Document public

Elaboration de règles de gestion volumique de la ressource en eau souterraine - Bassin Versant du Layon

Rapport final

BRGM/RP-60065-FR
Septembre 2011

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Direction Départementale
des
Territoires
de
MAINE et LOIRE

DIR/VDCT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Elaboration de règles de gestion volumique de la ressource en eau souterraine - Bassin Versant du Layon

Rapport final

BRGM/RP-60065-FR
Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009 09EAUI66

F. Lucassou, D. Allier, P. Chrétien
Avec la collaboration de
M.-J. Féret , J.-P. Jegou

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : E. ROUXEL	Nom : P. CONIL
Date : 17/10/2011	Date : 15/12/2011
Signature :	Signature **:**

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Direction Départementale
des
Territoires
de
MAINE et LOIRE

DIR/VDCT

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : eau souterraine, piézomètre, forage, puits, bassin versant, Layon, Maine-et-Loire, Pays de la Loire.

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

Lucassou F., Allier D., Chrétien P. avec la collaboration de Féret M.-J., Jegou J.-P. (2011) - Elaboration de règles de gestion volumique de la ressource en eau souterraine - Bassin Versant du Layon. Rapport final - BRGM/RP-60065-FR, 53 p., 25 ill., 7 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Une convention a été passée entre la Direction Départementale de l'Equipement et de l'Agriculture du Maine-et-Loire et le BRGM pour mener une étude visant à aboutir à une meilleure connaissance de la ressource en eau souterraine pour le bassin versant du Layon. Ces informations permettront par la suite d'élaborer des propositions pour l'élaboration de règles adaptées concernant la gestion de la ressource en eau souterraine dans le périmètre d'étude.

Pour parvenir à cet objectif l'opération comporte les phases suivantes :

- Collecte des données
- Analyse des chroniques piézométriques
- Cartographie de la piézométrie
- Estimation du bilan volumique

Deux campagnes piézométriques hautes eaux (avril 2010) et basses eaux (octobre 2010) ont permis d'élaborer des cartes piézométriques. Elles mettent en évidence des axes de drainage constitués par les vallées, ce qui montre que la nappe alimente les cours d'eau du secteur.

Le bilan hydrologique montre une tendance à la baisse de la recharge au cours des dix dernières années (recharge moyenne de 130 mm sur la période 2000-2010). En parallèle, d'après les données recueillies auprès de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, les prélèvements connus (quasi-exclusivement destinés à un usage irrigation) ont fortement augmenté, avant une diminution notable en 2008.

Il est actuellement impossible de déterminer d'éventuelles relations entre les prélèvements, la recharge et l'évolution du niveau de la nappe, la chronique piézométrique de Doué-la-Fontaine étant à ce jour trop courte (2006-2011).

Une simulation pluie-niveau a tout de même été réalisée sur le bassin versant du Layon. Elle met en évidence une faible contribution des eaux souterraines au débit d'étiage, d'où des étiages très sévères du Layon. Un ordre de grandeur des périodes de retour des niveaux piézométriques a également été calculé mais cette estimation est à utiliser avec précaution étant donné la faible longueur de la chronique.

Avant de pouvoir établir des règles de gestion, il est donc nécessaire de mieux connaître les prélèvements et de poursuivre l'acquisition de données, notamment piézométriques, pour envisager une nouvelle modélisation plus complète intégrant les paramètres niveau, pluie et débit.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Objectif et méthodologie 11

2.1. OBJECTIF 11

2.2. MÉTHODOLOGIE 11

3. Contexte de l'étude 13

3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE 13

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE 13

4. Collecte des données 17

5. Piézométrie du bassin versant du Layon 19

5.1. CAMPAGNES PIÉZOMÉTRIQUES DE TERRAIN 19
5.1.1. Choix du secteur d'étude 19
5.1.2. Choix des périodes de mesure 19
5.1.3. Dépouillement des données d'archive et repérage 20
5.1.4. Campagne piézométrique de « hautes eaux » 21
5.1.5. Campagne piézométrique de « basses eaux » 23
5.1.6. Dépouillement et saisie des données recueillies 23
5.1.7. Géoréférencement des données 23
5.1.8. Cartes piézométriques 24

5.2. CLEFS DE LECTURE DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES 27
5.2.1. Caractéristiques et limites d'utilisation des cartes piézométriques 27
5.2.2. Commentaires sur les cartes piézométriques 27

6. Bilan hydrologique sur le bassin versant du Layon 29

6.1. DONNÉES DE PRÉLÈVEMENTS 29

6.2. REJET DES STATIONS D'EPURATION 32

6.3. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES 32

7. Etude des corrélations niveaux/débits/pluie 35

7.1. ANALYSE PRÉALABLE A LA MODÉLISATION 35
7.1.1. Piézomètre 04855X0077/PZ (Doué-la-Fontaine, Cénomanien) 36
7.1.2. Piézomètre 04838X0175/PZ (Chemillé, socle) 39
7.1.3. Analyse du débit du Layon 42
7.1.4. Recherche de corrélations entre niveaux et débits 44
7.1.5. Corrélogramme croisé Pluie/Débit 47

7.2. MODÉLISATION PLUIE/DÉBIT 47

8. Conclusion 51

9. Bibliographie 53

Liste des illustrations

Illustration 1 : Contexte géographique de l'étude 13
Illustration 2 : Masses d'eau souterraines sur le bassin versant du Layon 14
Illustration 3 : Extrait de la carte géologique au 1 : 1 000 000 (BRGM) 15
Illustration 4 : Chronique du piézomètre 04855X0077/PZ à Doué-la-Fontaine 19
Illustration 5 : Répartition des points de mesure potentiels 21
Illustration 6 : Aperçu d'une sonde piézométrique 22
Illustration 7 : Battement de la nappe entre les hautes eaux (avril 2010) et les basses eaux (octobre 2010) 25
Illustration 8 : Localisation des prélèvements sur le bassin versant du Layon 30
Illustration 9 : Evolution des prélèvements industriels et irrigation sur le bassin versant du Layon entre 1999 et 2008 31
Illustration 10 : Evolution des prélèvements et de la piézométrie sur le bassin versant du Layon entre 2005 et 2010 31
Illustration 11 : Evolution du niveau piézométrique et de l'infiltration annuelle sur le bassin du Layon entre 2005 et 2011 33
Illustration 12 : Evolution des prélèvements et de l'infiltration annuelle sur le bassin du Layon entre 2000 et 2009 34
Illustration 13 : Localisation des stations de mesures étudiées pour les corrélations et les modélisations 35
Illustration 14 : Chronique piézométrique et autocorrélogramme du piézomètre 04855X0077/PZ de Doué-la-Fontaine (Cénomanien) 37
Illustration 15 : calcul de la période de retour « 5 ans sec » du niveau piézométrique décadaire à l'étiage du piézomètre 04855X0077/PZ de Doué-la-Fontaine (Cénomanien) 38

Illustration 16 : le niveau piézométrique décadaire à l'étiage de période de retour « 5 ans sec » a été atteint à Doué-la-Fontaine en 2006 et 2011 39
Illustration 17 : Autocorrélogramme du piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé (socle) 39
Illustration 18 : Calcul de la période de retour « 5 ans sec » du niveau piézométrique d'étiage du piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé (socle) 40
Illustration 19 : le niveau piézométrique décadaire d'étiage de période de retour « 5 ans sec » a été atteint à Chemillé en 2009 41
Illustration 20 :Chronique de débit journalier et mensuel à Saint-Georges-sur-Layon 42
Illustration 21 : Calcul de la période de retour « 5 ans sec » du débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon 43
Illustration 22 : Comparaison du débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et à Saint-Lambert-du-Lattay 44
Illustration 23 : Chronique piézométrique de Doué-la-Fontaine, débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et corrélogramme croisé 45
Illustration 24 : Chronique piézométrique de Chemillé, débit du Layon à Saint-Lambert et corrélogramme croisé 46
Illustration 25 : Débit journalier du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et pluviométrie mensuelle à Vihiers 47
Illustration 26 : Comparaison du débit modélisé avec le logiciel TEMPO et du débit mesuré à Saint-Georges-sur-Layon 48
Illustration 27 : Réponses impulsionnelles utilisées par le logiciel TEMPO 48

Liste des annexes

Annexe 1 Carte piézométrique hautes eaux des sables du Cénomanien du bassin du Layon 55
Annexe 2 Carte piézométrique basses eaux des sables du Cénomanien du bassin du Layon 59
Annexe 3 Éléments de l'atlas 63
Annexe 4 Recensement des ouvrages 67
Annexe 5 Stations dépuration du bassin versant du Layon 73
Annexe 6 Calcul du bilan hydrologique sur la période 2000-2010 77
Annexe 7 Compléments théoriques sur l'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques (rapport BRGM/RP-58139-FR) 91

1. Introduction

De manière générale, le développement considérable de l'irrigation, conjugué aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau souterraine, rend nécessaire une gestion de la ressource plus adaptée qui prendrait à la fois en compte les besoins et le stock utilisable.

Ces problèmes de disponibilité se font sentir à l'échelle du bassin du Layon, notamment en période estivale où les assecs sont fréquents.

Dans le bassin versant du Layon, le niveau de la nappe du Cénomanien est observé depuis 2006 dans le cadre du suivi piézométrique patrimonial du département du Maine-et-Loire. La ressource que représente cette nappe constitue localement un enjeu important à préserver puisqu'elle est utilisée par de nombreux ouvrages de prélèvements à usage agricole et – dans une moindre mesure - industriel.

Partant de ce constat, il a été décidé de mettre en place une étude à l'échelle de ce bassin versant afin de préciser la connaissance des eaux souterraines et de leurs usages, pour définir des règles de gestion adaptées et éviter des étiages trop sévères du Layon.

2. Objectif et méthodologie

2.1. OBJECTIF

Le travail réalisé au cours de cette étude vise à aboutir à une meilleure connaissance de la ressource en eau souterraine et de son utilisation dans le périmètre du bassin versant du Layon. Les informations recueillies permettront ensuite de définir des propositions pour l'élaboration de règles adaptées concernant la gestion de la ressource en eau souterraine dans le périmètre d'étude.

2.2. MÉTHODOLOGIE

Pour parvenir à cet objectif l'opération comporte les phases suivantes :

- **Collecte des données :**
  - achat des données météorologiques ;
  - données de la Banque du Sous-Sol (BSS) ;
  - données de prélèvement connues (DDT, AELB, SIMAEP de Blou) ;
  - chroniques des volumes prélevés pour l'usage AEP (SIMAEP de Blou) ;
  - chroniques de suivi piézométrique (SIMAEP de Blou, BRGM).
- **Analyse des chroniques piézométriques :**
  - vérification des chroniques recueillies ;
  - analyse des corrélations entre les chroniques disponibles ;
  - modélisation des chroniques piézométriques.
- **Cartographie de la piézométrie :**
  - préparation des campagnes de mesures piézométriques ;
  - réalisation de deux campagnes en « basses eaux » et en « hautes eaux » ;
  - dépouillement et saisie des données recueillies ;
  - traitement cartographique des données.
- **Estimation du bilan volumique**

3. Contexte de l'étude

3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

La zone d'étude, d'une superficie de 1 075 km², est localisée au sud d'Angers. Elle est étalée sur les deux départements du Maine-et-Loire et des Deux-Sèvres.

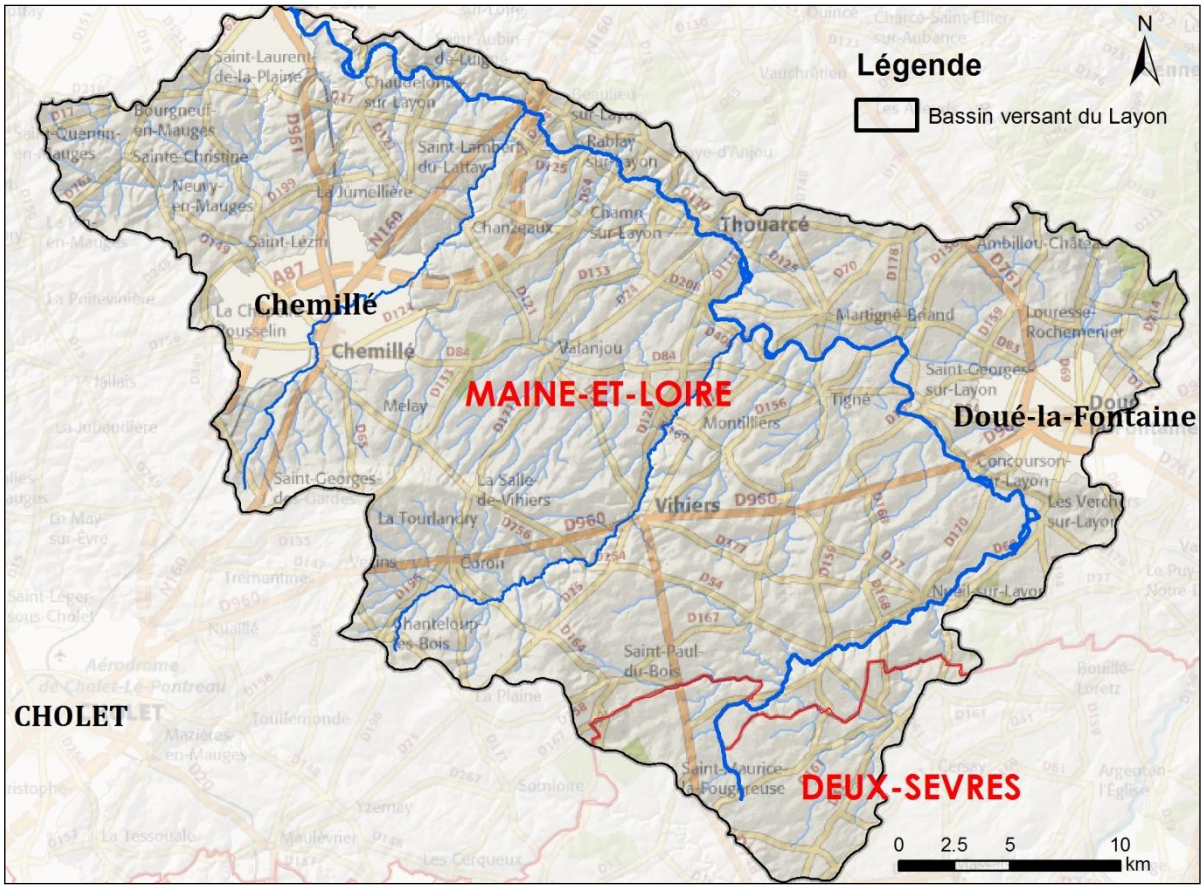


Illustration 1 : Contexte géographique de l'étude

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La région d'étude se situe dans la zone de contact entre deux grandes unités géologiques, le Massif Armoricain à l'Ouest et le Bassin Parisien (roches d'origine sédimentaire) à l'Est, comme l'illustre la cartographie des masses d'eau souterraines (Illustration 2).

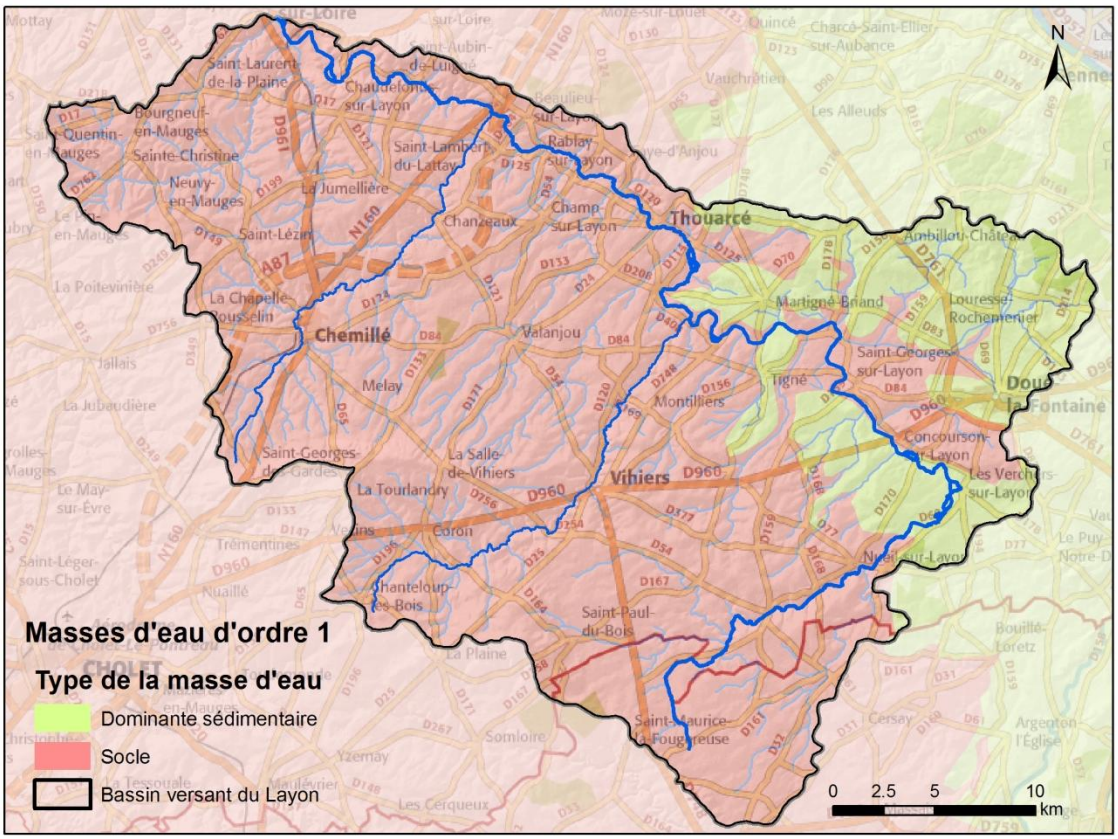


Illustration 2 : Masses d'eau souterraines sur le bassin versant du Layon

On distingue ainsi :

- A l'Ouest, le socle d'âge primaire, constitué essentiellement de Schistes briovériens (notation b sur l'Illustration 3) plus ou moins métamorphisés. Ces schistes constituent le support du Glacis des Mauges qui descend en pente douce jusqu'au Layon. Plus au Sud-Ouest, émergent des formations d'origine éruptive relativement dures constituant le complexe éruptif de Cossé d'Anjou (rhyolites, granites),

- A l'Est, les terrains sédimentaires représentés essentiellement par des Sables et des Marnes du Cénomanien pour l'ère Secondaire et par des affleurements discontinus sableux et graveleux et des Faluns d'Anjou (sables coquilliers - Miocène) pour l'ère Tertiaire (notation m).

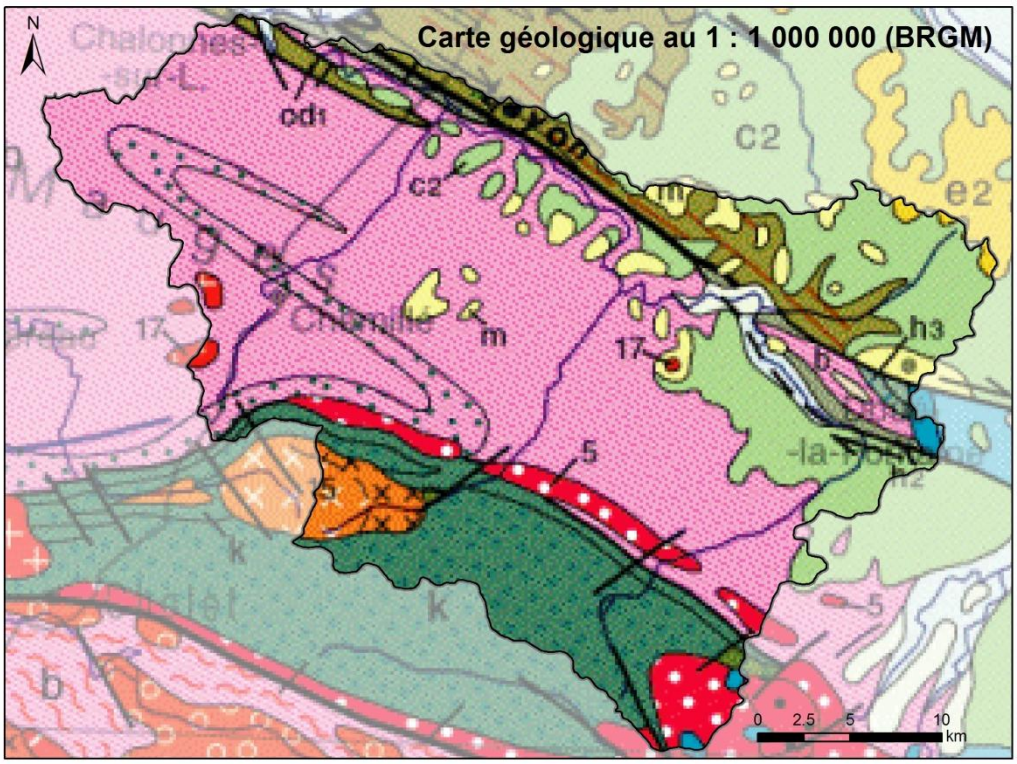


Illustration 3 : Extrait de la carte géologique au 1 : 1 000 000 (BRGM)

Cette région est fortement marquée par "l'accident géologique du Layon". Cette faille de direction Sud-Armoricaine (Nord-Ouest/Sud-Est) présente un tracé peu rectiligne, en raison de nombreux décrochements perpendiculaires. Les rejeux post-cénomanien de cet accident ont entraîné le rehaussement des terrains situés au Nord au pied desquels coule le Layon. Le cours de cette rivière est profondément marqué par l'interaction entre les directions de la faille et des rejeux. La mise en relief des coteaux du Layon constitue ainsi un trait caractéristique de cette région. La vallée du Layon est donc dissymétrique dans sa partie aval, ses affluents étant localisés en rive gauche.

Le Layon est fortement anthropisé, son cours ayant fait l'objet de nombreux aménagements hydrauliques (recalibrage et ouvrages de retenues).

Du point de vue hydrogéologique, les sables et les graviers de base du Cénomanien, d'épaisseur variable (0 à 15 m), constituent un aquifère à bonne perméabilité. Bien que de faible épaisseur, cet aquifère constitue l'une des principales ressources en eau souterraine du département du Maine-et-Loire. D'autre part, les formations tertiaires, souvent superficielles, peuvent constituer localement des petits aquifères à débits intéressants (Nappe des Faluns dans le secteur de Doué-la-Fontaine). Localement, ces aquifères sont exploités pour l'irrigation, les usages industriels et plus modestement pour des usages domestiques (potager, sanitaires, …). L'alimentation de ces aquifères s'effectue principalement par l'infiltration des précipitations sur ce bassin.

4. Collecte des données

La collecte des données a été entreprise, conformément à la méthodologie décrite dans le cahier des charges. Elle porte sur les points suivants :

- consultation des données BRGM (BSS et réseau piézométrique patrimonial), afin d'établir la liste des points de mesure potentiels et de planifier les campagnes piézométriques ;

- consultation de la Direction Départementale des Territoires du Maine-et-Loire afin de déterminer la présence de prélèvements destinés à l'usage agricole l'Alimentation en Eau Potable (AEP) ;

- consultation des données de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB) pour déterminer les prélèvements industriels et agricoles ;

- consultation du SIMAEP de Blou pour obtenir les informations relatives aux prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable ;

- acquisition de données météorologiques (précipitations et évapotranspiration) afin d'établir un bilan hydrologique sur le secteur.

5. Piézométrie du bassin versant du Layon

5.1. CAMPAGNES PIÉZOMÉTRIQUES DE TERRAIN

5.1.1. Choix du secteur d'étude

Compte-tenu du contexte géologique et l'importante étendue du bassin du Layon (1075 km²), il a été décidé en concertation avec la DDT du Maine-et-Loire de réaliser les campagnes piézométriques uniquement sur la partie sédimentaire du bassin, les données en domaine de socle n'étant pas assez représentatives pour réaliser une carte piézométrique cohérente. Le secteur ainsi délimité couvre une surface d'environ 513 km², au nord-est du bassin.

Le tracé des limites du bassin d'alimentation de captage est basé sur une interprétation des esquisses piézométriques. Le tracé des contours du bassin d'alimentation est rendu délicat par le manque d'éléments récents sur la piézométrie locale et l'imprécision des données en particulier dans la partie socle du bassin du Layon.

5.1.2. Choix des périodes de mesure

Trois piézomètres se trouvent dans le bassin du Layon, un à Chemillé (socle) et deux à Doué-la-Fontaine (sédimentaire). L'un de ces deux piézomètre capte les formations miocènes alors que le second, « Les Blanchisseries » (04855X0077/PZ) est situé dans les sables du Cénomanien. C'est ce piézomètre qui nous intéresse dans le cadre de cette étude. Cependant, il n'est suivi que depuis janvier 2006 dans le cadre du réseau piézométrique patrimonial du Maine-et-Loire et la chronique est incomplète (Illustration 4) : il manque notamment les hautes eaux de 2008 et l'étiage 2010 (pour cause de vandalisme).

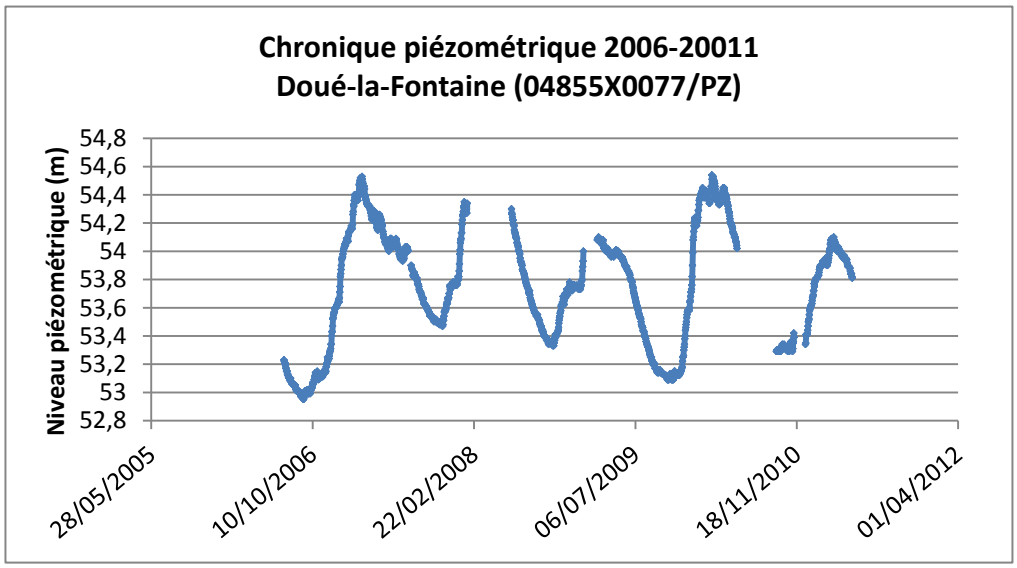


Illustration 4 : Chronique du piézomètre 04855X0077/PZ à Doué-la-Fontaine

Ce piézomètre montre des cycles annuels, avec des hautes eaux en mars et des basses eaux en septembre/octobre.

Les campagnes de mesure des niveaux piézométriques sur le secteur d'étude ont été programmées sur des périodes limitées dans le temps (une semaine) afin de s'affranchir des évolutions temporelles des niveaux piézométriques en ayant des mesures synchrones, comparables les unes aux autres. Elle a été organisée en avril 2010 pour la période dite de « hautes eaux » et en octobre 2010 pour la période dite de « basses eaux ».

5.1.3. Dépouillement des données d'archive et repérage

En application du Code Minier (articles 131 et 132, titre VIII du Livre I), le BRGM est chargé par l'Etat de collecter l'ensemble des informations relatives à la réalisation d'ouvrages souterrains dépassant 10 mètres de profondeur. Ces points et les informations afférentes sont numérotés et stockés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) au BRGM.

Une extraction de ces informations a été effectuée sur le secteur d'étude et dans sa région afin de ne pas occulter d'informations aux limites et dans l'environnement proche de la zone d'étude (géomorphologie notamment).

Au final, un rectangle de 1 400 km² a été défini autour de la zone d'étude puis découpé en 87 mailles de 16 km². Ainsi, 125 points ont été recensés avant le début de la campagne de mesure sur ce maillage (Illustration 5 + Annexe 4). Les mesures n'ont été réalisées que sur des ouvrages captant des formations sédimentaires (potentialités aquifères supérieures à celles des formations de socle), soit seulement 38 mailles avec des points mesurés.

Ces informations ont ensuite été organisées sous forme d'un atlas. En effet, la constitution de ce type de document permet de préparer au mieux la campagne de mesure (planification d'objectifs de mesure, meilleure répartition des points de mesure) mais aussi de repérer rapidement ces points (ou de nouveaux) sur le terrain (Annexe 3).

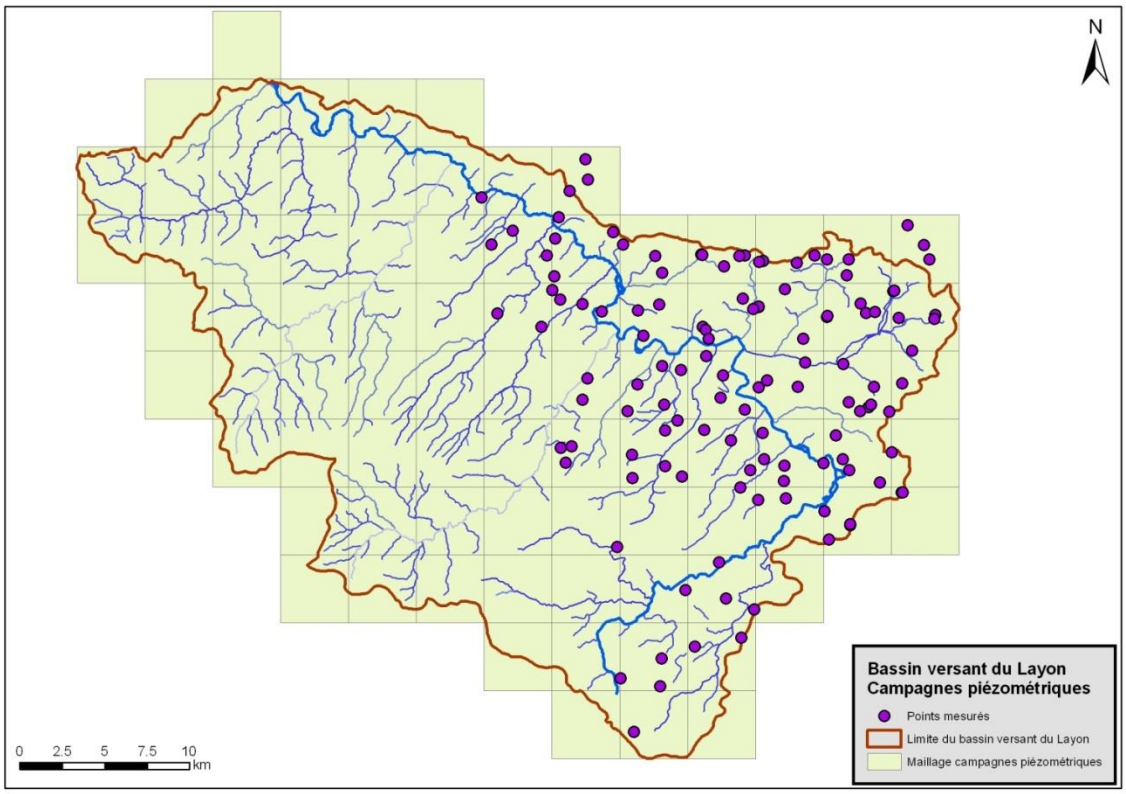


Illustration 5 : Répartition des points de mesure potentiels

5.1.4. Campagne piézométrique de « hautes eaux »

La campagne de mesure piézométrique en hautes eaux s'est déroulée du 12 au 15 avril 2010 (semaine 15).

Comme mentionné ci-dessus la campagne de mesure a été préparée afin de viser une répartition géographique homogène sur l'ensemble du territoire d'étude et son pourtour. En effet, il est important que les points de mesures ne se cantonnent pas uniquement à la zone d'étude et qu'ils ne soient pas concentrés sur un même secteur. A cette fin, le territoire de mesure a donc été découpé comme précédemment évoqué, en mailles de 16 km² et les mesures ont été réparties le plus uniformément possible dans celui-ci (de l'ordre de 2 à 3 points de mesure par maille).

A l'aide du tableau des ouvrages répertoriés en BSS, le BRGM (SGR Pays de la Loire) a sillonné le territoire défini afin de réaliser des mesures à l'aide d'une sonde piézométrique. Cette sonde, reliée à un câble conducteur gradué, est équipée d'un capteur qui permet à l'enrouleur de produire un son et/ou d'émettre une lumière dès qu'elle touche l'eau (Illustration 6).

Illustration 6 : Aperçu d'une sonde piézométrique

Les mesures ont été réalisées sur différents types d'ouvrages appartenant principalement à des particuliers, des entreprises ou des collectivités territoriales. Ces ouvrages sont décrits ci-dessous :

- puits : excavation généralement cylindrique de gros diamètre, creusée manuellement, et souvent en partie maçonnée, destinée à atteindre et à exploiter la première nappe d'eau souterraine. Ces puits sont parfois exploités par des particuliers (arrosage du potager, des fleurs…). Ils sont, ou non, équipés d'une pompe ;

- forage : ouvrage de petit diamètre creusé mécaniquement et destiné à l'exploitation d'une nappe d'eau souterraine. Ils sont souvent plus profonds que les puits et souvent équipés d'une pompe. Les forages peuvent être utilisés par les particuliers, par les exploitations agricoles pour l'irrigation, par les industriels ou encore par les communes (espaces verts…).

Dans ces différents ouvrages la profondeur du niveau piézométrique est mesurée par la distance entre la surface du sol et de l'eau de la nappe (en mètres). A noter que lorsque les ouvrages possèdent une margelle, il faut déduire la hauteur de la margelle de la mesure effectuée (distance sol-eau = distance margelle-eau - distance margelle-sol).

Toutes les informations récoltées sur un point de mesure (indice BSS, commune, adresse ou lieu-dit, propriétaire, renseignements divers sur l'accès) ainsi que la mesure effectuée (date, heure, profondeur de nappe, existence éventuelle d'un pompage avant ou après la mesure) ont été notées sur une fiche type (Annexe 4). Cette méthode permet notamment de conserver l'homogénéité des informations relevées mais aussi de garantir la rigueur des mesures.

Enfin, tous les ouvrages mesurés au cours de cette campagne ont été pris en photo afin de pouvoir les identifier plus facilement lors du prochain exercice mais aussi dans l'optique de garder en mémoire un « visuel » de ces points.

Lors de cette campagne de hautes eaux, 103 ouvrages ont été mesurés.

Il faut noter qu'aucune distinction entre les différents aquifères captés par les ouvrages mesurés n'a pu être établie, les coupes des ouvrages n'étant souvent pas disponibles. Les ouvrages captent donc probablement les Sables du Cénomanien ou les Faluns miocènes mais il est également possible qu'ils captent des nappes du socle. Cependant, lors de l'exploitation des résultats, les valeurs aberrantes seront mises en relief et pourront être interprétées comme issues d'un aquifère différent.

5.1.5. Campagne piézométrique de « basses eaux »

La campagne de mesure en basses eaux s'est déroulée du 4 au 8 octobre 2010 (semaine 40), selon les mêmes principes que la campagne «hautes eaux», en mesurant en priorité les ouvrages déjà relevés lors de la première campagne.

Lors de la campagne de basses eaux, 113 ouvrages ont été mesurés, dont 92 ouvrages communs à la campagne précédente.

5.1.6. Dépouillement et saisie des données recueillies

Les données recueillies lors des campagnes piézométriques ont ensuite été valorisées afin de conserver une information pérenne et de qualité.

De ce fait, tous les éléments (fiche descriptive, photographie et carte) ont été saisis ou numérisés. Ces documents ont ensuite été regroupés afin de constituer pour chaque ouvrage un fichier détaillé sur l'environnement de la mesure (au format .pdf).

5.1.7. Géoréférencement des données

Lors des campagnes de terrain, 216 mesures ont été effectuées au total.

L'Illustration 5 montre la localisation de ces points, ceux-ci sont relativement bien répartis et représentent de façon assez homogène la partie sédimentaire de la zone d'étude.

Néanmoins, si ce travail de mesure a une répartition relativement homogène, des zones semblent moins pourvues au regard de la carte de répartition des points.

Par ailleurs, les mesures n'ont pas toujours pu être effectuées sur les sites pré-identifiés. Cela peut s'expliquer par diverses raisons :

- adresse erronée du propriétaire ou changement de propriétaire ;
- destruction de maisons ;
- absence du propriétaire (emploi ou vacances) ;
- refus d'accès de la part du propriétaire (peur du contrôle, de taxe…) ;
- ouvrages rebouchés ou non retrouvés ;
- gênes occasionnées par les équipements des ouvrages (pompe, couvercle…) lesquels empêchent le passage de la sonde de mesure.

En conséquence, afin d'obtenir un nombre suffisant de mesures réparties de façon homogène sur tout le secteur d'étude, d'autres ouvrages ont été recherchés durant la campagne de terrain.

De nombreux ouvrages encore non déclarés en BSS ont ainsi été recensés, complétant ainsi nos informations sur le secteur.

5.1.8. Cartes piézométriques

Afin d'établir la carte piézométrique à partir des mesures de terrain, les profondeurs mesurées sont converties en altitude avant d'être interpolées $Z_{nappe} = Z_{repère} - h_{mesurée}$.

Les mesures ont été interpolées sur un secteur de 513 km² par les méthodes « spline » et « inverse de la distance » pour obtenir deux grilles au pas de 100 m, de basses et hautes eaux. Les isopièzes (courbe équipotentielle de charge hydraulique, voir § 5.2.2) ont ensuite été calculées à partir de ces grilles puis retravaillées manuellement :

- en veillant à ce que la cote piézométrique soit inférieure à la cote topographique ;
- en vérifiant la cohérence des isopièzes avec les différents axes de drainage naturels que constituent les vallées humides et les vallons secs ;
- en s'assurant de la cohérence entre les isopièzes hautes eaux (avril 2010) et les isopièzes basses eaux (octobre 2010) ;
- en arrêtant le cas échéant les isopièzes aux limites d'extension de la nappe (lignes d'affleurement, failles, etc.).

La carte piézométrique des hautes eaux des sables du Cénomanien du bassin du Layon figure en annexe 1. La carte piézométrique des basses eaux figure en annexe 2.

Il faut noter que parmi les 92 points mesurés lors des deux campagnes, 22 affichent des niveaux piézométriques de basses eaux supérieurs aux hautes eaux. On l'explique par les éventuels pompages de fin d'hiver destinés à remplir les nombreuses retenues et pouvant « fausser » les hautes eaux printanières. C'est pourquoi sur la carte de battement de la nappe (Illustration 7), de nombreuses zones apparaissent comme ayant un battement négatif entre basses et hautes eaux (en jaune).

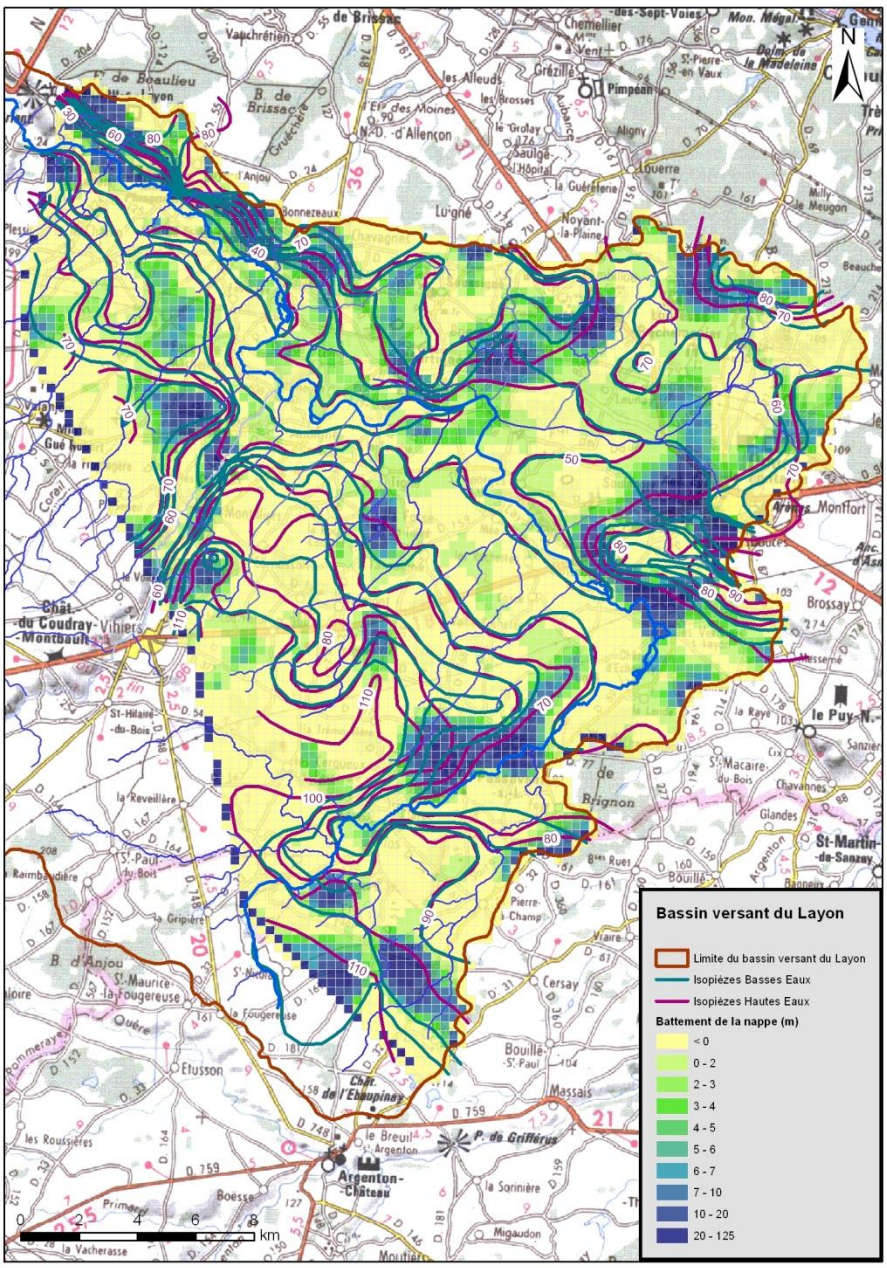


Illustration 7 : Battement de la nappe entre les hautes eaux (avril 2010) et les basses eaux (octobre 2010)

5.2. CLEFS DE LECTURE DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES

5.2.1. Caractéristiques et limites d'utilisation des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques basses et hautes eaux élaborées dans le cadre de la présente étude contribuent à l'amélioration de la connaissance des ressources en eaux souterraines du bassin versant du Layon ; elles peuvent être exploitées localement, afin d'estimer l'altitude du toit de la nappe. L'écart entre les courbes piézométriques est de 10 m et elles ont été interpolées en grille au pas de 100 m.

Sur un plan pratique, elles peuvent être utilisées comme des documents d'orientation, voire comme un outil d'aide à la décision à une échelle plus grande, de l'ordre de 1/25 000. Elles restent cependant inadaptées pour des échelles plus précises.

5.2.2. Commentaires sur les cartes piézométriques

Lignes de courant et sens d'écoulement

Les isopièzes sont des équipotentielles (la charge hydraulique est la même le long d'une isopièze). Les lignes de courant, qui définissent la direction et le sens des écoulements de la nappe, sont perpendiculaires aux isopièzes et vont dans le sens des potentiels décroissants (de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible).

A la simple observation des cartes piézométriques et de l'allure des isopièzes, on constate que la nappe est drainée par les cours d'eau (et donc les lignes de courant convergent vers les vallées). Une même allure des isopièzes est observée en hautes eaux et en basses eaux.

Cependant, aucune crête piézométrique ne permet de tracer les contours du bassin versant hydrogéologique du Layon dans sa partie sédimentaire, les isopièzes et les points de mesures ne s'étendant pas sur un secteur assez grand.

Il faut noter que l'accident du Layon ne semble pas influencer la piézométrie.

Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique entre deux points de la surface piézométrique est l'équivalent de la pente en topographie. Il épouse le modelé topographique en en atténuant la rugosité. Il est plus faible sous les plaines et les plateaux que sous les coteaux.

On le détermine en calculant le rapport de la différence de potentiel entre deux points (donc ici une différence de charge hydraulique) par la distance séparant les deux points.

Le gradient hydraulique et la transmissivité de la roche aquifère permettent de déterminer le débit de la nappe au travers de la section de passage considérée (loi de Darcy).

6. Bilan hydrologique sur le bassin versant du Layon

6.1. DONNÉES DE PRÉLÈVEMENTS

Les données de prélèvement ont été consultées auprès des organismes identifiés : Agence de l'Eau Loire-Bretagne et syndicats d'eau.

Un seul syndicat d'eau potable est présent dans la zone d'étude, le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable (SIAEP) de la Région du Layon. Les prélèvements sont réalisés dans la nappe alluviale de la Loire, en dehors de la zone d'étude. Il n'existe aucun autre prélèvement AEP dans le bassin du Layon.

Deux prélèvements d'eau à usage industriel sont recensés à l'est du bassin :

- un prélèvement en rivière (affluent du Layon) au niveau des carrières de Cléré-sur-Layon : volume prélevé en 2007 = 6 600 m^3 (données AELB),
- un prélèvement en nappe alluviale au niveau de la SARL Gay Père & Fils à Doué-la-Fontaine : volume prélevé en 2007 = 3 600 m^3 (données AELB),

On dénombre 430 points de prélèvements liés à l'irrigation utilisés entre 1999 et 2008 (Illustration 8), principalement pour la culture du maïs, dont 240 points utilisés en 2008. Parmi ces 430 points, 219 prélèvent de l'eau souterraine (essentiellement nappe profonde, très peu de prélèvements en nappe alluviale), ce qui représente 40% des volumes prélevés pour l'irrigation (données AELB, probablement non exhaustives du fait de l'existence de prélèvements « sauvages » non déclarés). Les 60% restants sont prélevés dans les cours d'eau ou dans des retenues collinaires. Il faut noter que les prélèvements en cours d'eau sont interdits en période d'étiage (dès le début du mois de mai). Environ 35% des prélèvements destinés à l'irrigation sont réalisés sur la partie sédimentaire du bassin du Layon (volume relativement constant, autour d'un million de m^3 par an).

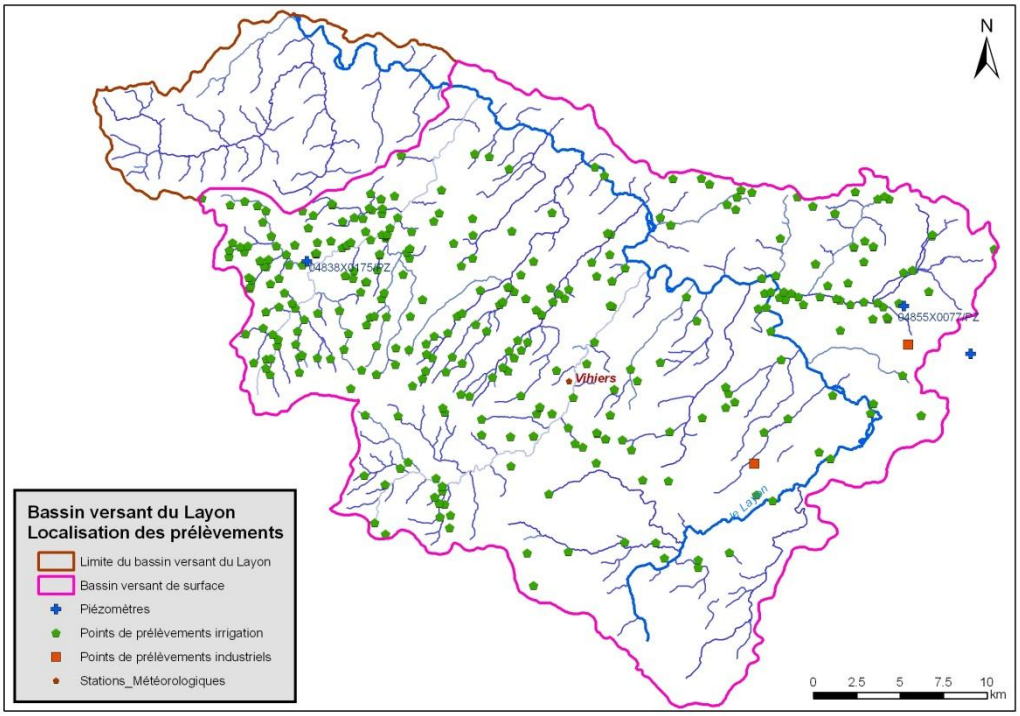


Illustration 8 : Localisation des prélèvements sur le bassin versant du Layon

On observe une nette prépondérance des prélèvements destinés à l'irrigation sur le bassin (Illustration 9). Le volume prélevé connu a fortement augmenté en 2004 puis s'est stabilisé avant de considérablement diminuer en 2008. L'Illustration 10 permet de comparer l'évolution des prélèvements totaux à celle du niveau piézométrique : cette comparaison ne pouvant être effectuée que sur une courte période (chronique piézométrique disponible de 2006 à 2011 et données de prélèvements de 2000 à 2008, soit seulement 3 années en commun), il est impossible de déterminer un éventuel impact des prélèvements sur les fluctuations piézométriques. Le suivi piézométrique doit être poursuivi afin de disposer de chroniques suffisamment longues pour effectuer cette comparaison et modéliser le comportement de la nappe avec et sans cet impact.

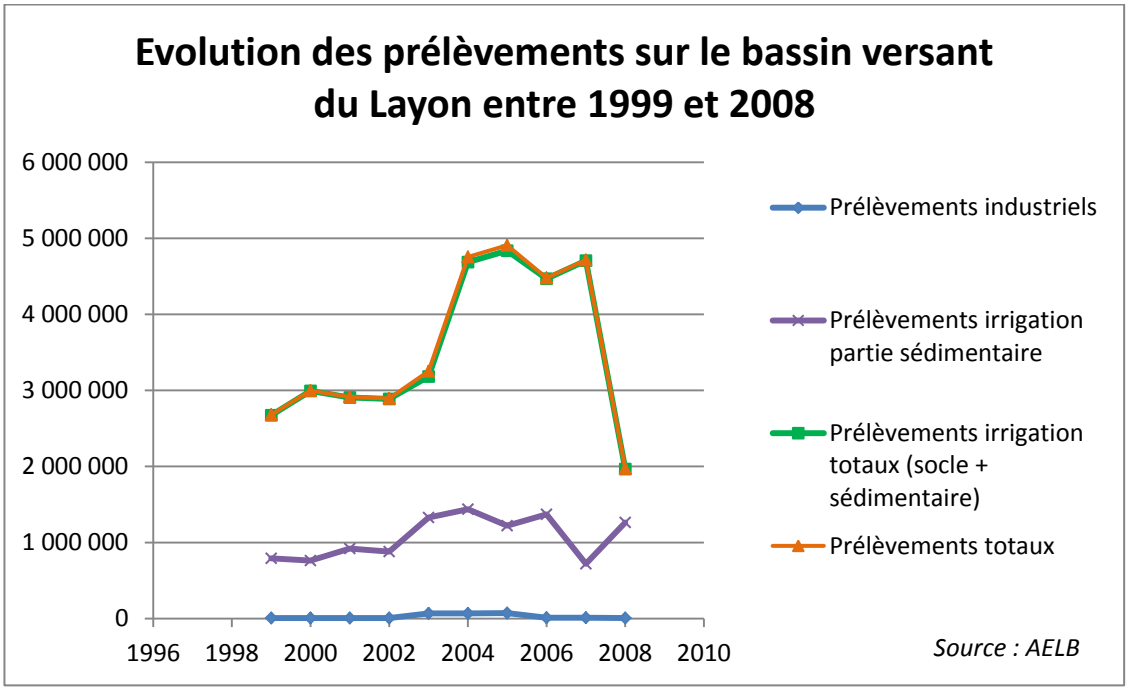


Illustration 9 : Evolution des prélèvements industriels et irrigation sur le bassin versant du Layon entre 1999 et 2008

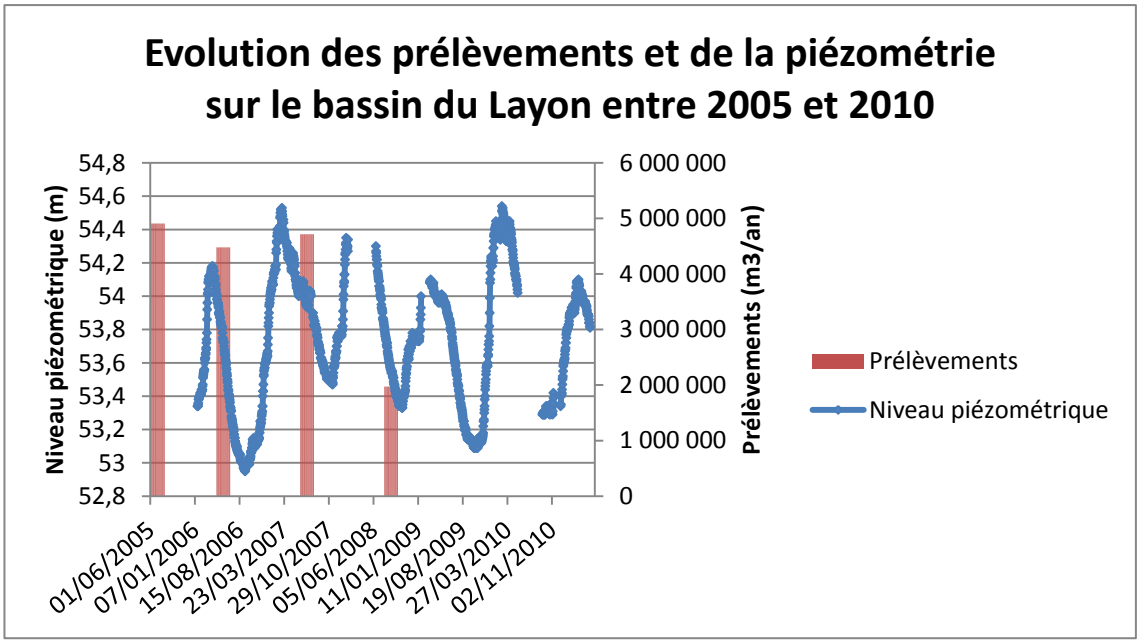


Illustration 10 : Evolution des prélèvements et de la piézométrie sur le bassin versant du Layon entre 2005 et 2010

6.2. REJET DES STATIONS D'EPURATION

Dans le bilan, il faut également prendre en compte les rejets de stations d'épuration (STEP). L'eau potable du bassin du Layon provient d'un autre bassin (lire ci-dessus) et les rejets des STEP constituent donc un apport extérieur d'eau au système hydrologique.

Sur le bassin du Layon, on compte 54 stations d'épuration (Annexe 5). Il faut noter que la STEP de Chemillé (deuxième STEP du bassin en termes de capacité : 2000 eH) est la seule station d'épuration possédant un dispositif de non rejet en période d'étiage sur le bassin du Layon (le rejet de cette STEP ne sera pas comptabilisé dans les calculs suivants).

Les volumes rejetés par ces STEP peuvent être estimés selon deux approches différentes :

- à partir de leur capacité nominale (données du SANDRE) : pour ces 53 stations, on obtient un total des capacités nominales de 9 072 m^3/j (soit environ 3,3 millions de m^3/an). Il s'agit d'une valeur maximale qui ne reflète pas la réalité actuelle, les STEP ne fonctionnant pas encore à capacité nominale (STEP dimensionnées en prenant en compte les futurs raccordements sur le réseau d'assainissement collectif).

- à partir du débit moyen journalier calculé pour l'année 2010 (valeurs de charges hydrauliques entrantes, transmises par la DDT 49 : pour les stations de plus de 2000 équivalent-habitant (eH), la valeur est une moyenne annuelle ; pour les STEP entre 1000 et 2000 eH, la valeur correspond à la moyenne de 2 bilans journaliers ; pour les STEP de moins de 1000 eH, un seul bilan par an). Pour les 53 STEP du bassin, on obtient un total de 7 178 m^3/j (soit environ 2,6 millions de m^3/an). Ce volume se rapproche davantage du volume réellement rejeté par les STEP du bassin versant que celui calculé à partir des capacités nominales.

Le volume d'eau rejeté par les STEP est du même ordre de grandeur que les prélèvements effectués dans le bassin du Layon chaque année.

D'autre part, si on compare ce flux rejeté par les STEP au débit du Layon à Saint-Lambert du Lattay (environ 1 m^3/s sur l'année et environ 0,2 m^3/s à l'étiage), les rejets de STEP représentent environ 8 à 10% du débit du Layon (respectivement en prenant en compte la somme des capacités nominales ou la somme des débits moyens journaliers) mais jusqu'à 42 à 53% en période d'étiage.

6.3. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Le bilan hydrologique a été réalisé sur une période de 10 ans (2000-2010), ce qui permet de s'affranchir de l'incertitude sur le remplissage de la réserve utile du sol au début du bilan (les années 2001 et 2002 ayant été particulièrement pluvieuses, on peut considérer que la réserve utile a été intégralement reconstituée). Ce bilan est basé sur

les données Météo France de pluviométrie à la station météorologique de Vihiers (au centre du bassin versant du Layon) et d'évapotranspiration potentielle (ETP) à la station de Beaucouzé, au pas de temps décadaire. La station météorologique de Beaucouzé est assez éloignée du bassin du Layon (40 km) mais il s'agit de la plus proche station fournissant des valeurs d'ETP dans le secteur.

La réserve utile des sols a été calculée par une méthode estimative de terrain basée sur la texture des différents types de sols rencontrés sur le bassin du Layon (*source : AgroCampus ouest, Angers*). Elle est évaluée à 120 mm.

Ces données permettent de calculer les pluies efficaces[1] (hauteur d'eau en mm) qui se répartissent entre ruissellement (estimé à 20% de pluies efficaces sur le bassin versant du Layon) et infiltration (Annexe 6). Sur la période de recharge (octobre à mars) la moyenne des pluies efficaces est de l'ordre de 340 mm (hauteur d'eau calculée sur la base des données précédemment citées). La recharge moyenne de l'aquifère sur la période 2000-2010 est de 130 mm. On constate une tendance globale à la baisse de la recharge ces dernières années, avec notamment une recharge très faible en 2005 et 2008 (respectivement 46 et 55 mm).

L'Illustration 11 permet de comparer l'évolution de la lame d'eau infiltrée annuellement à celle du niveau piézométrique : comme pour les prélèvements, cette comparaison ne peut être effectuée que sur les 6 années couvertes par la chronique piézométrique (2006 à 2011), il est donc impossible d'en tirer une éventuelle corrélation.

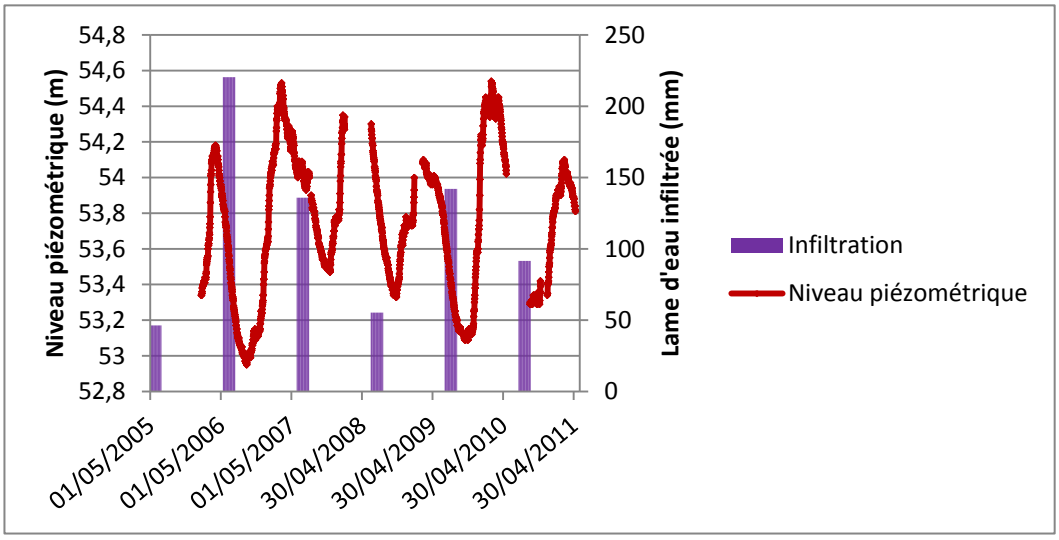


Illustration 11 : Evolution du niveau piézométrique et de l'infiltration annuelle sur le bassin du Layon entre 2005 et 2011

[1] On appelle ici pluie efficace le terme du bilan hydrologique Peff = P-ETP ; une partie de cette pluie efficace ruisselle tandis que l'autre s'infiltre puis recharge la réserve utile des sols RU et éventuellement la nappe (lorsque RU=RUmax.)

Les prélèvements peuvent représenter une part importante de la recharge de l'aquifère, notamment en année sèche (10% de la recharge en 2005 (Illustration 12), calcul réalisé en ramenant les volumes prélevés (en m^3) à une lame d'eau (en mm) sur le bassin du Layon afin de pouvoir les comparer à la lame d'eau infiltrée). Pour les autres années, la part des prélèvements connus ne représente que 1 à 3 % de la lame d'eau infiltrée annuellement (Illustration 12 et Annexe 6).

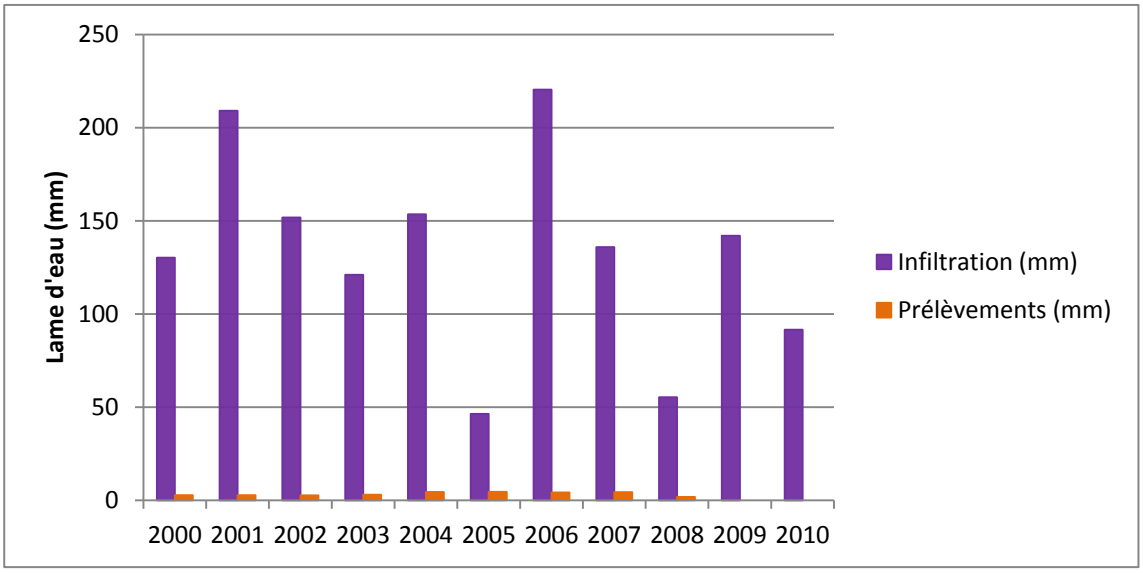


Illustration 12 : Evolution des prélèvements et de l'infiltration annuelle sur le bassin du Layon entre 2000 et 2009

7. Etude des corrélations niveaux/débits/pluie

7.1. ANALYSE PRÉALABLE A LA MODÉLISATION

Pour caractériser les nappes en fonction de leur inertie plusieurs outils peuvent être utilisés :

- le temps de demi-décroissance des niveaux,
- le temps de "réponse moyen" déduit de la réponse impulsionnelle de l'hydrosystème, avec le logiciel de modélisation TEMPO,
- le corrélogramme de la chronique piézométrique (quantifiant la "mémoire" du système).

Les stations de mesures (piézomètres, stations hydrométriques et stations météorologiques) étudiées pour les corrélations et la modélisation ont été choisies de manière à disposer des chroniques les plus longues possibles (Illustration 13).

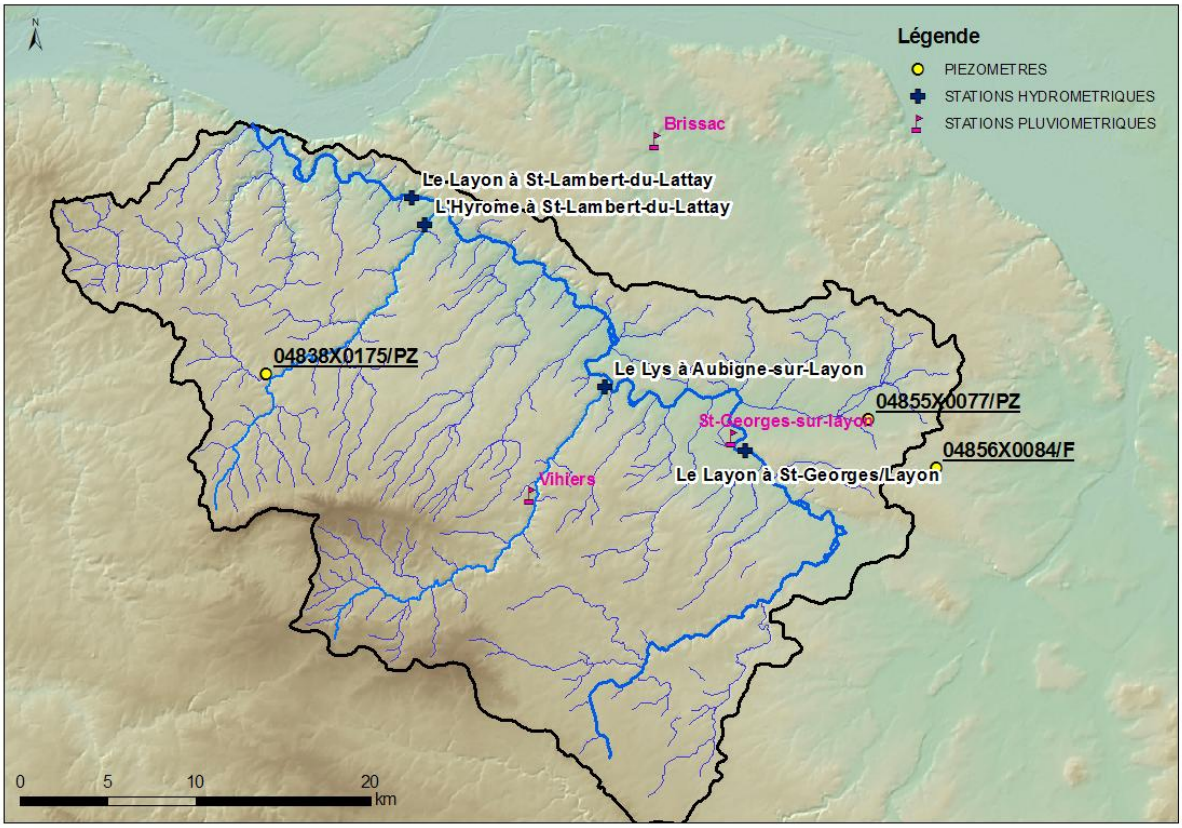


Illustration 13 : Localisation des stations de mesures étudiées pour les corrélations et les modélisations

7.1.1. Piézomètre 04855X0077/PZ (Doué-la-Fontaine, Cénomanien)

Autocorrélogramme

Pour une chronique piézométrique, un autocorrélogramme (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 ».[2]

Pour le piézomètre 04855X0077/PZ de Doué-la-Fontaine (Cénomanien), on obtient l'autocorrélogramme suivant (Illustration 14), à partir de sa chronique piézométrique :

[2] J.J. Seguin - 2010 - Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR

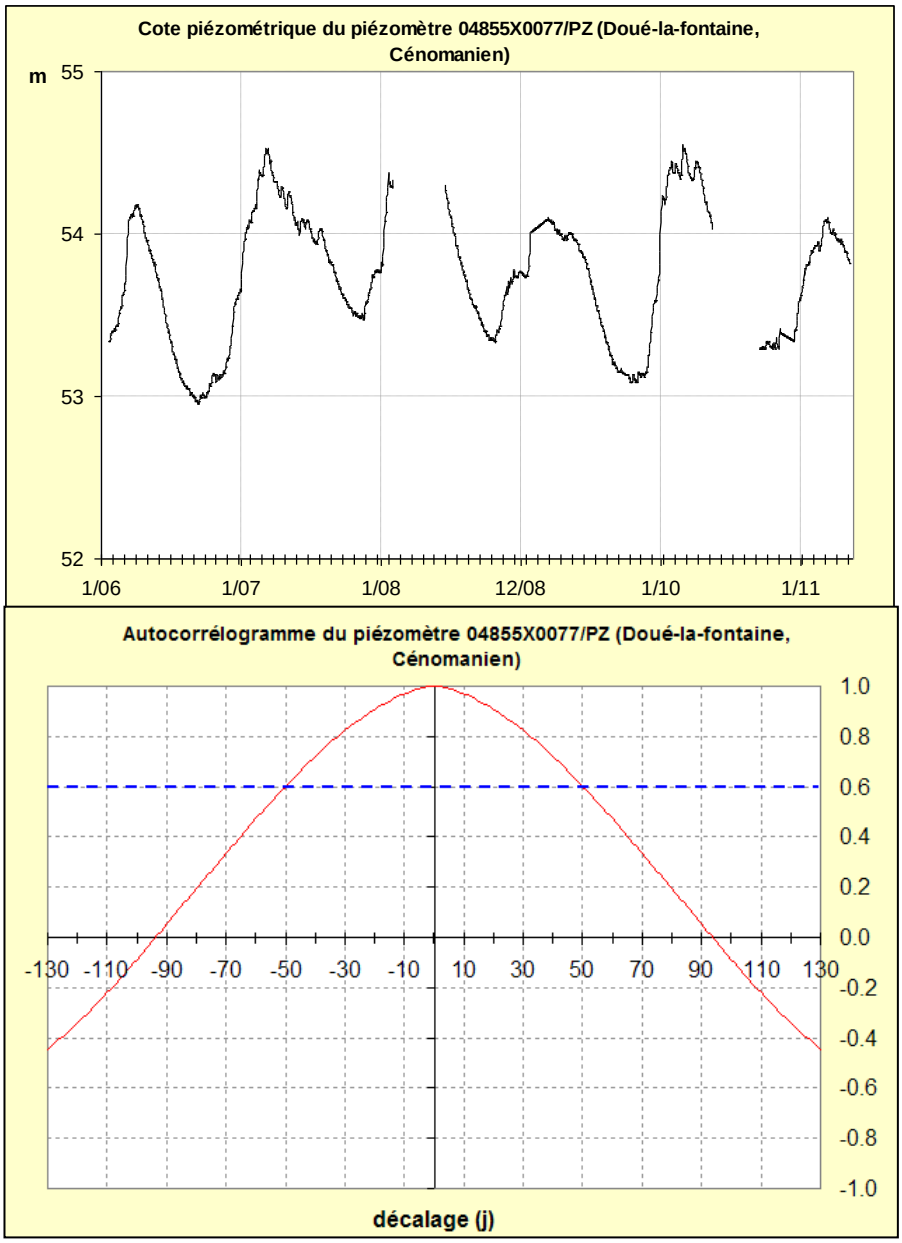


Illustration 14 : Chronique piézométrique et autocorrélogramme du piézomètre 04855X0077/PZ de Doué-la-Fontaine (Cénomanien)

Ce corrélogramme décrit une nappe à cycle annuel (la corrélation n'est plus significative après 50 jours), de faible inertie. Aucun cycle pluriannuel n'a pu être identifié (Illustration 14).

Période de retour quinquennale sèche (« 5 ans sec ») des niveaux piézométriques décadaires à l'étiage

Il est possible de définir un niveau piézométrique décadaire de période de retour "5 ans sec" en classant les niveaux piézométriques décadaires[3] par fréquence cumulée : il correspond à une fréquence de 0,2 (la période de retour étant l'inverse de la fréquence). Cette analyse a été conduite sur les valeurs décadaires des niveaux piézométriques à l'étiage de Doué-la-Fontaine (Cénomanien). La période d'étiage considérée dans l'analyse fréquentielle est variable selon les années (on choisit les neuf décades successives pendant lesquelles les niveaux sont les plus bas) mais correspondent peu ou prou en l'occurrence aux mois de septembre, octobre et novembre.

Des précisions sur l'analyse fréquentielle et l'ajustement de lois de probabilité sont fournies en Annexe 7.

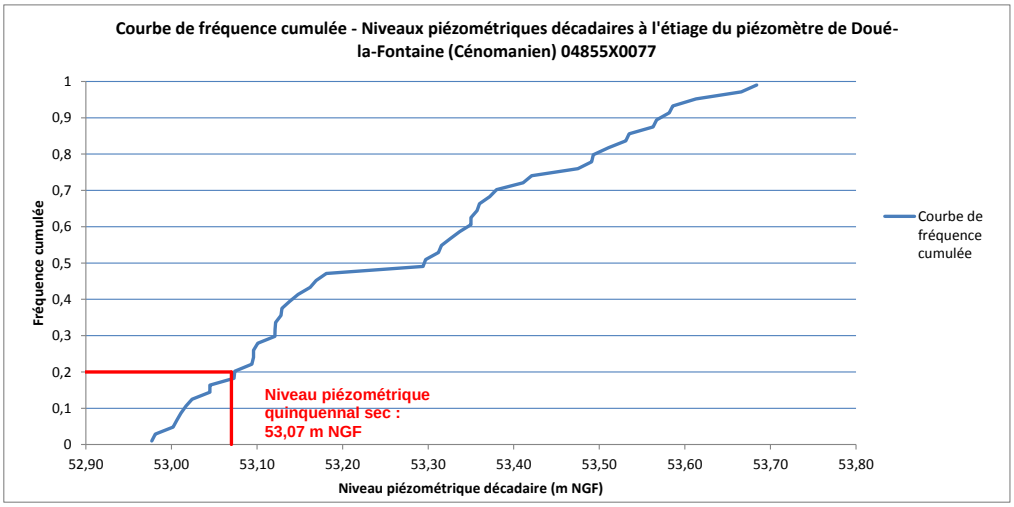


Illustration 15 : calcul de la période de retour « 5 ans sec » du niveau piézométrique décadaire à l'étiage du piézomètre 04855X0077/PZ de Doué-la-Fontaine (Cénomanien)

Pour le piézomètre 04855X0077/PZ, le niveau piézométrique décadaire à l'étiage de période de retour "5 ans sec"[4] est de 53,07 m (Illustration 15). Ce niveau doit être interprété avec précaution étant donné que la chronique piézométrique ne comporte que 6 ans de données.

[3] Moyenne des niveaux piézométrique enregistrés pendant une décade

[4] le niveau piézométrique journalier à l'étiage de période de retour 5 ans sec est sensiblement équivalent : il vaut quant à lui 53,06 m NGF

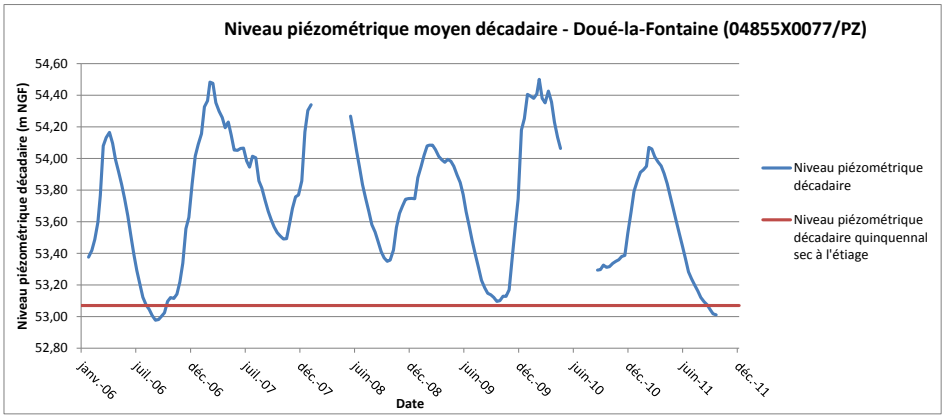


Illustration 16 : le niveau piézométrique décadaire à l'étiage de période de retour « 5 ans sec » a été atteint à Doué-la-Fontaine en 2006 et 2011

7.1.2. Piézomètre 04838X0175/PZ (Chemillé, socle)

Autocorrélogramme

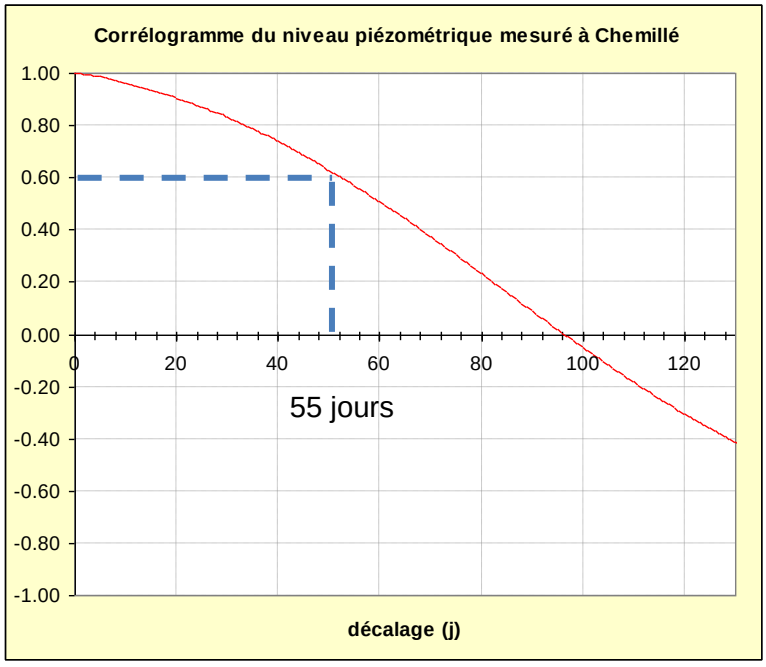


Illustration 17 : Autocorrélogramme du piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé (socle)

Pour le piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé, le corrélogramme décrit une nappe à cycle annuel (la corrélation n'est plus significative après 55 jours), de faible inertie (Illustration 17).

Période de retour « 5 ans sec » du niveau piézométrique décadaire

On constate que sur la période 2006-2011 les basses eaux à Chemillé ne se produisent pas à la même période de l'année (par exemple, un décalage d'un trimestre est observé entre les basses eaux de l'année 2006, survenues pendant l'été, et celles de 2007, survenues à l'automne). Pour réaliser l'analyse fréquentielle et déterminer le niveau piézométrique décadaire quinquennal sec, on extrait de la chronique piézométrique les neuf décades consécutives de chaque année présentant les niveaux piézométriques les plus bas.

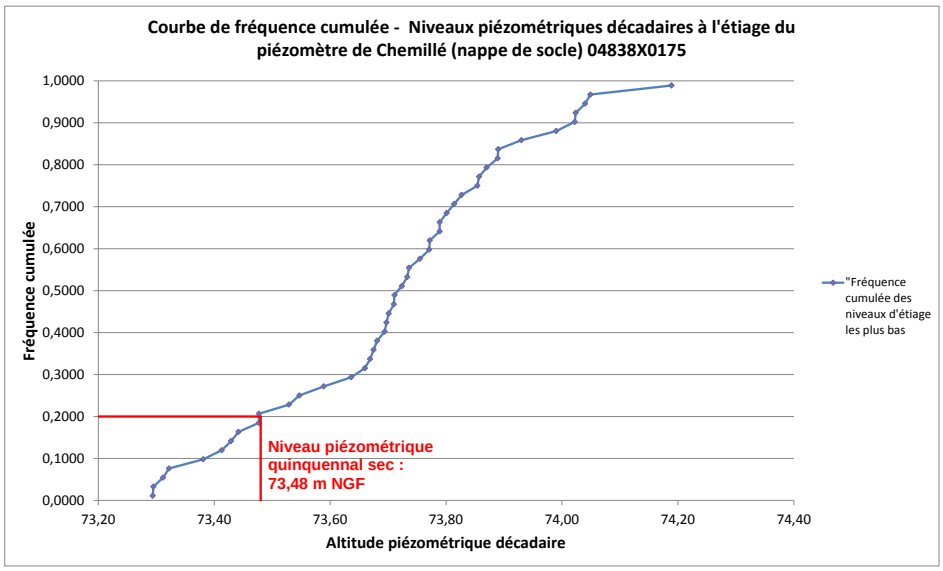


Illustration 18 : Calcul de la période de retour « 5 ans sec » du niveau piézométrique d'étiage du piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé (socle)

Le niveau piézométrique journalier de période de retour "5 ans sec" (fréquence de 0,2) calculé à partir des donnés piézométriques d'étiage est de 73,48 m pour le piézomètre 04838X0175/PZ de Chemillé (Illustration 18).

Comme pour le piézomètre de Doué-la-Fontaine, ce niveau doit être interprété avec précaution étant donné que la chronique piézométrique ne comporte que 6 ans de données.

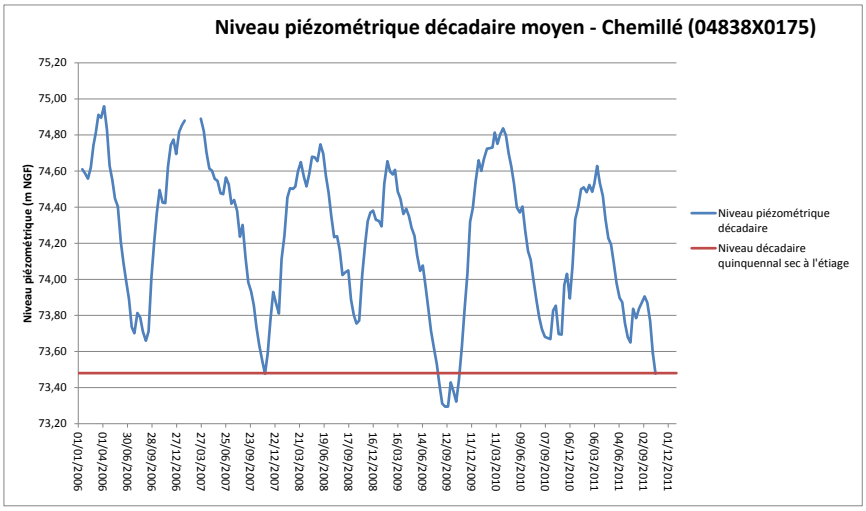


Illustration 19 : le niveau piézométrique décadaire d'étiage de période de retour « 5 ans sec » a été atteint à Chemillé en 2009

7.1.3. Analyse du débit du Layon

Débit à Saint-Georges-sur-Layon

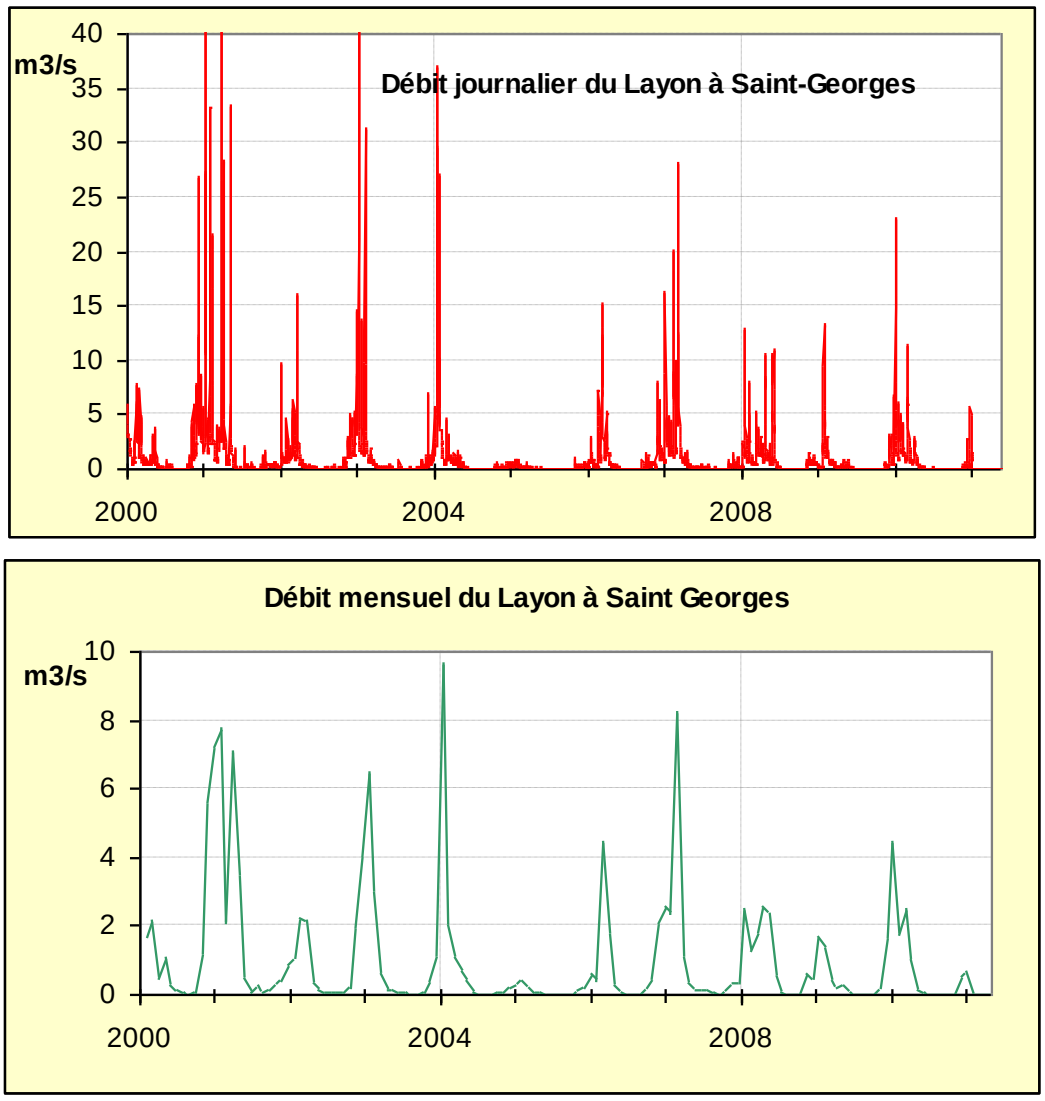


Illustration 20 :Chronique de débit journalier et mensuel à Saint-Georges-sur-Layon

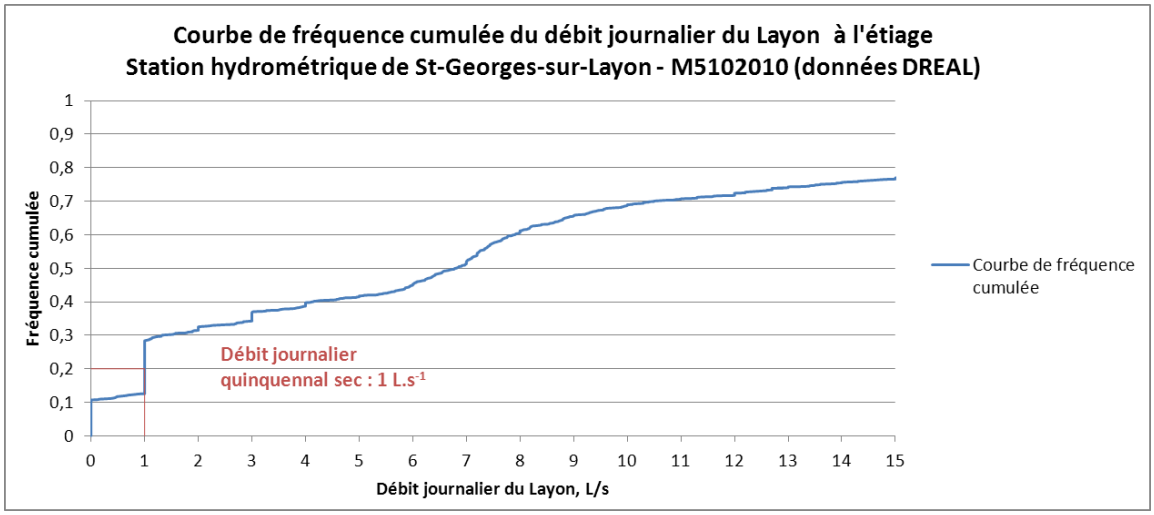


Illustration 21 : Calcul de la période de retour « 5 ans sec » du débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon

Le débit journalier du Layon à l'étiage à Saint-Georges-sur-Layon de période de retour « 5 ans sec » (Illustration 21) est de 0,001 m^3/s (calcul réalisé sur les débits journaliers enregistrés à l'étiage[5] au cours des 10 dernières années, 2002-2011. Sur les 900 débits journaliers d'étiage utilisés pour le calcul, 143 sont approchés à 1 $L.s^{-1}$). Le QMNA5[6] donné sur le site de la Banque HYDRO, calculé sur 45 ans, est deux fois plus élevé, à 0,002 m^3/s. La décennie 2002-2011 est donc marquée par une diminution des débits du Layon les plus faibles à l'étiage.

Les étiages du Layon sont très sévères, ce qui pourrait s'expliquer par un faible soutien de la nappe, renforcé par les prélèvements en nappe sur le bassin versant. D'autre part, le Layon est très anthropisé (nombreux ouvrages hydrauliques).

Débit à Saint-Lambert-du-Lattay

Le comportement du Layon à St-Lambert est très comparable avec celui mesuré à Saint-Georges-sur-Layon : très faibles étiages, pics de crues aux mêmes périodes.

[5] L'étiage est ici défini comme les 90 jours consécutifs où la moyenne des débits journaliers est la plus faible. Il correspond le plus souvent aux mois de juillet, août et septembre, parfois juin et octobre.

[6] Débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans. Le débit mensuel d'étiage du cours d'eau ne descend en dessous de cette valeur que 20 fois par siècle.

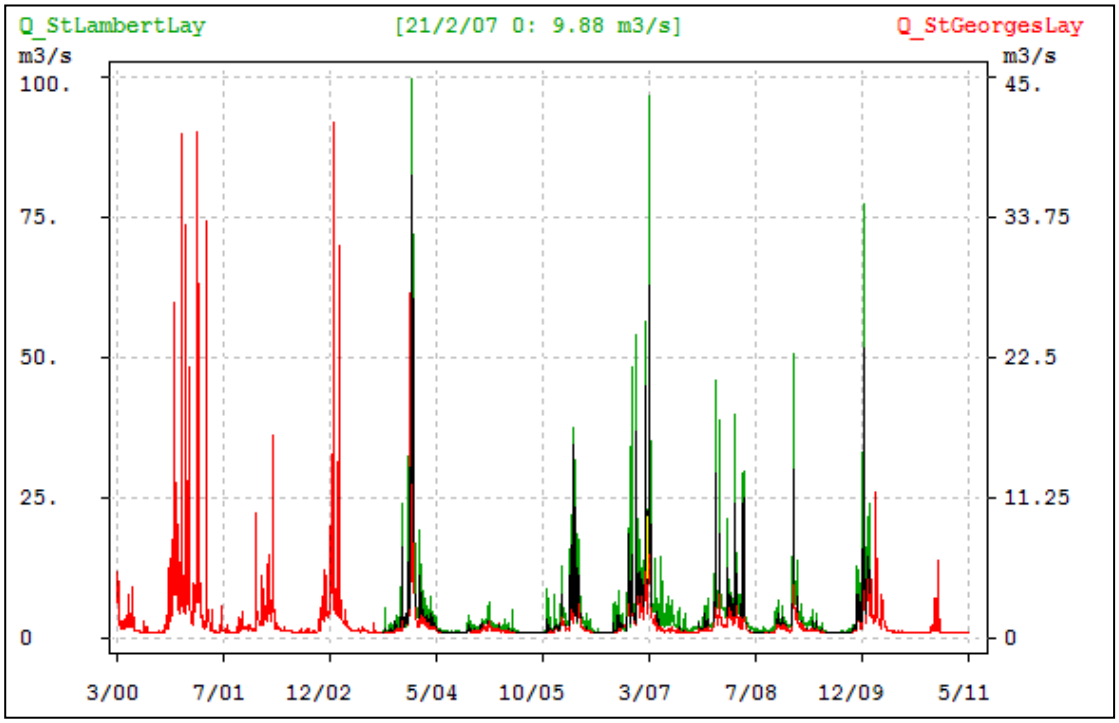


Illustration 22 : Comparaison du débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et à Saint-Lambert-du-Lattay

7.1.4. Recherche de corrélations entre niveaux et débits

Des outils d'analyse des séries temporelles de niveaux et débits peuvent aussi être utilisés pour obtenir une vision synthétique des relations de dépendance existant entre ces séries (corrélogrammes croisés).

Recherche de corrélation entre la chronique piézométrique de Doué-la-Fontaine et le débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon

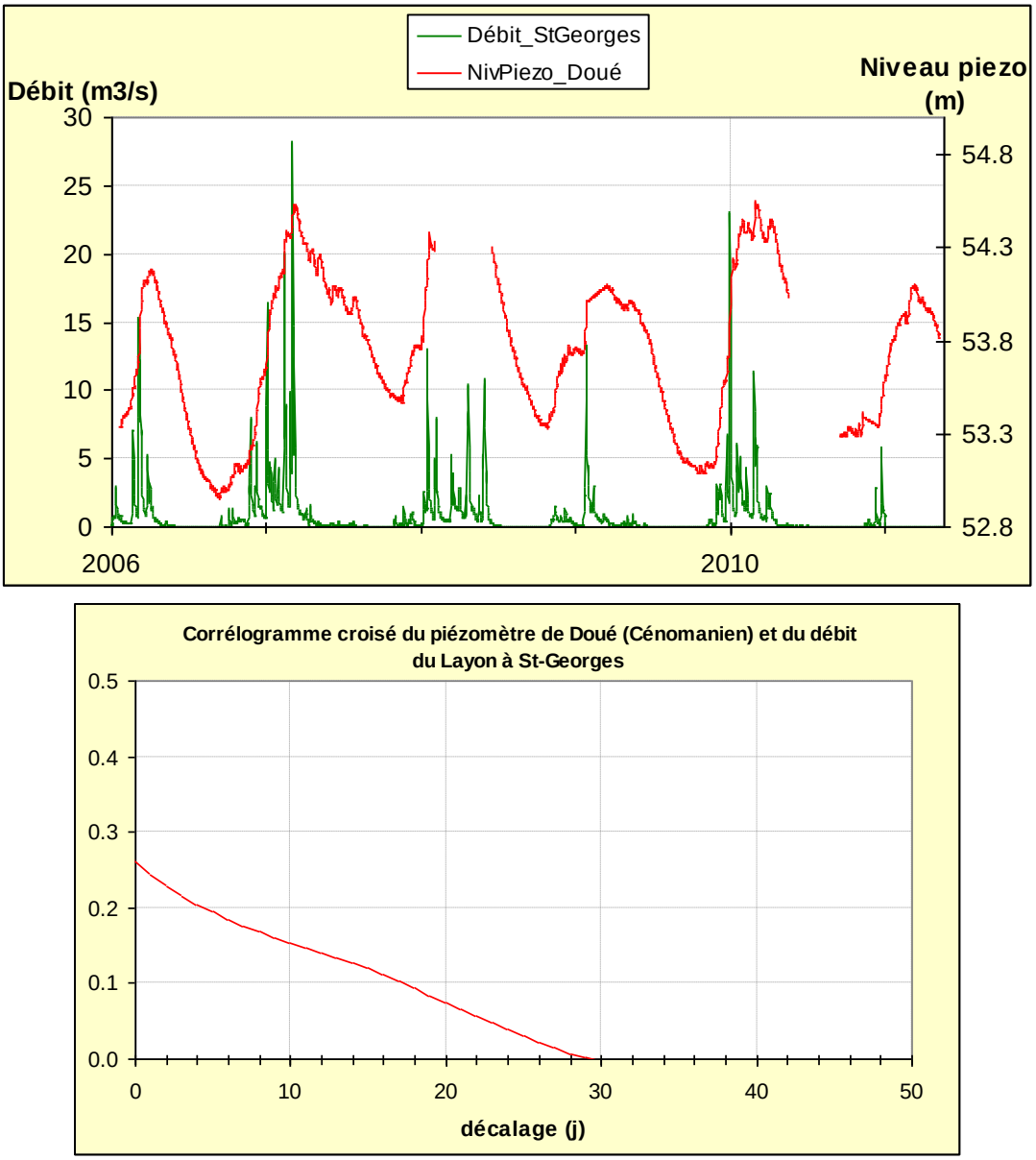


Illustration 23 : Chronique piézométrique de Doué-la-Fontaine, débit du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et corrélogramme croisé

Il existe peu de corrélation entre le niveau de la nappe mesuré à Doué-la-Fontaine et le débit du Layon mesuré à Saint-Georges-sur-Layon (même résultat avec le débit mesuré à Saint-Lambert).

Recherche de corrélation entre la chronique piézométrique de Chemillé et le débit du Layon à Saint-Lambert

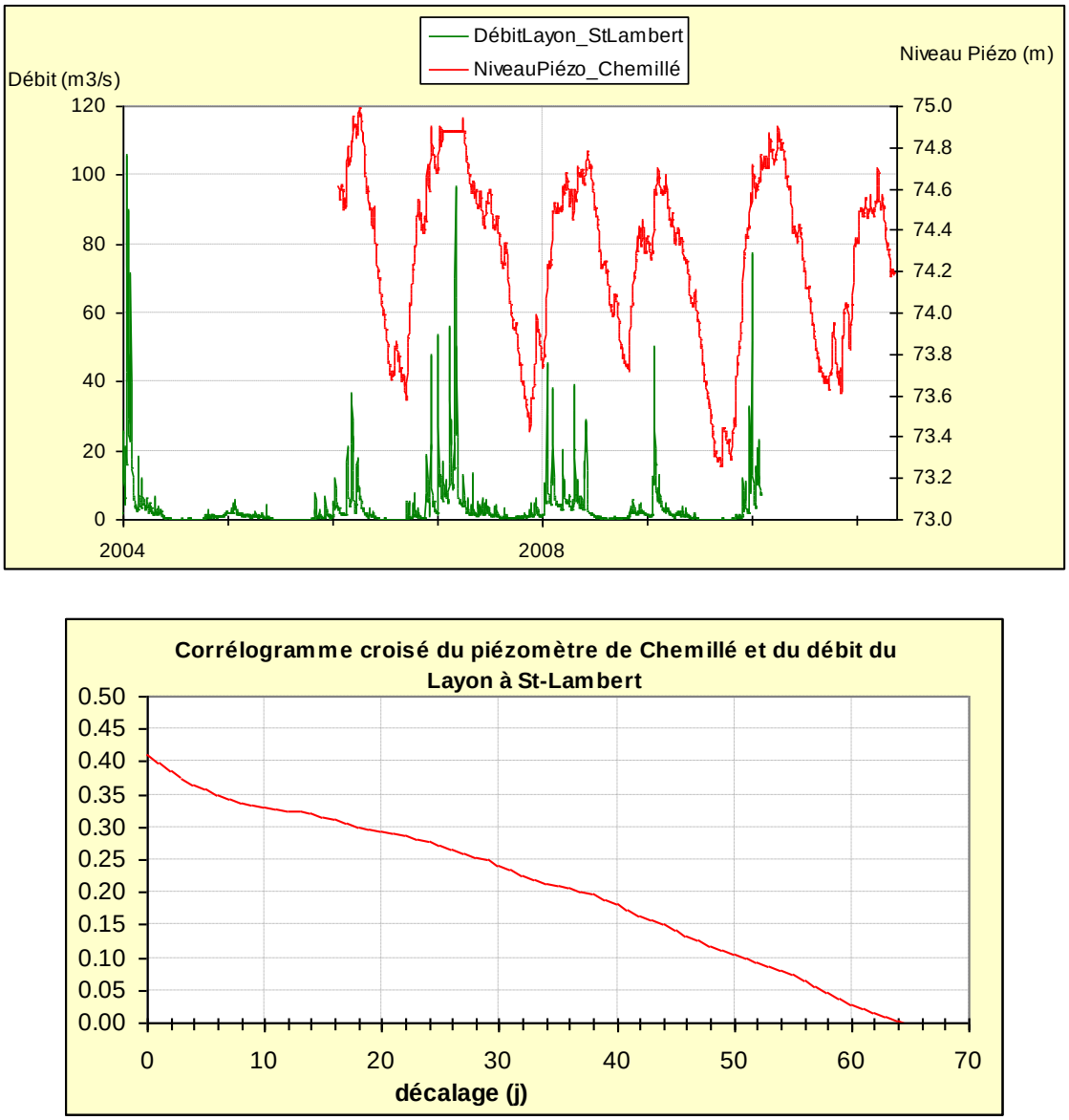


Illustration 24 : Chronique piézométrique de Chemillé, débit du Layon à Saint-Lambert et corrélogramme croisé

Il existe peu de corrélation entre le niveau de la nappe mesuré à Chemillé et le débit du Layon (mesuré à Saint-Georges-sur-Layon ou à Saint-Lambert).

7.1.5. Corrélogramme croisé Pluie/Débit

Parmi les 3 stations pluviométriques étudiées (Vihiers, Saint-Georges-sur-Layon et Brissac), c'est la pluviométrie mesurée à Vihiers qui « explique le mieux » le débit du Layon (optimisation du corrélogramme croisé).

Sur le graphique suivant (Illustration 25) sont superposés le débit journalier du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et la pluviométrie à Vihiers au pas de temps mensuel (en mm/mois).

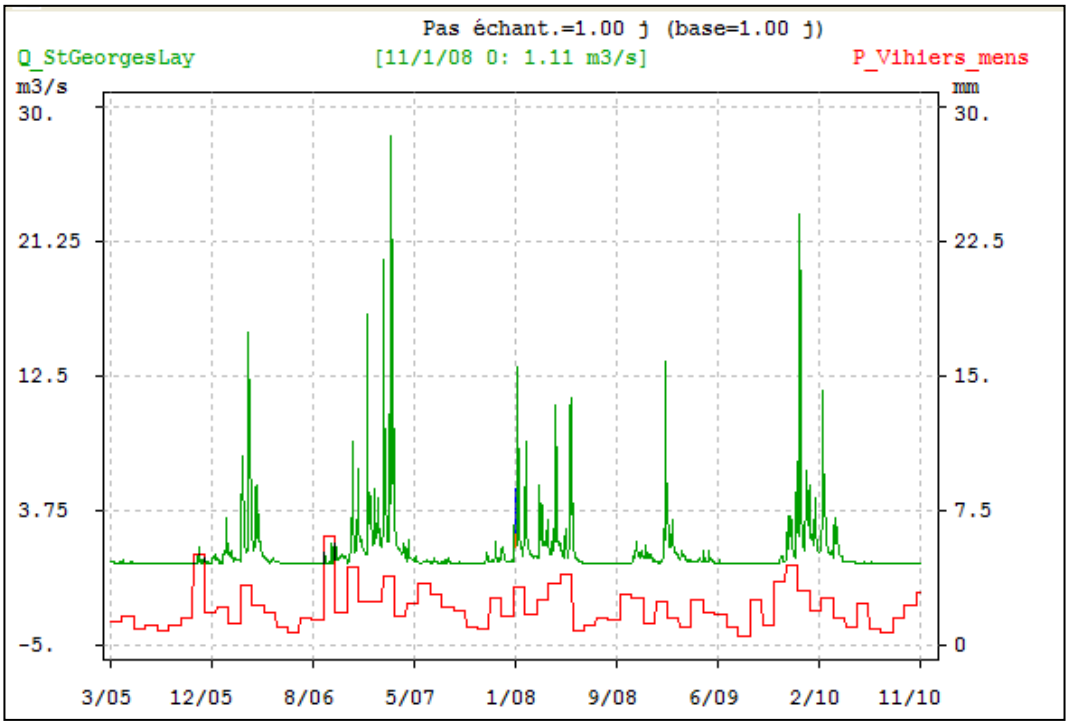


Illustration 25 : Débit journalier du Layon à Saint-Georges-sur-Layon et pluviométrie mensuelle à Vihiers

7.2. MODÉLISATION PLUIE/DÉBIT

Il faut noter que les niveaux piézométriques mesurés sur le Layon n'ont pas pu faire l'objet de modélisation, faute de données sur une longueur suffisante (moins de 10 ans de suivi). Cette modélisation intégrant la piézométrie pourra être effectuée lorsque les chroniques seront suffisamment longues.

Une modélisation globale de type « boîte noire » pluie/débit a été réalisée avec le logiciel de traitement du signal TEMPO du BRGM, au pas de temps décadaire :

- Données en entrée : pluie décadaire à Vihiers, ETP décadaire à Beaucouzé ;
- Données en sortie : débit journalier à Saint-Georges-sur-Layon.

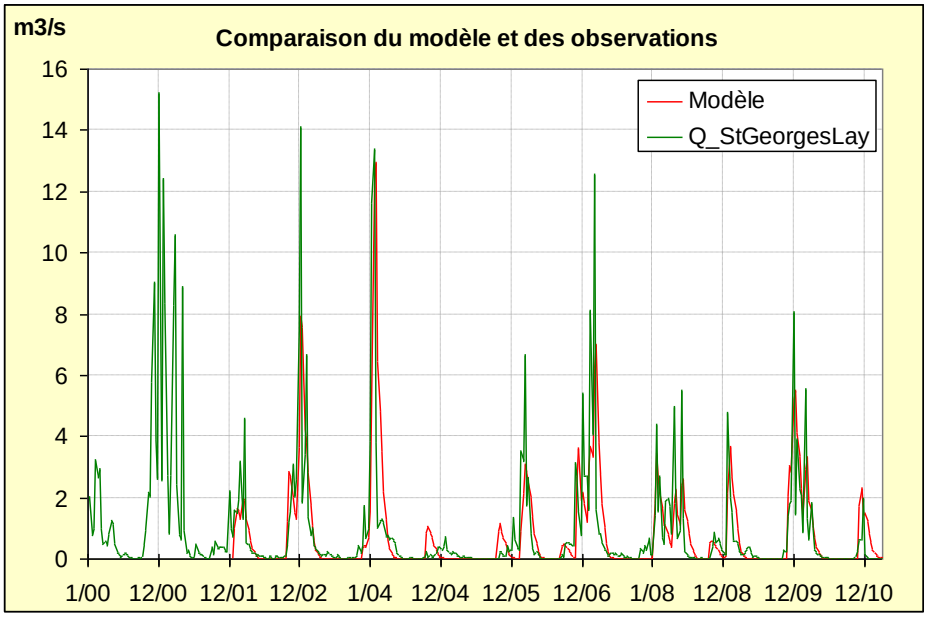


Illustration 26 : Comparaison du débit modélisé avec le logiciel TEMPO et du débit mesuré à Saint-Georges-sur-Layon

Le débit est globalement bien reproduit par le modèle, à la fois en situation d'étiage et pour les pics de crue (Illustration 26).

Les réponses impulsionnelles utilisées par le logiciel pour reproduire le débit à partir de la pluie efficace sont représentées sur l'Illustration 27 :

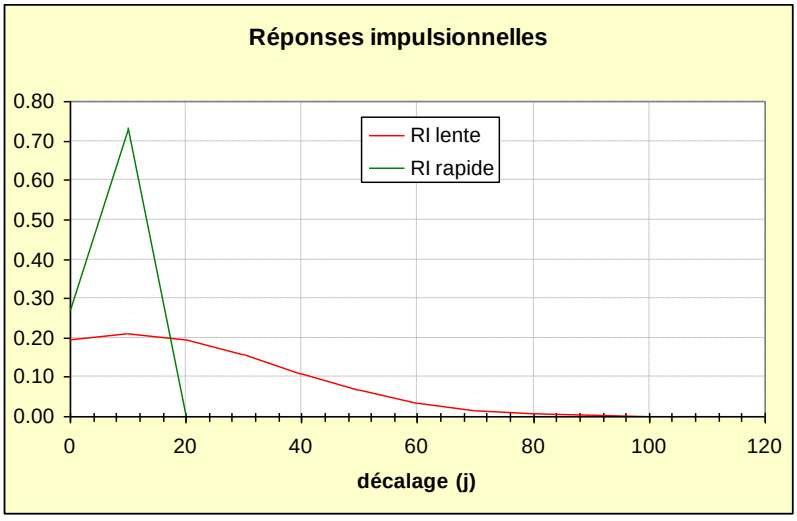


Illustration 27 : Réponses impulsionnelles utilisées par le logiciel TEMPO

Le décalage en jours montre une réponse rapide de l'hydrosystème, avec une faible contribution des eaux souterraines au débit du cours d'eau (ruissellement

prépondérant). Il s'agit d'une réponse globale calculée sur l'année entière. Il n'est en effet pas possible de différencier l'étiage de la période hivernale pour cette modélisation.

8. Conclusion

Cette étude visant à une meilleure connaissance de la ressource en eau souterraine et de son utilisation dans le périmètre du bassin versant du Layon s'est concentrée sur la partie sédimentaire du bassin versant. Différents types de données ont été recueillis sur ce secteur : piézométrie, pluviométrie, débit des cours d'eau, prélèvements.

Les campagnes piézométriques du printemps (avril) et de l'automne (octobre) 2010 ont abouti à l'élaboration de deux cartes piézométriques, respectivement hautes et basses eaux, qui renseignent chacune sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin versant. Les axes de drainage constitués par les vallées sont bien représentés par les courbes piézométriques et montrent que la nappe alimente les cours d'eau du secteur.

Les sens d'écoulement de la nappe varient peu entre avril et octobre 2010. Les hautes eaux provoquent généralement une augmentation du gradient hydraulique (malgré quelques anomalies de battement négatif entre basses et hautes eaux observées).

Le bilan hydrologique met en évidence une tendance à la baisse de la recharge au cours des dix dernières années (recharge moyenne de 130 mm sur la période 2000-2010). En parallèle, les prélèvements (quasi-exclusivement destinés à un usage irrigation) ont fortement augmenté, avant une diminution notable en 2008. La connaissance des prélèvements est imparfaite : elle repose sur les données de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, qui à l'évidence ignorent les prélèvements « sauvages » non déclarés (avérés dans le secteur).

La chronique piézométrique (Doué-la-Fontaine) disponible sur le bassin n'est pas suffisamment longue (2006-2011) pour pouvoir établir des relations entre les prélèvements, la recharge et l'évolution du niveau de la nappe. De même, cette chronique ne peut être utilisée pour une modélisation pluie-débit-niveau. Seule une simulation pluie-niveau a été réalisée. Elle met en évidence une faible contribution des eaux souterraines au débit d'étiage (d'où des étiages très sévères), avec prépondérance des phénomènes de ruissellement.

Des niveaux piézométriques de période de retour « 5 ans sec » ont été évalués sur le bassin du Layon. Néanmoins ils ne donnent qu'un ordre de grandeur des niveaux objectifs mais sont insuffisants (chronique d'à peine 5 ans) pour définir des seuils de vigilance, d'alerte et de crise.

Avant de pouvoir établir des règles de gestion, il est donc nécessaire d'acquérir une connaissance plus exhaustive des prélèvements. De plus longues chroniques (piézométrie, jaugeage du Layon, pluviométrie) permettront d'avoir un recul nécessaire sur les évolutions du débit du Layon, du niveau de la nappe et de la recharge de l'aquifère. Une nouvelle modélisation intégrant ces 3 paramètres (niveau-pluie-débit) ainsi que les volumes prélevés pourra alors être réalisée.

Le Layon étant une rivière très anthropisée, une étude hydraulique (barrages, retenues, …) pourrait également être envisagée.

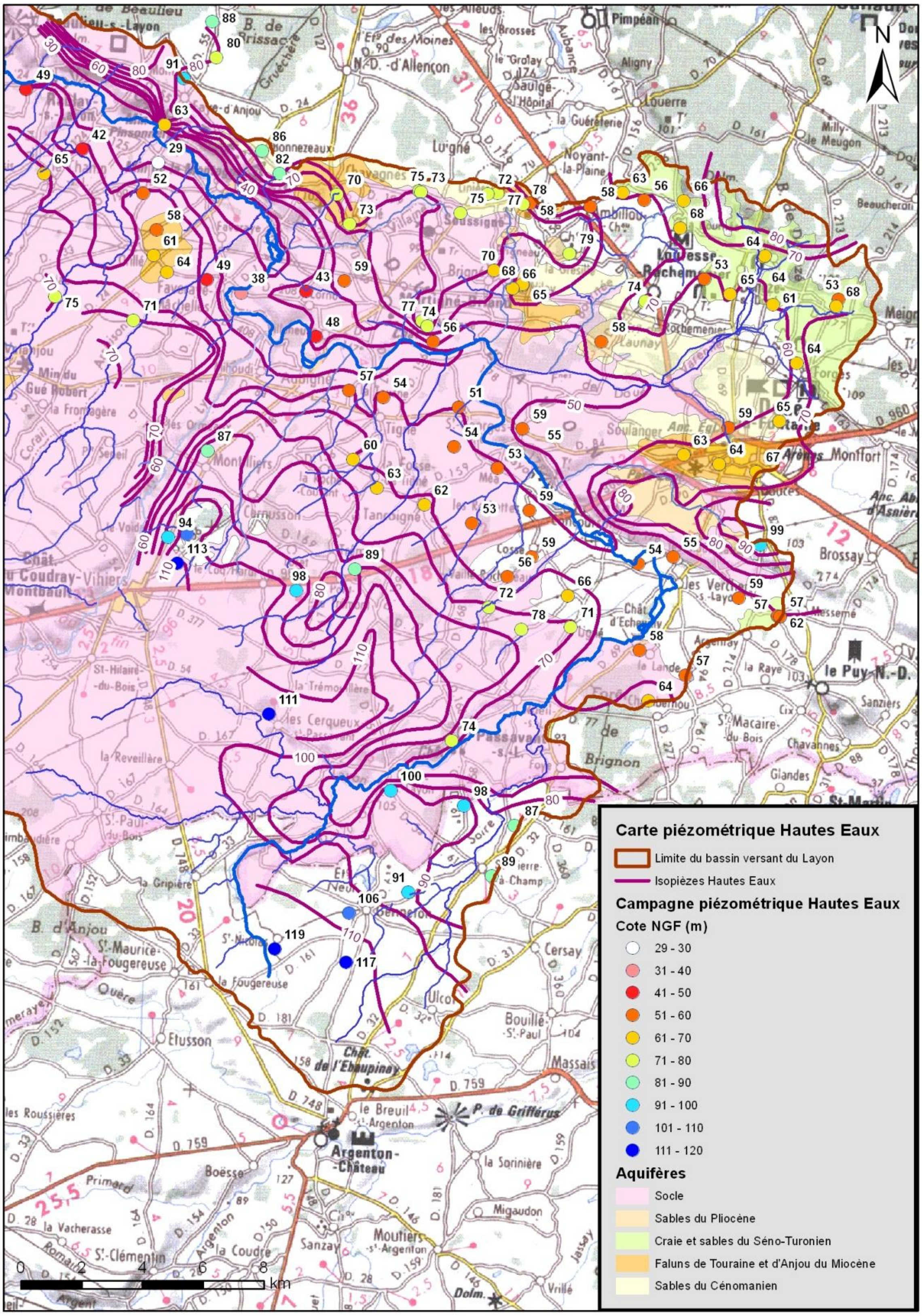
9. Bibliographie

SCE (2002) – SAGE des bassins versants du Layon et de l'Aubance – phase 1 – Rapport. 148 p.

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

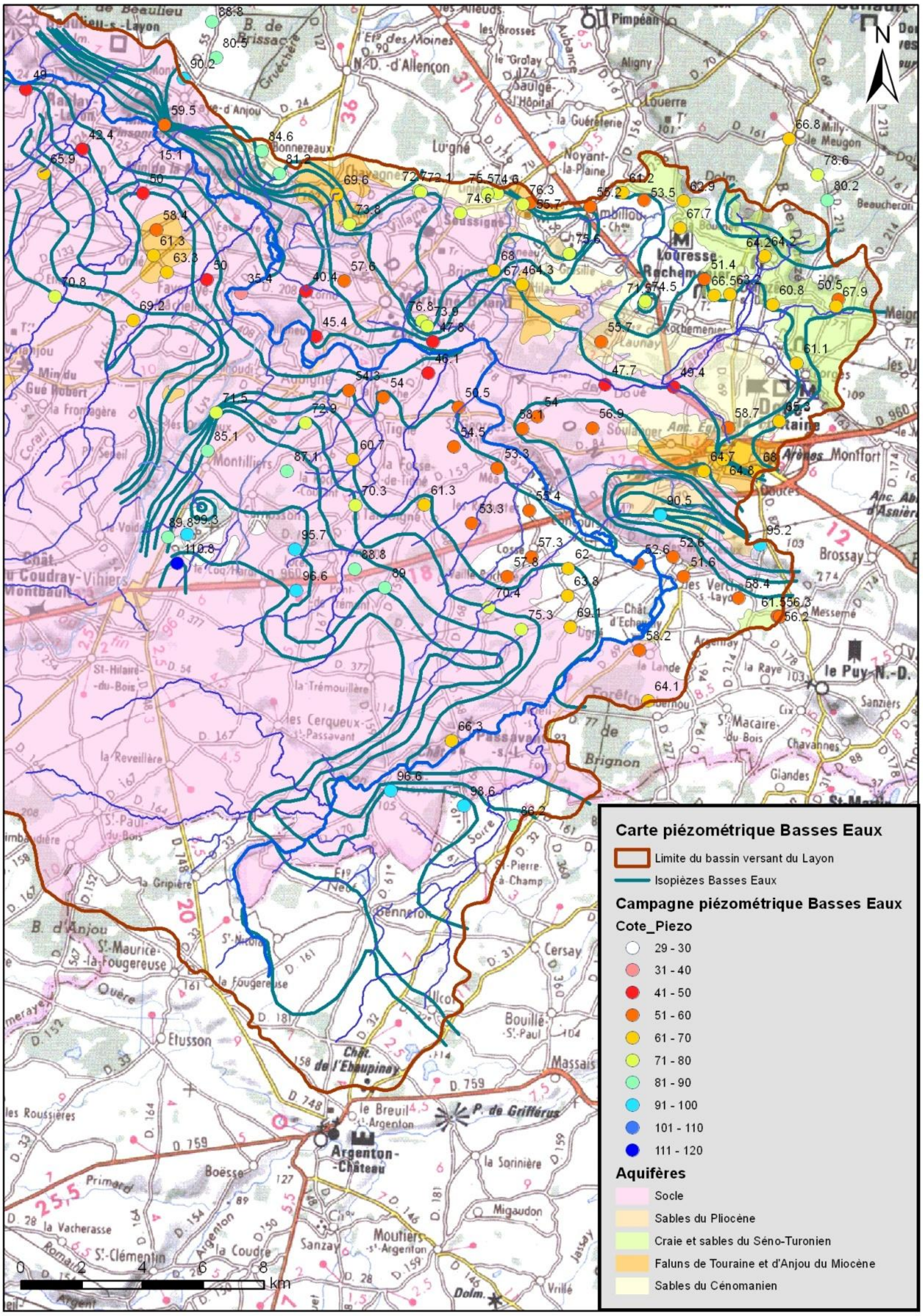
Annexe 1

Carte piézométrique hautes eaux des sables du Cénomanien du bassin du Layon


Carte piézométrique Hautes Eaux
Limite du bassin versant du Layon
Isopièzes Hautes Eaux
Campagne piézométrique Hautes Eaux
Cote NGF (m)
29 - 30
31 - 40
41 - 50
51 - 60
61 - 70
71 - 80
81 - 90
91 - 100
101 - 110
111 - 120
Aquifères
Socle
Sables du Pliocène
Craie et sables du Séno-Turonien
Faluns de Touraine et d'Anjou du Miocène
Sables du Cénomanien
0 2 4 6 8 km
N

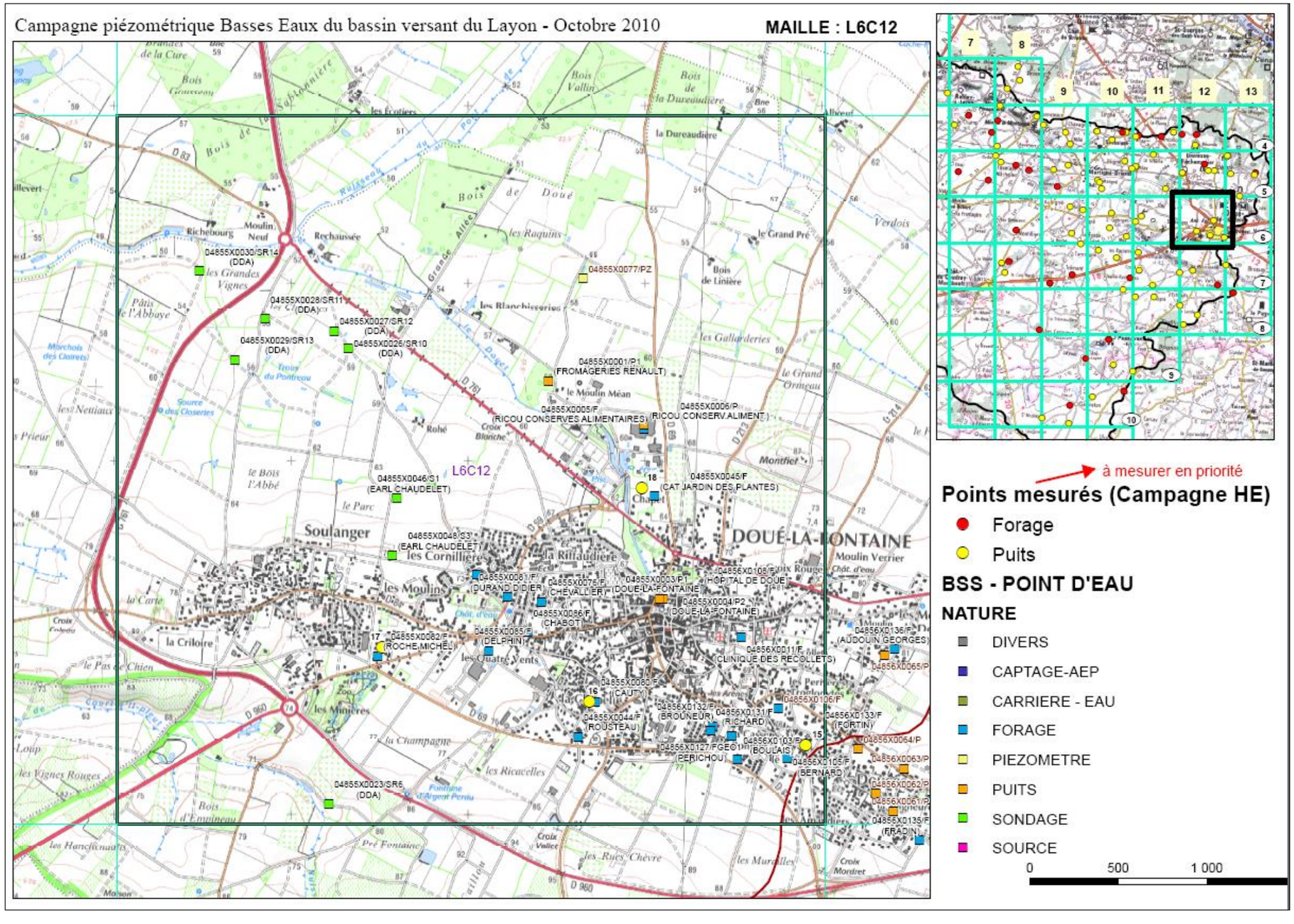
Annexe 2

Carte piézométrique basses eaux des sables du Cénomanien du bassin du Layon


Carte piézométrique Basses Eaux
Limite du bassin versant du Layon
Isopièzes Basses Eaux
Campagne piézométrique Basses Eaux
Cote_Piezo
29 - 30
31 - 40
41 - 50
51 - 60
61 - 70
71 - 80
81 - 90
91 - 100
101 - 110
111 - 120
Aquifères
Socle
Sables du Pliocène
Craie et sables du Séno-Turonien
Faluns de Touraine et d'Anjou du Miocène
Sables du Cénomanien
0 2 4 6 8 km
N

Annexe 3

Éléments de l’atlas


Campagne piézométrique Basses Eaux du bassin versant du Layon - Octobre 2010
MAILLE : L6C12
L6C12
04855X0030/SR14 (DDA)
04855X0028/SR11 (DDA)
04855X0027/SR12 (DDA)
04855X0029/SR13 (DDA)
04855X0026/SR10 (DDA)
04855X0077/PZ
04855X0001/P1 (FROMAGERIES RENAULT)
04855X0005/F (RICOU CONSERVES ALIMENTAIRES)
04855X0006/P (RICOU CONSERV.ALIMENT.)
04855X0046/S1 (EARL CHAUDELET)
04855X0045/F (CAT JARDIN DES PLANTES)
04855X0048/S3 (EARL CHAUDELET)
04855X0008/F (DURAND DIDIER)
04855X0076/F (CHEVALLIER)
04855X0003/P1 (DOUE-LA-FONTAINE)
04855X0004/P2 (DOUE-LA-FONTAINE)
04856X0108/F (HOPITAL DE DOUE)
04855X0086/F (CHABOT)
04855X0085/F (DELPHIN)
04855X0082/F (ROCHE,MICHEL)
04855X0080/F (CAUT)
04856X0011/F (CLINIQUE DES RECOLLETS)
04856X0136/F (AUDOUIN GEORGES)
04856X0065/P
04856X0106/F
04856X0132/F (BROUNEUR)
04856X0131/F (RICHARD)
04856X0133/F (FORTIN)
04856X0064/P
04856X0063/P
04856X0062/P
04856X0061/P
04856X0135/F (FRADIN)
04855X0044/F (ROUSSEAU)
04856X0127/FGEO1 (PERICHOU)
04856X0103/F (BOULAIS)
04856X0105/F (BERNARD)
04855X0023/SR6 (DDA)
Soulanger
DOUÉ-LA-FONTAINE
à mesurer en priorité
Points mesurés (Campagne HE)
Forage
Puits
BSS - POINT D'EAU
NATURE
DIVERS
CAPTAGE-AEP
CARRIERE - EAU
FORAGE
PIEZOMETRE
PUITS
SONDAGE
SOURCE
0
500
1 000

Annexe 4

Recensement des ouvrages

brgm

PIEZOMETRIE DU BASSIN VERSANT DU LAYON (49)
CAMPAGNE DU 12 AU 16 AVRIL

DATE :..... **EQUIPE :**

FICHE N° .....

PHOTO N° : .....

DESIGNATION OUVRAGE

Indice BSS ou de déclaration :.....

Ouvrage non référencé (*Numéro / Date de création*) :.....

LOCALISATION OUVRAGE

Commune / Lieu-dit : .....

Repéré sur la carte ign ☐ Référence de la maille : .....

MESURE PIEZOMETRIQUE

Profondeur du niveau d'eau : .....m

Nature du repère (schéma si besoin) : ☐ *Margelle* ☐ *Haut tubage* ☐ *Autre :* .....

Hauteur du repère par rapport au TN : .....m

CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE

Type d'ouvrage : ☐ *Forage* ☐ *Puits* ☐ *Autre :* .....

Utilisation : ☐ *Domestique* ☐ *Irrigation* ☐ *Industrielle* ☐ *AEP* ☐ *Géothermie* ☐ *Autre :* .....

Profondeur (connue / mesuré) : .....m

Diamètre : .....cm

Système de fermeture : ☐ *Dalle béton* ☐ *Plaque métal* ☐ *Capot tubage* ☐ *Autre :* .....

Présence d'une pompe (*oui/non ; état de la pompe*) :.....

Proximité d'un ouvrage exploité (*oui/non ; distance approximative*) :.....

ACCESSIBILITE / ADRESSE

Propriété : ☐ *Privée* ☐ *Publique*

Propriétaire (*nom/adresse/coordonnées*) :

.....

Personne à contacter (*nom/adresse/coordonnées*) :

.....

Situation (*champ, bord de route, chemin, ...*) : .....

SCHEMA D'ACCES / DU REPERE :

Commune	Type_Ouvrage	Utilisation	Date_Mesur	Profondeur_Ouvrag	Profondeur_Ea	Hauteur_Repere_TI	Profondeur_Eau_TI	Altitude_MN	Cote_Piez
SAINT-MACAIRE-DU-BOIS	Puits	Domestique	08/10/2010	5.50	3.24	0.31	2.93	67	64.07
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	Domestique	08/10/2010		4.29	0.4	3.89	73	69.11
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits		08/10/2010	4.88	2	1.19	0.81	59	58.19
NUEIL-SUR-LAYON	Puits		08/10/2010	12.50	6.65	0	6.65	82	75.35
VAUDELNAY	Forage	Viticulture	04/10/2010	50.00	15.79	0	15.79	72	56.21
VAUDELNAY	Puits	Domestique	04/10/2010	14.60	10.56	0.08	10.48	72	61.52
VAUDELNAY	Forage	Viticulture	04/10/2010	55.00	15.92	0.2	15.72	72	56.28
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	Domestique	04/10/2010	6.70	5.83	0	5.83	101	95.17
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits		04/10/2010	100.00	14.43	0	14.43	67	52.57
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	Domestique	04/10/2010	7.65	3.31	0.94	2.37	55	52.63
FORGES	Puits	Domestique	04/10/2010	10.76	10.15	-1.77	11.92	73	61.08
DOUE-LA-FONTAINE	Puits		04/10/2010		11.19	1.23	9.96	78	68.04
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits	Industrielle	05/10/2010	7.80	5.35	0.5	4.85	68	63.15
DOUE-LA-FONTAINE	Puits	Domestique	04/10/2010		2.34	0.05	2.29	61	58.71
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits	Domestique	05/10/2010		3.11	0.1	3.01	57	53.99
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits		05/10/2010		2.49	0.56	1.93	60	58.07
CONCOURSON-SUR-LAYON	Puits	Domestique	05/10/2010	15.60	8.76	0.15	8.61	64	55.39
CONCOURSON-SUR-LAYON	Puits	Domestique	05/10/2010	14.00	9.68	0	9.68	67	57.32
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	Domestique	05/10/2010	9.00	5.25	0.05	5.2	69	63.8
CONCOURSON-SUR-LAYON	Forage	Irrigation	05/10/2010		12.05	-0.2	12.25	70	57.75
TANCOIGNE	Puits	Domestique	05/10/2010		1.96	0.3	1.66	63	61.34
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits	Irrigation	05/10/2010	13.00	6.24	0.54	5.7	59	53.3
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits		06/10/2010		5.01	0.36	4.65	58	53.35
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits	Domestique	06/10/2010	4.50	0.55	0.1	0.45	55	54.55
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits		06/10/2010	5.70	3.9	0.43	3.47	54	50.53
TIGNE	Puits	Domestique	06/10/2010	7.00	4.07	0.03	4.04	58	53.96
TIGNE	Puits		06/10/2010		5.01	0.74	4.27	65	60.73
TIGNE	Puits		06/10/2010		3.93	0.2	3.73	58	54.27
NUEIL-SUR-LAYON	Puits		05/10/2010		4.89	0.3	4.59	75	70.41
TREMONT	Forage	Irrigation	05/10/2010	55.00	6.49	0.12	6.37	103	96.63
CERSAY	Puits	Irrigation	06/10/2010		0.74	0.32	0.42	99	98.58
CERSAY	Puits	Domestique	06/10/2010		4.13	0.3	3.83	90	86.17
CHAMP-SUR-LAYON	Forage	Irrigation	07/10/2010	80.00	2	0.4	1.6	44	42.4
BRIGNE	Forage	Irrigation	05/10/2010		26.61	0.3	26.31	82	55.69
VALANJOU	Forage	Irrigation	07/10/2010	60.00	6.19	0	6.19	77	70.81
MONTILLIERS	Puits	Domestique	07/10/2010	10.00	8.35	0.2	8.15	98	89.85
MONTILLIERS	Forage	Irrigation	07/10/2010	50.00	5.93	0.25	5.68	105	99.32
MEIGNE	Forage	Irrigation	04/10/2010	80.00	25.9	0.4	25.5	76	50.5
DOUE-LA-FONTAINE	Puits		04/10/2010		0.73	0	0.73	66	65.27
CLERE-SUR-LAYON	Forage	Irrigation	06/10/2010	57.00	9.6	0.24	9.36	106	96.64
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Forage	Irrigation	04/10/2010	30.00	0.78	0.2	0.58	59	58.42
MEIGNE	Puits	Domestique	04/10/2010	6.40	5.12	0	5.12	73	67.88
LOURESSE-ROCHEMENIER	Forage	Irrigation	04/10/2010		18.83	0.25	18.58	70	51.42
LOURESSE-ROCHEMENIER	Puits		04/10/2010	6.80	5.96	0.42	5.54	77	71.46
LOURESSE-ROCHEMENIER	Puits		04/10/2010	11.25	3.49	0	3.49	78	74.51
LOURESSE-ROCHEMENIER	Forage	Irrigation	04/10/2010	35.00	13.46	0.4	13.06	76	62.94
AMBILLOU-CHATEAU	Forage	Irrigation	04/10/2010	80.00	9.63	0.09	9.54	63	53.46
AMBILLOU-CHATEAU	Puits		04/10/2010	5.60	2.96	0.15	2.81	64	61.19
AMBILLOU-CHATEAU	Forage	Irrigation	07/10/2010		17.94	0.1	17.84	73	55.16
AMBILLOU-CHATEAU	Puits		07/10/2010	11.40	7.41	0	7.41	83	75.59
AMBILLOU-CHATEAU	Puits	Domestique	05/10/2010	6.70	3.45	0.15	3.3	59	55.7
MARTIGNE-BRIAND	Puits	Domestique	05/10/2010	3.10	1.82	0.6	1.22	78	76.78
BRIGNE	Puits		05/10/2010	10.00	5.66	0.7	4.96	73	68.04
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits	Domestique	05/10/2010	14.00	10.68	0.5	10.18	71	60.82
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits		05/10/2010	9.52	9.23	0.4	8.83	73	64.17
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits		05/10/2010	9.80	8.97	0.2	8.77	73	64.23
LOURESSE-ROCHEMENIER	Puits	Domestique	05/10/2010	1.40	7.37	1.1	6.27	74	67.73
AMBILLOU-CHATEAU	Puits		05/10/2010	5.50	4.78	0.2	4.58	72	67.42
AMBILLOU-CHATEAU	Puits		05/10/2010	10.74	8.73	1	7.73	72	64.27
MARTIGNE-BRIAND	Puits	Domestique	05/10/2010	13.40	2.46	0.4	2.06	76	73.94
MARTIGNE-BRIAND	Puits	Domestique	05/10/2010	8.10	3.67	0.25	3.42	78	74.58
BRIGNE	Puits	Domestique	06/10/2010	6.20	3.9	0.25	3.65	80	76.35
BRIGNE	Puits	Domestique	06/10/2010	5.00	1.81	0.3	1.51	77	75.49
CHAVAGNES	Puits	Domestique	06/10/2010	4.50	3.46	0.2	3.26	76	72.74
CHAVAGNES	Puits		06/10/2010	8.20	2.05	0.1	1.95	74	72.05
CHAVAGNES	Puits	Domestique	06/10/2010	7.60	2.53	0.15	2.38	72	69.62
CHAVAGNES	Puits	Domestique	06/10/2010	7.50	5.92	0.7	5.22	79	73.78
THOUARCE	Puits	Domestique	06/10/2010	10.50	5.15	0.35	4.8	86	81.2
MARTIGNE-BRIAND	Puits	Domestique	06/10/2010	11.50	4.48	0.1	4.38	62	57.62
MARTIGNE-BRIAND	Puits	Irrigation	06/10/2010	10.50	3.85	0.25	3.6	44	40.4
MARTIGNE-BRIAND	Forage		06/10/2010	40.00	8.9	0.3	8.6	54	45.4
MARTIGNE-BRIAND	Forage	Irrigation	06/10/2010	33.00	8.15	0.55	7.6	43	35.4
FAVERAYE-MACHELLES	Forage	Domestique	06/10/2010	40.00	6.97	0	6.97	57	50.03
THOUARCE	Puits		06/10/2010	6.10	2.16	0.5	1.66	65	63.34
THOUARCE	Puits	Domestique	06/10/2010	5.70	4.24	0.5	3.74	65	61.26
TIGNE	Puits	Irrigation	06/10/2010	10.70	6.96	0.4	6.56	65	58.44
THOUARCE	Forage	Irrigation	06/10/2010	45.00	23.75	-0.15	23.9	39	15.1
THOUARCE	Puits		06/10/2010	13.40	2.75	0.35	2.4	87	84.6
FAYE-D'ANJOU	Puits	Irrigation	06/10/2010	7.30	2.77	0.25	2.52	83	80.48
FAYE-D'ANJOU	Puits	Irrigation	06/10/2010	6.40	3.56	0.35	3.21	92	88.79
FAYE-D'ANJOU	Puits	Irrigation	07/10/2010	5.80	3.81	0	3.81	94	90.19
RABLAY-SUR-LAYON	Puits		07/10/2010	22.40	2.77	0.75	2.02	51	48.98
CHAMP-SUR-LAYON	Puits		07/10/2010	6.35	1.93	0.85	1.08	67	65.92
FAYE-D'ANJOU	Puits		07/10/2010	28.10	8.54	0	8.54	68	59.46
FAVERAYE-MACHELLES	Forage	Irrigation	07/10/2010	25.00	3.98	0	3.98	54	50.02
VALANJOU	Forage	Irrigation	07/10/2010	100.00	5.53	0.75	4.78	74	69.22
MONTILLIERS	Forage	Irrigation	07/10/2010	45.00	2.88	0	2.88	88	85.12
VIHIERS	Puits		07/10/2010	9.00	3.6	0.45	3.15	114	110.85
TREMONT	Forage	Domestique	05/10/2010		13.53	0.37	13.16	102	88.84
PASSAVANT-SUR-LAYON	Forage	Irrigation	06/10/2010	64.00	18.12	0.42	17.7	84	66.3
DOUE-LA-FONTAINE	Puits		04/10/2010		13	0.77	12.23	77	64.77
DOUE-LA-FONTAINE	Forage	Irrigation	04/10/2010		3.69	0.08	3.61	53	49.39
DOUE-LA-FONTAINE			04/10/2010		1.28	0.77	0.51	91	90.49
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	traitement phyto	04/10/2010	6.00	2.36	0	2.36	54	51.64
DOUE-LA-FONTAINE	Puits	arrosage	04/10/2010		12.28	0	12.28	77	64.72
SAINT-GEORGES-SUR-LAYON	Puits	jardinage	05/10/2010		3.36	0.28	3.08	60	56.92
LOURESSE-ROCHEMENIER	Puits	cheptel	05/10/2010		2.37	0.1	2.27	50	47.73
LES VERCHERS-SUR-LAYON	Puits	Domestique	05/10/2010		4.06	0.1	3.96	66	62.04
TREMONT	Puits	Domestique	05/10/2010		8.66	0.4	8.26	104	95.74
LA FOSSE-DE-TIGNE	Puits	cheptel	05/05/2010		2.72	0.05	2.67	73	70.33
TIGNE	Forage	Domestique	06/10/2010		6.91	0	6.91	53	46.09
TIGNE	Puits	Domestique	06/10/2010		5.16	0.1	5.06	78	72.94
CERNUSSON	Puits	jardinage	06/10/2010		4.17	0.25	3.92	91	87.08
TREMONT	Puits	cheptel	06/10/2010		13.37	0.35	13.02	102	88.98
MONTILLIERS	Puits	Domestique	07/10/2010		6.77	0.23	6.54	78	71.46
LOURESSE-ROCHEMENIER	Puits		04/10/2010		13.52	0	13.52	80	66.48
BRIGNE	Forage	Irrigation	07/10/2010	15.00	1.58	0.2	1.38	76	74.62
MARTIGNE-BRIAND	Puits		06/10/2010	16.30	12.2	-3	15.2	63	47.8
GENNES	Puits		08/10/2010	8.65	5.4	0.2	5.2	72	66.8
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits	Domestique	08/10/2010	18.50	13.6	0.2	13.4	92	78.6
DENEZE-SOUS-DOUE	Puits	Domestique	08/10/2010	17.60	13.12	0.3	12.82	93	80.18

Annexe 5

Stations dépuration du bassin versant du Layon

Capacité nominale

Débit moyen journalier

NOM DE LA COMMUNE (STEP)	CAPACITE (eH)	CAPACITE hydraulique (m3/j)	CHARGE organique entrante max (eH)	CHARGE organique entrante moy (eH)	CHARGE hydraulique entrante (m3/j)
DOUE LA FONTAINE	8600	2700	8400	5400	1135
CHEMILLE *(pas de rejet en étiage)*	8000	1500	4800	3700	1170
VIHIERS	4100	1000	4000	1900	689
SAINT LAMBERT DU LATTAY	2200	829	1250	800	242
MARTIGNE BRIAND	1950	300	1930	1200	258
ST LAURENT DE LA PLAINE	1800	330	1075	720	164
CHAMP SUR LAYON	1800	175	2275	1100	120
THOUARCE	1300	225	1050	1300	176
NUEIL SUR LAYON	1200	180	560	450	90
LA JUMELLIERE	1100	170	600	380	103
LA TOURLANDRY	1100	165	635	540	414
MONTILLIERS	1100	60	600	600	70
BEAULIEU SUR LAYON	1025	180	1420	1150	148
CORON	1000	150	900	646.6666667	183.3479452
SAINT GEORGES DES GARDES	1000	200	900	550	213
VALANJOU	980	165	1600	1600	418
MELAY	750	113	770	770	210.9808219
CHAVAGNES LES EAUX	650	97	680	640	146
RABLAY SUR LAYON	650	97	480	410	65
CONCOURSON SUR LAYON	650	97	340	340	204
CHANZEAUX	600	90	350	350	90
SAINTE CHRISTINE	550	82	450	450	42.43307087
SAINT AUBIN DE LUIGNE	550	90	455	402	141
SAINT GEORGES SUR LAYON	550	82	420	355	109.1150685
CHAUDEFONDS SUR LAYON	533	240	360	315	48
CERQUEUX SOUS PASSAVANT	500	75	126	190	102
NEUVY EN MAUGES	500	60	410	340	87.42191781
SAINT GEORGES DES GARDES	450	67	300		70
LES VERCHERS SUR LAYON	450	67	200	200	40
LA SALLE DE VIHIERS Maison de retraite	450	60	290	290	53
SAINT LEZIN	450	75	425	425	81.66849315
CLERE SUR LAYON	450	68	440		60
LOURESSE ROCHEMENIER	420	63	200	370	154
LA SALLE DE VIHIERS	360	60	300	260	54
FAYE D'ANJOU	350	52	480	480	100
VIHIERS Le Voide	300	45	330	330	105
TANCOIGNE	300	45	110	110 ou 456	177
LA FOSSE DE TIGNE	270	45	60		100
TIGNE	250	38	290	290	48
CHANTELOUP LES BOIS	550	82	330	330	100
MARTIGNE BRIAND "CORNU"	240	36	110	110	20
PASSAVANT SUR LAYON	225	33	130	130	15
AUBIGNE-BRIAND	220	33	150	150	89
SAINT PAUL DU BOIS	220	38	260	260	45
FAYE D'ANJOU	270	30	230	200	79
MARTIGNE BRIAND «SOUSSIGNE »	190	28.5	60	?	9.75890411
BRIGNE SUR LAYON	180	27	50	50	7.05
MARTIGNE BRIAND "MALIGNE"	160	24	115		29
CHAVAGNES LES EAUX Millé	150	22.5	60		13
LA JUMELIERE la bliniere	150	22.5	166	166.6666667	20
VALANJOU Etiau	150	22	160	160	18
LA SALLE DE VIHIERS lotissment	130	19.5	100	100	14
LES VERCHERS SUR LAYON argentay	65	9.75	60	?	?
CHANTELOUP LES BOIS guerineaux	50	7.5	13.33333333	50	7.5
TOTAL (m^3/j)		**10572.3**			**8348.3**

Annexe 6

Calcul du bilan hydrologique sur la période 2000-2010

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2000	janvier	1	2.3	10.6	8.3	2.12	120	8.3
2000	janvier	2	2.5	3.1	0.6	0.62	120	-0.02
2000	janvier	3	3.4	2.2	0	0.44	120	-0.44
2000	février	1	5.8	31.9	26.1	6.38	120	19.72
2000	février	2	6.7	27.2	20.5	5.44	120	15.06
2000	février	3	8.4	16	7.6	3.2	120	4.4
2000	mars	1	12.1	12.1	0	2.42	120	-2.42
2000	mars	2	15.6	0	0	0	104.4	0
2000	mars	3	17.3	23.1	5.8	4.62	120	-14.42
BILAN TRIMESTRIEL			**74.1**	**126.2**	**68.9**	**25.24**	**120.0**	**30.2**
2000	avril	1	20	11.1	0	2.22	108.88	0
2000	avril	2	21.4	43.8	22.4	8.76	120	2.52
2000	avril	3	25.4	26	0.6	5.2	115.4	0
2000	mai	1	27	15.1	0	3.02	100.48	0
2000	mai	2	29.6	24.3	0	4.86	90.32	0
2000	mai	3	34.7	14.8	0	2.96	67.46	0
2000	juin	1	36.4	32.3	0	6.46	56.9	0
2000	juin	2	47.9	0.5	0	0.1	9.4	0
2000	juin	3	38.6	6.8	0	1.36	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**281**	**174.7**	**23**	**34.94**	**0**	**2.52**
2000	juillet	1	38.1	63.4	25.3	12.68	12.62	0
2000	juillet	2	39.2	4.2	0	0.84	0	0
2000	juillet	3	45.8	28.2	0	5.64	0	0
2000	août	1	40.6	4.3	0	0.86	0	0
2000	août	2	36.4	15.6	0	3.12	0	0
2000	août	3	39.9	17.5	0	3.5	0	0
2000	septembre	1	30.5	2.9	0	0.58	0	0
2000	septembre	2	22.1	38.5	16.4	7.7	8.7	0
2000	septembre	3	19.4	17.9	0	3.58	3.62	0
BILAN TRIMESTRIEL			**312**	**192.5**	**41.7**	**38.5**	**3.62**	**0**
2000	octobre	1	13.5	46.1	32.6	9.22	27	0
2000	octobre	2	9	44.4	35.4	8.88	53.52	0
2000	octobre	3	9.6	31.6	22	6.32	69.2	0
2000	novembre	1	7	40.4	33.4	8.08	94.52	0
2000	novembre	2	5	26.9	21.9	5.38	111.04	0
2000	novembre	3	4.9	53.7	48.8	10.74	120	29.1
2000	décembre	1	6.2	54.1	47.9	10.82	120	37.08
2000	décembre	2	4	27	23	5.4	120	17.6
2000	décembre	3	3	21	18	4.2	120	13.8
BILAN TRIMESTRIEL			**62.2**	**345.2**	**283**	**69.04**	**120.0**	**97.58**
BILAN ANNUEL			**729.3**	**838.6**	**416.6**	**167.7**	**0.0**	**130.28**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2001	janvier	1	4	46.6	42.6	9.32	120	42.6
2001	janvier	2	2	10.7	8.7	2.14	120	8.7
2001	janvier	3	3.9	49.8	45.9	9.96	120	45.9
2001	février	1	6.6	43.4	36.8	8.68	120	36.8
2001	février	2	6.8	0.6	0	0.12	113.68	0
2001	février	3	6.1	8.3	2.2	1.66	114.22	0
2001	mars	1	10.5	25.7	15.2	5.14	120	9.42
2001	mars	2	13.5	63.1	49.6	12.62	120	49.6
2001	mars	3	20.6	36.7	16.1	7.34	120	16.1
BILAN TRIMESTRIEL			**74**	**284.9**	**217.1**	**56.98**	**120.0**	**209.1**
2001	avril	1	22.8	18.2	0	3.64	111.76	0
2001	avril	2	21.8	6.5	0	1.3	95.16	0
2001	avril	3	22.2	32.4	10.2	6.48	98.88	0
2001	mai	1	24.3	30.7	6.4	6.14	99.14	0
2001	mai	2	38.7	1.4	0	0.28	61.56	0
2001	mai	3	55.7	0	0	0	5.86	0
2001	juin	1	39.6	7.3	0	1.46	0	0
2001	juin	2	43.5	6.6	0	1.32	0	0
2001	juin	3	56.7	0	0	0	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**325.3**	**103.1**	**16.6**	**20.62**	**0**	**0**
2001	juillet	1	44.8	23.4	0	4.68	0	0
2001	juillet	2	36.8	56.6	19.8	11.32	8.48	0
2001	juillet	3	50.1	8.8	0	1.76	0	0
2001	août	1	35.5	39.4	3.9	7.88	0	0
2001	août	2	37.9	21.1	0	4.22	0	0
2001	août	3	40.7	0.7	0	0.14	0	0
2001	septembre	1	24	2.2	0	0.44	0	0
2001	septembre	2	21.8	2.5	0	0.5	0	0
2001	septembre	3	20.1	53.2	33.1	10.64	22.46	0
BILAN TRIMESTRIEL			**311.7**	**207.9**	**56.8**	**41.58**	**22.46**	**0**
2001	octobre	1	16.7	43.7	27	8.74	40.72	0
2001	octobre	2	13	40.7	27.7	8.14	60.28	0
2001	octobre	3	10.3	13.6	3.3	2.72	60.86	0
2001	novembre	1	4.7	11.6	6.9	2.32	65.44	0
2001	novembre	2	3.8	2.9	0	0.58	63.96	0
2001	novembre	3	1.6	15.7	14.1	3.14	74.92	0
2001	décembre	1	1.8	3.4	1.6	0.68	75.84	0
2001	décembre	2	4.9	0.2	0	0.04	71.1	0
2001	décembre	3	2.3	39.8	37.5	7.96	100.64	0
BILAN TRIMESTRIEL			**59.1**	**171.6**	**118.1**	**34.32**	**100.6**	**0**
BILAN ANNUEL			**770.1**	**767.5**	**408.6**	**153.5**	**-19.36**	**209.12**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2002	janvier	1	3.6	1.1	0	0.22	97.92	0
2002	janvier	2	3.3	10	6.7	2	102.62	0
2002	janvier	3	8.7	37.3	28.6	7.46	120	11.22
2002	février	1	10.6	25	14.4	5	120	14.4
2002	février	2	8.7	25.9	17.2	5.18	120	17.2
2002	février	3	8.7	15.4	6.7	3.08	120	6.7
2002	mars	1	11.4	12.9	1.5	2.58	118.92	0
2002	mars	2	14.3	47	32.7	9.4	120	31.62
2002	mars	3	21.6	0.6	0	0.12	98.88	0
BILAN TRIMESTRIEL			**90.9**	**175.2**	**107.8**	**35.04**	**98.9**	**81.1**
2002	avril	1	25.3	18.5	0	3.7	88.38	0
2002	avril	2	24	6.3	0	1.26	69.42	0
2002	avril	3	32.6	4.1	0	0.82	40.1	0
2002	mai	1	27.2	54	26.8	10.8	56.1	0
2002	mai	2	36.5	9.3	0	1.86	27.04	0
2002	mai	3	41.6	31.9	0	6.38	10.96	0
2002	juin	1	37.4	13.2	0	2.64	0	0
2002	juin	2	41	2.8	0	0.56	0	0
2002	juin	3	49.4	0	0	0	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**315**	**140.1**	**26.8**	**28.02**	**0**	**0**
2002	juillet	1	36.3	22	0	4.4	0	0
2002	juillet	2	50.9	2.5	0	0.5	0	0
2002	juillet	3	48.1	66.5	18.4	13.3	5.1	0
2002	août	1	33.7	28.9	0	5.78	0	0
2002	août	2	36.2	11.8	0	2.36	0	0
2002	août	3	30.7	31.4	0.7	6.28	0	0
2002	septembre	1	26.1	35.2	9.1	7.04	2.06	0
2002	septembre	2	26.5	1.4	0	0.28	0	0
2002	septembre	3	20	0.2	0	0.04	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**308.5**	**199.9**	**28.2**	**39.98**	**0**	**0**
2002	octobre	1	12.5	15.1	2.6	3.02	0	0
2002	octobre	2	11.8	14.6	2.8	2.92	0	0
2002	octobre	3	11.5	66.7	55.2	13.34	41.86	0
2002	novembre	1	6	59.6	53.6	11.92	83.54	0
2002	novembre	2	4.2	18.1	13.9	3.62	93.82	0
2002	novembre	3	3.1	33.7	30.6	6.74	117.68	0
2002	décembre	1	3.5	4.9	1.4	0.98	118.1	0
2002	décembre	2	2.5	25.9	23.4	5.18	120	21.5
2002	décembre	3	4.4	53.6	49.2	10.72	120	49.2
BILAN TRIMESTRIEL			**59.5**	**292.2**	**232.7**	**58.44**	**120.0**	**70.7**
BILAN ANNUEL			**773.9**	**807.4**	**395.5**	**161.5**	**19.36**	**151.84**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2003	janvier	1	1.8	52.3	50.5	10.46	120	50.5
2003	janvier	2	1.8	8.7	6.9	1.74	120	6.9
2003	janvier	3	4.7	17.2	12.5	3.44	120	12.5
2003	février	1	5.4	26.1	20.7	5.22	120	20.7
2003	février	2	5.4	3.4	0	0.68	117.32	0
2003	février	3	10	5.9	0	1.18	112.04	0
2003	mars	1	13.3	13.1	0	2.62	109.22	0
2003	mars	2	23.4	0	0	0	85.82	0
2003	mars	3	24.6	6.7	0	1.34	66.58	0
BILAN TRIMESTRIEL			**90.4**	**133.4**	**90.6**	**26.68**	**66.6**	**90.6**
2003	avril	1	25.1	0.2	0	0.04	41.64	0
2003	avril	2	34.1	0.8	0	0.16	8.18	0
2003	avril	3	34.1	23.3	0	4.66	0	0
2003	mai	1	33.1	21.5	0	4.3	0	0
2003	mai	2	33.1	31.6	0	6.32	0	0
2003	mai	3	43.9	13.8	0	2.76	0	0
2003	juin	1	47.8	16.6	0	3.32	0	0
2003	juin	2	54.6	8.3	0	1.66	0	0
2003	juin	3	52	15.5	0	3.1	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**357.8**	**131.6**	**0**	**26.32**	**0**	**0**
2003	juillet	1	47.9	10.5	0	2.1	0	0
2003	juillet	2	53.8	22.3	0	4.46	0	0
2003	juillet	3	42.3	40.5	0	8.1	0	0
2003	août	1	54.8	0	0	0	0	0
2003	août	2	42.5	0.1	0	0.02	0	0
2003	août	3	41.4	3.8	0	0.76	0	0
2003	septembre	1	32.1	44.7	12.6	8.94	3.66	0
2003	septembre	2	28.3	0.1	0	0.02	0	0
2003	septembre	3	23.1	10.9	0	2.18	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**366.2**	**132.9**	**12.6**	**26.58**	**0**	**0**
2003	octobre	1	16.3	44.2	27.9	8.84	19.06	0
2003	octobre	2	10.9	17.1	6.2	3.42	21.84	0
2003	octobre	3	6.1	28.3	22.2	5.66	38.38	0
2003	novembre	1	4.8	18.7	13.9	3.74	48.54	0
2003	novembre	2	3.1	17.9	14.8	3.58	59.76	0
2003	novembre	3	3.4	59.8	56.4	11.96	104.2	0
2003	décembre	1	2.4	3.1	0.7	0.62	104.28	0
2003	décembre	2	2.3	11.5	9.2	2.3	111.18	0
2003	décembre	3	4	43.3	39.3	8.66	120	30.48
BILAN TRIMESTRIEL			**53.3**	**243.9**	**190.6**	**48.78**	**120.0**	**30.48**
BILAN ANNUEL			**867.7**	**641.8**	**293.8**	**128.4**	**0**	**121.08**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2004	janvier	1	2.8	20.6	17.8	4.12	120	17.8
2004	janvier	2	5.8	88.2	82.4	17.64	120	82.4
2004	janvier	3	4.6	44.3	39.7	8.86	120	39.7
2004	février	1	9	4.4	0	0.88	114.52	0
2004	février	2	7.5	3.9	0	0.78	110.14	0
2004	février	3	7.1	22.2	15.1	4.44	120	5.24
2004	mars	1	11.4	19.8	8.4	3.96	120	8.4
2004	mars	2	15.9	15	0	3	116.1	0
2004	mars	3	21.5	27.2	5.7	5.44	116.36	0
BILAN TRIMESTRIEL			**85.6**	**245.6**	**169.1**	**49.12**	**116.4**	**153.5**
2004	avril	1	24	15.7	0	3.14	104.92	0
2004	avril	2	27.7	33.6	5.9	6.72	104.1	0
2004	avril	3	33.7	19.3	0	3.86	85.84	0
2004	mai	1	28.6	50.5	21.9	10.1	97.64	0
2004	mai	2	45.3	0.8	0	0.16	52.98	0
2004	mai	3	48.1	9.4	0	1.88	12.4	0
2004	juin	1	48.5	0	0	0	0	0
2004	juin	2	51.7	0	0	0	0	0
2004	juin	3	52.7	6.2	0	1.24	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**360.3**	**135.5**	**27.8**	**27.1**	**0**	**0**
2004	juillet	1	46.9	9.9	0	1.98	0	0
2004	juillet	2	42.3	5	0	1	0	0
2004	juillet	3	53.1	13.9	0	2.78	0	0
2004	août	1	43.1	15.8	0	3.16	0	0
2004	août	2	36.2	43.9	7.7	8.78	0	0
2004	août	3	39.3	16.5	0	3.3	0	0
2004	septembre	1	39.3	2.3	0	0.46	0	0
2004	septembre	2	28.5	6.3	0	1.26	0	0
2004	septembre	3	20.6	1.5	0	0.3	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**349.3**	**115.1**	**7.7**	**23.02**	**0**	**0**
2004	octobre	1	16.4	53.3	36.9	10.66	26.24	0
2004	octobre	2	12.4	74.1	61.7	14.82	73.12	0
2004	octobre	3	13.1	12.5	0	2.5	70.02	0
2004	novembre	1	4.7	15.1	10.4	3.02	77.4	0
2004	novembre	2	3.9	3	0	0.6	75.9	0
2004	novembre	3	2.3	8.6	6.3	1.72	80.48	0
2004	décembre	1	3	0.6	0	0.12	77.96	0
2004	décembre	2	1.3	16.4	15.1	3.28	89.78	0
2004	décembre	3	2.4	21	18.6	4.2	104.18	0
BILAN TRIMESTRIEL			**59.5**	**204.6**	**149**	**40.92**	**104.2**	**0**
BILAN ANNUEL			**854.7**	**700.8**	**353.6**	**140.2**	**-15.82**	**153.54**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2005	janvier	1	2.8	13	10.2	2.6	111.78	0
2005	janvier	2	2.9	20.1	17.2	4.02	120	8.98
2005	janvier	3	4.9	11.6	6.7	2.32	120	6.7
2005	février	1	7	2.5	0	0.5	115	0
2005	février	2	9.4	7.9	0	1.58	111.92	0
2005	février	3	6.4	9.3	2.9	1.86	112.96	0
2005	mars	1	10.7	9.6	0	1.92	109.94	0
2005	mars	2	18.3	0.3	0	0.06	91.88	0
2005	mars	3	24.1	14	0	2.8	78.98	0
BILAN TRIMESTRIEL			**86.5**	**88.3**	**37**	**17.66**	**79.0**	**15.7**
2005	avril	1	25.1	4.6	0	0.92	57.56	0
2005	avril	2	26.2	14.9	0	2.98	43.28	0
2005	avril	3	27.4	14.4	0	2.88	27.4	0
2005	mai	1	35	1.1	0	0.22	0	0
2005	mai	2	31.8	26.9	0	5.38	0	0
2005	mai	3	49.9	11.1	0	2.22	0	0
2005	juin	1	47.1	2	0	0.4	0	0
2005	juin	2	53.2	2.9	0	0.58	0	0
2005	juin	3	56.3	10.8	0	2.16	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**352**	**88.7**	**0**	**17.74**	**0**	**0**
2005	juillet	1	42	11.5	0	2.3	0	0
2005	juillet	2	57.5	1.1	0	0.22	0	0
2005	juillet	3	48.7	13.8	0	2.76	0	0
2005	août	1	49.9	0.3	0	0.06	0	0
2005	août	2	47.3	1.7	0	0.34	0	0
2005	août	3	43.4	18.1	0	3.62	0	0
2005	septembre	1	35.3	6.3	0	1.26	0	0
2005	septembre	2	25.1	0.5	0	0.1	0	0
2005	septembre	3	24	7.2	0	1.44	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**373.2**	**60.5**	**0**	**12.1**	**0**	**0**
2005	octobre	1	19.2	0.5	0	0.1	0	0
2005	octobre	2	15.9	49.7	33.8	9.94	23.86	0
2005	octobre	3	18.4	94	75.6	18.8	80.66	0
2005	novembre	1	9.2	22.5	13.3	4.5	89.46	0
2005	novembre	2	3.2	17.9	14.7	3.58	100.58	0
2005	novembre	3	3.3	5.5	2.2	1.1	101.68	0
2005	décembre	1	4.6	32.8	28.2	6.56	120	9.88
2005	décembre	2	3.9	0.4	0	0.08	116.42	0
2005	décembre	3	1.6	26	24.4	5.2	120	20.82
BILAN TRIMESTRIEL			**79.3**	**249.3**	**192.2**	**49.86**	**120.0**	**30.7**
BILAN ANNUEL			**891**	**486.8**	**229.2**	**97.4**	**15.82**	**46.38**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2006	janvier	1	2.7	25.9	23.2	5.18	120	23.2
2006	janvier	2	4.3	9.2	4.9	1.84	120	4.9
2006	janvier	3	4.5	8.7	4.2	1.74	120	4.2
2006	février	1	4.8	1	0	0.2	116	0
2006	février	2	9.3	42	32.7	8.4	120	28.7
2006	février	3	7.3	2.1	0	0.42	114.38	0
2006	mars	1	11.9	60.6	48.7	12.12	120	43.08
2006	mars	2	20.1	2.8	0	0.56	102.14	0
2006	mars	3	21.1	43.8	22.7	8.76	116.08	0
BILAN TRIMESTRIEL			**86**	**196.1**	**136.4**	**39.22**	**116.1**	**104.1**
2006	avril	1	28.4	13.3	0	2.66	98.32	0
2006	avril	2	24.4	2.1	0	0.42	75.6	0
2006	avril	3	33.9	7.8	0	1.56	47.94	0
2006	mai	1	31.8	24.7	0	4.94	35.9	0
2006	mai	2	40.3	29.3	0	5.86	19.04	0
2006	mai	3	46.3	4.4	0	0.88	0	0
2006	juin	1	54.5	0	0	0	0	0
2006	juin	2	55.5	0.5	0	0.1	0	0
2006	juin	3	45.5	3	0	0.6	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**360.6**	**85.1**	**0**	**17.02**	**0**	**0**
2006	juillet	1	54.3	9.2	0	1.84	0	0
2006	juillet	2	65.8	0.4	0	0.08	0	0
2006	juillet	3	59.9	27.4	0	5.48	0	0
2006	août	1	45.2	7.6	0	1.52	0	0
2006	août	2	39	11.2	0	2.24	0	0
2006	août	3	38	14.9	0	2.98	0	0
2006	septembre	1	39	0.5	0	0.1	0	0
2006	septembre	2	22.7	90	67.3	18	49.3	0
2006	septembre	3	23.1	27	3.9	5.4	47.8	0
BILAN TRIMESTRIEL			**387**	**188.2**	**71.2**	**37.64**	**47.8**	**0**
2006	octobre	1	14.3	64	49.7	12.8	84.7	0
2006	octobre	2	13	26.3	13.3	5.26	92.74	0
2006	octobre	3	12.1	20.9	8.8	4.18	97.36	0
2006	novembre	1	3.7	1.6	0	0.32	94.94	0
2006	novembre	2	5.2	40	34.8	8	120	9.74
2006	novembre	3	4.2	27.4	23.2	5.48	120	23.2
2006	décembre	1	4.6	54.8	50.2	10.96	120	50.2
2006	décembre	2	2.4	9.9	7.5	1.98	120	7.5
2006	décembre	3	1.7	27.4	25.7	5.48	120	25.7
BILAN TRIMESTRIEL			**61.2**	**272.3**	**213.2**	**54.46**	**120.0**	**116.34**
BILAN ANNUEL			**894.8**	**741.7**	**420.8**	**148.3**	**0**	**220.42**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2007	janvier	1	6.3	29.1	22.8	5.82	120	22.8
2007	janvier	2	3.4	17.6	14.2	3.52	120	14.2
2007	janvier	3	5.6	6.1	0.5	1.22	119.28	0
2007	février	1	6.5	48.8	42.3	9.76	120	41.58
2007	février	2	13.5	17.2	3.7	3.44	120	3.7
2007	février	3	12	28	16	5.6	120	16
2007	mars	1	13.8	51.4	37.6	10.28	120	37.6
2007	mars	2	14.8	9.2	0	1.84	112.56	0
2007	mars	3	18.9	19.8	0.9	3.96	109.5	0
BILAN TRIMESTRIEL			**94.8**	**227.2**	**138**	**45.44**	**109.5**	**135.9**
2007	avril	1	29.7	13.1	0	2.62	90.28	0
2007	avril	2	32.6	15.9	0	3.18	70.4	0
2007	avril	3	35.3	24.8	0	4.96	54.94	0
2007	mai	1	32.8	20.8	0	4.16	38.78	0
2007	mai	2	31.6	32.1	0.5	6.42	32.86	0
2007	mai	3	36.1	35.6	0	7.12	25.24	0
2007	juin	1	41.7	30.5	0	6.1	7.94	0
2007	juin	2	38.2	29.2	0	5.84	0	0
2007	juin	3	42.1	23.4	0	4.68	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**320.1**	**225.4**	**0.5**	**45.08**	**0**	**0**
2007	juillet	1	40.9	21.6	0	4.32	0	0
2007	juillet	2	44.3	17.5	0	3.5	0	0
2007	juillet	3	43.2	32.4	0	6.48	0	0
2007	août	1	41.5	3.9	0	0.78	0	0
2007	août	2	29.9	36.7	6.8	7.34	0	0
2007	août	3	31.5	10.3	0	2.06	0	0
2007	septembre	1	27.1	0.6	0	0.12	0	0
2007	septembre	2	25	4.8	0	0.96	0	0
2007	septembre	3	18	11.8	0	2.36	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**301.4**	**139.6**	**6.8**	**27.92**	**0**	**0**
2007	octobre	1	15	8	0	1.6	0	0
2007	octobre	2	10.8	6.2	0	1.24	0	0
2007	octobre	3	9.5	8.8	0	1.76	0	0
2007	novembre	1	6.5	1.1	0	0.22	0	0
2007	novembre	2	3.4	37.7	34.3	7.54	26.76	0
2007	novembre	3	2.9	13.8	10.9	2.76	34.9	0
2007	décembre	1	7.2	36.3	29.1	7.26	56.74	0
2007	décembre	2	3.6	0.4	0	0.08	53.46	0
2007	décembre	3	2.2	7.9	5.7	1.58	57.58	0
BILAN TRIMESTRIEL			**61.1**	**120.2**	**80**	**24.04**	**57.6**	**0**
BILAN ANNUEL			**777.4**	**712.4**	**225.3**	**142.5**	**-62.42**	**135.88**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2008	janvier	1	3.3	37.5	34.2	7.5	84.28	0
2008	janvier	2	7.3	44.1	36.8	8.82	112.26	0
2008	janvier	3	3.5	12	8.5	2.4	118.36	0
2008	février	1	6.2	32.1	25.9	6.42	120	24.26
2008	février	2	5.9	1.1	0	0.22	114.98	0
2008	février	3	8.6	7.6	0	1.52	112.46	0
2008	mars	1	13.9	31.6	17.7	6.32	120	10.16
2008	mars	2	18.7	17.1	0	3.42	114.98	0
2008	mars	3	20	30.5	10.5	6.1	119.38	0
BILAN TRIMESTRIEL			**87.4**	**213.6**	**133.6**	**42.72**	**119.4**	**34.4**
2008	avril	1	19.7	6.2	0	1.24	104.64	0
2008	avril	2	22.3	49.9	27.6	9.98	120	12.24
2008	avril	3	28.1	36.8	8.7	7.36	120	8.7
2008	mai	1	36.4	11.5	0	2.3	92.8	0
2008	mai	2	37.3	23.6	0	4.72	74.38	0
2008	mai	3	35.4	79.4	44	15.88	102.5	0
2008	juin	1	42.8	4.5	0	0.9	63.3	0
2008	juin	2	41.3	3.2	0	0.64	24.56	0
2008	juin	3	46.7	4.6	0	0.92	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**310**	**219.7**	**80.3**	**43.94**	**0**	**20.94**
2008	juillet	1	46.5	14.9	0	2.98	0	0
2008	juillet	2	48.4	0.5	0	0.1	0	0
2008	juillet	3	49.3	11.2	0	2.24	0	0
2008	août	1	42.5	14.8	0	2.96	0	0
2008	août	2	39.4	4	0	0.8	0	0
2008	août	3	33.7	18.5	0	3.7	0	0
2008	septembre	1	27.9	29.9	2	5.98	0	0
2008	septembre	2	21.8	2.8	0	0.56	0	0
2008	septembre	3	20.2	0.7	0	0.14	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**329.7**	**97.3**	**2**	**19.46**	**0**	**0**
2008	octobre	1	16.1	13.2	0	2.64	0	0
2008	octobre	2	9.9	8.8	0	1.76	0	0
2008	octobre	3	7.6	61.8	54.2	12.36	41.84	0
2008	novembre	1	5.6	43	37.4	8.6	70.64	0
2008	novembre	2	3.6	5.5	1.9	1.1	71.44	0
2008	novembre	3	3.6	17.8	14.2	3.56	82.08	0
2008	décembre	1	3.9	16.9	13	3.38	91.7	0
2008	décembre	2	1.6	8.3	6.7	1.66	96.74	0
2008	décembre	3	4.8	0.2	0	0.04	92.1	0
BILAN TRIMESTRIEL			**56.7**	**175.5**	**127.4**	**35.1**	**92.1**	**0**
BILAN ANNUEL			**783.8**	**706.1**	**343.3**	**141.2**	**34.52**	**55.36**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2009	janvier	1	3.2	0.5	0	0.1	89.3	0
2009	janvier	2	3.8	29.9	26.1	5.98	109.42	0
2009	janvier	3	4.8	48.2	43.4	9.64	120	32.82
2009	février	1	7.4	23.1	15.7	4.62	120	15.7
2009	février	2	7.3	0	0	0	112.7	0
2009	février	3	7.7	0.2	0	0.04	105.16	0
2009	mars	1	13.2	16.3	3.1	3.26	105	0
2009	mars	2	19.1	0.2	0	0.04	86.06	0
2009	mars	3	23.5	6.3	0	1.26	67.6	0
BILAN TRIMESTRIEL			**90**	**124.7**	**88.3**	**24.94**	**67.6**	**48.5**
2009	avril	1	22.6	13.6	0	2.72	55.88	0
2009	avril	2	21.6	31.9	10.3	6.38	59.8	0
2009	avril	3	30.2	27	0	5.4	51.2	0
2009	mai	1	32.6	1.9	0	0.38	20.12	0
2009	mai	2	36.5	30.1	0	6.02	7.7	0
2009	mai	3	51.1	13.3	0	2.66	0	0
2009	juin	1	44.1	32.2	0	6.44	0	0
2009	juin	2	43.1	4	0	0.8	0	0
2009	juin	3	54.2	4	0	0.8	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**336**	**158**	**10.3**	**31.6**	**0**	**0**
2009	juillet	1	49.7	2.1	0	0.42	0	0
2009	juillet	2	49	11.5	0	2.3	0	0
2009	juillet	3	51	11.4	0	2.28	0	0
2009	août	1	42.6	0.1	0	0.02	0	0
2009	août	2	44.9	0	0	0	0	0
2009	août	3	44.1	5.8	0	1.16	0	0
2009	septembre	1	34.6	11.9	0	2.38	0	0
2009	septembre	2	24.2	53.2	29	10.64	18.36	0
2009	septembre	3	21.5	0.2	0	0.04	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**361.6**	**96.2**	**29**	**19.24**	**0**	**0**
2009	octobre	1	19.2	10.7	0	2.14	0	0
2009	octobre	2	11.4	11.5	0.1	2.3	0	0
2009	octobre	3	9.3	5.1	0	1.02	0	0
2009	novembre	1	6.2	45.9	39.7	9.18	30.52	0
2009	novembre	2	6.1	24.6	18.5	4.92	44.1	0
2009	novembre	3	6.6	65	58.4	13	89.5	0
2009	décembre	1	3.2	42.2	39	8.44	120	8.5
2009	décembre	2	2.7	17.7	15	3.54	120	15
2009	décembre	3	2	72	70	14.4	120	70
BILAN TRIMESTRIEL			**66.7**	**294.7**	**240.7**	**58.94**	**120.0**	**93.5**
BILAN ANNUEL			**854.3**	**673.6**	**368.3**	**134.7**	**27.9**	**142.02**

année	mois	décade	ETP décadaire mm	Pluie décadaire mm	Peff mm	ruissellement	RU fin décade mm	Alimentation de l'aquifère mm
2010	janvier	1	3.8	0.1	0	0.02	116.28	0
2010	janvier	2	2.4	32.5	30.1	6.5	120	26.38
2010	janvier	3	4.8	16.8	12	3.36	120	12
2010	février	1	6.3	17.9	11.6	3.58	120	11.6
2010	février	2	7.5	5.2	0	1.04	116.66	0
2010	février	3	12.5	50	37.5	10	120	34.16
2010	mars	1	16.7	6.5	0	1.3	108.5	0
2010	mars	2	17.1	14.2	0	2.84	102.76	0
2010	mars	3	25.7	36.3	10.6	7.26	106.1	0
BILAN TRIMESTRIEL			**96.8**	**179.5**	**101.8**	**35.9**	**106.1**	**84.1**
2010	avril	1	27.7	12.9	0	2.58	88.72	0
2010	avril	2	32.1	1	0	0.2	57.42	0
2010	avril	3	37.3	0.1	0	0.02	20.2	0
2010	mai	1	29.7	16	0	3.2	3.3	0
2010	mai	2	36	0.2	0	0.04	0	0
2010	mai	3	51.7	14.7	0	2.94	0	0
2010	juin	1	38.3	17.1	0	3.42	0	0
2010	juin	2	41.9	28.9	0	5.78	0	0
2010	juin	3	54	18.5	0	3.7	0	0
BILAN TRIMESTRIEL			**348.7**	**109.4**	**0**	**21.88**	**0**	**0**
2010	juillet	1	55.6	2.1	0	0.42	0	0
2010	juillet	2	53.3	2.6	0	0.52	0	0
2010	juillet	3	54.1	0.3	0	0.06	0	0
2010	août	1	43.6	5.6	0	1.12	0	0
2010	août	2	36.9	6	0	1.2	0	0
2010	août	3	42.4	19	0	3.8	0	0
2010	septembre	1	35.8	18.5	0	3.7	0	0
2010	septembre	2	25	1.8	0	0.36	0	0
2010	septembre	3	20.9	27.7	6.8	5.54	1.26	0
BILAN TRIMESTRIEL			**367.6**	**83.6**	**6.8**	**16.72**	**1.26**	**0**
2010	octobre	1	15.4	28.6	13.2	5.72	8.74	0
2010	octobre	2	13.5	1.6	0	0.32	0	0
2010	octobre	3	9	24.6	15.6	4.92	10.68	0
2010	novembre	1	8.1	32.9	24.8	6.58	28.9	0
2010	novembre	2	4	24.8	20.8	4.96	44.74	0
2010	novembre	3	2.6	11.5	8.9	2.3	51.34	0
2010	décembre	1	1.8	53.3	51.5	10.66	92.18	0
2010	décembre	2	2.6	17.8	15.2	3.56	103.82	0
2010	décembre	3	1.5	25.1	23.6	5.02	120	7.42
BILAN TRIMESTRIEL			**58.5**	**220.2**	**173.6**	**44.04**	**120.0**	**7.42**
BILAN ANNUEL			**871.6**	**592.7**	**282.2**	**118.5**	**0**	**91.56**

Annexe 7

Compléments théoriques sur l'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques (rapport BRGM/RP-58139-FR)

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

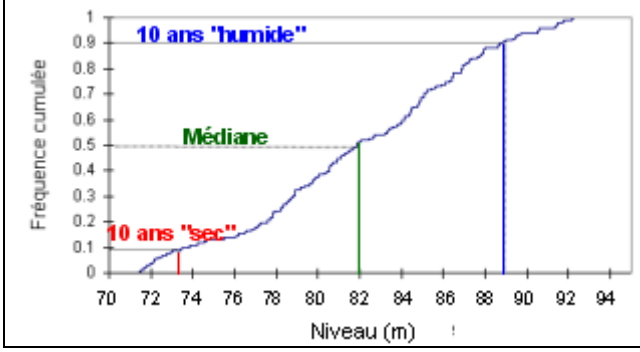
Dans une chronique de niveaux de nappe ou de débits de cours d'eau (avec un pas de temps mensuel, décadaire ou journalier), on souhaite connaître les périodes de retour d'une variable caractérisant un "évènement" particulier, par exemple le niveau de la nappe en période de basses eaux sur un mois donné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



Sur ce graphique:

- la valeur H = 89 m est dépassée 1 année sur 10 (10 ans "humide");
- la valeur H = 73.5 m n'est pas dépassée 1 année sur 10 (10 ans "sec");
- la valeur H=82 m est la médiane (dépassée ou non dépassée 1 année sur 2).

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:

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

$Vp = x_{j+1}$ si d>0

Autres formules:

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

SAS méthode 4: Vp= (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 décadaires 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.

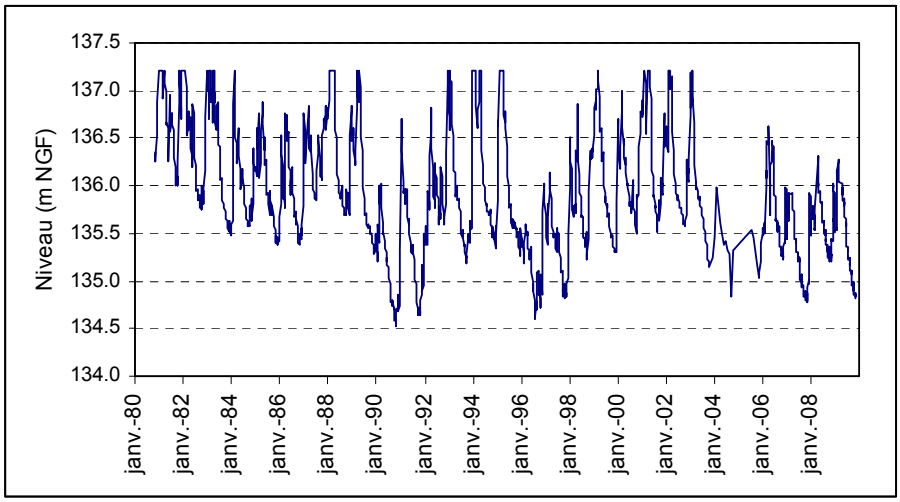


Illustration A2 – Evolution des niveaux au piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache dans le BV de l'Helpe Mineure

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 décadaires

A partir des chroniques de données journalières s'étendant sur les périodes retenues pour l'analyse, les valeurs décadaires 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 décadaires moyennes de septembre à novembre ont été calculées de 1981 à 2007 (illustration A3 page suivante).

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

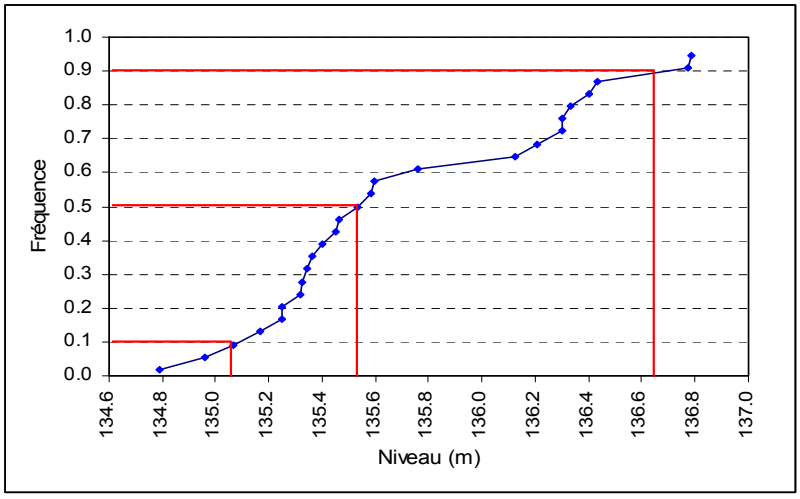


Illustration A4 - Courbe de fréquence cumulée des niveaux du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour la 3ème décade de novembre

- 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")

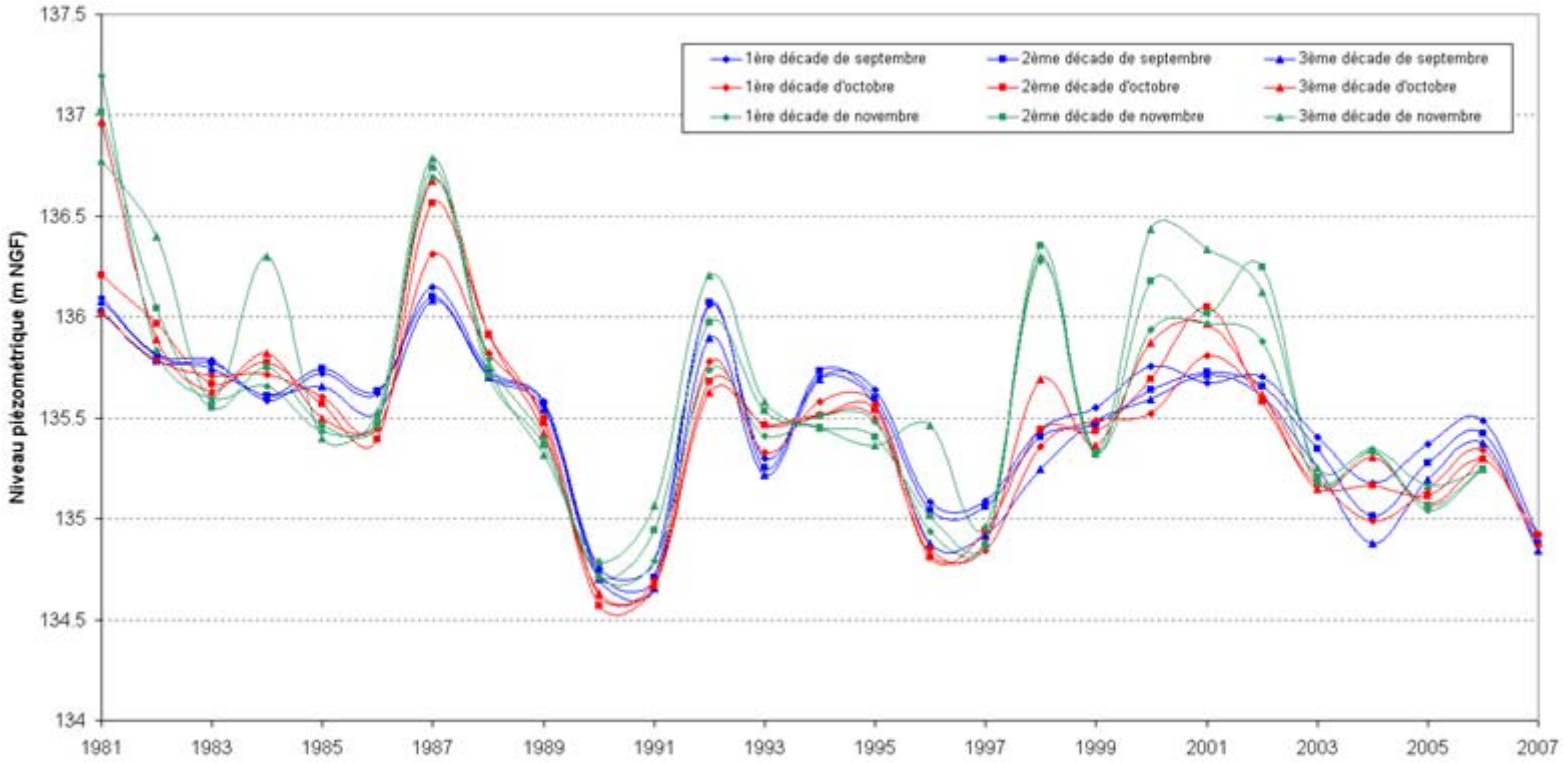


Illustration A3 - Séries des niveaux piézométriques moyens décadaires en période d'étiage, de 1981 à 2007 (piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache)

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 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).

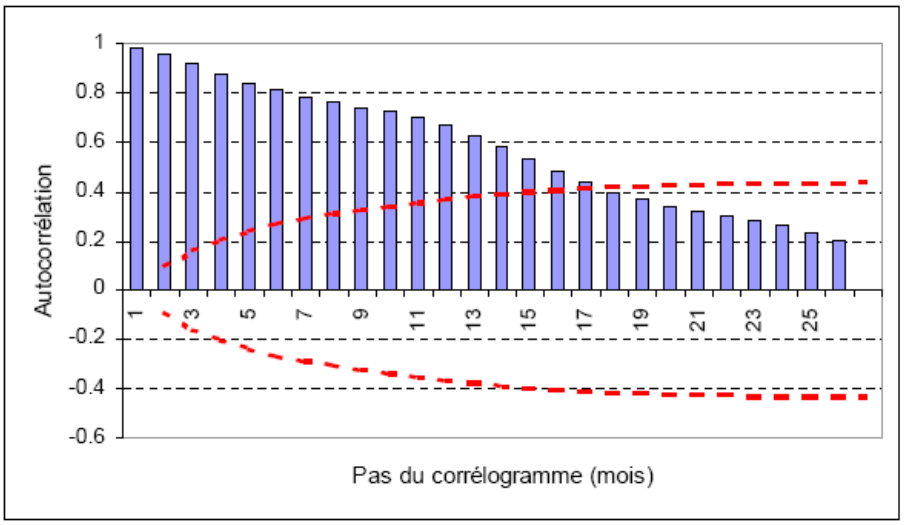


Illustration A5 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Janvier 1969 à Mars 2005

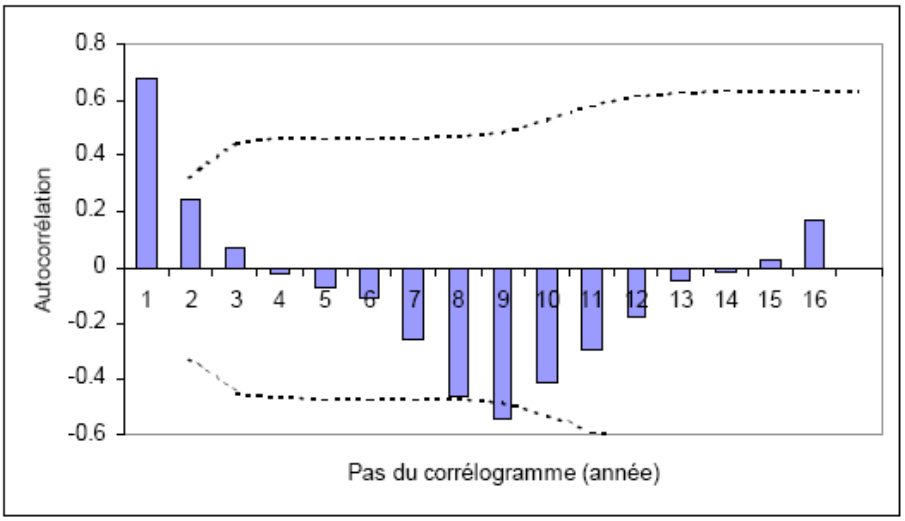


Illustration A6 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Décembre (1969 à 2004)

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.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Pays de la Loire
1, rue des Saumonières
BP 92342
44323 – Nantes cedex 3 - France
Tél. : 02 51 86 01 51