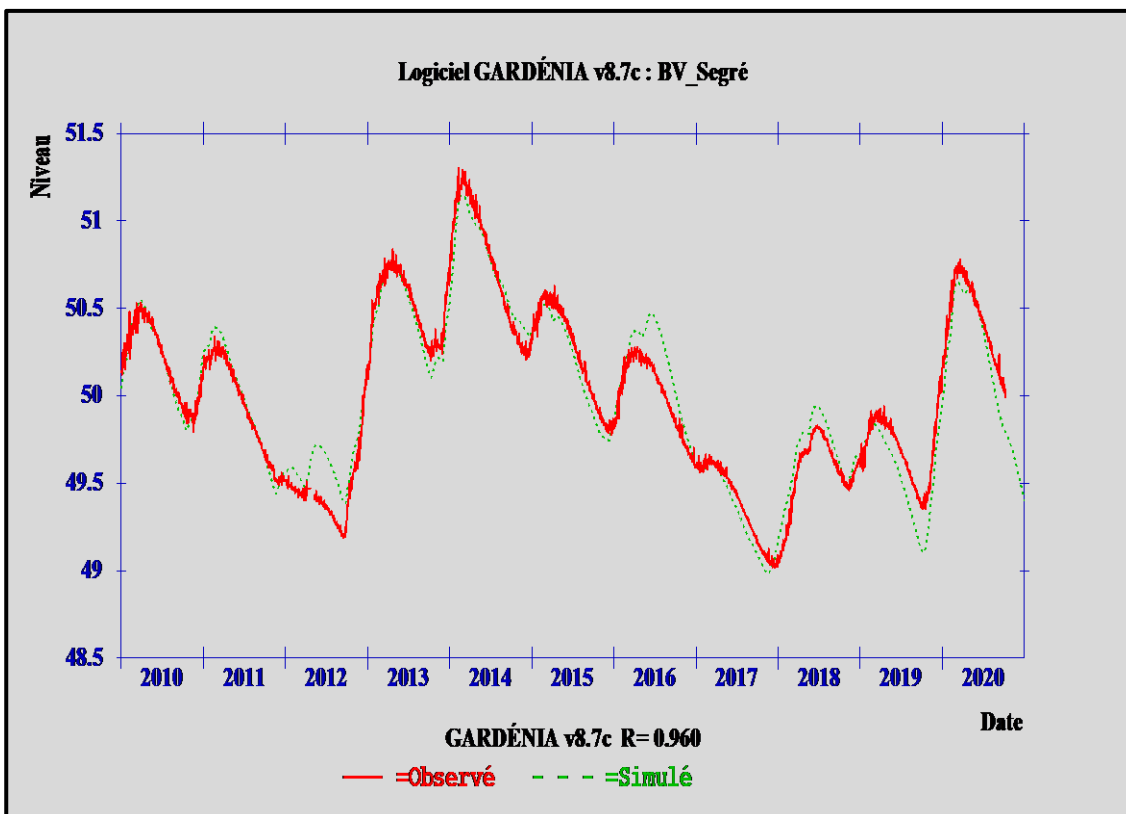
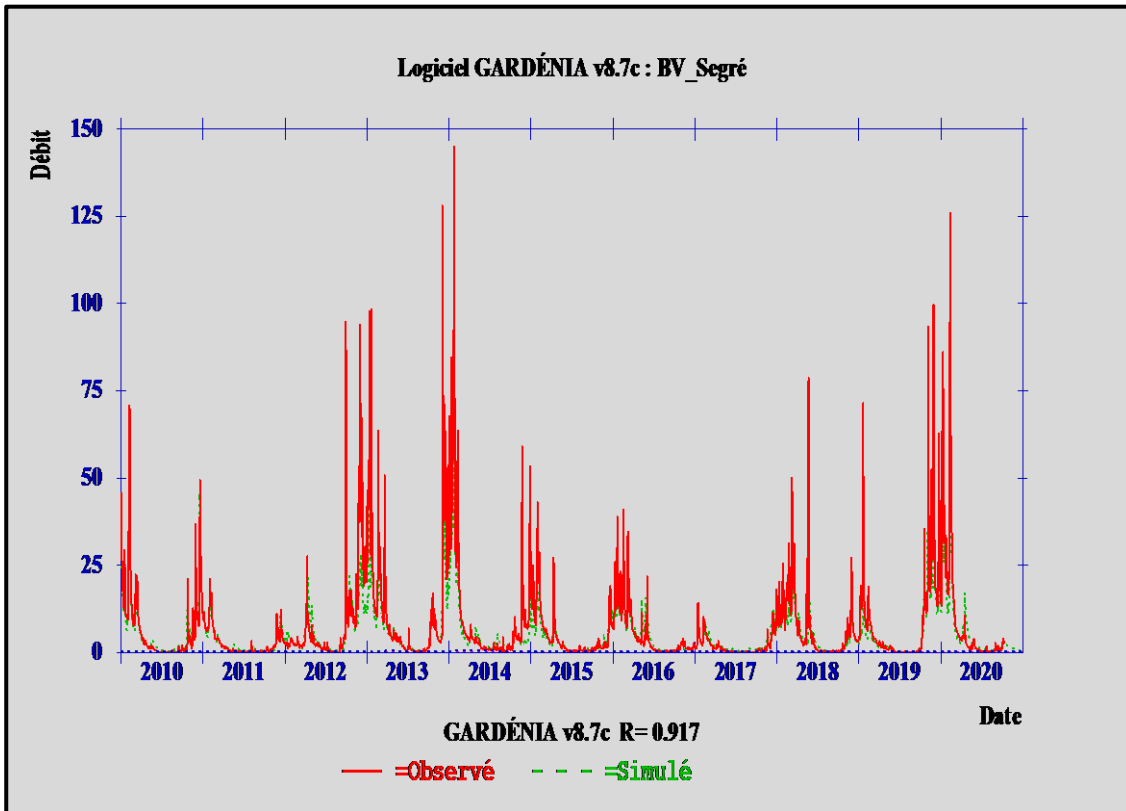
Annexe 3

Modélisations globales : débits et niveaux piézométriques observés et simulés

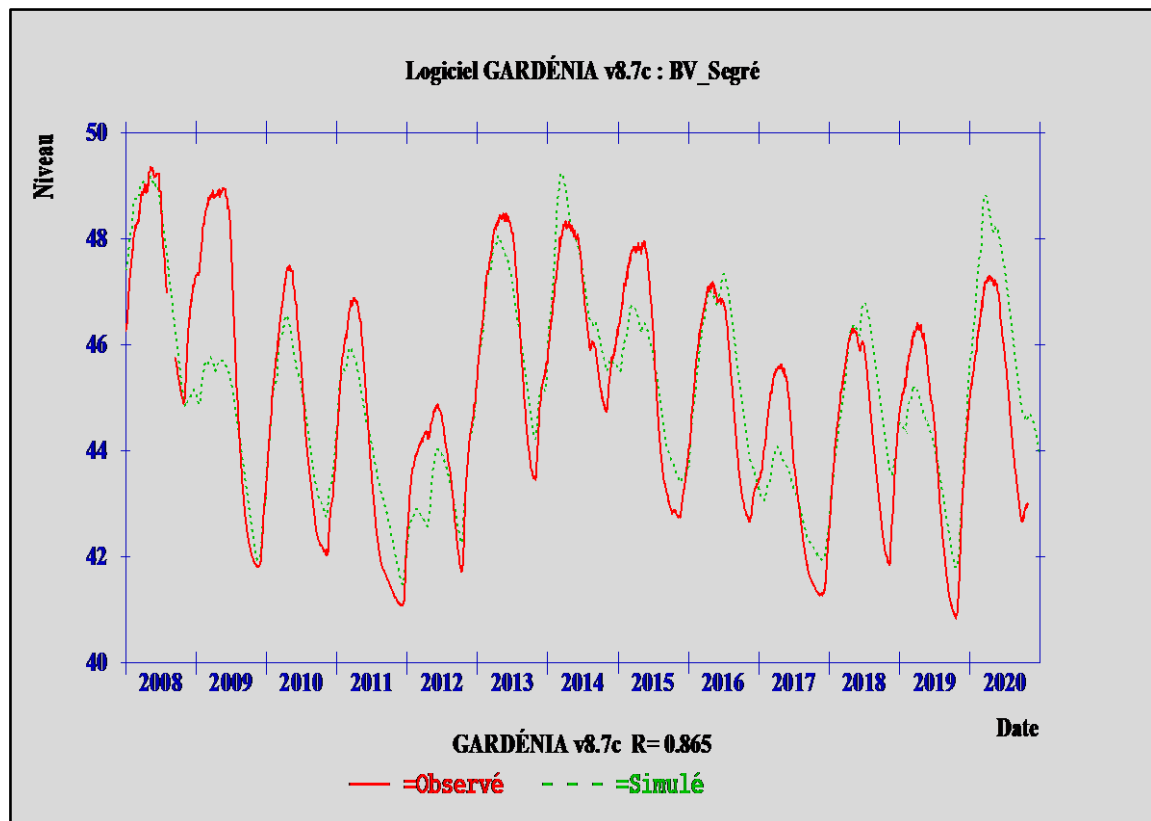
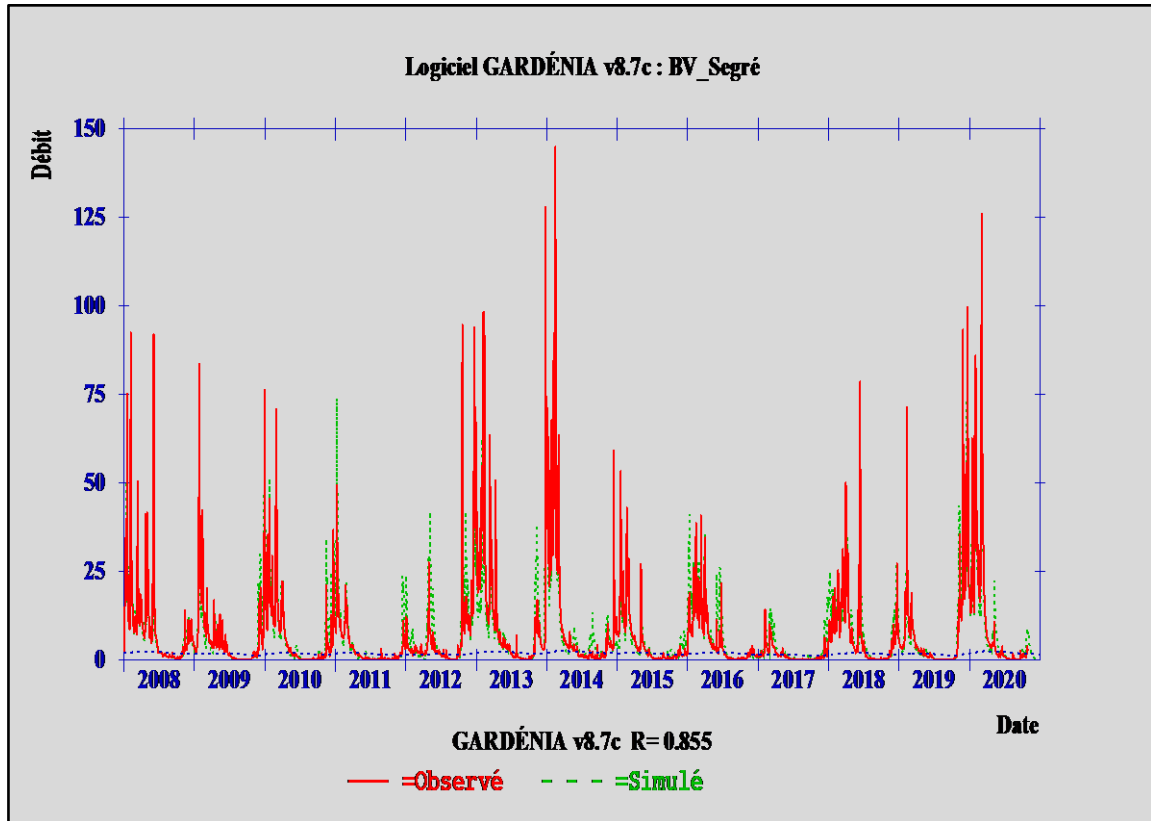
Modèle 1 : Q_Ségré_Pz_NG_1Rés



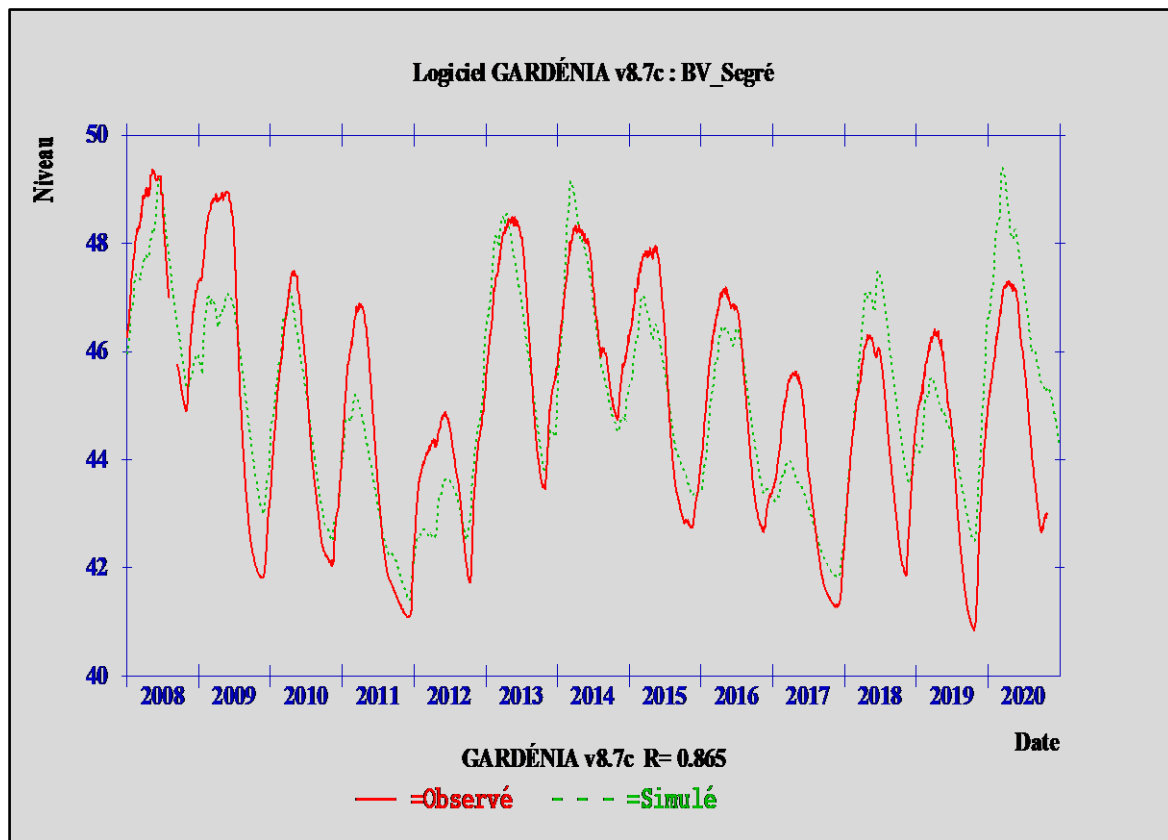
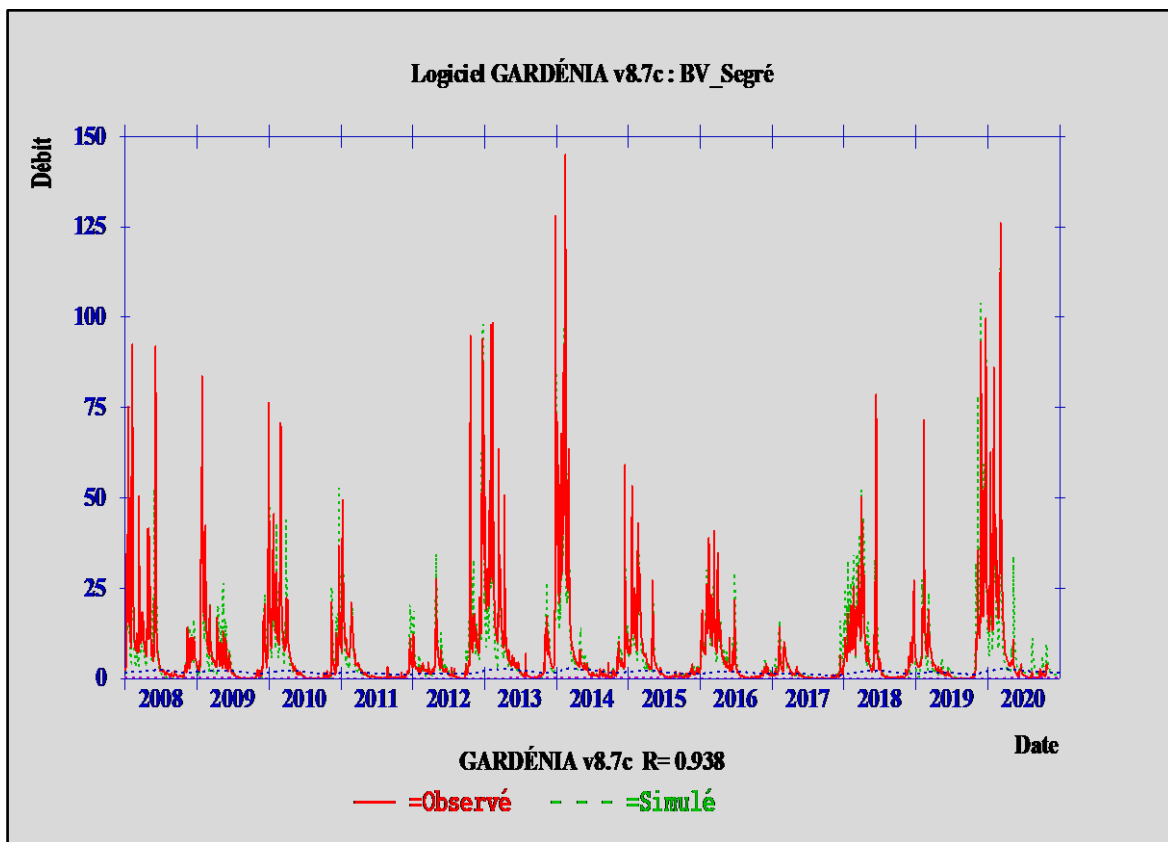
Modèle 2 : Q_Ségré_Pz_NG_2Rés



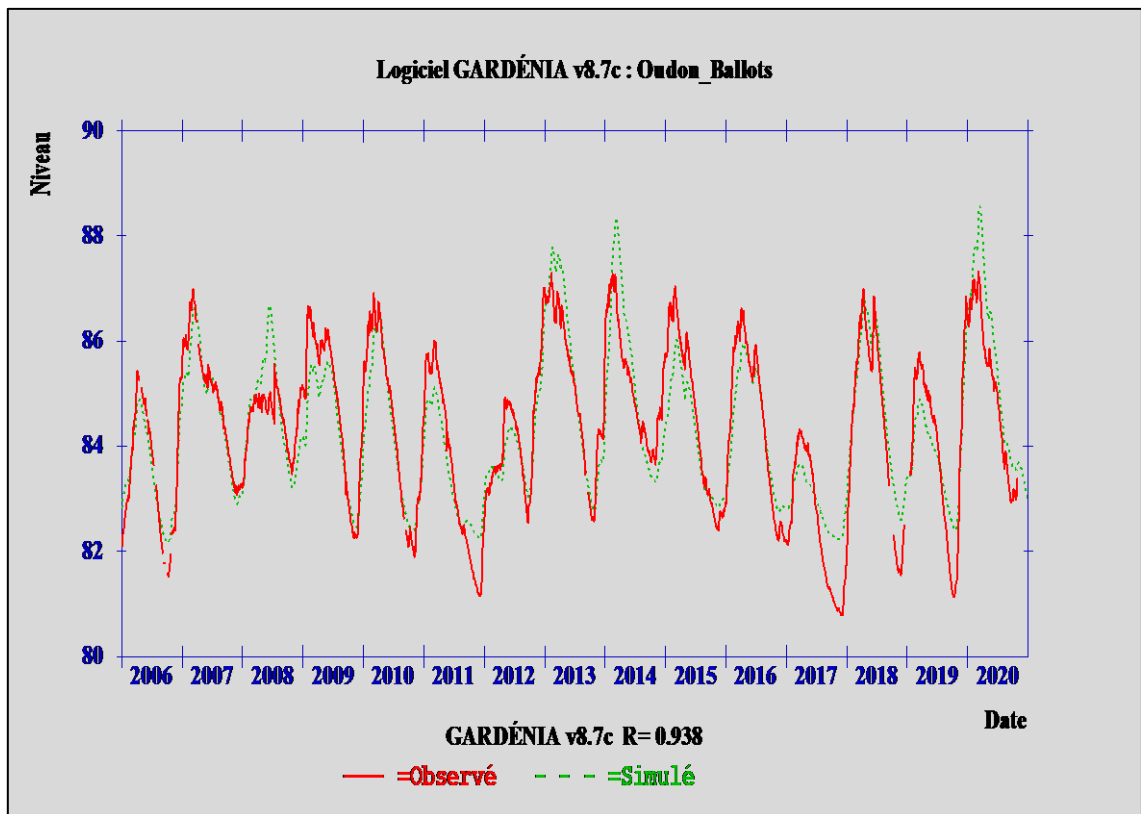
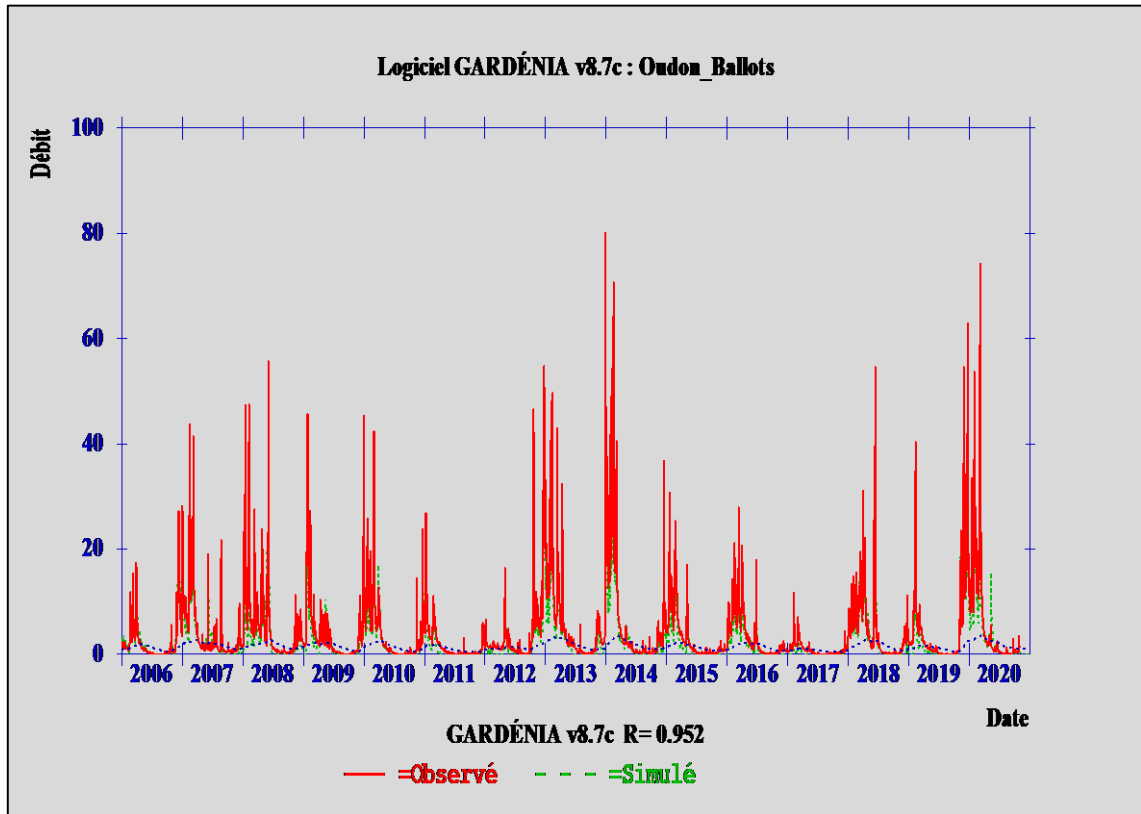
Modèle 3 : Q_Ségré_Pz_Champ_1Rés



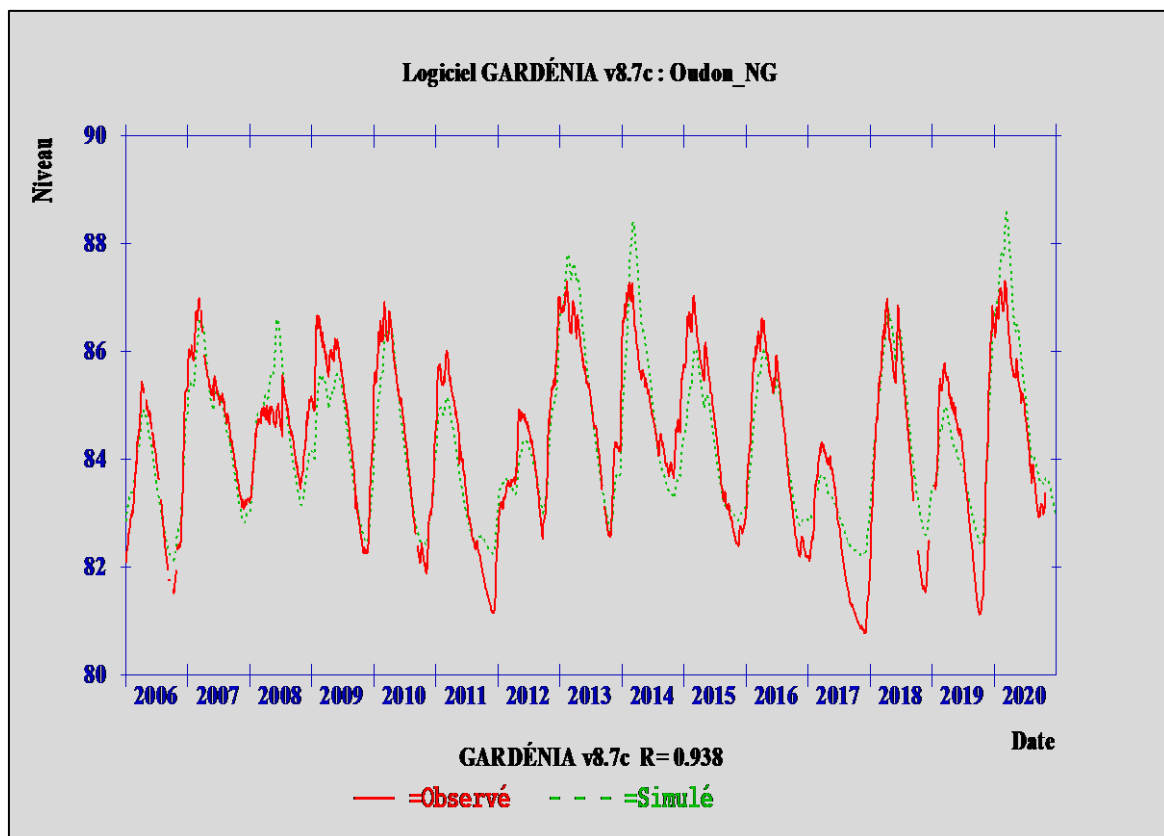
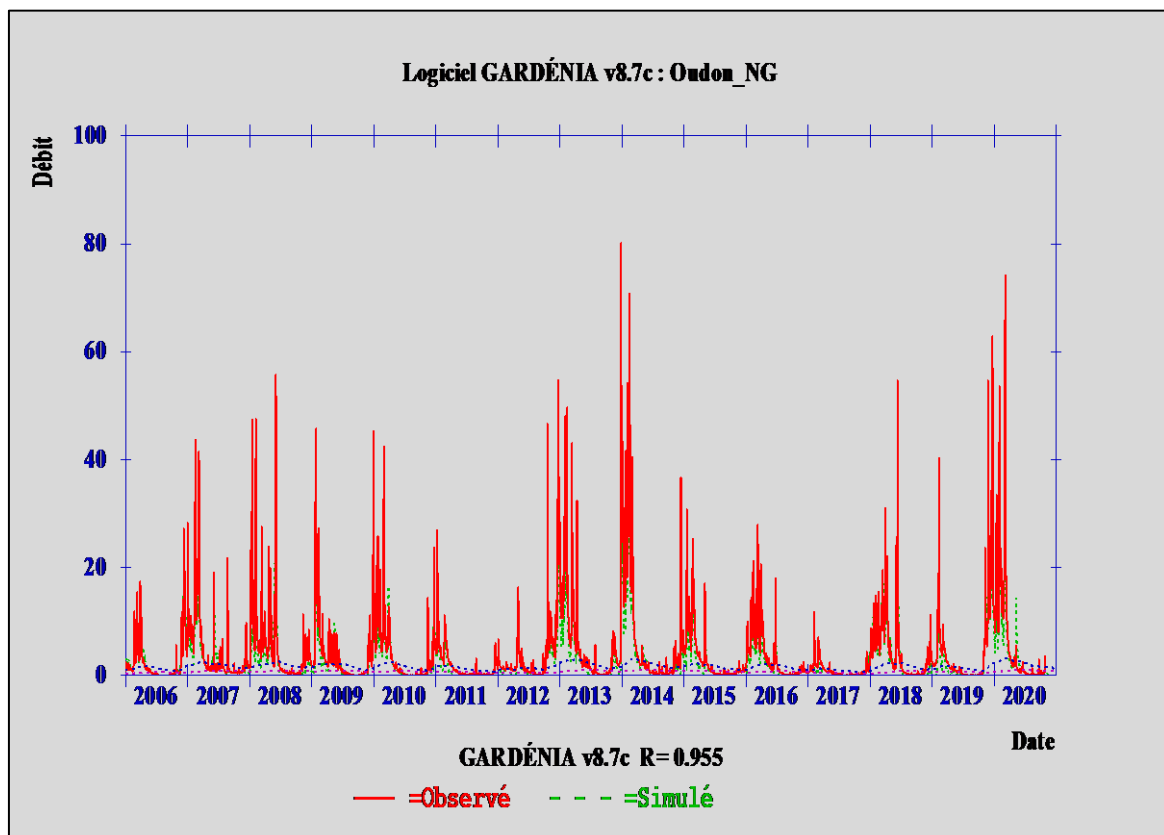
Modèle 4 : Q_Ségré_Pz_Champ_2Rés



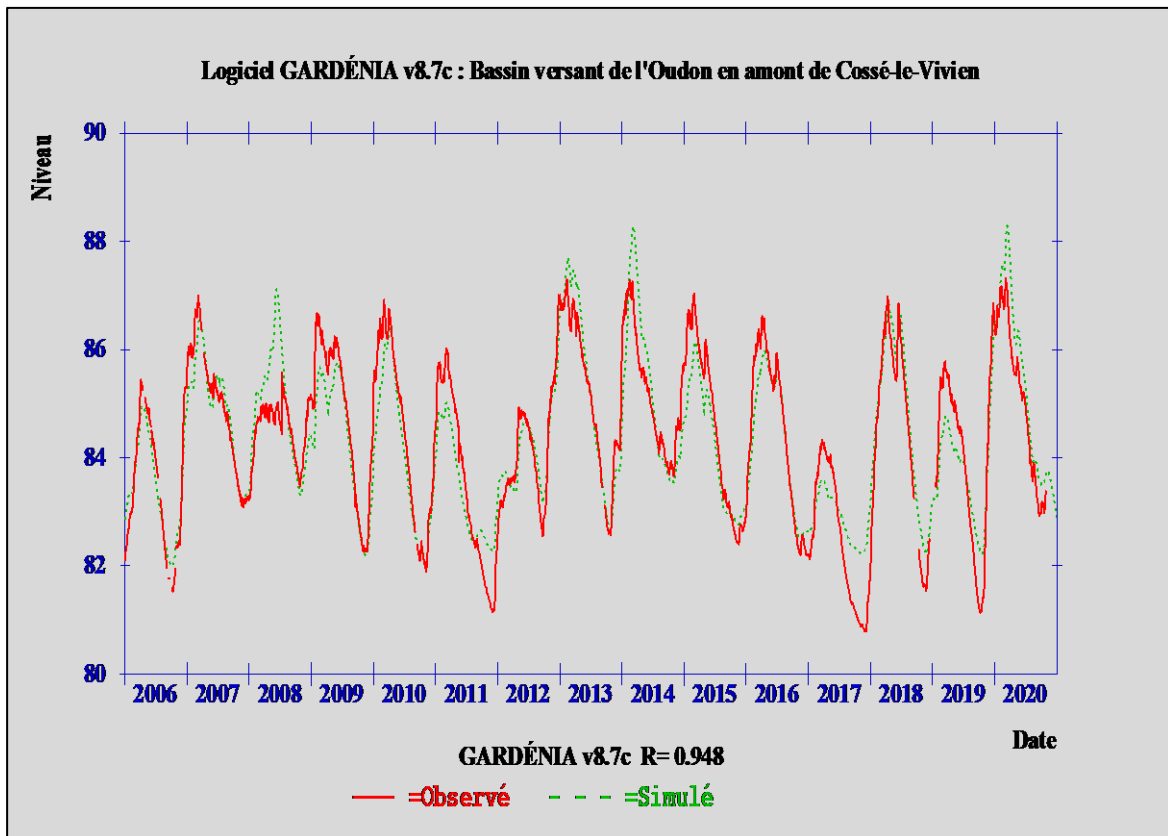
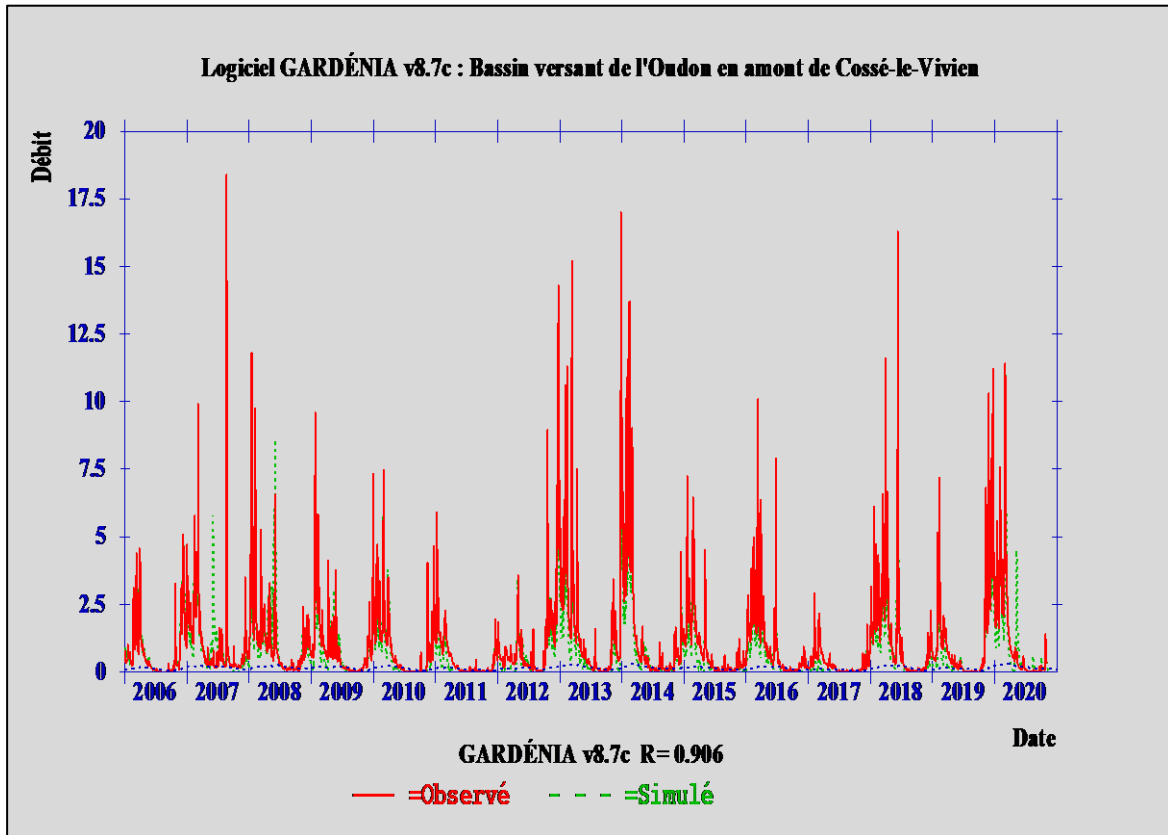
Modèle 5 : Q_Châtelais_Pz_Bal_1Rés



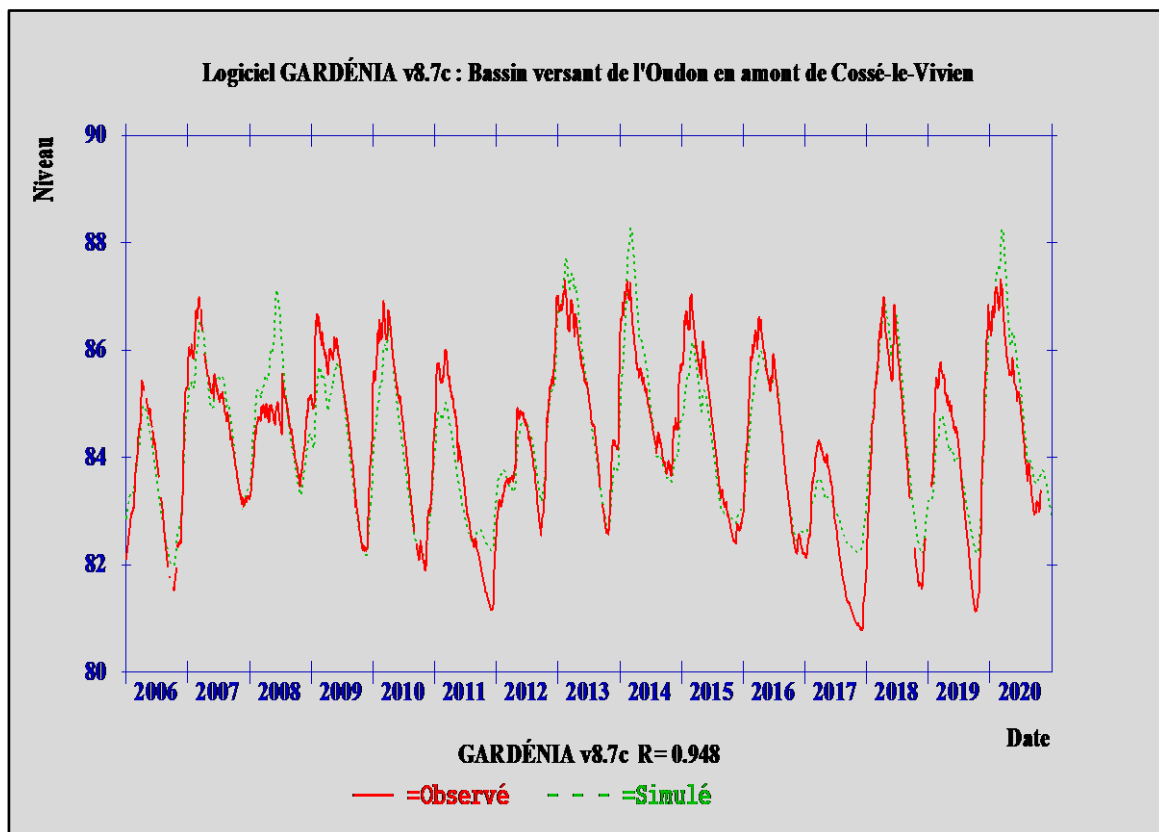
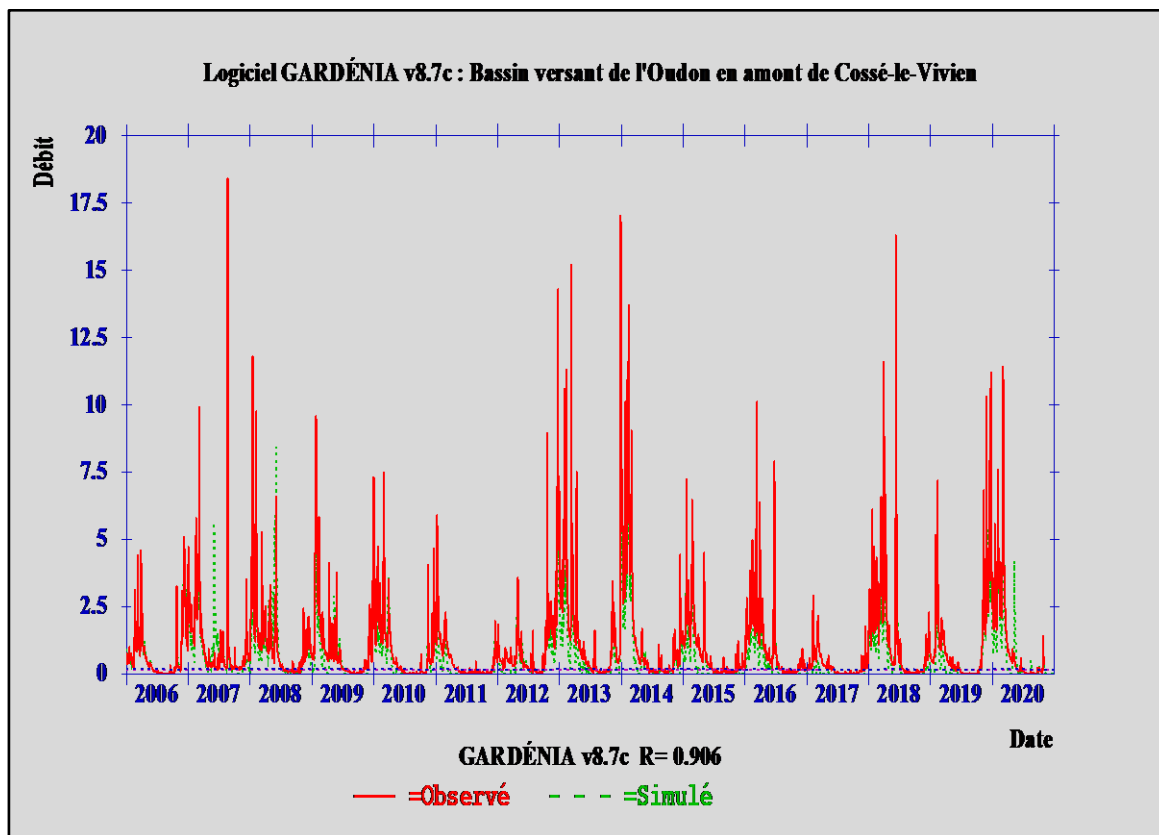
Modèle 6 : Q_Châtellais_Pz_Bal_2Rés



Modèle 7 : Q_Cossé_Pz_Bal_1Rés



Modèle 8 : Q_Cossé_Pz_Bal_2Rés



Annexe 4

Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Oudon – Sous-bassins versants de Segré, Châtelais et Cossé-le-Vivien

Modèle 2 : débits de Segré, niveaux piézométriques de Noyant-la-Gravoyère, précipitations d'Angrié, ETP d'Arbrissel

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne mensuelle
Janvier	2%	4%	3%	5%	8%	2%	1%	4%	3%	11%	3%	5%	2%	4%
Février	2%	7%	2%	5%	15%	3%	3%	5%	3%	6%	3%	5%	1%	5%
Mars	4%	9%	4%	12%	14%	4%	12%	11%	3%	10%	2%	13%	9%	8%
Avril	4%	8%	15%	24%	3%	8%	10%	7%	9%	18%	6%	16%	5%	10%
Mai	6%	12%	16%	21%	7%	9%	10%	14%	4%	23%	4%	18%	12%	12%
Juin	18%	25%	23%	27%	16%	20%	22%	25%	7%	27%	7%	31%	24%	21%
Juillet	31%	40%	40%	31%	26%	24%	18%	42%	25%	35%	22%	47%	42%	33%
Août	41%	55%	41%	29%	41%	40%	13%	37%	42%	34%	39%	59%	53%	40%
Septembre	52%	66%	26%	42%	7%	44%	22%	28%	52%	29%	53%	53%	30%	39%
Octobre	17%	53%	9%	47%	2%	5%	11%	26%	47%	29%	40%	4%	16%	23%
Novembre	9%	5%	4%	11%	3%	8%	12%	13%	33%	11%	6%	1%		10%
Décembre	13%	2%	2%	5%	2%	2%	8%	4%	29%	4%	7%	2%		7%
Min.	2%	2%	2%	5%	2%	2%	1%	4%	3%	4%	2%	1%	1%	
Max.	52%	66%	41%	47%	41%	44%	22%	42%	52%	35%	53%	59%	53%	
Moyenne annuelle (année hydrologique)	-/	21%	23%	16%	20%	10%	12%	17%	14%	27%	13%	25%	17%	

Modèle 6 : débits de Châtelais, niveaux piézométriques de Ballots, précipitations de Ballots, ETP d'Arbrissel.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne mensuelle
Janvier	8%	32%	30%	23%	19%	18%	18%	21%	30%	20%	12%	24%	24%	62%	14%	46%	19%	25%
Février	40%	48%	28%	17%	22%	25%	18%	35%	52%	19%	10%	20%	17%	35%	18%	19%	18%	26%
Mars	41%	68%	19%	24%	30%	47%	22%	50%	66%	26%	29%	42%	21%	43%	16%	33%	18%	35%
Avril	69%	75%	33%	65%	30%	36%	42%	79%	29%	40%	70%	72%	32%	80%	22%	72%	79%	54%
Mai	66%	55%	66%	62%	21%	30%	82%	92%	28%	68%	53%	39%	54%	71%	53%	65%	41%	56%
Juin	86%	78%	87%	30%	26%	52%	88%	96%	51%	76%	77%	82%	36%	85%	21%	67%	75%	65%
Juillet	96%	95%	96%	51%	84%	84%	97%	98%	69%	90%	93%	95%	64%	90%	76%	88%	92%	86%
Août	97%	98%	99%	67%	91%	96%	99%	81%	88%	94%	81%	94%	94%	96%	96%	97%	70%	90%
Septembre	94%	99%	95%	83%	89%	99%	99%	75%	75%	99%	83%	80%	98%	90%	99%	99%	84%	91%
Octobre	71%	91%	38%	94%	90%	100%	84%	92%	15%	90%	77%	82%	99%	90%	100%	67%	56%	79%
Novembre	66%	38%	24%	89%	36%	72%	34%	92%	22%	25%	42%	69%	73%	78%	88%	8%		54%
Décembre	59%	26%	12%	53%	35%	14%	18%	24%	11%	18%	26%	60%	73%	24%	29%	10%		31%
Min.	8%	26%	12%	17%	19%	14%	18%	21%	11%	18%	10%	20%	17%	24%	14%	8%	18%	
Max.	97%	99%	99%	94%	91%	100%	99%	98%	88%	99%	93%	95%	99%	96%	100%	99%	92%	
Moyenne annuelle (année hydrologique)	-/	70%	59%	42%	54%	53%	63%	66%	58%	46%	55%	58%	53%	75%	50%	67%	50%	

Modèle 8 : débits de Cossé-le-Vivien, niveaux piézométriques de Ballots, précipitations de Ballots, ETP d'Arbrissel.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne mensuelle
Janvier	4%	19%	20%	10%	9%	9%	9%	10%	17%	7%	5%	10%	13%	39%	8%	25%	7%	13%
Février	17%	27%	17%	7%	9%	10%	8%	16%	29%	6%	3%	8%	8%	20%	8%	9%	6%	12%
Mars	18%	41%	10%	8%	12%	20%	8%	22%	38%	8%	9%	16%	9%	22%	6%	13%	5%	16%
Avril	30%	43%	14%	28%	10%	13%	15%	44%	14%	13%	26%	32%	12%	48%	7%	33%	33%	25%
Mai	28%	26%	30%	22%	6%	10%	40%	58%	11%	24%	16%	13%	20%	35%	19%	27%	11%	23%
Juin	47%	44%	52%	9%	8%	17%	44%	68%	19%	27%	30%	39%	11%	48%	6%	25%	26%	31%
Juillet	67%	71%	69%	15%	41%	41%	71%	72%	27%	44%	49%	64%	26%	55%	34%	49%	52%	50%
Août	71%	84%	85%	23%	45%	65%	86%	47%	49%	51%	30%	65%	64%	68%	68%	72%	33%	59%
Septembre	66%	91%	78%	40%	44%	83%	87%	42%	43%	76%	38%	43%	79%	60%	84%	83%	44%	64%
Octobre	42%	81%	27%	60%	50%	90%	60%	66%	8%	57%	34%	48%	82%	63%	90%	45%	22%	54%
Novembre	39%	33%	16%	50%	15%	49%	22%	65%	9%	11%	17%	38%	47%	52%	68%	5%		34%
Décembre	37%	20%	6%	23%	15%	9%	11%	16%	5%	9%	11%	32%	46%	16%	16%	4%		17%
Min.	4%	19%	6%	7%	6%	9%	8%	10%	5%	6%	3%	8%	8%	16%	6%	4%	5%	
Max.	71%	91%	85%	60%	50%	90%	87%	72%	49%	76%	49%	65%	82%	68%	90%	83%	52%	
Moyenne annuelle (année hydrologique)	-/	45%	43%	21%	26%	26%	43%	43%	33%	20%	27%	29%	27%	49%	29%	43%	26%	

Annexe 5

Compléments théoriques sur l'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques

(Le contenu de cette annexe provient du rapport BRGM/RP-58139-FR de Seguin et collab., 2009.)

1. Période de retour

1.1. Définition

Pour une variable X qui évolue dans le temps, on définit classiquement une période de retour comme suit : " une valeur x de la variable X a une période de retour T si le temps séparant deux dépassements successifs de x vaut **en moyenne** T ", ce qui pourrait aussi se formuler ainsi: " une valeur x de période de retour T ans est dépassée **en moyenne** tous les T ans" et l'on peut associer à la période de retour une probabilité de non dépassement.

Si P est la probabilité de non dépassement, on définira une période de retour par :

$$T = \frac{1}{1 - P(X < x)} \quad \text{si } P > 0.5$$
$$T = \frac{1}{P(X < x)} \quad \text{si } P < 0.5$$

Par exemple:

- une valeur h d'une série piézométrique $H(t)$ de probabilité de non dépassement de 0.1 a une période de retour de 10 ans (décennal "sec").
- une valeur h de probabilité de non dépassement de 0.9 a aussi une période de retour de 10 ans, mais en décennal "humide".

Remarque

En fait, si le phénomène décrit par la variable X n'est pas stationnaire, la période de retour sera elle aussi dépendante du temps et il n'est plus possible de relier directement (comme ci-dessus) la période de retour à la probabilité de non dépassement.

Cet aspect est bien détaillé dans la thèse de Benjamin Renard (2006) : "*Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*" (thèse INP Grenoble).

Dans la présente étude, les périodes de retour ont toujours été calculées en supposant la stationnarité des séries de données.

1.2. Méthode de calcul

Dans une chronique de niveaux de nappe ou de débits de cours d'eau (avec un pas de temps mensuel, décadaire ou journalier), on souhaite connaître les périodes de retour d'une variable caractérisant un "évènement" particulier, par exemple le niveau de la nappe en période de basses eaux sur un mois donné (ou une décade).

Dans la chronique de plusieurs années, on extrait pour chacune des années les valeurs de la variable considérée (si l'on s'intéresse à des valeurs mensuelles ou décadaires et si la chronique est au pas de temps journalier, on calcule préalablement une moyenne mensuelle ou décadaire).

Avec la série de valeurs ainsi constituée, on construit une fonction de répartition en classant par ordre croissant les valeurs et en calculant les fréquences de non dépassement (fréquences cumulées) avec une formule du type:

$$\hat{F}(x_i) = \frac{i - a}{n + b}$$

n est le nombre de valeurs, a un paramètre pouvant prendre les valeurs 0, 0.5 ou 1 et b un paramètre de valeur 0 ou 1.

En hydrologie, on prend souvent a=0.5 et b=0 ("formule de Hazen", qui permet d'obtenir une symétrie autour de la médiane):

$$\hat{F}(x_i) = \frac{i - 0.5}{n}$$

On porte en abscisses les valeurs de la variable (par exemple des niveaux) et en ordonnées les fréquences cumulées (illustration A1) ce qui permet ensuite par lecture du graphique de calculer une fréquence de dépassement ou de non dépassement.

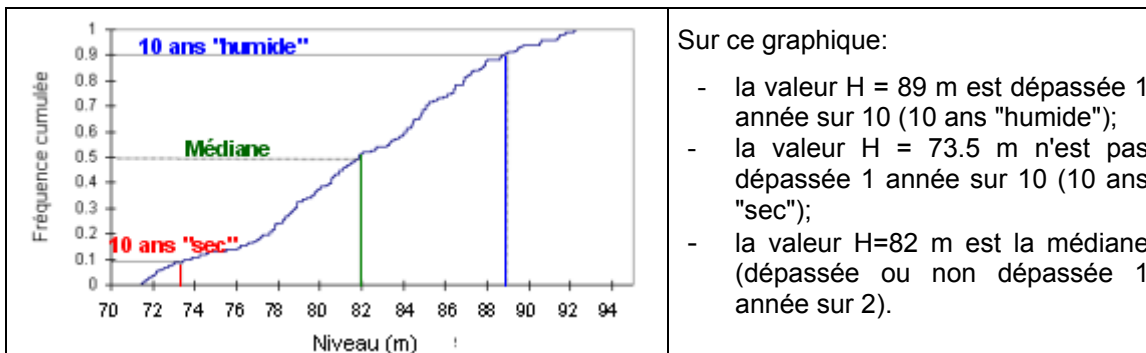


Illustration A1 – Courbe de fréquence cumulée

1.3. Méthodes de calcul des quantiles

Pour obtenir la valeur d'une variable correspondant à une période de retour donnée (5 ans, 10 ans, ...) plusieurs méthodes existent, ne fournissant d'ailleurs pas toutes les mêmes résultats pour un quantile donné.

Outre la méthode de calcul appliquée par Excel, il en existe d'autres utilisées dans des logiciels uniquement dédiés à l'analyse statistique (SAS, MiniTab, ...).

La méthode proposée par défaut dans le logiciel SAS (qui en propose plusieurs), s'applique comme suit:

1) On ordonne la série des valeurs (niveaux ou profondeurs) par ordre croissant.

2) Soit p le percentile considéré et n le nombre de valeurs de la série. On calcule le produit np que l'on décompose en une partie entière j et une partie décimale d:

$$np = j + d$$

La valeur correspondant au percentile p est donnée par:

$$V_p = \frac{(x_j + x_{j+1})}{2} \quad \text{si } d=0 \quad j \text{ étant la partie entière du produit } np$$

$$V_p = x_{j+1} \quad \text{si } d>0$$

Autres formules:

Excel: $V_p = (1-d)*x(j+1)+d*x(j+2)$

SAS méthode 4: $V_p = (1-d)*x(j)+d*x(j+1)$

1.4. Exemple

Une analyse fréquentielle a été effectuée sur des niveaux piézométriques de la nappe de la craie en Artois-Picardie. Pour chaque série piézométrique, cette analyse a été conduite sur des séries de valeurs décennales correspondant à des "niveaux d'étiage" de la nappe captée.

L'exemple du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour le bassin de l'Helpe Majeure est présenté par l'illustration A2.

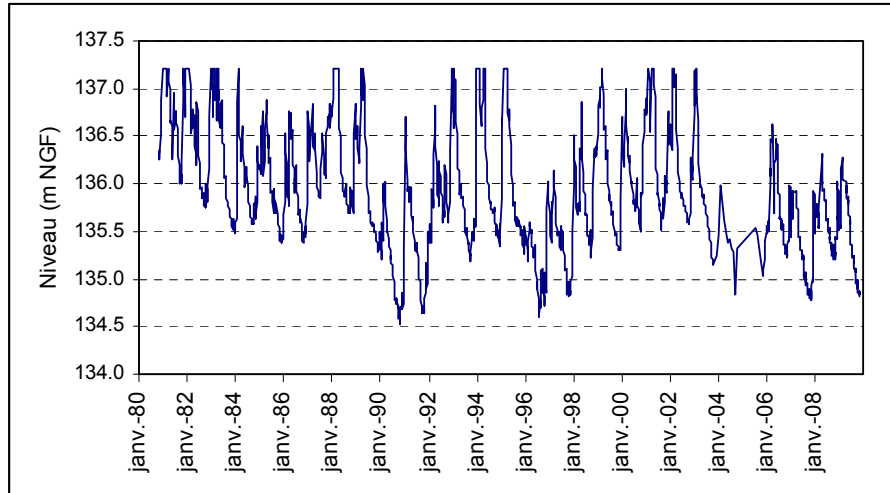


Illustration A2 – Evolution des niveaux au piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache dans le BV de l'Helpe Mineure

La majorité des niveaux d'étiage se situent courant octobre. La période d'étiage considérée dans l'analyse fréquentielle recouvre les mois de septembre, octobre et novembre.

Constitution de séries de valeurs décennales

A partir des chroniques de données journalières s'étendant sur les périodes retenues pour l'analyse, les valeurs décennales moyennes de niveau piézométrique ont été calculées pour la période d'étiage.

Pour le piézomètre de Taisnières-en-Thiérache, 27 années de mesure au pas de temps journalier sont disponibles à la période de plus bas niveau. A partir de ces données journalières, les 9 valeurs décennales moyennes de septembre à novembre ont été calculées de 1981 à 2007 (illustration A3 page suivante).

La distribution cumulée des fréquences pour la 3^{ème} décennie de Novembre est présentée par l'illustration A4.

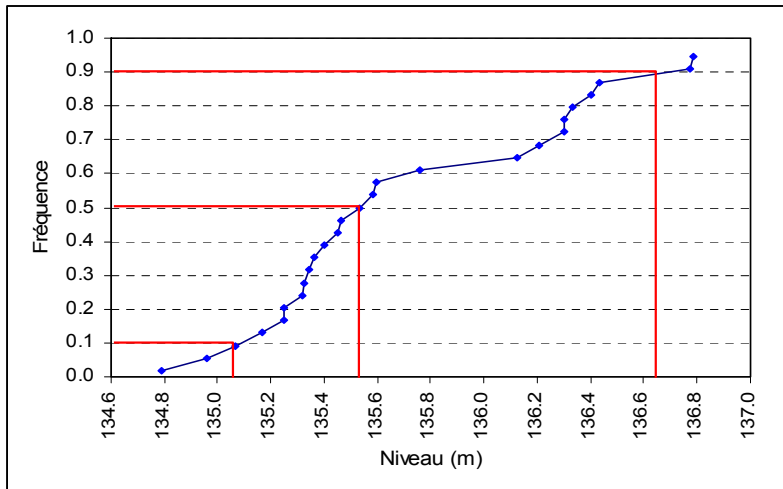


Illustration A4 - Courbe de fréquence cumulée des niveaux du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour la 3^{ème} décennie de novembre

- le niveau H = 135 m n'est pas dépassé environ 1 année sur 10 (10 ans "secs")
- le niveau H = 135,5 m est proche de la médiane
- le niveau H = 136,3 m est dépassé environ 1 année sur 10 (10 ans "humides")

Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes.

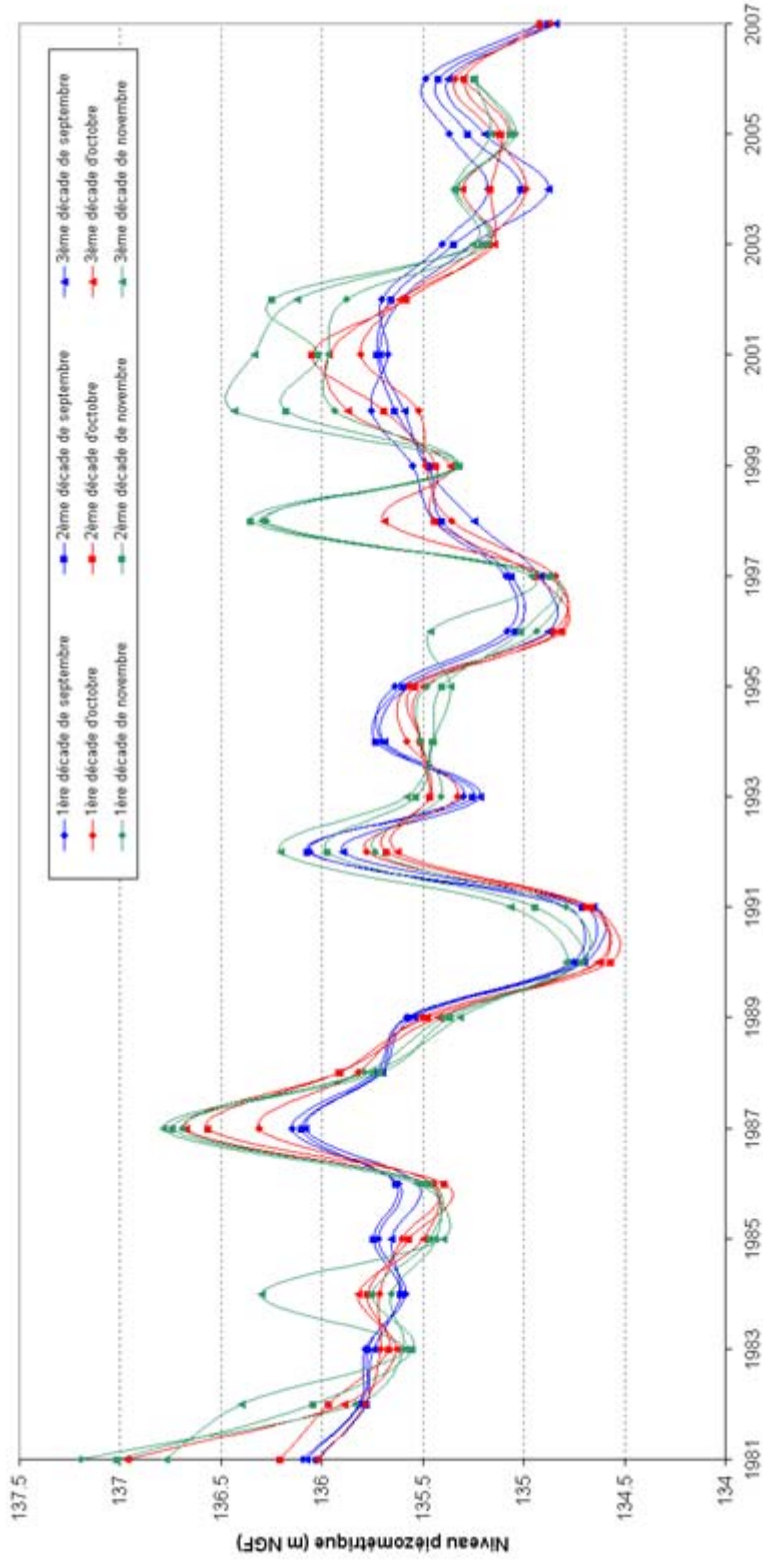


Illustration A3 - Séries des niveaux piézométriques moyens décadaires en période d'étiage, de 1981 à 2007 (piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache)

2. Corrélogrammes

Corrélogramme simple

Il permet de mettre en évidence dans une série de données temporelles le degré de corrélation existant entre valeurs successives de la série pour des intervalles de temps croissants (on parle d'auto-corrélation). Le corrélogramme représente graphiquement la corrélation qui existe entre les valeurs de la série lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3,

Corrélogramme croisé

Il permet de mettre en évidence les corrélations temporelles pouvant exister entre 2 séries pour des intervalles de temps croissants. Le corrélogramme croisé représente graphiquement la corrélation qui existe entre les valeurs successives des 2 séries lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3,

Le corrélogramme croisé peut fournir aussi une indication sur le temps de réponse de l'hydrosystème suite à un épisode pluvieux (c'est le décalage temporel pour lequel la corrélation est maximale entre les 2 séries).

3. Ajustements de lois de probabilités: démarche

Pour illustrer la démarche, on choisit comme exemple une chronique de niveaux piézométriques au pas de temps journalier et l'on s'intéresse aux "niveaux d'étiage" en moyennes mensuelles.

3.1. Constitution de la série de données à étudier

A partir de cette chronique (qui doit couvrir plusieurs années car il faut un minimum d'années pour que la méthode soit pertinente), on calcule mois par mois les valeurs mensuelles et l'on extrait celles correspondant à la variable étudiée.

Il faut préalablement compléter la série de données journalières en cas de valeurs manquantes (différentes techniques peuvent être utilisées dont l'interpolation linéaire est la plus simple si l'analyse de la chronique le permet et si les intervalles de temps "lacunaires" ne sont pas trop grands).

3.2. Contrôle de la série constituée

Toute démarche probabiliste repose sur la notion d'indépendance des observations traitées. Il faut donc s'assurer que les valeurs successives de la série constituée sont bien indépendantes les unes des autres. C'est généralement le cas en hydrologie pour des valeurs mensuelles: dans une série pluriannuelle de débits moyens mensuel, le débit d'un mois donné est en général indépendant de celui du mois précédent. C'est encore plus vrai pour des valeurs moyennes annuelles.

Par contre dans l'étude des nappes, le niveau d'un mois donné dépend en général du niveau des mois précédents, la "longueur temporelle" de cette dépendance étant d'autant plus grande que "l'inertie" de la nappe est importante (par exemple la nappe des Calcaires de Beauce où les temps de régulation sont très longs, de plusieurs années). Il y a autocorrélation (corrélation entre elles des valeurs successives de la série).

Lorsque dans une série pluriannuelle de niveaux moyens mensuels on extrait les valeurs d'un mois donné pour constituer une série "dérivée", cette autocorrélation peut s'atténuer, voire disparaître. Dans le cas des grandes nappes, une autocorrélation

significative peut néanmoins persister (cf § 2.2. dynamique des nappes). C'est la raison pour laquelle il faut vérifier que la série dérivée vérifie bien la notion d'indépendance. Cette vérification peut se faire par l'intermédiaire d'un corrélogramme.

Ceci est illustré par l'illustration A5 ci-après pour les niveaux mesurés au piézomètre de Saint-Martin-Chennetron captant la nappe des Calcaires de Champigny.

L'autocorrélation d'une portée de l'ordre de l'année mise en évidence dans la série des valeurs mensuelles successives est bien sûr retranscrite par l'autocorrélation des valeurs mensuelles de Décembre (niveaux les plus bas observés). Les valeurs espacées de 1 an apparaissent en effet encore faiblement corrélées (coefficient égal à 0.67, illustration A6).

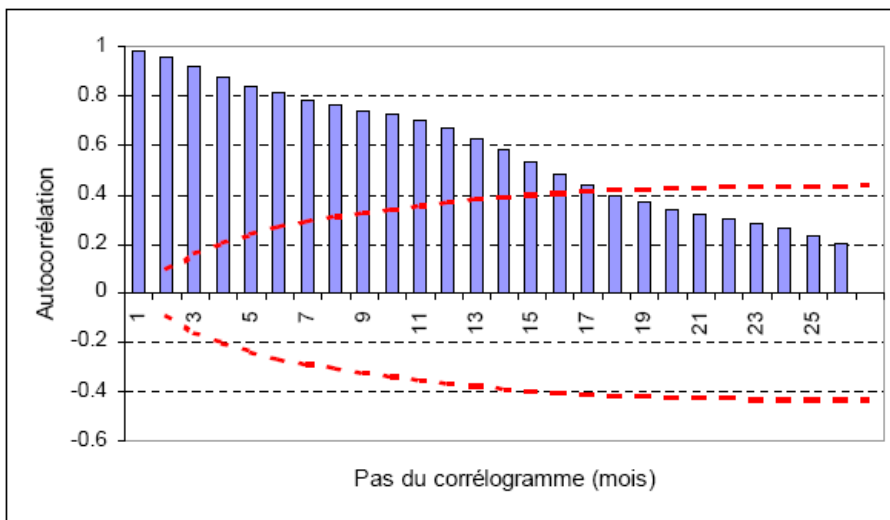


Illustration A5 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Janvier 1969 à Mars 2005

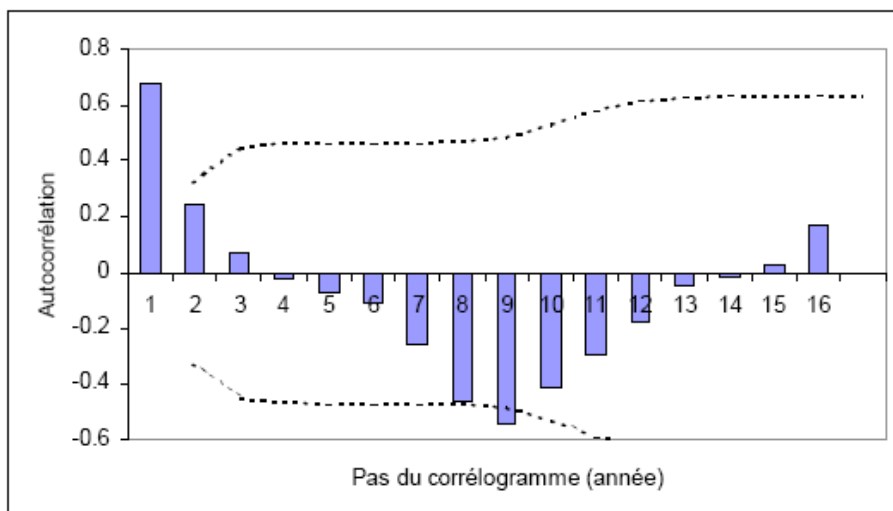


Illustration A6 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Décembre (1969 à 2004)

3.3. Choix d'un modèle fréquentiel et test d'adéquation

Le choix d'un modèle fréquentiel est capital, car c'est du bien fondé de ce choix que dépendra la qualité des prédictions émises. Plusieurs lois peuvent être testées:

- la loi normale,
- la loi log-normale
- la loi de Gumbel et la loi de Pearson III susceptibles de décrire des séries de maxima ou de minima
-

L'ajustement d'un modèle fréquentiel doit être systématiquement accompagné d'un test d'adéquation. On teste l'hypothèse, pour un niveau de signification donné (qui définit la condition de rejet de l'hypothèse, en général 5%), que la répartition des données traitées est bien conforme à celle prévue par le modèle fréquentiel choisi. Il existe de nombreux tests possibles, un test peut en effet être bien adapté pour une certaine loi et ne pas l'être pour une autre. Le choix du test approprié est donc important puisque de lui dépendra l'acceptation (à tort) ou le rejet (à tort) du modèle testé.

3.4. Quantification des incertitudes

Une fois le modèle fréquentiel retenu, les incertitudes sur les prédictions, inhérentes à une démarche probabiliste, peuvent être évaluées par l'intermédiaire d'intervalles de confiance que l'on reporte sur le graphique fréquence-valeurs sous la forme de "courbes enveloppes" encadrant la courbe théorique représentant le modèle fréquentiel (cette courbe peut être une droite dans un graphique approprié).

Cet intervalle de confiance, qui se calcule à un certain seuil de confiance, par exemple 95 %, doit être interprété comme l'intervalle qui doit contenir, avec une probabilité correspondant au seuil de confiance, la "vraie" valeur (inconnue) à prédire.

L'intervalle de confiance est d'autant plus petit que l'adéquation entre la loi ajusté et l'échantillon est bonne. Il est d'autant plus petit que le seuil de confiance considéré est petit.

Le niveau d'une nappe dont le modèle fréquentiel nous dit que sa probabilité d'occurrence est de 10 % sera donc encadré par deux bornes définissant un intervalle à l'intérieur duquel la valeur du niveau à prédire aura 95 chances sur 100 de s'y trouver (pour un calcul avec un seuil de confiance de 95%). Ainsi, pour le mois de décembre, la cote piézométrique de période de retour 10 ans sec a 95 chances sur 100 d'être comprise entre 118,68 et 124,00 m NGF, la valeur médiane étant de 121,34 m NGF.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 régionale Pays-de-la-Loire
1 rue des Saumonières
BP 92342
44323 Nantes cedex 3
Tél. : 02 51 86 01 51