



# Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor

Rapport final

BRGM/RP-64123-FR

Février 2015



Établissement public du ministère chargé du développement durable



Syndicat Départemental d'Alimentation en Eau Potable des Côtes d'Armor



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor

Rapport final

**BRGM/RP-64123-FR**

Février 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 13RSE1405

**F. Lucassou, B. Mougin**

Avec la collaboration de

**P. Stollsteiner**

**Vérificateur :**

Nom : O. DOUEZ

Date : 06/02/2015

Signature :



**Approbateur :**

Nom : E. PALVADEAU

Date : 25/02/2015

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



**Mots-clés** : Bretagne, Côtes d'Armor, indicateur piézométrique, gestion quantitative, eau souterraine, modèle Gardenia, bassin versant.

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

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



## Synthèse

Le projet « Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor » a été réalisé grâce à la collaboration du Conseil Général des Côtes d'Armor (CG 22), du Syndicat Départemental d'Alimentation en Eau Potable des Côtes d'Armor (SDAEP 22), de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB) et du BRGM.

L'objectif de l'étude est de produire des indicateurs piézométriques utilisables par le CG 22 pour améliorer la gestion de ses 3 principales retenues destinées à l'alimentation en eau potable (barrages sur les rivières de l'Arguenon, du Gouët et du Blavet). Le CG 22 souhaite disposer d'outils permettant d'anticiper le remplissage des retenues, afin d'assurer la distribution d'eau à l'étiage.

La définition d'indicateurs en milieu de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans constitue un test méthodologique ; les études existantes ayant été réalisées sur des piézomètres à chroniques plus longues en milieu sédimentaire.

En citant le rapport BRGM/RP-58139-FR, un indicateur piézométrique peut se définir comme une « variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur est caractérisé par une gamme de valeurs particulières (que l'on peut appeler seuils de gestion) ».

L'étude s'est déroulée en plusieurs phases : l'étude du contexte hydrogéologique des 3 bassins versants étudiés (bassins en amont des retenues) et des 13 piézomètres associés a permis de sélectionner 2 à 3 piézomètres représentatifs de chacun des bassins versants puis de caractériser la dynamique et l'inertie des nappes associées aux piézomètres. Une analyse critique des données disponibles a ensuite été réalisée préalablement aux modélisations globales pluie - niveau piézométrique - débit des rivières réalisées avec le logiciel GARDENIA<sup>®</sup>. Ces modélisations ont servi, après calage sur la période commune des données (météorologiques, hydrométriques et piézométriques), à reconstituer les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes sur la période 1994-2012. La modélisation a également permis : (i) d'analyser la représentativité des piézomètres, (ii) d'examiner la corrélation des niveaux piézométriques et des débits des rivières (en particulier à l'étiage), et (iii) d'approcher les participations annuelles et mensuelles des eaux souterraines aux débits des rivières.

Compte-tenu des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des 3 bassins versants étudiés et des résultats des modélisations pluie-débit-niveau piézométrique, un piézomètre de référence a été retenu sur chacun des bassins, associé à la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel du bassin :

- bassin versant du Gouët : piézomètre de Kerpert (02782X0047/PZ), associé à la station hydrométrique du Gouët à Saint Julien (J1513010),
- bassin versant de l'Arguenon : piézomètre de Trémeur (02803X0036/PZ), associé à la station hydrométrique de l'Arguenon en entrée de retenue,
- bassin versant du Blavet : piézomètre de Rostrenen (03124X0088/F), associé à la station hydrométrique du Blavet à Kerien [Kerlouet] (J5202110).

Les chroniques de ces piézomètres de référence ont ensuite été étendues grâce à des corrélations avec des piézomètres plus anciens existants dans les départements voisins (Morbihan et Finistère, suivis piézométriques existants depuis les années 1980-90). Des indicateurs piézométriques ont été calculés par analyse fréquentielle mensuelle des niveaux piézométriques (détermination des fréquences de dépassement d'un certain niveau). Plusieurs seuils ont été obtenus et sont proposés : de période de retour quinquennale sèche (seuil de vigilance), décennale sèche (seuil d'alerte) et quinze ans secs (seuil de crise). La corrélation avec des piézomètres plus anciens a permis d'approcher des périodes de retour 10 et 15 ans sec et pas seulement une période de retour 5 ans sec, compte tenu des courtes durées des chroniques piézométriques disponibles sur le département des Côtes d'Armor. Les incertitudes associées à ces seuils sont importantes et ces seuils ne peuvent en aucun cas être utilisés en vue d'arrêtés sécheresse. Compte-tenu des relations nappes-rivières sur les 3 bassins, ces seuils permettent d'identifier le degré de criticité de la gestion des ressources en eau au cours de l'année.

Enfin, les corrélations débits des rivières / niveaux piézométriques (Gouët-Kerpert, Arguenon-Trémeur et Blavet-Rostrenen) ont été approfondies et représentées via diverses courbes de corrélation. Connaissant ces corrélations et les valeurs des décroissances piézométriques, il est possible d'estimer un débit d'étiage à partir d'un débit de hautes eaux (exemple : quel pourrait être le débit du Gouët au 1<sup>er</sup> juillet sachant qu'au 1<sup>er</sup> mars il est de 4 m<sup>3</sup>/s ?). L'autre usage de ces courbes se fait « en remontant le temps » : connaissant le débit minimum à respecter à l'étiage, quel devrait être le débit en hautes eaux et la cote piézométrique pour assurer ce débit à l'étiage ?

Le test méthodologique de recherche d'indicateurs piézométriques, en milieu de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans, semble donc assez concluant. Néanmoins, ces indicateurs devront être ajustés lorsque les chroniques piézométriques seront plus longues (durée supérieure à au moins 15 ans).

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>  | <b>11</b> |
| 1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....   | 11        |
| 1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE.....   | 12        |
| 1.3. UN AUTRE OBJECTIF DE CETTE ETUDE EST D'AMELIORER LES<br>CONNAISSANCES DES INTERACTIONS ENTRE EAU DE SURFACE ET EAU<br>SOUTERRAINE, AFIN DE DEFINIR DES INDICATEURS PIEZOMETRIQUES.<br>DEMARCHE SUIVIE..... | 13        |
| 1.4. LIMITES DE L'ETUDE .....   | 13        |
| <b>2. Contexte hydrogéologique des piézomètres et dynamique des nappes .....</b>  | <b>14</b> |
| 2.1. PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS.....   | 14        |
| 2.1.1. Bassin versant du Gouët.....   | 15        |
| 2.1.2. Bassin versant de l'Arguenon .....   | 16        |
| 2.1.3. Bassin versant du Blavet.....  | 19        |
| 2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET ANTHROPIQUE DES PIEZOMETRES  | 22        |
| 2.2.1. Rappel sur les aquifères de socle .....  | 22        |
| 2.2.2. Analyse préalable des piézomètres .....  | 23        |
| 2.2.3. Sélection des piézomètres pour l'étude.....  | 27        |
| 2.3. CARACTERISATION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES .....  | 29        |
| 2.3.1. Temps de demi-décroissance des niveaux piézométriques .....  | 29        |
| 2.3.2. Vitesse de la baisse piézométrique à l'étiage.....   | 31        |
| 2.3.3. Auto-corrélogramme .....   | 32        |
| 2.3.4. Résultats obtenus .....  | 33        |
| <b>3. Analyse préalable critique des données.....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1. DONNEES PIEZOMETRIQUES .....   | 35        |
| 3.2. DONNEES HYDROMETRIQUES .....   | 35        |
| 3.2.1. Bassin versant du Gouët.....   | 35        |
| 3.2.2. Bassin versant de l'Arguenon .....   | 36        |
| 3.2.3. Bassin versant du Blavet.....  | 38        |
| 3.3. DONNEES METEOROLOGIQUES.....   | 39        |
| 3.3.1. Bassin versant du Gouët.....   | 40        |
| 3.3.2. Bassin versant de l'Arguenon .....   | 41        |
| 3.3.3. Bassin versant du Blavet.....  | 42        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4. PRELEVEMENTS.....  | 43        |
| 3.5. ANALYSE DES RELATIONS NAPPES-RIVIERES .....                                      | 46        |
| 3.6. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES .....   | 47        |
| <b>4. Modélisation globale Pluie – Niveau piézométrique – Débit des rivières.....</b> | <b>49</b> |
| 4.1. OBJECTIFS DE LA MODELISATION .....   | 49        |
| 4.2. DESCRIPTION DU LOGICIEL DE MODELISATION.....                                     | 49        |
| 4.3. DONNÉES D'ENTRÉE DU MODELE .....   | 52        |
| 4.4. CALAGE DES MODELES.....  | 54        |
| 4.4.1. Paramètres .....   | 54        |
| 4.4.2. Calage des modèles .....   | 56        |
| 4.4.3. Validation des calages .....   | 56        |
| 4.5. RESULTATS OBTENUS SUITE AUX MODELISATIONS .....                                  | 57        |
| 4.5.1. Résultats pour les 8 stations hydrométriques et commentaires.....              | 57        |
| 4.5.2. Résultats suite aux modélisations .....  | 60        |
| 4.6. PIEZOMETRES RETENUS POUR REPRESENTER LES BASSINS VERSANTS ETUDIÉS .....          | 61        |
| 4.7. LIMITES D'UTILISATION DES MODELES .....  | 62        |
| <b>5. Elaboration d'indicateurs piézométriques.....</b>                               | <b>63</b> |
| 5.1. ANALYSE FREQUENTIELLE .....  | 63        |
| 5.2. TRAVAIL AVEC DES PIEZOMETRES A CHRONIQUE PLUS LONGUE.....                        | 63        |
| 5.2.1. Piézomètre de Ploërdut .....   | 64        |
| 5.2.2. Piézomètre de Saint-Hernin .....   | 66        |
| 5.2.3. Piézomètre de Grandchamp .....   | 69        |
| 5.2.4. Exemple d'utilisation des seuils mensuels .....                                | 71        |
| 5.3. ABAQUES DEBIT – NIVEAU PIEZOMETRIQUE.....  | 73        |
| 5.3.1. Principe de l'abaque .....   | 73        |
| 5.3.2. Prise en compte du décalage temporel .....                                     | 74        |
| 5.3.3. Abaques pour le bassin versant du Gouët .....                                  | 74        |
| 5.3.4. Abaques pour le bassin versant de l'Arguenon .....                             | 78        |
| 5.3.5. Abaques pour le bassin versant du Blavet .....                                 | 81        |
| 5.3.6. Exemple d'utilisation des abaques à partir des débits objectif d'étiage....    | 84        |
| 5.4. INDICATEURS PIEZOMETRIQUES RETENUS .....   | 87        |
| <b>6. Conclusion.....</b>   | <b>89</b> |

**7. Bibliographie .....91****Liste des illustrations**

|   |    |
|---|----|
| Illustration 1 : Caractéristiques des 3 barrages étudiés (source : CG 22) .....   | 11 |
| Illustration 2 : Localisation des 3 barrages étudiés .....  | 12 |
| Illustration 3 : Localisation des bassins versants étudiés.....   | 14 |
| Illustration 4 : Carte géologique du bassin versant du Gouët au 1/250 000 .....   | 15 |
| Illustration 5 : Localisation des piézomètres suivis par le BRGM à proximité du bassin du Gouët<br>(fond géologique : se référer à la légende de l'illustration 4) .....                      | 16 |
| Illustration 6 : Carte géologique du bassin versant de l'Arguenon au 1/250 000.....   | 17 |
| Illustration 7 : Localisation des piézomètres à proximité du bassin de l'Arguenon (fond géologique :<br>se référer à la légende de l'illustration 4) .....                                    | 19 |
| Illustration 8 : Chronique du piézomètre de Trémur (2003-2013) .....  | 19 |
| Illustration 9 : Carte géologique du bassin versant du Blavet au 1/250 000 .....  | 21 |
| Illustration 10 : Localisation des piézomètres à proximité du bassin du Blavet (fond géologique : se<br>référer à la légende de l'illustration 9) .....                                       | 22 |
| Illustration 11 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (R.Wyns, 1998 et R.Wyns et al., 2004)<br>.....   | 23 |
| Illustration 12 : Localisation des 12 piézomètres suivis dans les Côtes d'Armor, du piézomètre de<br>Pleurtuit et date de début du suivi .....  | 23 |
| Illustration 13 : Caractéristiques des 12 piézomètres suivis dans les Côtes d'Armor, et du piézomètre<br>de Pleurtuit (les coordonnées sont en Lambert 2 étendu) .....                        | 24 |
| Illustration 14 : Localisation des piézomètres par rapport aux masses d'eau souterraines.....   | 25 |
| Illustration 15 : Coupes géologiques et techniques de 2 piézomètres : Quinténic et Rosternen  | 26 |
| Illustration 16 : Talonnage en hautes eaux sur le piézomètre de Quinténic à la côte de 63 m NGF<br>(source : <a href="http://www.adeseaufrance.fr">http://www.adeseaufrance.fr</a> ).....     | 26 |
| Illustration 17 : Matrice de corrélation (coefficient de Pearson) sur les 13 piézomètres étudiés (avec<br>en bleu les corrélations supérieures à 0,80).....                                   | 27 |
| Illustration 18 : Localisation des piézomètres retenus par rapport aux 3 bassins versants étudiés   | 28 |
| Illustration 19 : Caractéristiques des piézomètres retenus par bassin versant étudié .....  | 28 |
| Illustration 20 : Exemple d'ajustement d'une loi exponentielle (en rouge) sur une courbe de<br>décroissance des niveaux piézométriques (en bleu) – RP-58139-FR .....                          | 30 |
| Illustration 21 : Décroissances des niveaux piézométriques aux piézomètres de Bréhand (graphique<br>du haut) et de Kerper (graphique du bas), et vitesses de décroissances (cm/jour)<br>..... | 31 |
| Illustration 22 : Autocorrélogrammes des chroniques piézométriques de Bréhand (à gauche) et<br>Kerper (à droite), seuil de corrélation à 0.7 (trait vert horizontal) .....                    | 33 |
| Illustration 23 : Eléments caractérisant la dynamique et de l'inertie des nappes des bassin étudiés<br>.....  | 33 |
| Illustration 24 : Débits moyens mensuels du Gouët à Saint Julien calculés sur 35 ans (banque<br>HYDRO).....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Illustration 25 : Débits moyens mensuels du Gouët à Ploufragan calculés sur 20 ans (banque HYDRO).....   | 36 |
| Illustration 26 : Débits moyens mensuels de l'Arguenon à Jugon-les-Lacs calculés sur 42 ans (Banque HYDRO) .....   | 37 |
| Illustration 27 : Débits moyens mensuels de la Rosette à Mégrit calculés sur 39 ans (Banque HYDRO).....  | 37 |
| Illustration 28 : Débits moyens mensuels du Blavet à Kerien calculés sur 34 ans (Banque HYDRO) .....   | 38 |
| Illustration 29 : Débits moyens mensuels du Blavet à Lanrivain calculés sur 16 ans (Banque HYDRO).....   | 39 |
| Illustration 30 : Données météorologiques utilisées pour les modélisations Gardénia .....  | 40 |
| Illustration 31 : Localisation du bassin versant du Gouët et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues.....   | 41 |
| Illustration 32 : Localisation du bassin versant de l'Arguenon et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues.....  | 42 |
| Illustration 33 : Localisation du bassin versant du Blavet et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues.....  | 43 |
| Illustration 34 : Lames d'eau calculées aux stations amont et aval sur les bassins versants du Blavet (en haut) et du Gouët (en bas) et lames d'eau corrigées avec les prélèvements calculées sur les stations aval (colonne de droite) .....  | 45 |
| Illustration 35 : Exemple de corrélogramme croisé débit (Le Blavet à Kerien) / niveau piézométrique (Kerpert).....   | 46 |
| Illustration 36 : Résultats des corrélogrammes croisés débit / niveau piézométrique : en haut : valeur du coefficient de corrélation au pic (avec en bleu foncé les corrélations supérieures à 0,7 et en bleu clair les corrélations supérieures à 0,6) en bas : décalage entre la piézométrie et le débit (en jour) ..... | 47 |
| Illustration 37 : Périodes de modélisation déterminées par rapport aux plages de données communes (en orange : dates restrictives) .....   | 47 |
| Illustration 38 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant (RP-52832-FR) .....  | 50 |
| Illustration 39 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique global GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (schéma avec 1 seul réservoir aquifère) – (RP-61371-FR) .....  | 52 |
| Illustration 40 : Localisation des stations de mesures utilisées pour le calage des modèles .....  | 53 |
| Illustration 41 : Schéma de la modélisation à deux réservoirs souterrains avec le logiciel GARDENIA© (RP-52832-FR).....  | 55 |
| Illustration 42 : Temps de demi-tarissement des débits calculés par ajustement d'une loi de Maillet, utilisés comme paramètres de calage initiaux des modèles .....  | 56 |
| Illustration 43 : Modélisation Gardénia - Débit du Gouët à Ploufragan / Niveau du piézomètre de Goudelin - Calage des paramètres (2009-2010) .....   | 58 |
| Illustration 44 : Modélisation Gardénia - Débit du Blavet à Lanrivain / Niveau du piézomètre de Kerpert - Calage des paramètres (2009-2010).....   | 59 |
| Illustration 45 : Modélisation Gardénia - Débit du Blavet à Mûr de Bretagne / Niveau du piézomètre de Rostrenen - Calage des paramètres (2006-2007).....   | 59 |
| Illustration 46 : Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia.....  | 60 |
| Illustration 47 : Courbe de fréquence cumulée (source : BRGM/RP-58139-FR) .....  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Illustration 48 : Chroniques piézométriques de Rostrenen (en rouge) et Ploërdut (en bleu) .....  | 64 |
| Illustration 49 : Corrélation du niveau piézométrique de Rostrenen et du niveau piézométrique de Ploërdut (et intervalle de confiance) .....   | 65 |
| Illustration 50 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Rostrenen sur la période 1980-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Ploërdut) Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 1,4 m NGF .....    | 66 |
| Illustration 51 : Chroniques piézométriques de Kerpert (en rouge) et Saint-Hernin (en bleu) ....   | 67 |
| Illustration 52 : Corrélation du niveau piézométrique de Kerpert et du niveau piézométrique de Saint-Hernin (et intervalle de confiance) .....   | 67 |
| Illustration 53 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Kerpert sur la période 1992-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Saint-Hernin) Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 0,4 m NGF .....  | 68 |
| Illustration 54 : Chroniques piézométriques de Trémeur (en rouge) et Grandchamp (en bleu) .  | 69 |
| Illustration 55 : Corrélation du niveau piézométrique de Trémeur et du niveau piézométrique de Grandchamp (et intervalle de confiance).....  | 70 |
| Illustration 56 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Trémeur sur la période 1989-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Grandchamp). Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 0,346 m NGF ..... | 71 |
| Illustration 57 : Niveaux piézométriques moyens mensuels mesurés à Kerpert lors de l'année 2011 et comparaison aux seuils piézométriques mensuels .....  | 72 |
| Illustration 58 : Superposition des chroniques piézométriques annuelles à Kerpert.....   | 73 |
| Illustration 59 : Décalage temporel entre la piézométrie et le débit des rivières d'après les corrélogrammes croisés .....   | 74 |
| Illustration 60 : Corrélation entre le débit du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Kerpert (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle) .....   | 75 |
| Illustration 61 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique simulé à Kerpert .....   | 76 |
| Illustration 62 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique journalier simulé à Kerpert pendant la période de vidange .....   | 77 |
| Illustration 63 : Courbe de tendance 2006 des relations entre le débit moyen journalier du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique journalier simulé à Kerpert pendant la période de vidange .....   | 78 |
| Illustration 64 : Corrélation entre le débit de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Trémeur (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle).....   | 79 |
| Illustration 65 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé à Trémeur .....  | 80 |
| Illustration 66 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé à Trémeur pendant la période de vidange .....   | 81 |
| Illustration 67 : Corrélation entre le débit du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Rostrenen (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle) .....  | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Illustration 68 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé à Rostrenen .....  | 83 |
| Illustration 69 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé à Rostrenen pendant la période de vidange ..... | 84 |
| Illustration 70 : Débits réservés (m <sup>3</sup> /s) aux stations de jaugeages situées en aval des barrages (source : CG 22) .....  | 84 |
| Illustration 71 : Débits (m <sup>3</sup> /s) aux stations de jaugeage amont correspondant aux débits réservés aux stations de jaugeages situées en aval des barrages.....                          | 85 |
| Illustration 72 : Exemple d'utilisation de l'abaque débit – niveau piézométrique à partir des débits objectifs d'étiage .....  | 86 |
| Illustration 73 : Localisation des piézomètres de référence et des stations de jaugeage représentatives retenus pour chaque bassin versant.....  | 87 |
| Illustration 74 : Tableau récapitulatif des seuils de gestion estimés pour chaque piézomètre de référence.....   | 88 |

## Liste des annexes

|  |     |
|--|-----|
| Annexe 1 Analyse préalable des piézomètres .....   | 93  |
| Annexe 2 Liens vers les fiches BSS Eau des 13 piézomètres étudiés .....  | 95  |
| Annexe 3 Fiches détaillées des stations hydrométriques (source : Banque HYDRO) .....   | 99  |
| Annexe 4 Compléments théoriques sur l'analyse fréquentielle des niveaux piézométriques (extrait du rapport BRGM/RP-58139-FR) ..... | 109 |
| Annexe 5 Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces.....   | 121 |
| Annexe 6 Résultats des modélisations Gardénia©.....  | 127 |

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Suite aux épisodes de déficit pluviométrique important qui se sont succédés ces dernières années et après une année 2011 particulièrement sèche, le Conseil Général des Côtes d'Armor (CG 22) et le Syndicat Départemental d'Alimentation en Eau Potable des Côtes d'Armor (SDAEP 22) souhaitent améliorer la gestion hydraulique des trois principaux barrages du département (sur l'Arguenon, le Gouët et le Haut-Blavet - Illustration 1 et Illustration 2), afin d'anticiper les crues et les épisodes de sécheresse. Ces trois grandes retenues d'eau représentent un enjeu important pour le département, notamment en période d'étiage, puisqu'ils assurent plus de la moitié des volumes prélevés annuellement pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) du département.

| Retenues                      | Date de mise en eau | Capacité de stockage (m <sup>3</sup> ) | Volume moyen annuel prélevé (m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|---------------------|--|---|
| <b>Arguenon – Ville Hatte</b> | 1973                | 11,5 millions                          | 11,1 millions                                 |
| <b>Gouët – St Barthélémy</b>  | 1978                | 7,9 millions                           | 7,5 millions                                  |
| <b>Blavet – Kerné Uhel</b>    | 1981                | 2,4 millions                           | 4, 7 millions                                 |

*Illustration 1 : Caractéristiques des 3 barrages étudiés (source : CG 22)*

Actuellement, la gestion hydraulique des barrages repose sur l'examen des données de pluviométrie et des débits issus des stations de jaugeage. Compte-tenu des interactions eaux de surface - eaux souterraines, le CG 22 voudrait prendre en compte les données piézométriques pour améliorer sa gestion des barrages (remplissage optimal des réserves pour assurer la distribution d'eau à l'étiage) voire des autres prises d'eau AEP superficielles et souterraines. C'est pourquoi le CG 22 et le SDAEP 22 ont sollicité le BRGM pour réaliser une étude visant à mettre en place des indicateurs piézométriques sur le département des Côtes d'Armor afin d'améliorer cette gestion.

Pour réaliser le projet intitulé «Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor », le BRGM a établi une convention de recherche et développement partagés avec le CG 22 et le SDAEP 22 (convention du 01/07/2013). Par ailleurs, le projet a bénéficié d'une subvention financière de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB) (dossier n°130090401, décision référence 2013D015 du 06/05/2013).

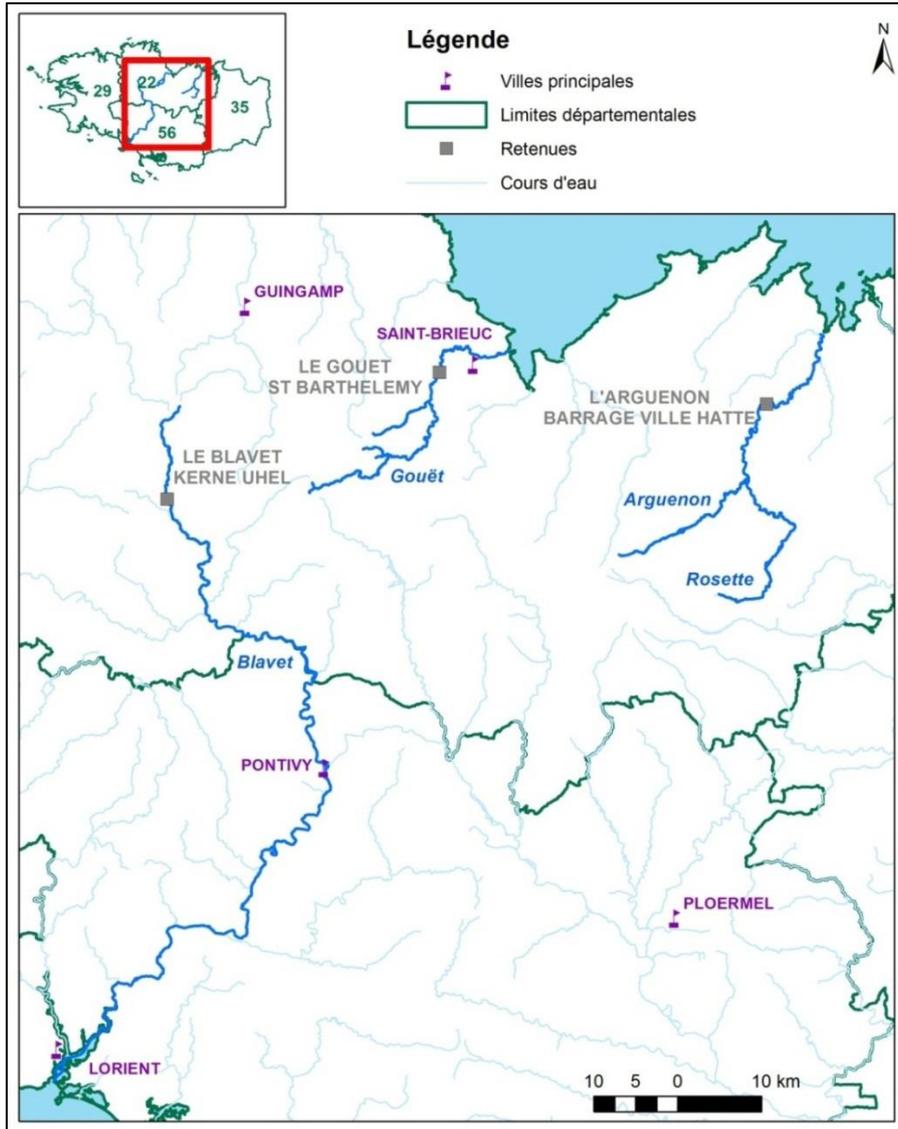


Illustration 2 : Localisation des 3 barrages étudiés

## 1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude est de proposer des indicateurs piézométriques utilisables par le CG 22 pour améliorer la gestion de ses 3 principales retenues destinées à l'alimentation en eau potable du département.

Un indicateur piézométrique peut se définir (cf. rapport BRGM/RP-58139-FR) comme une « variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur est caractérisé par une gamme de valeurs particulières (que l'on peut appeler seuils de gestion), qui peuvent correspondre à :

- un objectif de gestion : par exemple une piézométrie objectif d'étiage (POE),
- un (ou plusieurs) seuils d'alerte (PSA), destinés à anticiper une situation de crise,
- un seuil de crise (PSC).

*Cette variable a une dimension temporelle :*

- *la « valeur seuil » considérée correspond à un certain intervalle de temps dans l'année,*

*et une dimension spatiale :*

- *elle est associée à un piézomètre choisi comme représentatif du contexte, ou bien elle est associée à plusieurs piézomètres et correspond alors à une combinaison linéaire des valeurs enregistrées sur ces piézomètres (moyenne simple ou moyenne pondérée). ».*

### **1.3. UN AUTRE OBJECTIF DE CETTE ETUDE EST D'AMELIORER LES CONNAISSANCES DES INTERACTIONS ENTRE EAU DE SURFACE ET EAU SOUTERRAINE, AFIN DE DEFINIR DES INDICATEURS PIEZOMETRIQUES. DEMARCHE SUIVIE**

La recherche d'indicateurs piézométriques s'appuie sur la méthodologie nationale développée par le service EAU du BRGM à la demande de l'ONEMA (rapport BRGM/RP-58139-FR, 2009).

A la demande du CG 22, il a été décidé de s'intéresser à trois sites cruciaux pour l'alimentation en eau potable du département (cf. Illustration 2) :

- le barrage de Saint-Barthélémy sur le Gouët ;
- le barrage de la Ville Hatte sur l'Arguenon ;
- la retenue de Kerné Uhel sur le Blavet.

En fonction des résultats de l'étude, le CG 22 pourra évaluer le besoin d'étendre la définition d'indicateurs piézométriques au reste de son territoire, pour la gestion des prises d'eau superficielles et des captages souterrains.

L'étude s'est déroulée en 4 phases :

1. étude du contexte hydrogéologique des piézomètres et de la dynamique des nappes,
2. analyse critique préalable des données disponibles,
3. modélisation globale pluie - niveau piézométrique - débit des rivières,
4. élaboration d'indicateurs piézométriques.

Ces 4 phases sont détaillées dans les chapitres 2, 3, 4 et 5 de ce rapport.

### **1.4. LIMITES DE L'ETUDE**

Les précédentes études de définition d'indicateurs piézométriques ont été réalisées en milieu sédimentaire avec des chroniques piézométriques longues supérieures à 20 ans. La définition d'indicateurs en milieu de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans constitue donc un test méthodologique.

## 2. Contexte hydrogéologique des piézomètres et dynamique des nappes

### 2.1. PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS

L'illustration ci-dessous localise les bassins versants délimités à l'amont des barrages.

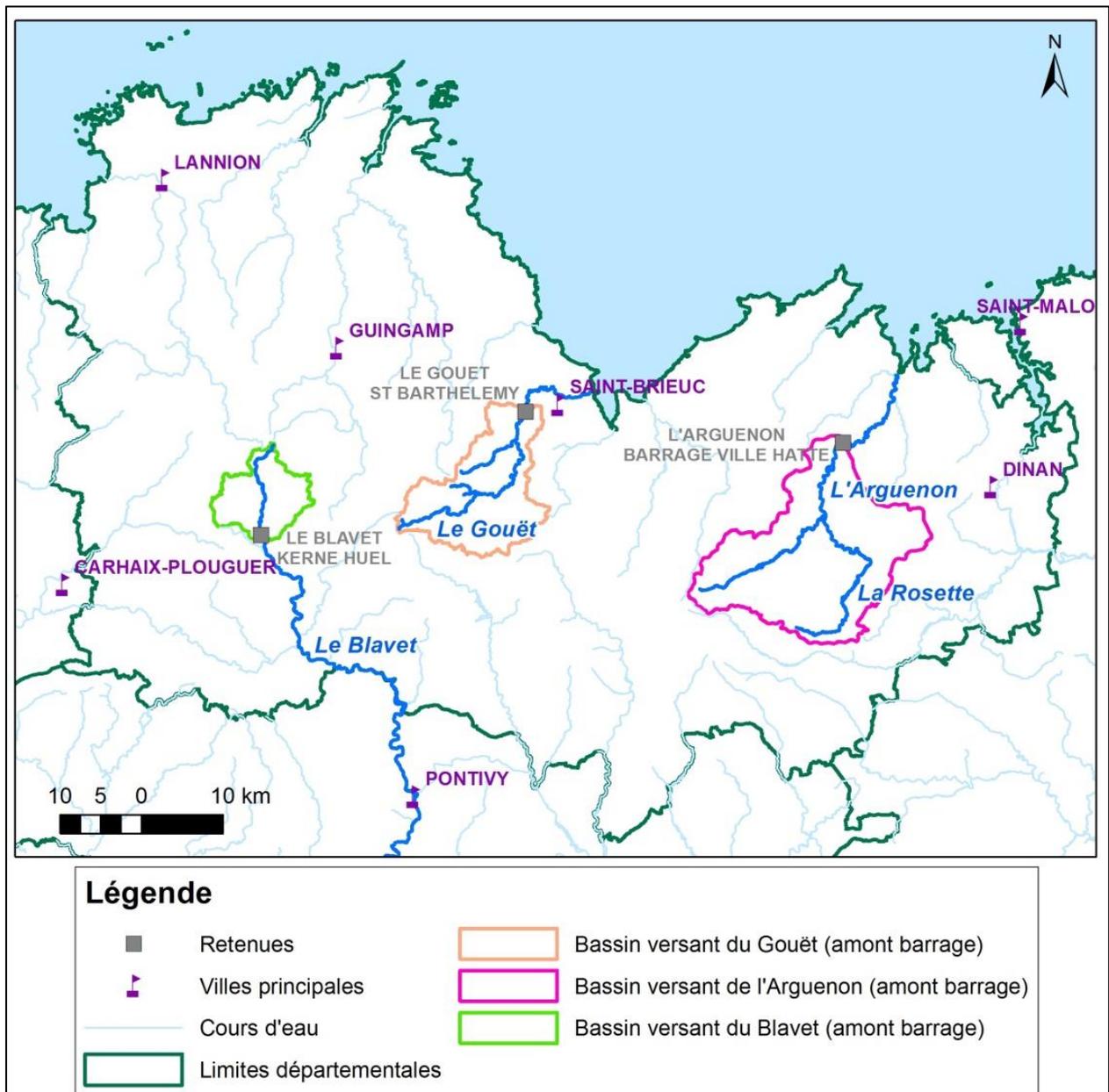


Illustration 3 : Localisation des bassins versants étudiés

### 2.1.1. Bassin versant du Gouët

#### Contexte géographique

Le bassin versant hydrographique du Gouët, d'une superficie de 250 km<sup>2</sup>, est intégralement situé dans les Côtes d'Armor. Le Gouët prend sa source sur la commune du Haut-Corlay et se jette dans la Manche au port du Légué, dans la Baie de Saint-Brieuc. Le cours du Gouët est long de 48 km. Ses principaux affluents sont, d'amont en aval, la Bronze, la Noë Sèche et la Maudouve en rive gauche, et le Pas, le Saint Germain et le Gouëdic en rive droite.

Le barrage de Saint-Barthélémy est situé en aval du bassin, entre les communes de La Méaugon et Ploufragan. Il a été mis en service en 1978 afin d'alimenter en eau potable les habitants du Pays de Saint Brieuc et la côte du Goëlo. La construction du barrage a noyé la vallée du Gouët sur 5 km (jusqu'à Sainte Anne du Houlin en amont). La retenue a une capacité de 7,9 millions de m<sup>3</sup>, pour une cote de retenue normale de 87 m NGF, ce qui représente une superficie de 81 hectares. Outre sa fonction d'alimentation en eau potable, le barrage est également utilisé pour la gestion des crues et il est équipé d'une microcentrale hydroélectrique turbinant en hiver les excédents d'écoulement (source : CG 22).

#### Contexte géologique

Le Gouët traverse à sa source des terrains paléozoïques de l'Unité de Châteaulin (grès, calcaires et schistes ardoisiers, cf. (1) sur l'illustration 4) puis des formations essentiellement granitiques (2), avec les Massifs de Quintin (hercynien) et de Ploufragan (cadomien) et enfin des roches volcaniques déformées de la formation de Lanvollon (Unité de Saint Brieuc, (3)). Sur la partie Nord du bassin versant, le granite de Ploufragan est traversé de filons de dolérites orientés Nord-Sud (traits verts sur l'illustration 4).

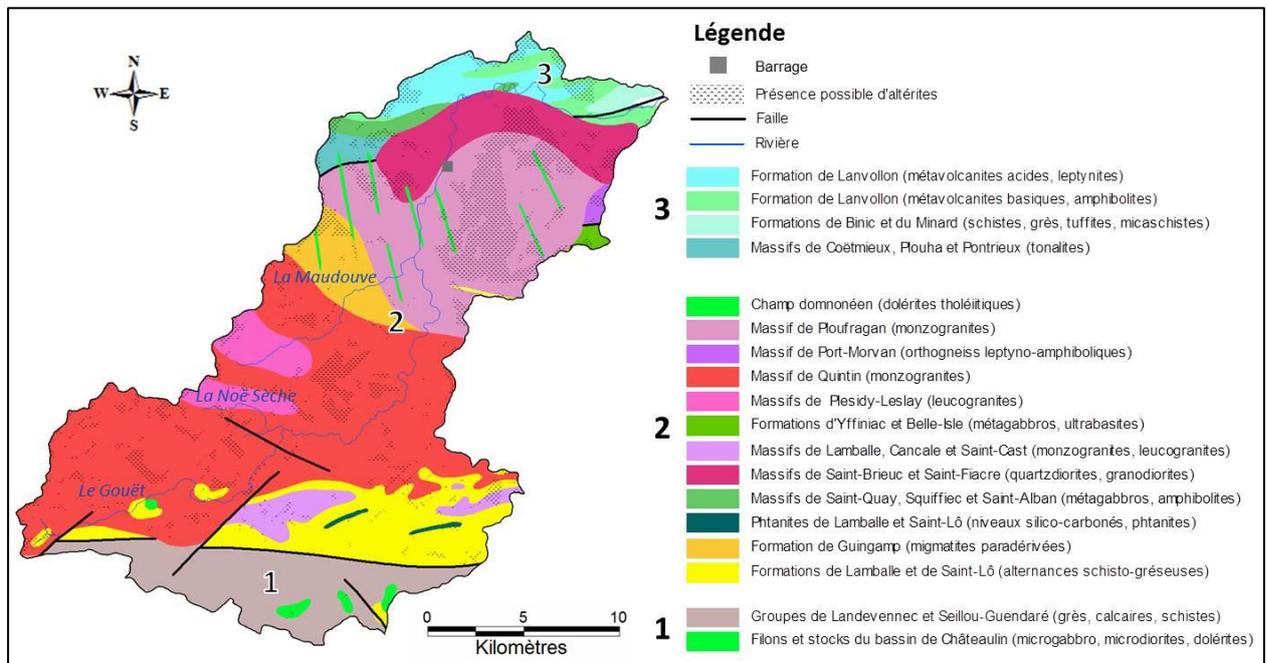


Illustration 4 : Carte géologique du bassin versant du Gouët au 1/250 000

## Contexte hydrogéologique

Aucun piézomètre suivi par le BRGM n'est situé sur le bassin versant du Gouët en amont du barrage. Les piézomètres les plus proches (cf. Illustration 5) se trouvent à Trémuson (à 4 km au nord du barrage), à Kerpert (à 10 km à l'ouest du bassin du Gouët), à Bréhand (à 14 km à l'est) et à Goudelin (à 15 km au nord). Contrairement à Goudelin et Trémuson, les piézomètres de Kerpert et de Bréhand recourent des formations géologiques que l'on retrouve plutôt à l'amont du bassin versant du Gouët.

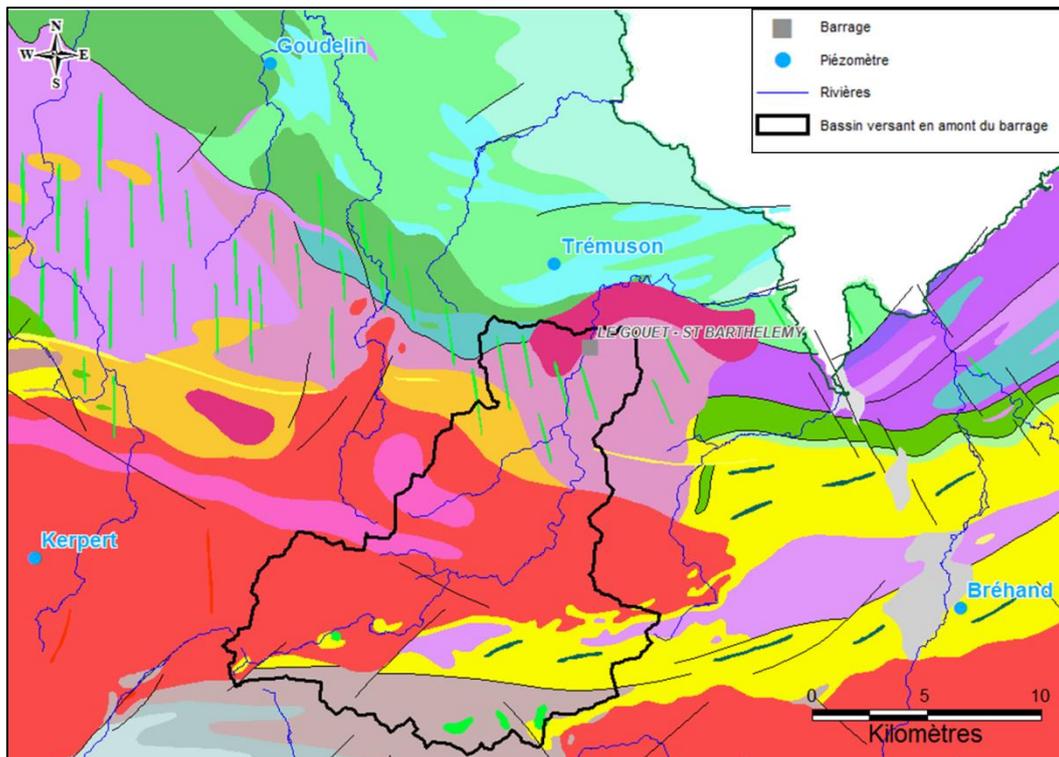


Illustration 5 : Localisation des piézomètres suivis par le BRGM à proximité du bassin du Gouët (fond géologique : se référer à la légende de l'illustration 4)

### 2.1.2. Bassin versant de l'Arguenon

#### Contexte géographique

L'Arguenon, fleuve côtier de l'Est des Côtes d'Armor, prend sa source dans les Landes du Mené et se jette dans la Manche à Notre Dame du Guildo, après un parcours de 64 km. Son bassin versant hydrographique a une superficie totale de 601 km<sup>2</sup>. Le bassin, de forme allongée, est orienté du Sud au Nord.

Les principaux affluents de l'Arguenon sont, d'amont en aval, le Quiloury (17 km) et le Guébriand (17 km) en rive gauche, et la Rosette (35 km), la Rieule (18 km) et le Montafilan (19 km) en rive droite.

Le Barrage de la Ville Hatte, situé entre les communes de Pléven et Plorec-sur-Arguenon, a été mis en service en 1973 afin de satisfaire une partie des besoins en eau potable du département. La retenue a une capacité de 11,5 millions de m<sup>3</sup>, pour une superficie de 180 hectares. La cote NGF de retenue normale est de 22,50 m. Le bassin versant en amont du

barrage couvre une superficie de 383 km<sup>2</sup>. Outre son rôle principal qui est l'alimentation en eau potable, le barrage est utilisé dans la mesure du possible pour gérer les crues et limiter les inondations à l'aval, notamment dans l'agglomération de Plancoët (source : CG 22).

### Contexte géologique

L'Arguenon traverse successivement les deux unités géologiques du Domaine Cadomien normano-breton que sont l'Unité de Fougères au Sud et l'Unité de Saint-Malo au Nord (cf. Illustration 6). Il prend sa source au Nord du Cisaillement Nord Armoricaïn, souligné par la présence de roches métasédimentaires (schistes, grès et quartzites), très fortement fracturées, du Paléozoïque.

L'Unité de Saint-Malo (1, Illustration 6), dans laquelle se trouve le barrage de la Ville Hatte, est composée de roches métamorphiques telles que des gneiss et des migmatites riches en micas (phyllosilicates), minéraux favorisant l'altération.

L'Unité de Fougères (2) est composée de schistes gréseux du Briovérien plus ou moins altérés et métamorphisés en bordure des granites intrusifs hercyniens comme celui de Bobital-Dinan.

Les structures tectoniques (failles, etc.), qui affectent le Sud du bassin versant ont des directions préférentielles allant de N020 à N120, alors qu'au Nord, les directions préférentielles vont de Nord-Sud à N050.

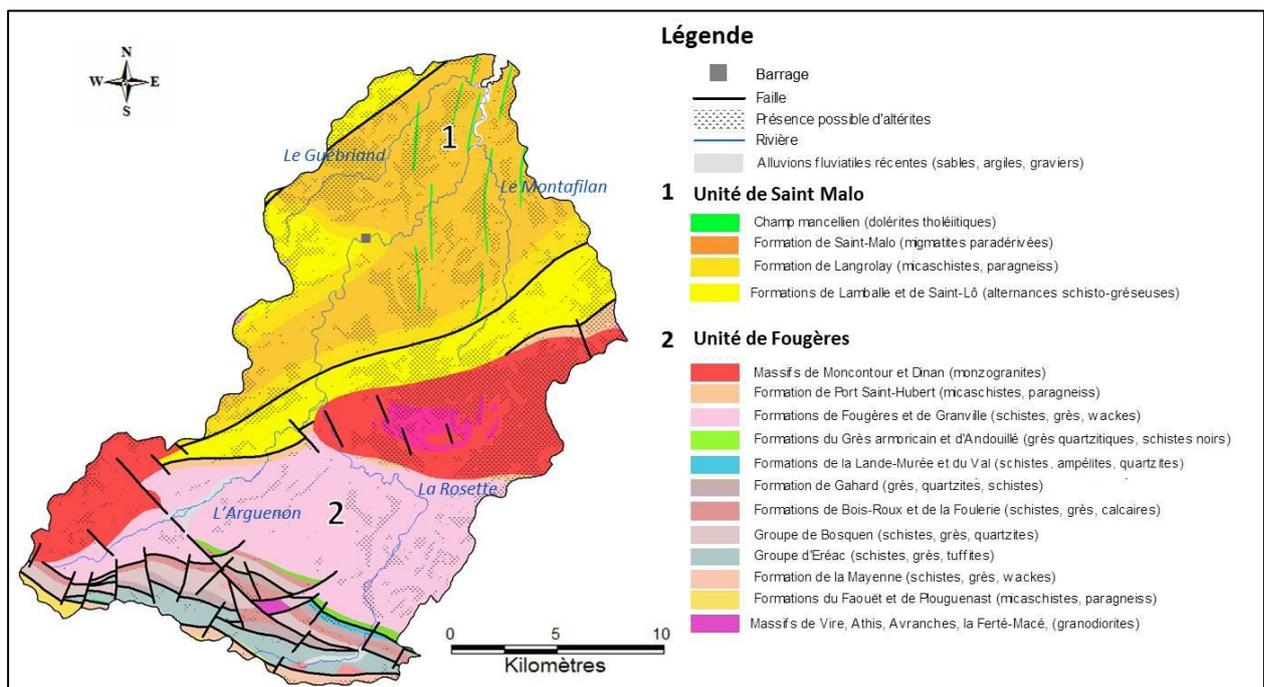


Illustration 6 : Carte géologique du bassin versant de l'Arguenon au 1/250 000

### Contexte hydrogéologique

Les niveaux de nappe sont enregistrés dans le bassin de l'Arguenon à l'amont du barrage grâce au piézomètre de Trémeur (n° d'identifiant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) : 02803X0036/PZ), implanté dans les schistes briovériens (cf. Illustration 7). Au droit de cet ouvrage, la profondeur de la nappe varie entre 0,74 et 3,69 m, le battement moyen annuel est

de 2,04 m sur la période 2004-2013 (cf.

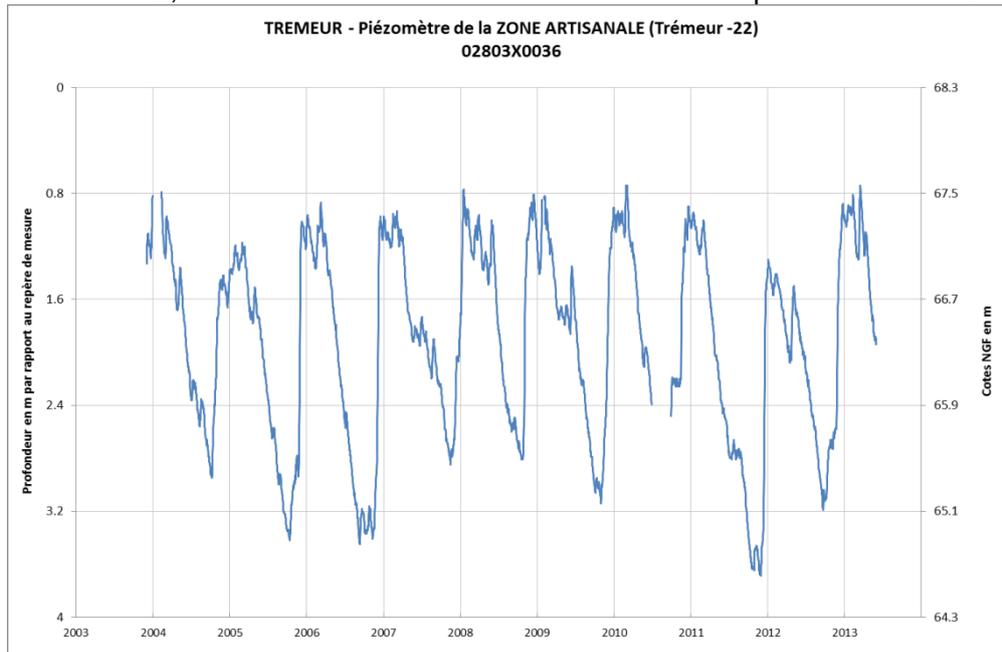
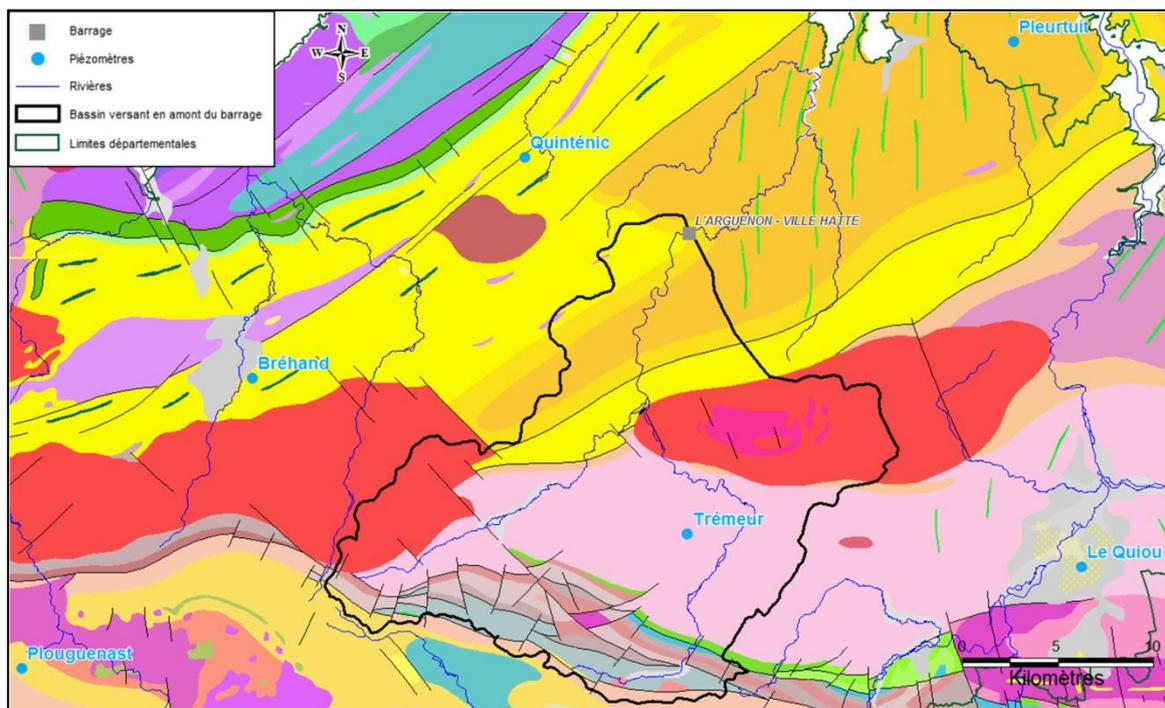


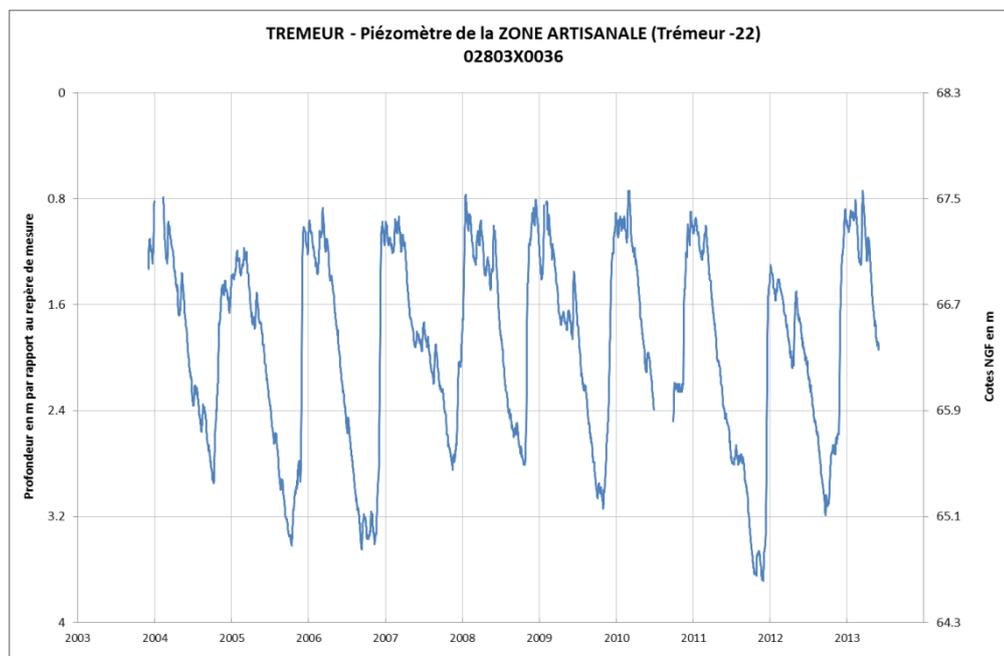
Illustration 8).

D'autres piézomètres se trouvent à proximité du bassin de l'Arguenon (Illustration 7) : Plouguenast, Bréhand, Quinténic, Pleurtuit et Le Quiou. Les piézomètres de Bréhand, Quinténic et Pleurtuit captent des formations géologiques que l'on retrouve en amont du barrage de la Ville Hatte, respectivement schistes et grès, schistes briovériens et gneiss. Le piézomètre du Quiou se trouve dans un contexte géologique particulier (bassin tertiaire) et recoupe des formations sédimentaires. Le piézomètre de Plouguenast se situe au Sud du Cisaillement Nord-Armoricain, dans un contexte géologique différent de celui du bassin versant de l'Arguenon.



*Illustration 7 : Localisation des piézomètres à proximité du bassin de l'Arguenon (fond géologique : se référer à la légende de l'illustration 4)*

L'évolution des niveaux piézométriques est caractérisée par des cycles annuels (qui traduisent la succession des épisodes de recharge et de tarissement) et pluriannuels (successions d'années humides ou succession d'années sèches). Les étiages ont été marqués en 2006 et en 2011 (ceci n'est pas lié à des prélèvements souterrains puisque l'ouvrage n'est pas influencé).



*Illustration 8 : Chronique du piézomètre de Trémeur (2003-2013)*

### 2.1.3. Bassin versant du Blavet

#### **Contexte géographique**

Le Blavet, fleuve côtier du Sud de la Bretagne, prend sa source à 280 m d'altitude près de Bourbriac dans les Côtes d'Armor et parcourt 149 km avant de se jeter dans l'océan Atlantique dans la rade de Lorient (Morbihan). Il s'écoule du Nord vers le Sud. Son bassin hydrographique a une superficie de 2 089 km<sup>2</sup>.

Les principaux affluents du Blavet sont, d'amont en aval, le Sulon (29 km), le Daoulas (19 km) et l'Evel (55 km) en rive gauche et la Sarre (35 km) en rive droite. Tous ces affluents se trouvent en aval du barrage de Kerné Uhel.

Le cours du Blavet est fortement anthropisé, avec la présence de 2 barrages (Kerné Uhel et Guerlédan) et de nombreuses écluses (canal de Nantes à Brest). La retenue de Kerné Uhel, mise en eau en 1981 en amont du Blavet (bassin versant amont : 90 km<sup>2</sup>), constitue une importante réserve pour l'alimentation en eau potable des Côtes d'Armor (2,4 millions de m<sup>3</sup>). Elle est fortement touchée par des phénomènes d'eutrophisation. Le barrage, localisé entre les communes de Lanrivain et Trémargat, ne joue pas de rôle dans la régulation des crues, en revanche il est équipé d'une microcentrale hydroélectrique turbinant en hiver les excédents

d'écoulement. A la cote NGF de retenue normale de 220 m, la superficie de la retenue est de 74 hectares (source : CG 22).

### **Contexte géologique**

Le bassin versant du Blavet recoupe un nombre important de structures et de domaines géologiques (cf. Illustration 9).

Du Nord vers le Sud, sa source s'initie dans le granite de Quintin (cf. (1) en Illustration 9) appartenant au Domaine varisque médio-armoricain occidental. En aval du barrage de Kerné Uhel, son cours se poursuit dans le même domaine mais traverse le Bassin paléozoïque de Châteaulin (2), empilement de roches sédimentaires déformées (schistes, quartzites, grès et calcaires), formant un synclinal. Cette géométrie est découpée par un réseau de failles et fractures, orienté N150 à N020 en moyenne.

Le Blavet traverse ensuite :

- le Domaine varisque de Bretagne centrale, composé de micaschistes et paragneiss et des Massifs de Scaër, Pontivy, Lizio, Séglien, Odet (3) ;
- le Domaine varisque ligéro-sénaise (Quimper-Angers) composé de leucogranites d'Ergué-Languidic (4).

Enfin, sa course se termine dans le Domaine sud-armoricain breton (5), composé des massifs granitiques de Quimper et Plomelin et de Plouhinec-Pluguffan-Plumergat, d'orthogneiss du sud-Bretagne et de l'Unité du Pouldu, composée de roches métamorphiques telles que des paragneiss, des micaschistes, schistes et schistes verts.

Les structures tectoniques ont trois directions préférentielles :

- celles orientées sub-Est-Ouest parallèles au Cisaillement Sud Armoricaire (CSA),
- celles orientées N150 environ,
- celles orientées N020.

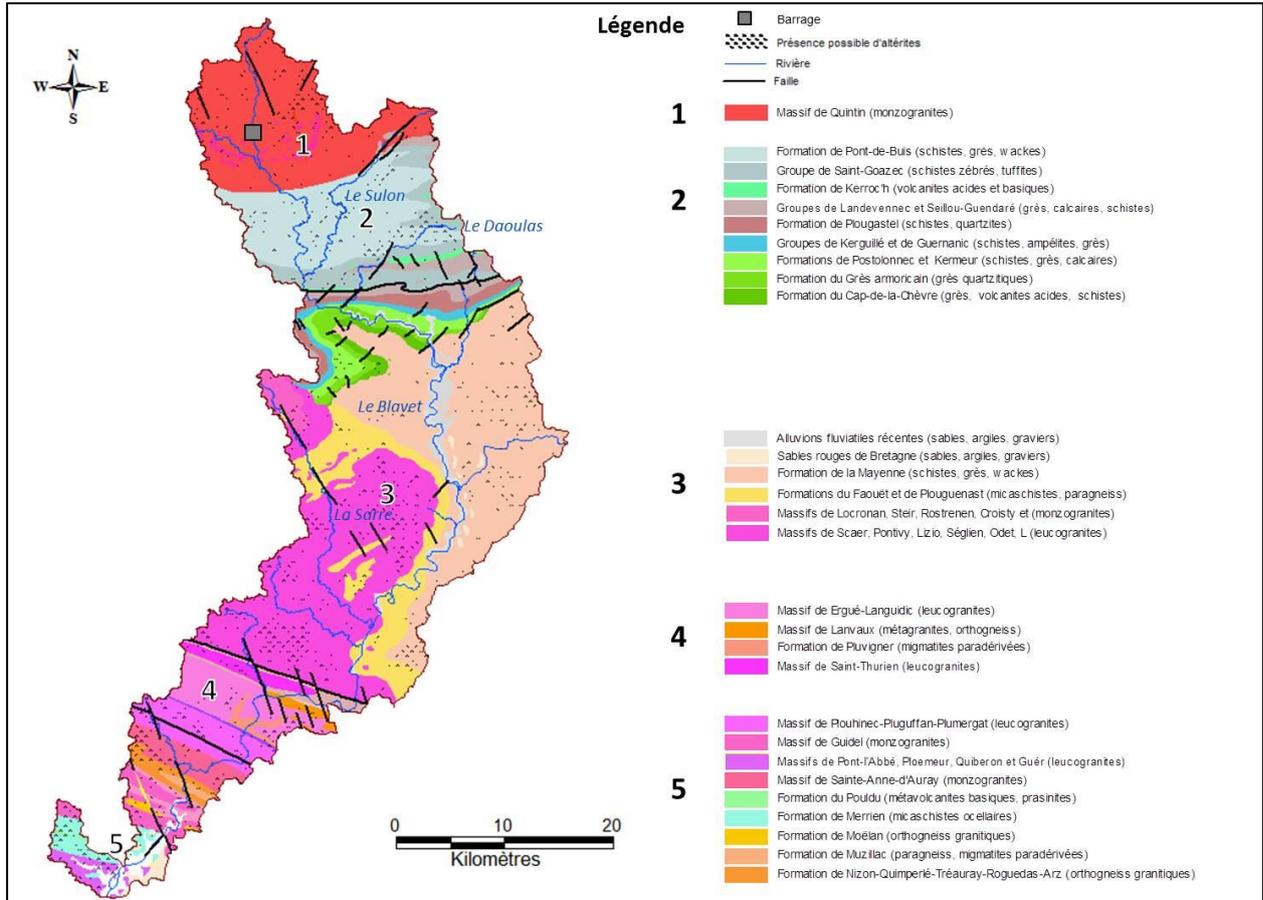


Illustration 9 : Carte géologique du bassin versant du Blavet au 1/250 000

### Contexte hydrogéologique

Dans le Morbihan, 3 piézomètres sont suivis sur le bassin hydrographique du Blavet, avec d'amont en aval : Pontivy, Bieuzy et Hennebont. Aucun piézomètre n'est suivi sur le bassin versant du Blavet à l'amont du barrage de Kerné Uhel. Les piézomètres les plus proches (cf. Illustration 10) se trouvent à Kerpert (à 3 km à l'Est du bassin versant du Blavet) et à Rostrenen (à 13 km au Sud du barrage de Kerné Uhel). Le piézomètre de Kerpert recoupe les mêmes formations géologiques que l'amont du bassin versant (granite).

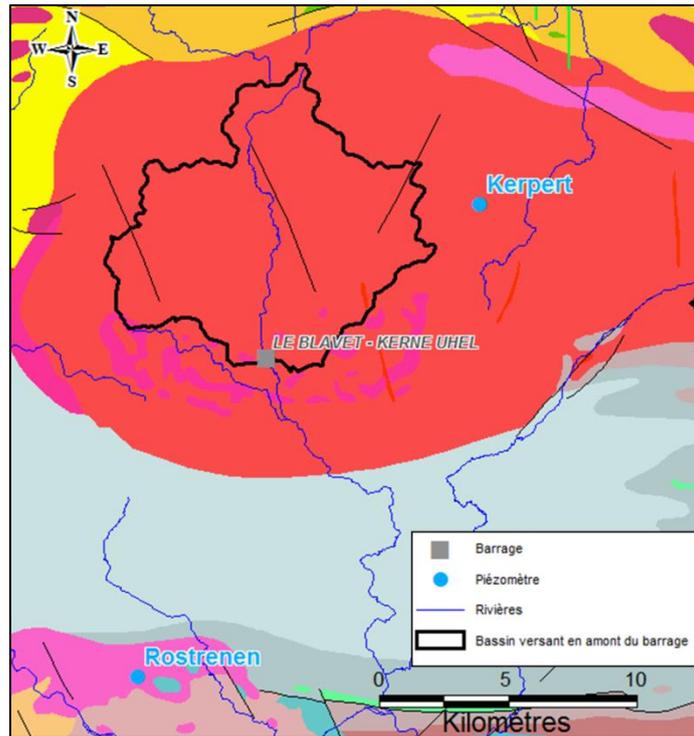


Illustration 10 : Localisation des piézomètres à proximité du bassin du Blavet (fond géologique : se référer à la légende de l'illustration 9)

## 2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET ANTHROPIQUE DES PIEZOMETRES

### 2.2.1. Rappel sur les aquifères de socle

En région de socle, il n'existe pas de grands aquifères, mais une mosaïque de petits systèmes imbriqués, indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles des exploitations qui en sont faites. Les eaux souterraines sont donc situées au sein de deux aquifères superposés et en contact permanent (cf. Illustration 11) : celui des altérites et celui du milieu fissuré. Le rôle de réservoir (fonction capacitive : emmagasinement de l'eau de pluie) est assuré principalement par l'altération de la roche en place (les altérites), à porosité importante et faible perméabilité, développée depuis la surface sur, parfois, plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, tandis que l'eau circule surtout par le réseau de fissures et fractures existant plus bas (fonctions capacitive et transmissive), dans la roche saine ou moins atteinte par l'altération (horizon fissuré), à porosité plus faible mais cependant significative (1 à 5 %) et à perméabilité plus importante ( $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s).

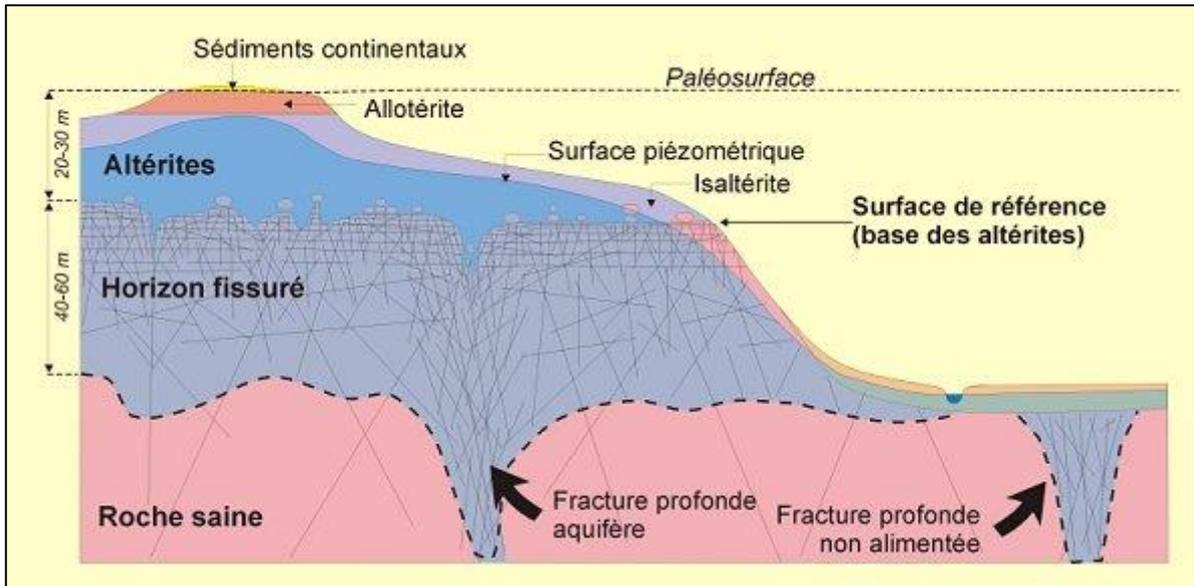


Illustration 11 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (R.Wyns, 1998 et R.Wyns et al., 2004)

### 2.2.2. Analyse préalable des piézomètres

12 piézomètres sont suivis par le BRGM dans les Côtes d'Armor. Le piézomètre de Pleurtuit, situé en Ile-et-Vilaine à la frontière avec les Côtes d'Armor sera également pris en compte dans le cadre de cette étude, soit un total de 13 piézomètres (cf. Illustration 12 et Annexe 2). Les dates de début de mesure en continu de la profondeur de la nappe figurent dans les illustrations 12 et 13.

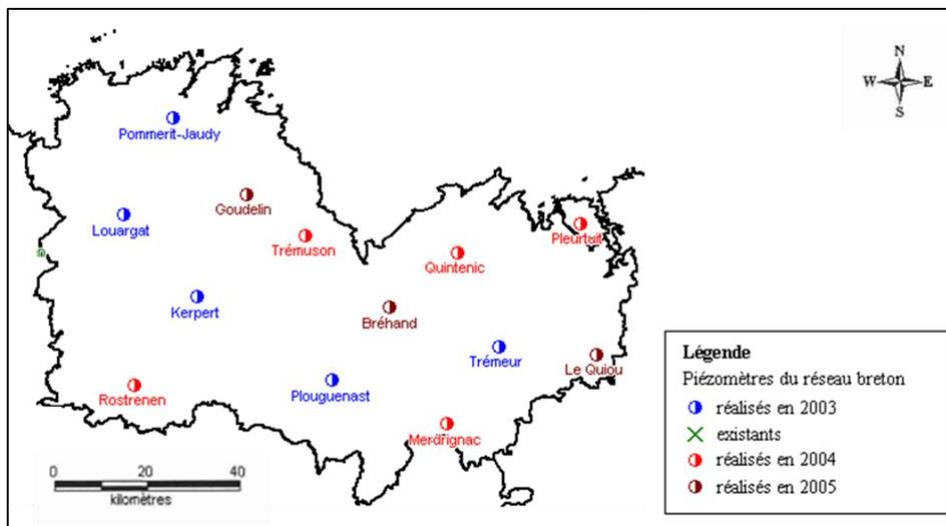


Illustration 12 : Localisation des 12 piézomètres suivis dans les Côtes d'Armor, du piézomètre de Pleurtuit et date de début du suivi

| PIEZOMETRE     |      |               |                               |        |         |                 | METEO    |                | BASSIN VERSANT              |  |
|----------------|------|---------------|-------------------------------|--------|---------|-----------------|----------|----------------|-----------------------------|--|
| Commune        | Dept | Code BSS      | Lieu dit                      | X      | Y       | mise en service | n°       | commune        | BV                          |  |
| Bréhand        | 22   | 02794X0063/PZ | Les Portes Cargouët           | 234607 | 2390480 | déc. 2005       | 22015001 | BREHAND        | Le Gouessant (J132)         |  |
| Goudelin       | 22   | 02047X0072/PZ | Le Restou                     | 204486 | 2414428 | déc. 2005       | 22065002 | GOUDELIN       | Le Leff (J181)              |  |
| Kerpert        | 22   | 02782X0047/PZ | Coldevennec                   | 194186 | 2392568 | déc. 2003       | 22092001 | KERPERT        | Trieux (J170)               |  |
| Le Quiou       | 22   | 02812X0238/PZ | Le Guémain                    | 277977 | 2380547 | déc. 2005       | 22263001 | LE QUIOU       | La Rance (J063)             |  |
| Louargat       | 22   | 02413X0065/PZ | Kerboll - Parc DDE            | 178452 | 2410105 | déc. 2003       | 22135001 | LOUARGAT       | Léguer (J220)               |  |
| Merdrignac     | 22   | 03152X0027/F  | La Peignie                    | 246520 | 2365818 | nov. 2004       | 22147006 | MERDRIGNAC     | Yvel (J834)                 |  |
| Plouguenast    | 22   | 02796X0044/PZ | La Hutte Charles              | 222544 | 2375131 | déc. 2003       | 22219003 | PLOUGUENAST    | Lié (J811)                  |  |
| Pommerit-Jaudy | 22   | 02034X0082/PZ | Bellevue                      | 189244 | 2430486 | déc. 2003       | 22247002 | POMMERIT-JAUDY | Jaudy (J202)                |  |
| Quintenic      | 22   | 02442X0111/F  | Centre d'élevage de la Vallée | 248863 | 2402089 | nov. 2004       | 22261002 | QUINTENIC      | Rivières côtières (J120)    |  |
| Rostrenen      | 22   | 03124X0088/F  | Rue du Miniou                 | 181000 | 2374180 | fév. 2005       | 22266001 | ROSTRENEEN     | Canal Nantes à Brest (J530) |  |
| Trémeur        | 22   | 02803X0036/PZ | Les Dineux - Parc DDE         | 257343 | 2382227 | déc. 2003       | 22020002 | BROONS         | Rosette (J111)              |  |
| Trémuson       | 22   | 02431X0106/F  | Aérodrome                     | 216864 | 2405616 | fév. 2005       | 22372001 | ST BRIEUC      | Ic (J161)                   |  |
| Pleurtuit      | 35   | 02451X0023/F  | Aéroport                      | 274385 | 2408202 | fév. 2005       | 35228001 | DINARD         | Rance (J081)                |  |

Illustration 13 : Caractéristiques des 12 piézomètres suivis dans les Côtes d'Armor, et du piézomètre de Pleurtuit (les coordonnées sont en Lambert 2 étendu)

### Pérennité des piézomètres

Pour chaque piézomètre, une analyse préalable a été réalisée, afin de s'assurer de la pérennité de l'ouvrage au regard des contraintes anthropiques existantes<sup>1</sup>. Afin de dresser un diagnostic complet du piézomètre, les points suivants ont été examinés :

- Etat général de l'ouvrage (protection, risques d'assecs, ...),
- Durée de la chronique,
- Influence des mesures par des pompages voisins,
- Environnement de l'ouvrage (contexte et risques de détérioration),
- Aspects fonciers (accès, convention avec le propriétaire du site, ...).

Le détail de cette analyse est présenté dans le 1<sup>er</sup> tableau de l'Annexe 1. La pérennité de l'ensemble des piézomètres cités ci-dessus est considérée comme forte. Seul le piézomètre de Merdrignac est influencé par des pompages saisonniers (arrosage du terrain communal de football). La durée des chroniques est inférieure à 10 ans pour les 13 piézomètres étudiés.

### Caractéristiques des piézomètres

D'autre part, les caractéristiques suivantes des différents piézomètres ont été analysées (cf. second tableau en Annexe 1) :

- Bassin versant de surface dans lequel se trouve le piézomètre,
- Masse d'eau souterraine dans laquelle se trouve le piézomètre (cf. Illustration 14),
- Altitude du sol,
- Profondeur du forage,
- Coupes géologique et technique (cf. exemples en Illustration 15),
- Géologie et aquifère majoritairement capté (horizon altéré et/ou fissuré),
- Gammes des niveaux mesurés depuis le début d'acquisition (cotes minimales maximales et moyennes, battement moyen),
- Paramètres calculés lors du programme SILURES Bretagne<sup>2</sup> (épaisseur de l'horizon fissuré utile, débit de l'horizon fissuré utile, productivité moyenne de la formation géologique captée [débit du fissuré utile rapporté à la hauteur de fissurée captée par le

<sup>1</sup> Conformément aux préconisations du Guide pour la détermination des indicateurs piézométriques en vue d'une gestion quantitative de la ressource. Rapport final BRGM/RP-61374-FR - STOLLSTEINER P. (2011)

<sup>2</sup> Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine (Mougin et al, 2008)

piézomètre], inertie du milieu physique souterrain des bassins versants – Cf. rapport BRGM/RP-56457-FR),

- Type de réaction suite aux précipitations (piézomètre réactif [succession parfois serrées de recharges et de vidanges], tamponné [variations régulières avec un nombre limité de pics et de minima] ou mitigé [comportement intermédiaire] - Cf. rapport BRGM/RP-56914-FR),
- Talonnage en hautes eaux (cf. exemple en Illustration 16),
- Cycles annuels et/ou pluri-annuels (cf. Illustration 16),
- Profondeur des arrivées d'eau recoupées lors de la foration (cf. Illustration 15),
- Dénoyage des arrivées d'eau au cours du battement de la nappe.

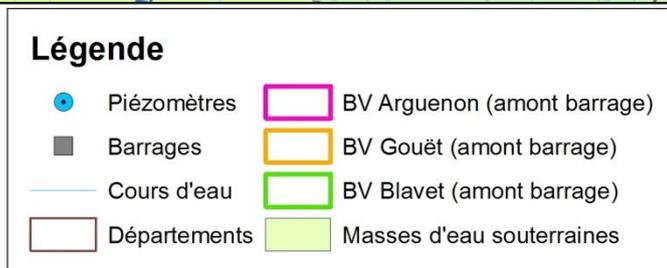
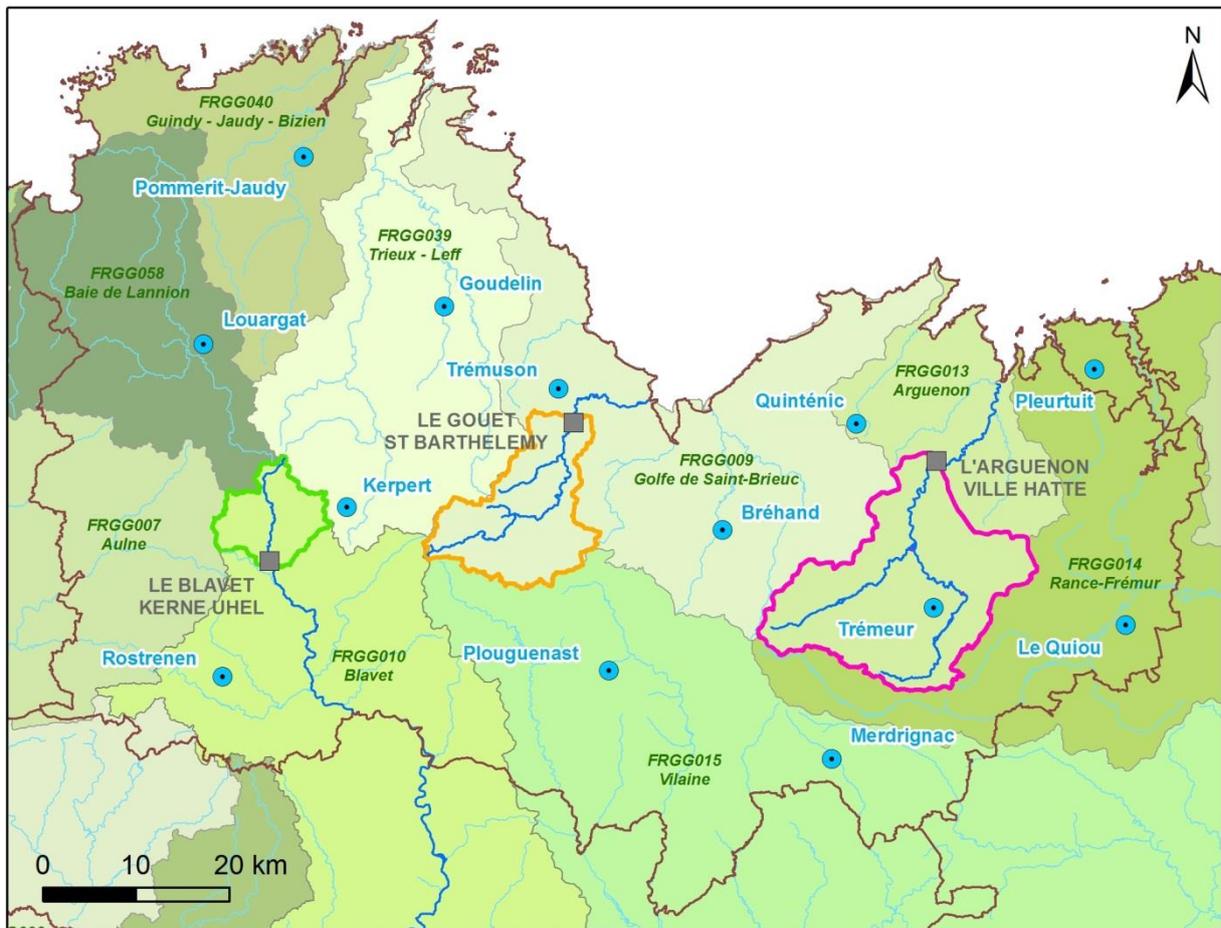


Illustration 14 : Localisation des piézomètres par rapport aux masses d'eau souterraines

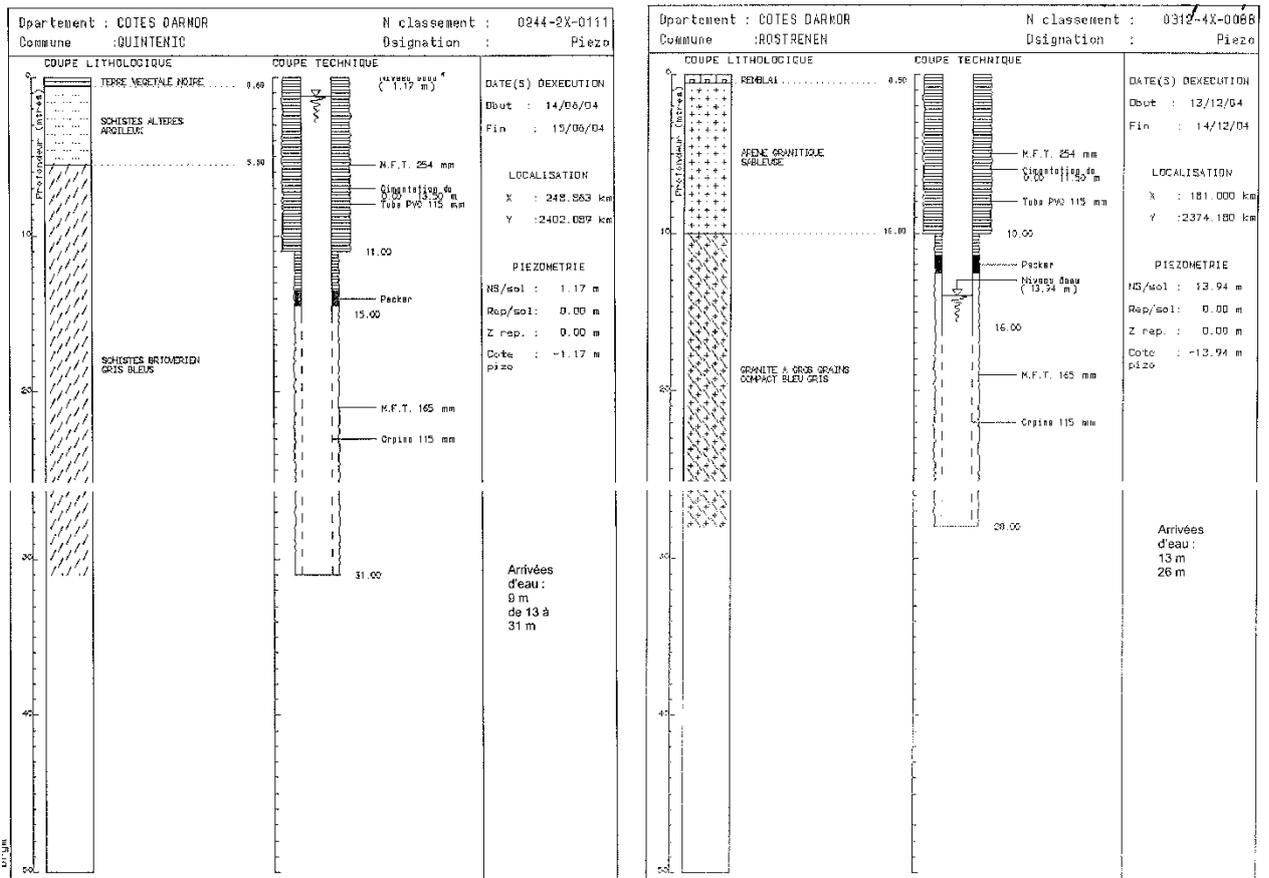


Illustration 15 : Coupes géologiques et techniques de 2 piézomètres : Quintenic et Rostrenen

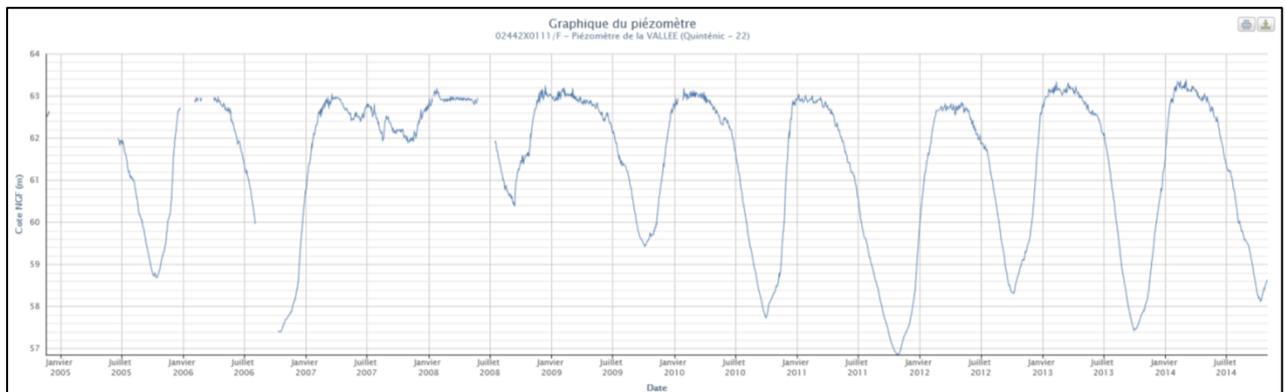


Illustration 16 : Talonnage en hautes eaux sur le piézomètre de Quintenic à la côte de 63 m NGF (source : <http://www.ades.eaufrance.fr>)

## Corrélation

L'existence de corrélation entre les chroniques des différents piézomètres a été recherchée (calcul du coefficient de corrélation de Pearson sur les données piézométriques journalières avec le logiciel XLSAT<sup>3</sup>) :

|                | Pommerit-Jaudy | Louargat | Kerpert | Trémeur | Plouguenast | Quinténic | Merdrignac | Trémuson | Rostrenen | Goudelin | Bréhand | Le Quiou | Pleurtuit |
|----------------|----------------|----------|---------|---------|-------------|-----------|------------|----------|-----------|----------|---------|----------|-----------|
| Pommerit-Jaudy |                |          |         |         |             |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Louargat       | 0.837          |          |         |         |             |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Kerpert        | 0.833          | 0.730    |         |         |             |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Trémeur        | 0.827          | 0.904    | 0.687   |         |             |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Plouguenast    | 0.778          | 0.871    | 0.709   | 0.753   |             |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Quinténic      | 0.625          | 0.796    | 0.437   | 0.774   | 0.782       |           |            |          |           |          |         |          |           |
| Merdrignac     | 0.757          | 0.945    | 0.631   | 0.923   | 0.821       | 0.842     |            |          |           |          |         |          |           |
| Trémuson       | 0.847          | 0.880    | 0.816   | 0.808   | 0.807       | 0.668     | 0.843      |          |           |          |         |          |           |
| Rostrenen      | 0.841          | 0.915    | 0.805   | 0.842   | 0.811       | 0.637     | 0.832      | 0.817    |           |          |         |          |           |
| Goudelin       | 0.606          | 0.861    | 0.483   | 0.827   | 0.642       | 0.764     | 0.920      | 0.752    | 0.732     |          |         |          |           |
| Bréhand        | 0.759          | 0.881    | 0.599   | 0.871   | 0.858       | 0.941     | 0.892      | 0.771    | 0.782     | 0.782    |         |          |           |
| Le Quiou       | 0.465          | 0.475    | 0.524   | 0.443   | 0.417       | 0.319     | 0.493      | 0.674    | 0.400     | 0.511    | 0.351   |          |           |
| Pleurtuit      | 0.865          | 0.884    | 0.783   | 0.868   | 0.810       | 0.683     | 0.844      | 0.915    | 0.864     | 0.733    | 0.813   | 0.573    |           |

Illustration 17 : Matrice de corrélation (coefficient de Pearson) sur les 13 piézomètres étudiés (avec en bleu les corrélations supérieures à 0,80)

On considère que la corrélation entre 2 chroniques piézométriques est bonne lorsque le coefficient de Pearson dépasse 0,80 (cases en bleu sur l'illustration 17).

Merdrignac et Louargat sont les piézomètres qui ont le plus de corrélation avec les autres points.

Au contraire, Le Quiou n'est corrélé avec aucun des autres piézomètres, ce qui peut s'expliquer par sa géologie particulière captée (aquifère sédimentaire tertiaire contrairement aux autres piézomètres captant des formations de socle).

### 2.2.3. Sélection des piézomètres pour l'étude

Compte-tenu des formations géologiques présentes sur les 3 bassins versants étudiés (Gouët, Arguenon et Blavet) et des caractéristiques des 13 piézomètres examinés (lithologie de l'aquifère recoupé, altérites présentes et captées, hauteur d'horizon fissuré capté, style de la chronique piézométrique/type de réaction aux pluies, cycles annuels/pluriannuels, proximité du bassin versant, présence dans la masse d'eau souterraine), les ouvrages suivants peuvent être retenus pour la suite de l'étude :

- bassin versant du Gouët : piézomètres de Goudelin, Bréhand et Kerpert ;
- bassin versant de l'Arguenon : Quinténic, Trémeur et Pleurtuit ;
- bassin versant du Blavet : Rostrenen et Kerpert.

Au total, ce seront donc 6 des 12 piézomètres du département qui seront utilisés dans le cadre de cette étude, ainsi que le piézomètre de Pleurtuit situé en Ille-et-Vilaine (cf. Illustration 18 et Illustration 19).

<sup>3</sup> XLSTAT Version 2013.1 (Copyright Addinsoft 1995-2013)

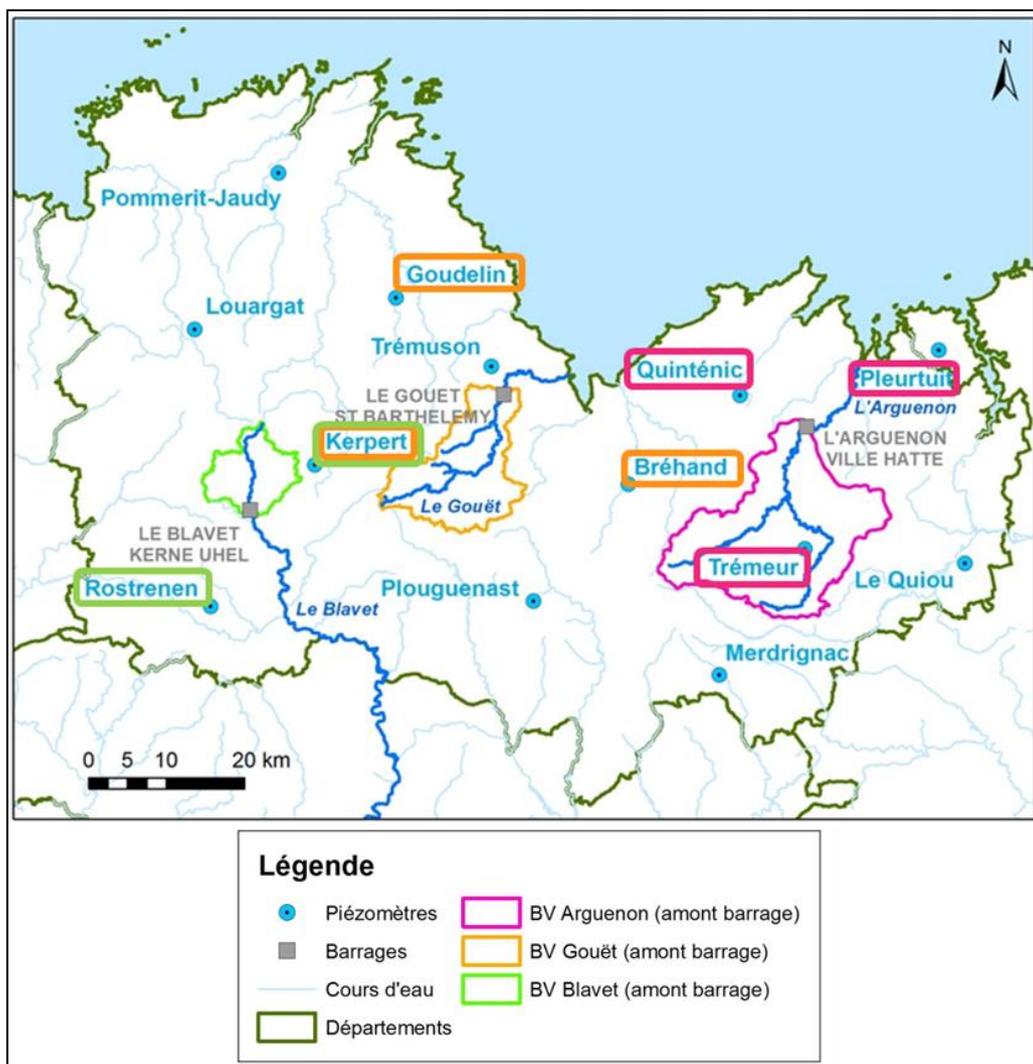


Illustration 18 : Localisation des piézomètres retenus par rapport aux 3 bassins versants étudiés

| Bassins versants | Lithologies principales en amont des barrages               | Piezomètres sélectionnés | Lithologie de l'aquifère | Présence d'altérites | Altérites captées (m) | Hauteur de l'horizon fissuré capté (m) | Réactivité du piézomètre | Cycles                 |
|------------------|---|--------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|--|--------------------------|------------------------|
| Gouët            | Granite, grès et schistes                                   | Goudelin                 | Volcanique               | Oui                  | 2                     | 6                                      | tamponné                 | annuel                 |
|                  |   | Bréhand                  | Schistes et grès         | Oui                  | 0                     | 6                                      | mitigé                   | annuel et pluri-annuel |
|                  |   | Kerpert                  | Granite                  | Oui                  | 2                     | 18                                     | réactif                  | annuel                 |
| Arguenon         | Schistes briovériens, schistes paléozoïque, granite, gneiss | Quinténic                | Schistes briovériens     | Oui                  | 0                     | 16                                     | tamponné                 | annuel et pluri-annuel |
|                  |   | Trémeur                  | Schistes briovériens     | Non                  | 0                     | 20                                     | mitigé                   | annuel                 |
|                  |   | Pleurtuit                | Gneiss                   | Oui                  | 0                     | 12                                     | réactif                  | annuel                 |
| Haut Blavet      | Granite   | Rostrenen                | Granite                  | Oui                  | 0                     | 12                                     | réactif                  | annuel                 |
|                  |   | Kerpert                  | Granite                  | Oui                  | 2                     | 18                                     | réactif                  | annuel                 |

Illustration 19 : Caractéristiques des piézomètres retenus par bassin versant étudié

Les 6 autres piézomètres ne sont pas retenus car 4 d'entre eux sont trop éloignés des bassins versants et ils ne captent pas les mêmes aquifères que ceux présents dans le sous-sol des bassins (Pommerit-Jaudy, Louargat, Plouguenast et Le Quiou), et les 2 ouvrages restants ont des chroniques piézométriques bien corrélées à celles d'ouvrages retenus (Merdrignac [corrélé avec Trémeur] et Trémuson [corrélé avec Kerpert]). D'autre part, le piézomètre de Merdrignac

est influencé par des pompages saisonniers. Enfin, sur le bassin versant de l'Arguenon, le piézomètre de Bréhand n'est pas retenu car il est corrélé avec celui de Quinténic.

Le piézomètre de Trémuson, bien que situé sur la masse d'eau souterraine où s'écoule le Gouët (FRGG009 Golfe de Saint-Brieuc), n'a pas été retenu pour représenter le bassin du Gouët. Le piézomètre de Kerpert a été préféré pour les raisons suivantes :

- le piézomètre de Kerpert recoupe les altérites (contrairement à Trémuson),
- sa chronique piézométrique est plus longue que celle de Trémuson,
- les formations géologiques recoupées par le piézomètre de Kerpert sont plus proches de celle du bassin versant du Gouët (majoritairement situé dans des formations plutoniques) que celle de Trémuson (formations volcaniques, recoupées seulement à l'aval du bassin versant du Gouët, en dehors du bassin versant à l'amont du barrage).
- les piézomètres de Trémuson et de Kerpert sont bien corrélés.

### 2.3. CARACTERISATION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Pour caractériser les nappes en fonction de leur dynamique et de leur inertie plusieurs éléments ont été analysés :

- le type de fluctuation (cycles annuels et/ou pluri-annuels ; cf. chapitre 2.2.2. et Illustration 19),
- la réactivité suite aux précipitations (cf. chapitre 2.2.2. et Illustration 19),
- le temps de demi-décroissance des niveaux piézométriques,
- l'auto-corrélogramme de la chronique piézométrique (quantifiant la « mémoire » du système),
- la vitesse de la baisse piézométrique à l'étiage.

#### 2.3.1. Temps de demi-décroissance des niveaux piézométriques

Le temps de demi-décroissance des niveaux piézométriques est déduit d'une loi exponentielle ajustée sur une portion de courbe piézométrique décroissante (cf. Illustration 20).

On peut en général caractériser la décroissance des niveaux d'une nappe, en l'absence de toute réalimentation pendant cette période (susceptible de rompre significativement cette décroissance), par une loi exponentielle (loi de Maillet - Illustration 20) du type :

$$H(t) = H_b + H_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

avec :

$H(t)$  : charge hydraulique en un point donné et à un instant  $t$  (en m), mesurée par rapport à un plan de référence (0 NGF)

$H_b$  : charge hydraulique correspondant au niveau de base (en m)

$H_0$  : charge hydraulique au-dessus du niveau de la base à la date  $t_0$  correspondant au début de la baisse des niveaux (en m)

$\alpha$  : constante de tarissement (en  $s^{-1}$ )

On peut relier la constante de temps  $\alpha$  au temps de demi-décroissance  $T_{\text{demi}}$  qui est le temps nécessaire pour qu'il y ait diminution de la moitié de la charge hydraulique au-dessus du niveau de base, soit  $T_{\text{demi}} = \frac{\ln 2}{\alpha}$

Ce temps de demi-décroissance est calculé à partir d'années relativement sèches, en période de vidange des aquifères.

La même loi peut également être utilisée pour examiner la décroissance des débits (Q).

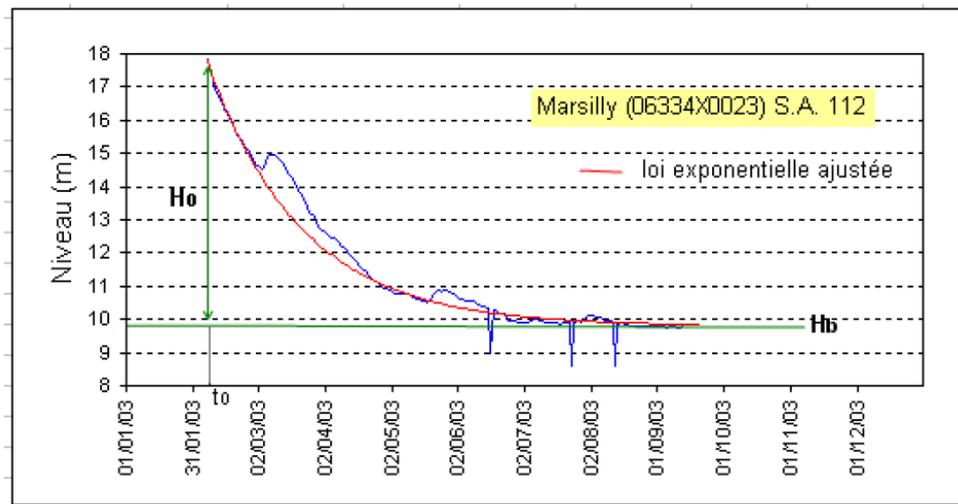


Illustration 20 : Exemple d'ajustement d'une loi exponentielle (en rouge) sur une courbe de décroissance des niveaux piézométriques (en bleu) – RP-58139-FR

La constante de tarissement  $\alpha$  (ou bien le temps de demi-décroissance) apparaît comme un critère susceptible de rendre globalement compte de la dynamique de « tarissement » d'une nappe. Plus le temps de demi-tarissement est élevé, plus la nappe est dotée d'inertie.

Le temps de demi-décroissance a été calculé sur Excel en ajustant des courbes exponentielles sur les parties décroissantes des chroniques piézométriques (vidange des nappes) et des chroniques de débit (cf. chapitre 4.4.1 pour les résultats obtenus sur les débits), puis en réalisant une moyenne des temps calculés sur les différentes années de chaque chronique.

Les temps de demi-décroissance obtenus pour chaque réservoir (altérites/horizon fissuré) sont présentés dans l'illustration 23.

### 2.3.2. Vitesse de la baisse piézométrique à l'étiage

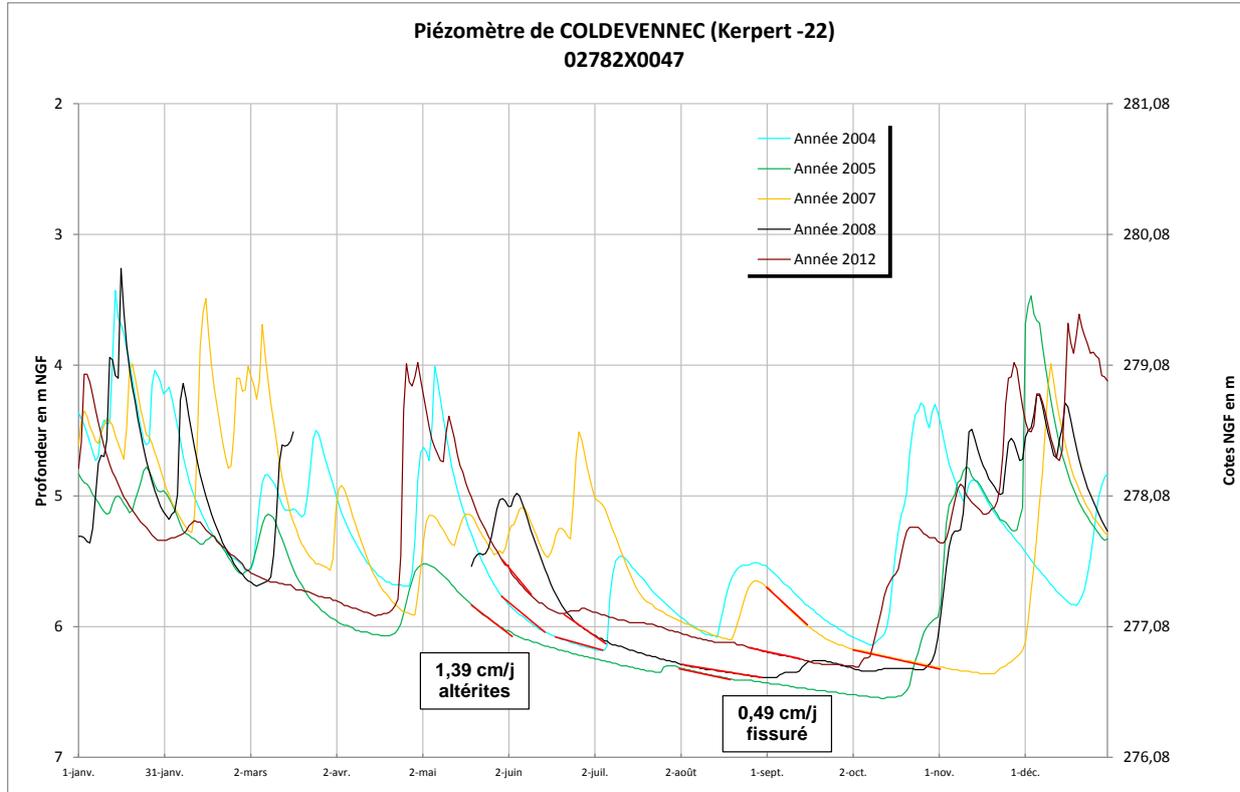
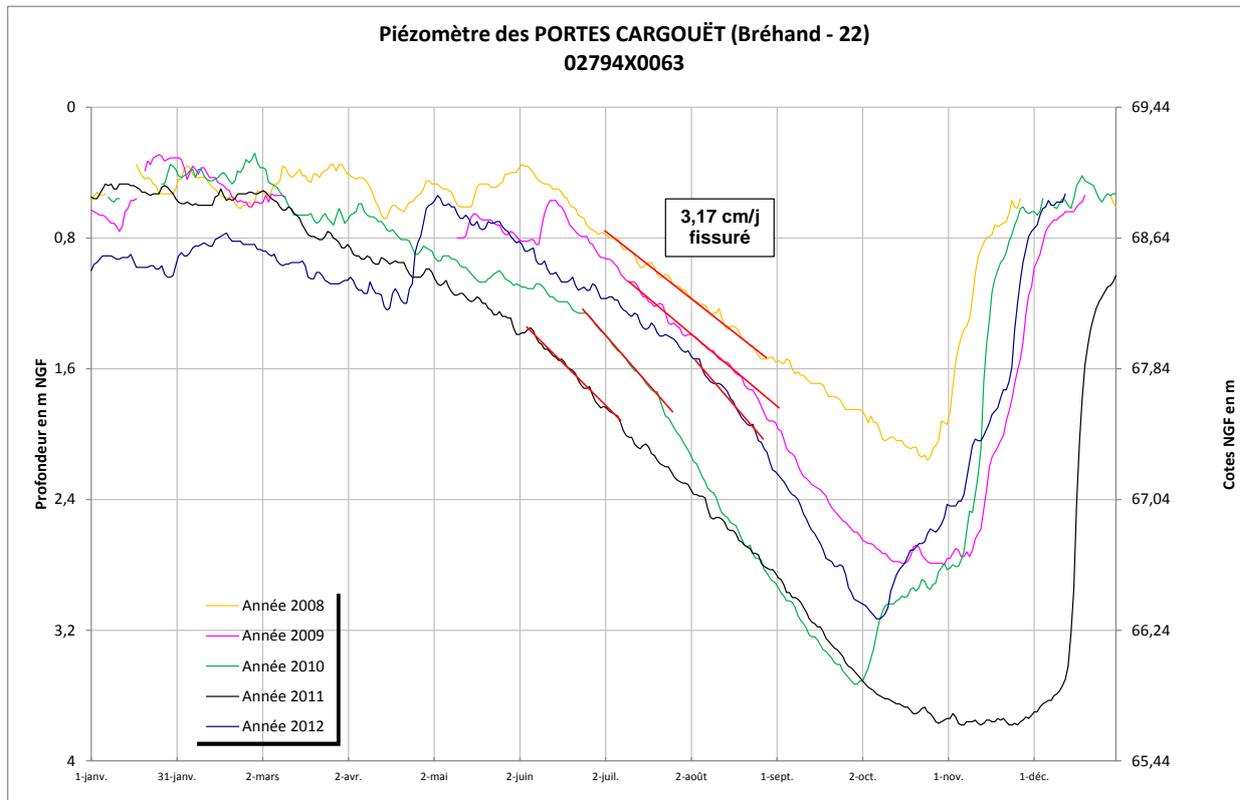


Illustration 21 : Décroissances des niveaux piézométriques aux piézomètres de Bréhand (graphique du haut) et de Kerpert (graphique du bas), et vitesses de décroissances (cm/jour)

Les graphiques présentés en Illustration 21 permettent de constater qu'il y a visiblement une vitesse de décroissance commune que l'on retrouve chaque année (cf. traits rouges). Le graphique du piézomètre de Kerpert met en évidence des vitesses de décroissance différentes au sein des différents réservoirs (altérites / horizon fissuré). La baisse du niveau piézométrique situé dans l'horizon fissuré du piézomètre de Bréhand est plus rapide que celle de Kerpert.

Les vitesses de décroissance piézométriques obtenues pour chaque réservoir (altérites/horizon fissuré) sont indiquées dans l'illustration 21.

Si on considère un période de baisse piézométrique s'étalant de début mars à fin novembre, il semblerait judicieux d'utiliser la vitesse de décroissance au sein des altérites de mars à avril, et d'utiliser la vitesse de décroissance au sein du milieu fissuré de mai à novembre.

En toute logique, ce choix des mois de décroissance au sein des 2 aquifères devrait être adapté à chaque style de décroissance du piézomètre utilisé en observant les variations piézométriques mensuelles (minimum-maximum-moyenne).

### 2.3.3. Auto-corrélogramme

Un corrélogramme caractérise le degré de corrélation qui existe entre deux points d'une série distants de N jours (cf. Annexe 4). Il s'agit d'autocorrélation si les deux points appartiennent à une même série. Dans le cas contraire, on parle de corrélation croisée.

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

*« Dans une chronique de mesures piézométriques journalières, il existe une corrélation entre les valeurs successives de la série jusqu'à une certaine « portée » temporelle, fonction de l'inertie de la nappe. Cette corrélation peut se mesurer par l'intermédiaire d'un coefficient d'autocorrélation qui représente la corrélation de la série avec elle-même mais décalée d'un certain intervalle de temps. Les valeurs du coefficient d'autocorrélation en fonction du décalage temporel permettent d'établir un graphique appelé corrélogramme ».*<sup>4</sup>

Une corrélation est d'autant plus forte qu'elle est proche de 1. Dans cette étude, le seuil de significativité de la corrélation a été fixé à 0,7 (ce qui représente déjà une corrélation forte).

Des variogrammes temporels avaient été calculés dans le cadre de l'étude BRGM/RP-57608-FR<sup>5</sup> en 2010, afin de trouver des corrélations entre piézomètres et de déterminer des familles de comportement (notamment en termes d'inertie). Afin de prendre en compte 3 années de chroniques complémentaires, de nouveaux calculs ont été effectués, sous forme d'autocorrélogrammes, plus faciles à interpréter.

Les autocorrélogrammes des chroniques piézométriques ont été calculés à l'aide du logiciel TEMPO© du BRGM (cf. Illustration 22).

---

<sup>4</sup> J.J. Seguin - 2010 - Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR

<sup>5</sup> Pinson S., Allier D., Stollsteiner P., Mardhel V., Wulleumier A. (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes.

Les pics observés pour un décalage de 365 jours correspondent à la répétitivité des fluctuations saisonnières de la piézométrie (quantifiant la « mémoire » du système).

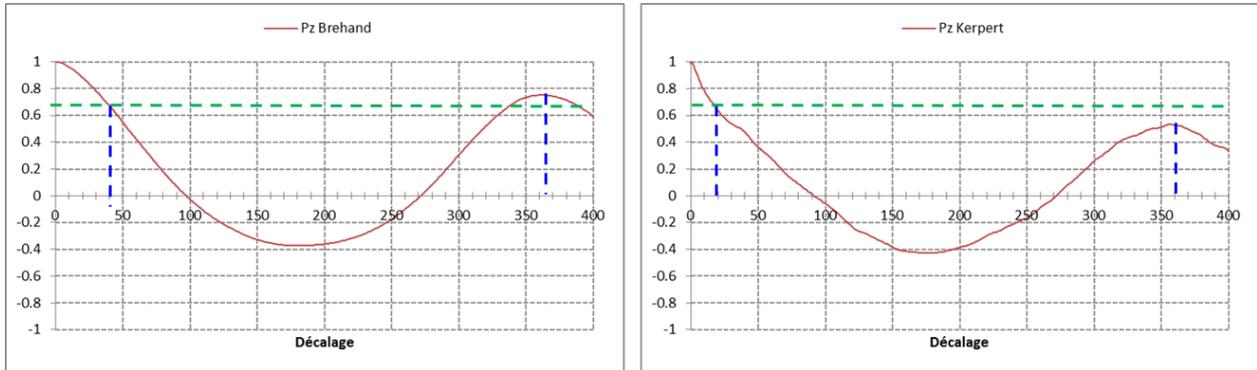


Illustration 22 : Autocorrélogrammes des chroniques piézométriques de Bréhand (à gauche) et Kerpert (à droite), seuil de corrélation à 0.7 (trait vert horizontal)

Pour le piézomètre de Bréhand, l'autocorrélogramme obtenu à partir de sa chronique piézométrique décrit une nappe à cycle annuel (la corrélation n'est plus significative après 37 jours ; 1<sup>er</sup> trait bleu vertical sur l'illustration 21) mais également à cycle pluriannuel (la corrélation est significative au 2<sup>ème</sup> pic à 365 jours ; 2<sup>nd</sup> trait bleu vertical sur l'illustration 21). Pour le piézomètre de Kerpert, l'autocorrélogramme décrit une nappe à cycle annuel (la corrélation n'est plus significative après 15 jours). Aucun cycle pluriannuel n'est mis en évidence (pas de corrélation significative à 365 jours).

Les durées d'autocorrélation au 1<sup>er</sup> seuil de 0,7 sont notées dans l'illustration 23.

### 2.3.4. Résultats obtenus

Les résultats obtenus avec les différentes méthodes de caractérisation de la dynamique et de l'inertie des nappes sont les suivants (Illustration 23) :

| Bassin versant | Piézomètre | Réactivité du piézomètre | Vitesse de décroissance piézométrique (cm/jour) réservoirs altérites / fissuré | Temps demi-décroissance réservoir altérites (mois) | Temps demi-décroissance réservoir fissuré (mois) | Durée d'autocorrélation au seuil de 0.7 (mois) | Présence autocorrélation à 365 jours (mémoire) | Cycles                 |
|----------------|------------|--------------------------|--|--|--|--|--|------------------------|
| Le Gouët       | Goudelin   | tamponné                 | 2.94 / 1.43  | 5.6  | 13.1   | 1.3  | non  | annuel                 |
|                | Bréhand    | mitigé                   | - / 3.17   | /  | 1.8  | 1.2  | oui  | annuel et pluri-annuel |
| L'Arguenon     | Kerpert    | réactif                  | 1.39 / 0.49  | 9.1  | 29.7   | 0.5  | non  | annuel                 |
|                | Quinténic  | tamponné                 | - / 2.43   | /  | 4.5  | 1.4  | oui  | annuel et pluri-annuel |
|                | Trémeur    | mitigé                   | - / 0.89   | /  | 6.4  | 1.1  | non  | annuel                 |
| Le Blavet      | Pleurtuit  | réactif                  | - / 0.52   | /  | 10.2   | 0.9  | non  | annuel                 |
|                | Rostrenen  | réactif                  | - / 2.69   | /  | 15.9   | 0.9  | non  | annuel                 |
|                | Kerpert    | réactif                  | 1.39 / 0.49  | 9.1  | 29.7   | 0.5  | non  | annuel                 |

Illustration 23 : Eléments caractérisant la dynamique et de l'inertie des nappes des bassin étudiés

En examinant les résultats de ce tableau, on note :

- une cohérence entre la réactivité du piézomètre aux pluies et la durée d'autocorrélation au seuil de 0.7 : plus le piézomètre est réactif, plus la durée est courte (exemple : Kerpert) et inversement plus le piézomètre est tamponné, plus la durée est longue (exemple : Quinténic) ;
- une bonne correspondance entre vitesse de décroissance piézométrique et temps de demi-décroissance des réservoirs : plus la baisse est rapide, plus le temps de demi-décroissance est court (exemple : Bréhand) et inversement plus la baisse est lente, plus le temps de demi-décroissance est long (exemple : Kerpert) ;

- une confirmation des cycles pluriannuels par la présence d'une autocorrélation à 365 jours (« mémoire » du système).

Les valeurs du tableau de l'illustration 23 montrent que les piézomètres retenus pour chacun des 3 bassins étudiés ont des comportements hétérogènes et qu'ils sont donc caractéristiques de la dynamique et de l'inertie des nappes de chaque bassin.

### 3. Analyse préalable critique des données

En préalable à la modélisation des 3 bassins étudiés, un important travail de sélection des chroniques de pluie, d'évapotranspiration potentielle (ETP), de débits et de niveaux de nappe a été effectué. La phase de collecte et contrôle des données (climatiques, hydrométriques et piézométriques) est essentielle pour assurer la validité des résultats des modélisations.

Une analyse critique des données de base a été effectuée de façon à identifier les lacunes d'observations et les erreurs grossières ou systématiques de données. Notons que toutes les données d'entrée (pluie, ETP) doivent être sans lacunes d'observation pour la modélisation. Par contre, il est possible d'avoir des lacunes dans les données de sortie (niveaux piézométriques, débits). Cette souplesse permet de prendre en compte des périodes de modélisation plus longues que celles de calage du modèle et donc plus représentatives des grandes fluctuations interannuelles climatiques et de l'inertie plus ou moins importantes des aquifères (effet « mémoire »).

Cette analyse préalable critique des données a permis :

- de s'assurer de la faisabilité de la modélisation (longueur et fiabilité des chroniques, homogénéité des périodes de disponibilité des chroniques, représentativité) ;
- d'identifier le cas échéant des premières corrélations entre les hydrosystèmes,
- de déterminer les périodes de modélisation à partir des plages de données communes (cf. Illustration 37).

#### 3.1. DONNEES PIEZOMETRIQUES

Les données piézométriques ont été extraites d'ADES, la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines, sur les 7 piézomètres sélectionnés dans le chapitre 2 (<http://www.ades.eaufrance.fr>). Les dates de début des mesures et les périodes de lacune de données ont été notées.

#### 3.2. DONNEES HYDROMETRIQUES

Il existe de nombreuses stations hydrométriques en activité gérées par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Bretagne. La sélection des stations hydrométriques a été faite grâce aux informations fournies par la DREAL Bretagne (validité des mesures, station influencée ou non, etc.) et disponibles dans la banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr>). Les fiches détaillées des différentes stations hydrométriques étudiées dans le cadre de cette étude sont disponibles en Annexe 3. Sur ces stations, la DREAL Bretagne a réalisé en septembre 2013 une extraction des débits journaliers sur la période 1981-2013.

##### 3.2.1. Bassin versant du Gouët

Le débit du Gouët est enregistré grâce à deux stations de jaugeage, d'amont en aval (Illustration 31) :

- le Gouët à Saint-Julien (J1513010), environ 8 km en amont du barrage de Saint-Barthélémy et en amont de la confluence avec la Maudouve (Illustration 24),

- le Gouët à Ploufragan [St-Barthélémy] (J1523020), en aval immédiat du barrage (Illustration 25).

Le débit moyen annuel du Gouët à Saint-Julien est de 1,65 m<sup>3</sup>/s (calculé sur une période de 35 ans). Son débit spécifique est de 12 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> (données Banque HYDRO).

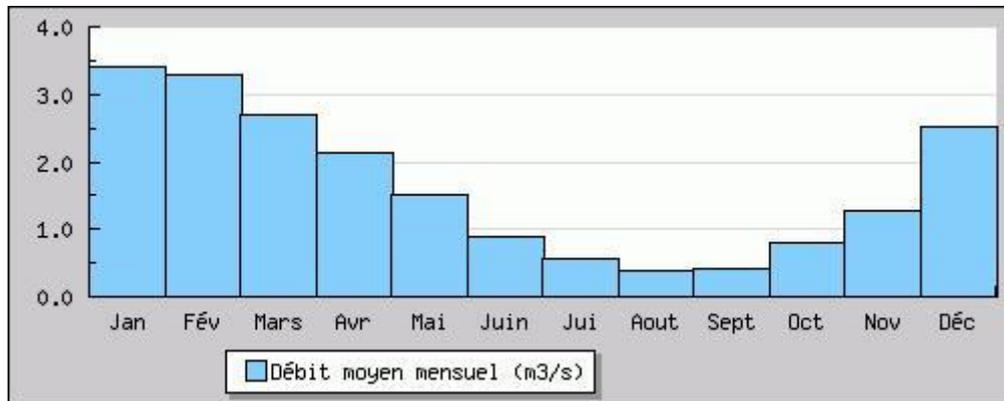


Illustration 24 : Débits moyens mensuels du Gouët à Saint Julien calculés sur 35 ans (banque HYDRO)

Le débit moyen annuel du Gouët à Ploufragan est de 2,04 m<sup>3</sup>/s (calculé sur une période de 20 ans). Son débit spécifique est de 10,5 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> (données Banque HYDRO).

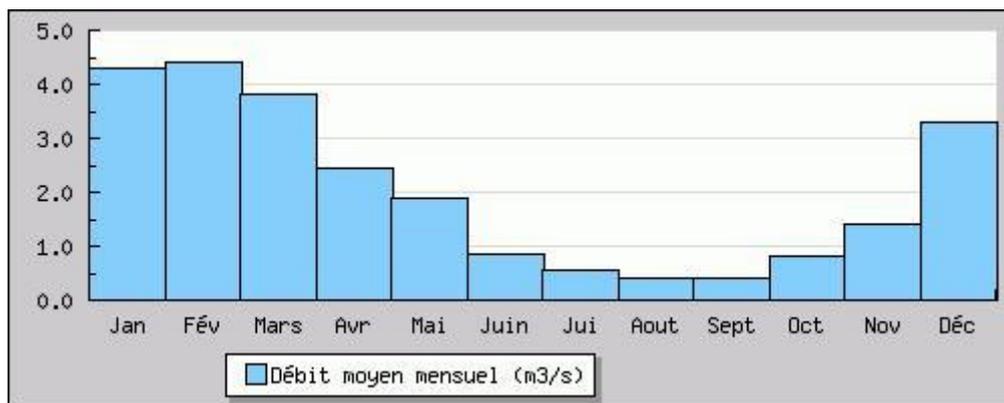


Illustration 25 : Débits moyens mensuels du Gouët à Ploufragan calculés sur 20 ans (banque HYDRO)

On peut noter que le débit spécifique du Gouët à Saint-Julien est supérieur au débit spécifique mesuré sur le Gouët en aval, à Ploufragan (respectivement 12 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> et 10,5 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>), ce qui s'explique par la présence de prélèvements pour l'eau potable au niveau de la retenue de la Saint-Barthélémy située entre les 2 stations de jaugeage.

### 3.2.2. Bassin versant de l'Arguenon

3 stations de jaugeage se trouvent sur le bassin versant de l'Arguenon (Illustration 32) :

- Le débit de l'Arguenon est enregistré grâce à la station de jaugeage de Jugon-les-Lacs (J1103010), située à 1 km en amont de la confluence entre l'Arguenon et la Rosette, soit 15 km environ en amont du barrage de la Ville Hatte (Illustration 26) ;
- Le débit de la Rosette est enregistré à la station de Mégrit (J1114010), située 10 km en amont de la confluence avec l'Arguenon (Illustration 27) ;

- Afin de disposer d'éléments nécessaires à la gestion du barrage, le CG 22 enregistre également les débits sur l'Arguenon en entrée de retenue et en aval du barrage. Les données ne sont pas mises à disposition sur le site de la Banque HYDRO, car les données sont considérées comme peu fiables par la DREAL (problèmes de mesures des faibles débits et problèmes en hautes eaux). Pour les débits en entrée de la retenue sur l'Arguenon, compte-tenu du manque de fiabilité des mesures de débit réalisées en entrée, le CG22 a conseillé au BRGM d'employer la formule empirique suivante :

$$\text{Débit Arguenon entrée de barrage} = 2,73 \times \text{Débit Rosette à Mégrit} + \text{Débit Arguenon à Jugon-les-Lacs}$$

Cette formule semble en accord avec les valeurs des superficies des bassins versants jaugés et la superficie estimée du bassin de l'Arguenon au droit de la retenue ( $2,73 \times 102 \text{ km}^2 + 104 \text{ km}^2 = 382 \text{ km}^2$ , comparables aux  $388 \text{ km}^2$  calculés à partir d'un SIG). D'autre part, aucun prélèvement d'eau de surface significatif, susceptible d'avoir un impact sur le débit, n'est recensé en amont de la retenue.

Le débit moyen annuel de l'Arguenon est de  $0,815 \text{ m}^3/\text{s}$  (calculé sur une période de 42 ans à la station de Jugon-les-Lacs). Son débit spécifique est de  $7,8 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$  (données Banque HYDRO).

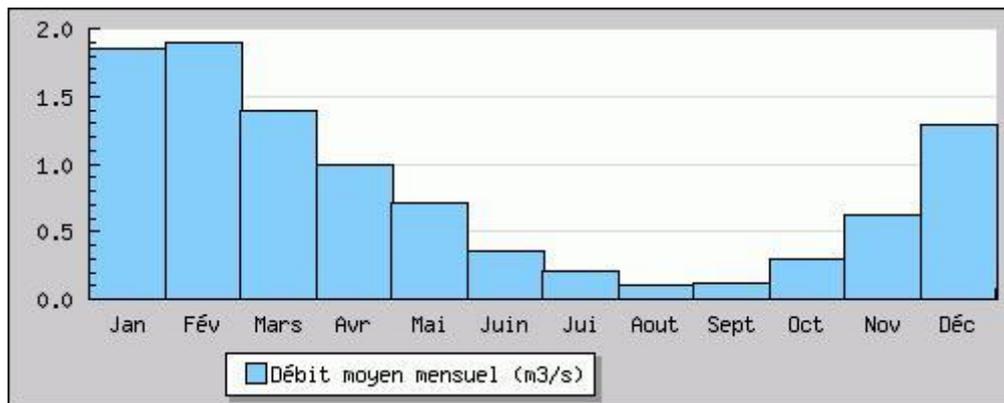


Illustration 26 : Débits moyens mensuels de l'Arguenon à Jugon-les-Lacs calculés sur 42 ans (Banque HYDRO)

Le débit moyen annuel de la Rosette à Mégrit est de  $0,730 \text{ m}^3/\text{s}$  (calculé sur une période de 39 ans). Son débit spécifique est de  $7,2 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$  (données Banque HYDRO).

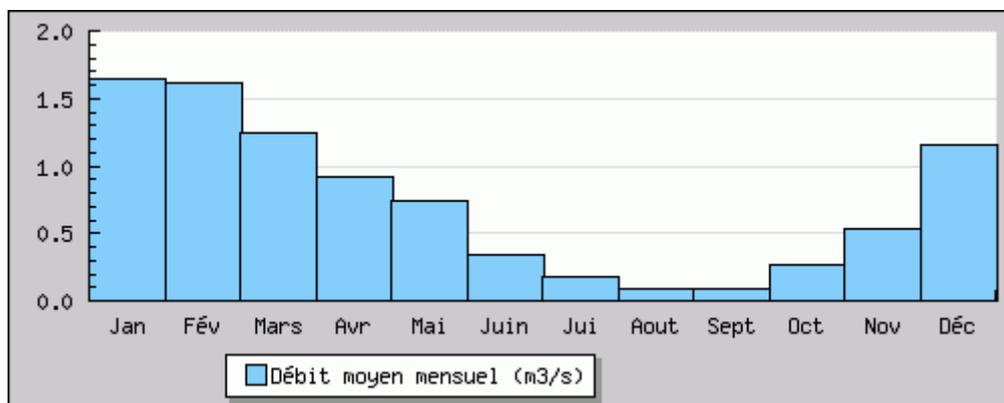


Illustration 27 : Débits moyens mensuels de la Rosette à Mégrit calculés sur 39 ans (Banque HYDRO)

La période des basses eaux s'étend sur 5 mois, de juin à octobre. Les mois d'août et septembre enregistrent les débits moyens les plus faibles. A l'inverse, les mois de janvier et février enregistrent les débits moyens les plus forts. Ces débits sont environ 18 fois supérieurs aux débits moyens les plus faibles enregistrés.

### 3.2.3. Bassin versant du Blavet

Le débit du Blavet est enregistré grâce à plusieurs stations de jaugeage, d'amont en aval :

- le Blavet à Kerien [Kerlouet] (J5202110), à 5 km en amont du barrage de Kerné Uhel (Illustration 28),
- le Blavet à Lanrivain (J5212120), en aval immédiat du barrage (les mesures sont donc influencées - Illustration 29),
- le Blavet à Plounévez-Quintin [Pors Forêt] (J5212110), à 3 km en aval du barrage (influencé),
- le Blavet à Gouarec (J5222110),
- le Blavet à Laniscat [St Hervé] (J5402110),
- le Blavet à Mûr-de-Bretagne [Guerlédan] (J5412110), en aval du barrage de Guerlédan (il s'agit de données virtuelles, calculées à partir des variations de la retenue de Guerlédan et de la production électrique, dont la fiabilité est douteuse d'après la DREAL),
- Le Blavet à Languidic (J5712130), influencé par le soutien d'étiage du barrage de Guerlédan.

Un certain nombre de stations de jaugeage sont influencées soit par un barrage (retenue et/ou lâchers d'eau), soit par des prélèvements AEP (de l'ordre de quelques litres par seconde) situés en amont de la station. Afin de tenir compte de ce biais dans les résultats, la fiabilité des stations sera rappelée.

Le débit moyen annuel du Blavet est de 0,364 m<sup>3</sup>/s à Kerien (calculé sur une période de 34 ans), 1,55 m<sup>3</sup>/s à Lanrivain (calculé sur 16 ans) et 10,9 m<sup>3</sup>/s à Mûr (calculé sur 62 ans). Son débit spécifique est de 17,7 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> à Kerien, 16,8 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> à Lanrivain et 17,6 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> à Mûr (données Banque HYDRO).

Le débit spécifique du Blavet à Kerien est supérieur au débit spécifique mesuré sur le Blavet en aval, à Lanrivain, ce qui s'explique par la présence de prélèvements pour l'eau potable au niveau de la retenue de Kerné Uhel située entre les 2 stations de jaugeage.

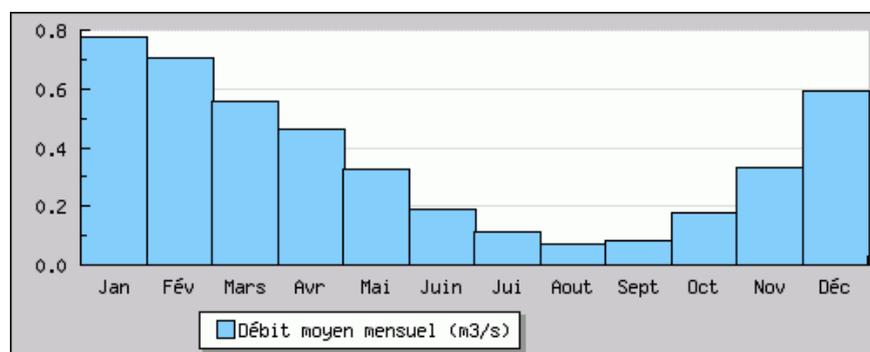


Illustration 28 : Débits moyens mensuels du Blavet à Kerien calculés sur 34 ans (Banque HYDRO)

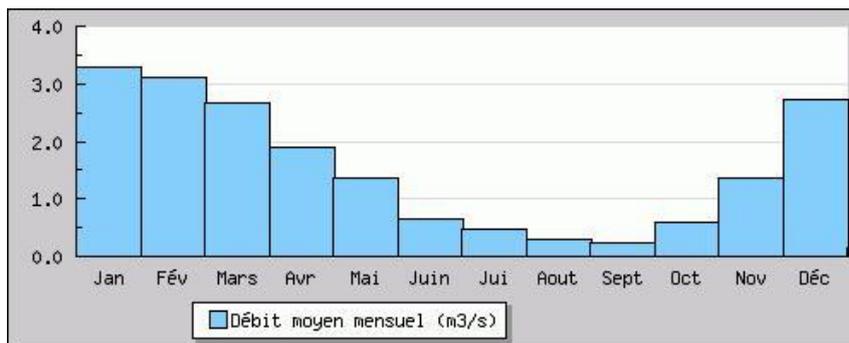


Illustration 29 : Débits moyens mensuels du Blavet à Lanrivain calculés sur 16 ans (Banque HYDRO)

La période des basses eaux s'étend sur 5 mois, de juin à octobre. Les mois d'août et septembre enregistrent les débits moyens les plus faibles. A l'inverse, les mois de janvier et février enregistrent les débits moyens les plus forts.

### 3.3. DONNEES METEOROLOGIQUES

Les données météorologiques journalières (pluie et ETP) ont été obtenues de différentes façons : réutilisation des données 1995-2000 achetées à Météo-France dans le cadre du projet SILURES Bretagne (rapport BRGM/RP-56457-FR), données achetées depuis 2006 à Météo-France dans le cadre de la gestion du réseau piézométrique régional, données 2001-2005 fournies par le CG 22 ou acquises auprès de Météo-France suite au passage d'une commande.

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, un calcul de la pluviométrie moyenne tombant sur les bassins versants du Gouët, de l'Arguenon et du Blavet avait été réalisée à partir des différentes stations pluviométriques présentes sur ces bassins et de la carte AURELHY<sup>6</sup> 1961-1990 (pluviométrie moyenne interannuelle sur la période 1961-1990, source : MétéoFrance). La formule permettant d'obtenir cette pluviométrie est la suivante (combinaison de plusieurs stations) :

$$\text{Pluie (P) sur le bassin versant} = X\% \times \text{Pluie}_{\text{station1}} + Y\% \times \text{Pluie}_{\text{station2}}$$

Pour représenter la pluviométrie moyenne du bassin versant, plusieurs stations météorologiques ont donc été retenues, d'après leurs positions par rapport au bassin versant et les normales de pluies interannuelles (isohyètes). Le bassin est ainsi divisé en secteurs pluviométriques dans lesquels se situe au moins une station météorologique. Un poids (X, Y dans la formule ci-dessus) proportionnel à la surface de la zone météorologique recoupant le bassin a été affecté à chaque station (Illustration 30).

Les combinaisons de postes pluviométriques obtenues dans le cadre du projet SILURES Bretagne ont été utilisées. Elles ont été complétées pour les bassins non traités dans SILURES en utilisant la même méthodologie (Arguenon en entrée de retenue, Gouët à Ploufragan et Blavet à Lanrivain).

Lorsque les chroniques de pluie étaient incomplètes (données manquantes), les séries ont été complétées en utilisant les données disponibles sur les stations météorologiques voisines.

<sup>6</sup> AURELHY : Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie (MétéoFrance)

| Bassin versant | Station hydrologique          | N° station | Superficie BV (km <sup>2</sup> ) | Pluie BV  | ETP BV        |
|----------------|-------------------------------|------------|----------------------------------|---|---------------|
| Arguenon       | Jugon-les-Lacs                | J1103010   | 104                              | 0.40 P Trémeur/Broons + 0.45 P Lanreles + 0.15 P Collinée           | ETP Trémeur   |
| Rosette        | Mégrit                        | J1114010   | 102                              | 0.52 P Trémeur/Broons + 0.46 P Lanreles + 0.02 P Collinée           | ETP Trémeur   |
| Arguenon       | en entrée de retenue          | /          | 317                              | 0.66 P Trémeur/Broons + 0.28 P Lanreles + 0.06 P Collinée           | ETP Trémeur   |
| Gouët          | Saint-Julien                  | J1513010   | 138                              | 0.57 P St-Donan/Cohiniac + 0.43 P La Harmoye                        | ETP Kerpert   |
| Gouët          | Ploufragan [Saint-Barthélémy] | J1523020   | 180                              | 0.54 P St-Donan/Cohiniac + 0.28 P La Harmoye + 0.18 P St-Brieuc     | ETP Kerpert   |
| Blavet         | Kerien [Kerlouet]             | J5202110   | 20.6                             | P Bulat Pestivien   | ETP Kerpert   |
| Blavet         | Lanrivain [Pont D 87]         | J5212120   | 92                               | P Bulat Pestivien   | ETP Kerpert   |
| Blavet         | Mûr-de-Bretagne [Guerledan]   | J5412110   | 620                              | 0.14 P Rostrenen + 0.67 P St-Igeaux + 0.19 P Kerien/Bulat Pestivien | ETP Rostrenen |

Illustration 30 : Données météorologiques utilisées pour les modélisations Gardénia

### 3.3.1. Bassin versant du Gouët

2 stations pluviométriques sont implantées sur le bassin du Gouët : Saint Donan (station fermée depuis 2006) et Saint Brieuc (Illustration 31).

Pour représenter la pluviométrie moyenne du bassin versant en amont de Saint-Julien, 2 stations météorologiques ont été retenues : Saint Donan (que l'on peut remplacer par Cohiniac à sa fermeture en 2006) et La Harmoye (station située en limite de bassin). Pour le bassin du Gouët en amont de Saint Julien, on obtient l'équation suivante :

$$P = 0,57 P_{\text{Saint Donan/Cohiniac}} + 0,43 P_{\text{La Harmoye}}$$

Pour représenter la pluviométrie moyenne du bassin versant en amont de Ploufragan (Saint Barthélemy), la station de Saint Brieuc doit également être prise en compte. On obtient alors l'équation suivante :

$$P = 0,54 P_{\text{St Donan/Cohiniac}} + 0,28 P_{\text{La Harmoye}} + 0,18 P_{\text{St Brieuc}}$$

Par ailleurs, nous disposons de l'ETP au pas de temps journalier à la station de Kerpert.



Illustration 31 : Localisation du bassin versant du Gouët et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues

### 3.3.2. Bassin versant de l'Arguenon

Plusieurs stations météorologiques sont situées sur le bassin versant de l'Arguenon : Trémeur (remplacée par la station de Broons à partir du 01/01/2008), Collinée, Corseul, Languedias et Pléven.

Pour représenter le bassin versant en amont de Jugon-les-Lacs, 3 stations météorologiques ont été retenues : Trémeur puis Broons, Lanrelas (située en bordure sud du bassin versant de la Rosette) et Collinée (Illustration 32).

Pour le bassin de l'Arguenon en amont de Jugon-les-Lacs, on obtient l'équation suivante :

$$P = 0,4 P_{\text{Trémeur-Broons}} + 0,45 P_{\text{Lanrelas}} + 0,15 P_{\text{Collinée}}$$

Pour représenter la pluviométrie du bassin versant de l'Arguenon en amont de la retenue (Ville Hatte), l'équation est la suivante :

$$P = 0,66 P_{\text{Trémeur-Broons}} + 0,28 P_{\text{Lanrelas}} + 0,06 P_{\text{Collinée}}$$

Enfin pour la pluviométrie sur le bassin versant de la Rosette en amont de Mégrit, on obtient l'équation suivante :

$$P = 0,52 P_{\text{Trémeur-Broons}} + 0,46 P_{\text{Lanrelas}} + 0,02 P_{\text{Collinée}}$$

Par ailleurs, nous disposons de l'ETP au pas de temps journalier à la station de Trémeur.



Illustration 32 : Localisation du bassin versant de l'Arguenon et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues

### 3.3.3. Bassin versant du Blavet

Plusieurs stations météorologiques sont situées sur le bassin versant du Blavet, dont Maël-Pestivien, Kerien, Lanrivain, Saint-Igeaux, Rostrenen, Sainte-Brigitte et Caure dans les Côtes d'Armor.

Pour représenter le bassin versant à Kerien et Lanrivain, la station météorologique de Bulat-Pestivien (située à 4 km au nord du bassin versant) a été retenue pour les données pluviométriques et celle de Kerpert pour l'ETP (Illustration 33).

Pour représenter le bassin versant à Mûr de Bretagne, 3 stations météorologiques ont été retenues : Rostrenen, Saint-Igeaux et Kerien (que l'on peut remplacer par Bulat-Pestivien à partir de sa fermeture le 31/01/2004). Pour le bassin du Blavet à Mûr de Bretagne, on obtient l'équation suivante :

$$P = 0,14 P \text{ Rostrenen} + 0,67 P \text{ Saint-Igeaux} + 0,19 P \text{ Kerien-Bulat-Pestivien}$$

Par ailleurs, nous disposons de l'ETP au pas de temps journalier à la station de Rostrenen.

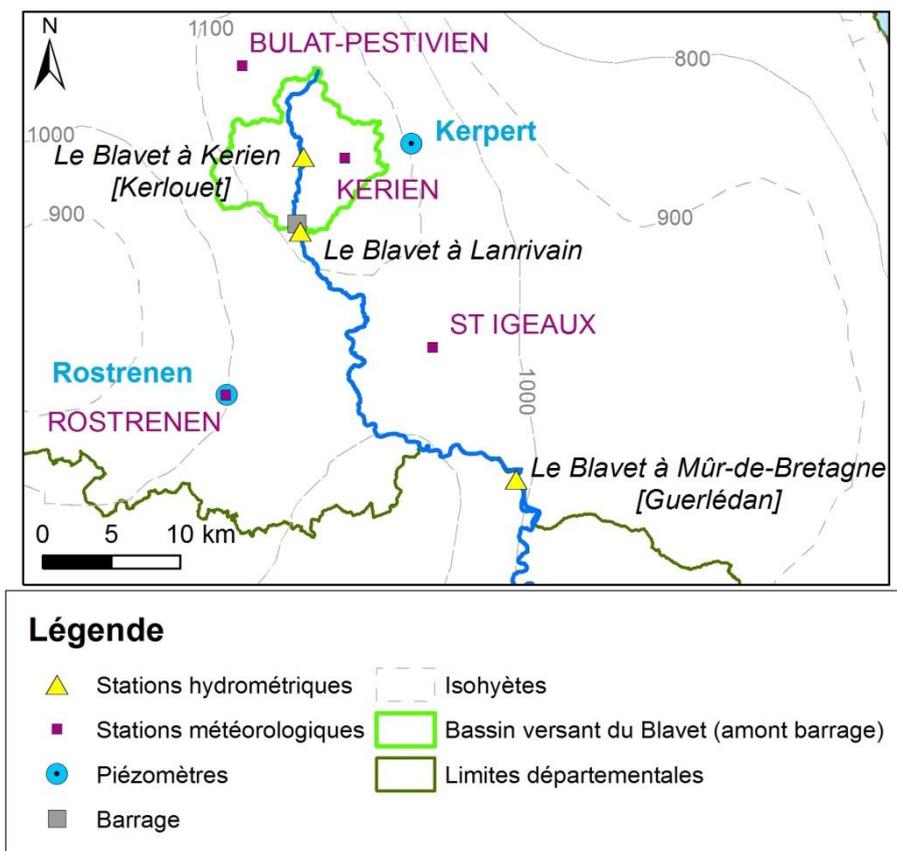


Illustration 33 : Localisation du bassin versant du Blavet et des stations hydrologiques, météorologiques et piézométriques retenues

### 3.4. PRELEVEMENTS

Le recensement des prélèvements est nécessaire pour évaluer la pression exercée sur les nappes et les cours d'eau, ainsi que leur impact éventuel sur les cours d'eau. Ces prélèvements doivent être pris en compte dans la modélisation.

Les données de prélèvements d'eau de surface et d'eau souterraine sur les différents bassins versants ont été extraites du fichier des données annuelles de l'Agence de l'Eau Lore-Bretagne (AELB 1998-2011). Il s'agit des prélèvements à usage alimentation en eau potable (AEP), industriel et irrigation. Les prélèvements à autre usage agricole que l'irrigation (abreuvement notamment) et de particuliers n'ont pas été pris en compte dans le calcul. En effet, ces données ne sont pas disponibles auprès de l'Agence de l'Eau.

Les données n'étant disponibles que jusqu'en 2011 au commencement de l'étude, les volumes de 2011 ont été reconduits jusqu'à 2013. De même, faute de données plus anciennes, les volumes de 1998 ont été appliqués aux années précédentes.

Comme démontré dans le cadre du SIGES Bretagne (<http://sigesbre.brgm.fr/Inventaires-des-prelevements-d-eau-souterraine-realises-en.html>), les prélèvements d'eau souterraine représentent généralement une proportion très faible de la lame d'eau écoulée sur un bassin versant et sont donc souvent négligeables, notamment en comparaison des prélèvements

d'eau de surface pour l'AEP depuis les retenues. Les volumes d'eau souterraine prélevés étant très inférieurs aux volumes prélevés en eau de surface (ils ne représentent que 2% du volume prélevé en eau de surface, sauf sur le bassin versant du Blavet en amont de Mûr de Bretagne où ils représentent 14% du volume prélevé en eau de surface), les prélèvements souterrains n'ont pas été pris en compte dans la modélisation.

En amont du **Blavet à Kerien**, aucun prélèvement d'eau de surface ou d'eau souterraine n'est recensé par l'AELB. En amont du **Blavet à Lanrivain et à Mûr de Bretagne**, seul le prélèvement d'eau potable de la prise d'eau de Kerné Uhel est significatif (4,9 millions de m<sup>3</sup> en 2011).

En amont du barrage de l'**Arguenon**, aucun prélèvement d'eau de surface n'est enregistré par l'AELB. Des prélèvements d'eau souterraine sont effectués en amont de l'**Arguenon à Jugon** (46 000 m<sup>3</sup> prélevés en 2011) et en amont de la **Rosette à Mégrit** (137 000 m<sup>3</sup> prélevés en 2011). Comme indiqué plus haut, compte tenu des faibles volumes prélevés, ils n'ont pas été pris en compte dans la modélisation.

En amont du **Gouët à Saint-Julien**, seuls des prélèvements à usage industriel en eau souterraine sont recensés par l'AELB (175 000 m<sup>3</sup> prélevés en 2011) ; ils n'ont pas été pris en compte dans la modélisation. En amont du **Gouët à Ploufragan**, seuls les prélèvements en eau de surface destinés à l'eau potable au niveau de la prise d'eau de de Saint Barthélémy (9,2 millions de m<sup>3</sup> en 2011) ont été pris en compte (les prélèvements à usage industriels ne représentant que 2% des prélèvements eau potable).

Les prélèvements comptabilisés ont uniquement un usage AEP. Ils ont été répartis uniformément durant toute l'année.

Les prélèvements cités ci-dessus ont été pris en compte dans le travail de modélisation (cf. chapitre 4) : ils sont ajoutés aux débits journaliers des cours d'eau.

Il est également intéressant de raisonner en termes de lame d'eau (en mm/an), en divisant le volume des prélèvements (en m<sup>3</sup>/an) par la superficie du bassin versant (Illustration 34), afin de comparer les bassins versants entre eux. Comme pour le débit spécifique (cf. chapitre 3.2), on s'aperçoit que la lame d'eau à l'aval des barrages (à Lanrivain pour le Blavet et à Ploufragan pour le Gouët, Illustration 34) est plus faible qu'à l'amont (à Kerien pour le Blavet et à Saint-Julien pour le Gouët). En effet, les importants volumes d'eau prélevés pour l'eau potable au niveau des retenues diminuent la quantité d'eau disponible en aval des barrages. La lame d'eau en aval des barrages peut ainsi être « corrigée » en y ajoutant les volumes prélevés au niveau des barrages (cf. colonne de droite sur l'illustration 34).

Il est alors possible de calculer le ratio suivant : lame d'eau aval corrigée/lame d'eau amont. Pour le Blavet, on obtient une moyenne de 1.071598 sur 13 ans. Pour le Gouët, ce ratio est de 1.032875 (moyenne sur 14 ans).

| Bassin versant                   | BLAVET            |                       |                          |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| Station hydrologique             | Kerien [Kerlouet] | Lanrivain [Pont D 87] |                          |
| N° station                       | J5202110          | J5212120              |                          |
| Superficie BV (km <sup>2</sup> ) | 20.6              | 92                    |                          |
| Année hydraulique                | Lame d'eau (mm)   | Lame d'eau (mm)       | Lame d'eau corrigée (mm) |
| 2000                             | 667.32            | 644.34                | 687.84                   |
| 2001                             | 998.98            | 994.80                | 1038.01                  |
| 2002                             | 447.36            | 410.88                | 454.14                   |
| 2003                             | 485.92            | 530.79                | 574.16                   |
| 2004                             | 471.39            | 396.69                | 445.23                   |
| 2005                             | 393.48            | 359.49                | 410.66                   |
| 2006                             | 468.72            | 491.30                | 542.99                   |
| 2007                             | 697.53            | 685.60                | 735.06                   |
| 2008                             | 510.92            | 485.17                | 536.05                   |
| 2009                             | 478.52            | 469.49                | 521.33                   |
| 2010                             | 581.77            | 623.74                | 676.31                   |
| 2011                             | 328.71            | 294.87                | 348.27                   |
| 2012                             | 366.34            | 350.35                | 404.12                   |

| Bassin versant                   | GOUET           |                               |                          |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Station hydrologique             | Saint-Julien    | Ploufragan [Saint-Barthélémy] |                          |
| N° station                       | J1513010        | J1523020                      |                          |
| Superficie BV (km <sup>2</sup> ) | 138             | 180                           |                          |
| Année hydraulique                | Lame d'eau (mm) | Lame d'eau (mm)               | Lame d'eau corrigée (mm) |
| 1999                             | 412.69          | 360.66                        | 398.17                   |
| 2000                             | 436.70          | 414.07                        | 453.09                   |
| 2001                             | 732.93          | 723.01                        | 762.71                   |
| 2002                             | 279.13          | 224.25                        | 262.77                   |
| 2003                             | 348.10          | 317.32                        | 360.21                   |
| 2004                             | 369.43          | 345.90                        | 386.08                   |
| 2005                             | 268.23          | 239.05                        | 277.42                   |
| 2006                             | 333.43          | 304.99                        | 347.43                   |
| 2007                             | 448.20          | 419.99                        | 462.44                   |
| 2008                             | 401.11          | 379.69                        | 425.88                   |
| 2009                             | 350.34          | 343.66                        | 394.16                   |
| 2010                             | 415.43          | 387.80                        | 438.71                   |
| 2011                             | 265.84          | 208.85                        | 259.79                   |
| 2012                             | 183.04          | 131.75                        | 183.01                   |

Illustration 34 : Lames d'eau calculées aux stations amont et aval sur les bassins versants du Blavet (en haut) et du Gouët (en bas) et lames d'eau corrigées avec les prélèvements calculées sur les stations aval (colonne de droite)

### 3.5. ANALYSE DES RELATIONS NAPPES-RIVIERES

L'analyse des relations nappes-rivières, représentant schématiquement le fonctionnement de l'hydrosystème, a été étudiée grâce à l'élaboration de corrélogrammes croisés entre débits de la rivière et niveaux piézométriques.

Les graphiques des corrélogrammes croisés doivent être lus uniquement pour les valeurs en abscisse supérieures à zéro (décalage dans le sens « débit → niveau » exprimé en jours). Une corrélation est d'autant plus forte qu'elle est proche de 1 (axe des ordonnées). Le seuil de significativité a été pris égal à 0,7 (ce qui représente d'ores et déjà une corrélation forte).

Les corrélogrammes croisés débit/niveau piézométrique ont été calculés à l'aide du logiciel TEMPO© du BRGM (cf. exemple en Illustration 35 et résultats globaux en Illustration 36).

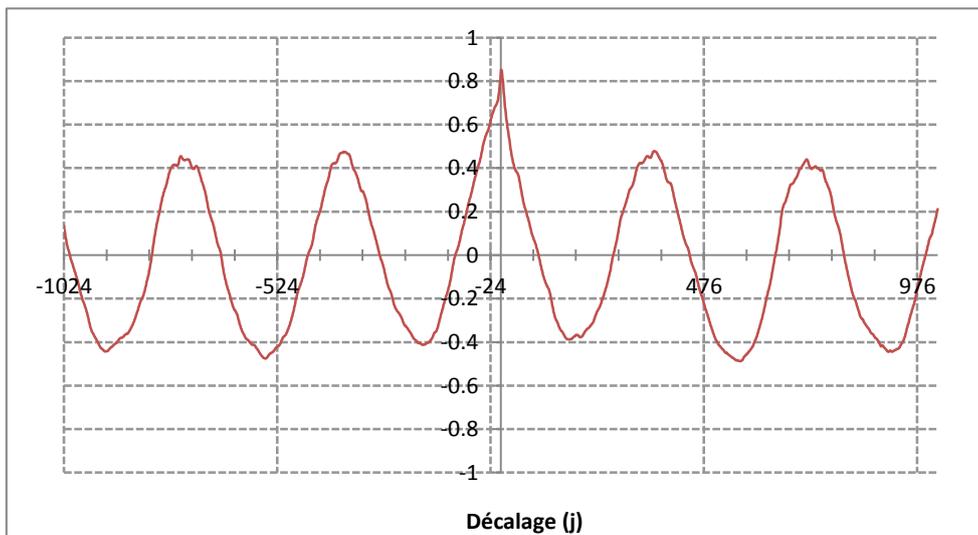


Illustration 35 : Exemple de corrélogramme croisé débit (Le Blavet à Kerien) / niveau piézométrique (Kerpert)

La corrélation entre les signaux de débit et du niveau de la nappe à Kerpert est assez forte : elle atteint de 0,85 avec un jour de décalage entre les séries (Illustration 35 et 35).

Les piézomètres sélectionnés ont globalement des niveaux bien corrélés avec les débits des cours d'eau (Illustration 36) hormis les piézomètres de Quinténic et Bréhand (il reste cependant 2 autres piézomètres bien corrélés au débit sur les bassins versants de l'Arguenon et du Gouët). En effet, les piézomètres de Quinténic et Bréhand sont caractérisés par un talonnage en période de hautes eaux : les niveaux piézométriques ne sont donc pas bien corrélés aux débits des rivières en hautes eaux.

| Débit / Piézomètre | Arguenon (Jugon) | Rosette (Mégrit) | Arguenon (entrée retenue) | Blavet (Kerien) | Blavet (Lanrivain) | Blavet (Mûr) | Gouët (St Julien) | Gouët (Ploufragan) |
|--------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| Pleurtuit          | 0.65             | 0.69             | 0.68                      |                 |                    |              |                   |                    |
| Trémeur            | 0.62             | 0.65             | 0.64                      |                 |                    |              |                   |                    |
| Quinténic          | 0.47             | 0.49             | 0.48                      |                 |                    |              |                   |                    |
| Kerpert            |                  |                  |                           | 0.85            | 0.76               | 0.85         | 0.79              | 0.72               |
| Rostrenen          |                  |                  |                           | 0.81            | 0.74               | 0.82         |                   |                    |
| Gouëlin            |                  |                  |                           |                 |                    |              | 0.73              | 0.71               |
| Bréhand            |                  |                  |                           |                 |                    |              | 0.57              | 0.53               |

| Débit / Piézomètre | Arguenon (Jugon) | Rosette (Mégrit) | Arguenon (entrée retenue) | Blavet (Kerien) | Blavet (Lanrivain) | Blavet (Mûr) | Gouët (St Julien) | Gouët (Ploufragan) |
|--------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| Pleurtuit          | 3                | 3                | 3                         |                 |                    |              |                   |                    |
| Trémeur            | 5                | 4                | 4                         |                 |                    |              |                   |                    |
| Quinténic          | 33               | 30               | 30                        |                 |                    |              |                   |                    |
| Kerpert            |                  |                  |                           | 1               | 1                  | 1            | 1                 | 1                  |
| Rostrenen          |                  |                  |                           | 5               | 5                  | 5            |                   |                    |
| Gouëlin            |                  |                  |                           |                 |                    |              | 19                | 13                 |
| Bréhand            | 6                |                  |                           |                 |                    |              | 16                | 5                  |

Illustration 36 : Résultats des corrélogrammes croisés débit / niveau piézométrique :  
 en haut : valeur du coefficient de corrélation au pic (avec en bleu foncé les corrélations supérieures à 0,7 et en bleu clair les corrélations supérieures à 0,6)  
 en bas : décalage entre la piézométrie et le débit (en jour)

### 3.6. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES

L'analyse des données disponibles a permis de définir les plages de données communes et donc de déterminer les périodes où les modélisations sont réalisables (Illustration 37).

| Rivière    | Station hydrologique        | DEBIT      |            | METEO      | PIEZOMETRIE |            | PRELEVEMENTS                    | PERIODE DE MODELISATION |
|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|---------------------------------|-------------------------|
|            |                             | Date début | Date fin   | Date début | Piézomètre  | Date début | Date début                      |                         |
| L'Arguenon | JUGON LES LACS              | 01/01/1981 |            | 18/01/1994 | Quinténic   | 18/11/2004 | pas prélèvements eau de surface | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Trémeur     | 03/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
|            |                             |            |            |            | Pleurtuit   | 18/02/2005 |                                 | 2005-2013               |
| La Rosette | MEGRIT                      | 01/01/1981 |            | 18/01/1994 | Quinténic   | 18/11/2004 | pas prélèvements eau de surface | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Trémeur     | 03/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
|            |                             |            |            |            | Pleurtuit   | 18/02/2005 |                                 | 2005-2013               |
| L'Arguenon | Entrée retenue              | 01/01/1981 |            | 18/01/1994 | Quinténic   | 18/11/2004 | pas prélèvements eau de surface | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Trémeur     | 03/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
|            |                             |            |            |            | Pleurtuit   | 18/02/2005 |                                 | 2005-2013               |
| Le Gouët   | ST-JULIEN                   | 01/01/1981 |            | 18/01/1994 | Gouëlin     | 21/12/2005 | pas prélèvements eau de surface | 2006-2013               |
|            |                             |            |            |            | Bréhand     | 21/06/2006 |                                 | 2006-2013               |
|            |                             |            |            |            | Kerpert     | 04/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
| Le Gouët   | PLOUFRAGAN (St-Barthélémy)  | 01/01/1998 |            | 01/01/1994 | Gouëlin     | 21/12/2005 | 1998                            | 2006-2013               |
|            |                             |            |            |            | Bréhand     | 21/06/2006 |                                 | 2006-2013               |
|            |                             |            |            |            | Kerpert     | 04/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
| Le Blavet  | KERIEN (Kerlouet)           | 01/01/1981 |            | 18/01/1994 | Rostrenen   | 16/02/2005 | pas prélèvements eau de surface | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Kerpert     | 04/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
| Le Blavet  | LANRIVAIN                   | 01/10/1998 |            | 18/01/1994 | Rostrenen   | 16/02/2005 | 1998                            | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Kerpert     | 04/12/2003 |                                 | 2004-2013               |
| Le Blavet  | MUR DE BRETAGNE (Guerlédan) | 01/01/1981 | 30/12/2009 | 01/01/2004 | Rostrenen   | 16/02/2005 | 1998                            | 2005-2013               |
|            |                             |            |            |            | Kerpert     | 04/12/2003 |                                 | 2004-2013               |

Illustration 37 : Périodes de modélisation déterminées par rapport aux plages de données communes (en orange : dates restrictives)



## **4. Modélisation globale Pluie – Niveau piézométrique – Débit des rivières**

### **4.1. OBJECTIFS DE LA MODELISATION**

Afin de valider le choix de certains piézomètres en tant qu'indicateurs piézométriques potentiels, il est nécessaire de réaliser un modèle pour :

- analyser la représentativité des piézomètres,
- examiner la corrélation des niveaux piézométriques et des débits des rivières (en particulier à l'étiage),
- approcher les participations annuelles et mensuelles des eaux souterraines aux débits des rivières.

Le logiciel Gardénia© a été utilisé car il permet de construire des modèles globaux qui mettent en relation un signal d'entrée (pluviométrie, évapotranspiration pour approcher les conditions de recharge des nappes) et un signal de sortie (débit de cours d'eau, niveau piézométrique). Le calage du modèle se fait à l'aide de constantes de temps et d'un coefficient de répartition de l'eau dans le sol entre ruissellement et infiltration. Les simulations permettent de déduire la variabilité des composantes du cycle de l'eau : ruissellement rapide, écoulements souterrains lents et débit à l'exutoire. Ainsi grâce à Gardénia©, les relations nappes/cours d'eau (donc eaux souterraines / eaux superficielles), sont mieux connues et contraintes pour envisager des solutions de gestion des retenues du CG 22 mieux adaptées.

### **4.2. DESCRIPTION DU LOGICIEL DE MODELISATION**

La compréhension d'un hydro-système peut être facilitée par la mise en place d'un modèle représentant de manière schématique la réalité.

Le logiciel de modélisation GARDENIA® (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères), développé par le BRGM, est utilisé dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et éventuellement prévoir des niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant (rapports BRGM/RP-52832-FR et RP-62797-FR). Il permet de modéliser le fonctionnement d'un hydro-système, tel que celui schématisé sur l'illustration 38.

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

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

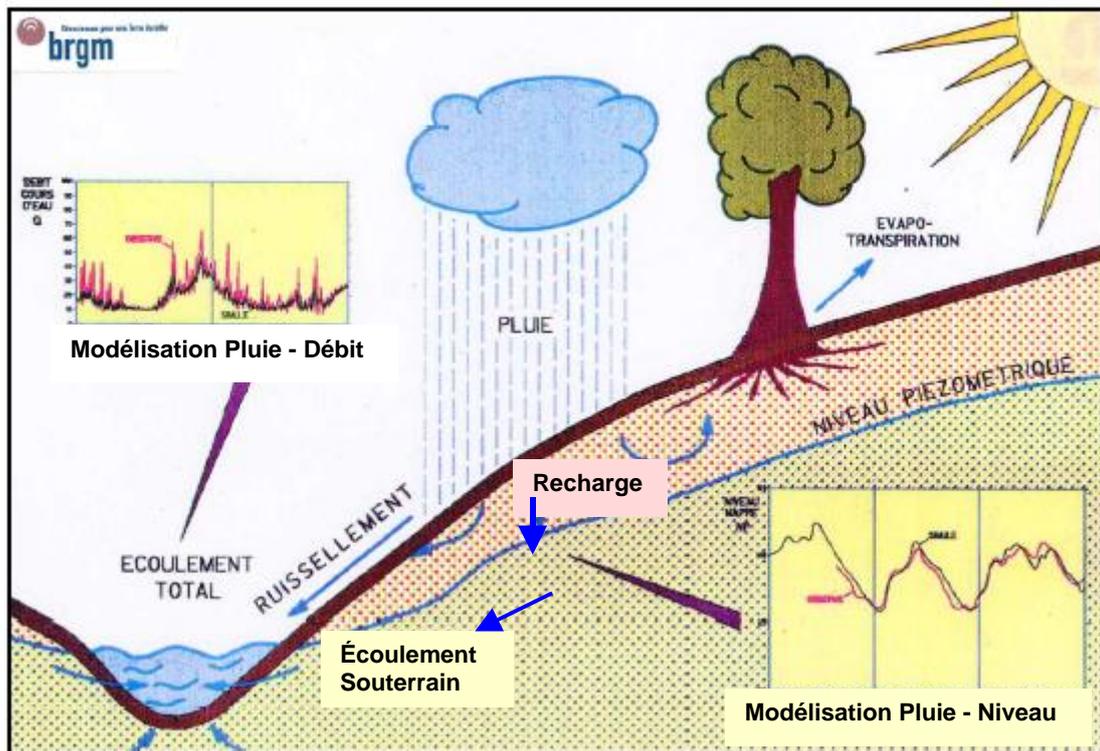


Illustration 38 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant (RP-52832-FR)

Le logiciel GARDENIA simule le cycle de l'eau en utilisant plusieurs réservoirs en cascade (cf. Illustration 39).

Les modélisations de la présente étude ont été réalisées avec un modèle à deux réservoirs pour simuler les deux régimes d'écoulement souterrain existant dans les roches de socle en Bretagne : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré. Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant.

Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les données d'entrée (pluie, ETP) et les données de sortie (débit et / ou niveau piézométrique) avec un jeu de paramètres aussi réaliste que possible, calé sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles. Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés. L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock, 1960. Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées (coefficient d'ajustement R). Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur qui peut le contraindre, notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Le coefficient d'ajustement R est égal à la racine du coefficient de Nash–Sutcliffe, 1970.

Le coefficient de Nash (NTD) est défini par :

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

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

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

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

Une fois calé, le modèle peut être utilisé pour :

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

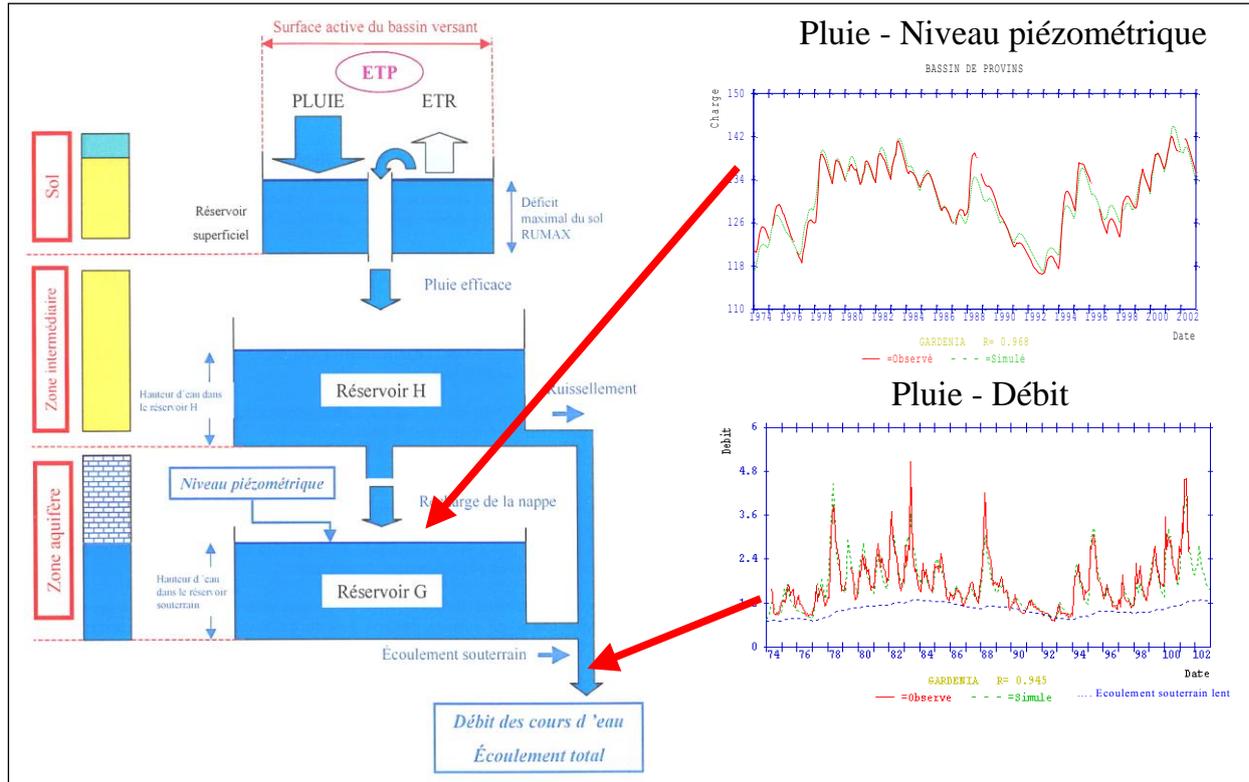


Illustration 39 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique global GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique (schéma avec 1 seul réservoir aquifère) – (RP-61371-FR)

Dans le cadre de cette étude, les modélisations des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques ont été réalisées simultanément au pas de temps journalier à partir des données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (données météorologiques journalières).

#### 4.3. DONNEES D'ENTREE DU MODELE

Un pas de temps journalier a été choisi pour la modélisation. Il permet de prendre en compte les réactions rapides des débits et du niveau piézométrique en réponse aux précipitations (contrairement à un pas de temps décadaire).

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- données climatologiques : précipitations et EvapoTranspiration Potentielle (ETP),
- données hydrométriques : débits des rivières,
- données piézométriques : niveaux des nappes,
- prélèvements en eau de surface.

Les différentes stations de mesures (hydrologiques, météorologiques, piézométriques) utilisées pour modéliser chaque bassin versant sont localisées sur l'illustration 40.



Illustration 40 : Localisation des stations de mesures utilisées pour le calage des modèles

A partir de l'examen des données disponibles (cf. Illustration 37), les modélisations Gardénia ont été effectuées au niveau des 8 stations hydrométriques suivantes :

- le Gouët à St-Julien J1513010, le Gouët à Ploufragan [Saint-Barthélémy] J1513020 (en aval du barrage) ;
- l'Arguenon à Jugon-les-Lacs J1103010, la Rosette à Mégrit J1114010, l'Arguenon en entrée de retenue ;
- le Blavet à Kérien (Kerlouet) J5202110, le Blavet à Lanrivain J5212120 (en aval du barrage), le Blavet à Mûr-de-Bretagne [Guerlédan] J5412110.

Pour chaque rivière, les piézomètres retenus à l'issue du chapitre 2.2.3. ont été utilisés. Cela constitue donc un total de 21 modélisations pluie/niveau piézométrique/débit des rivières réalisées (8 stations de mesure de débits avec pour chaque rivière 2 à 3 piézomètres : Gouët [piézomètres de Goudelin, Bréhand et Kerpert], Arguenon [Quinténic, Trémeur et Pleurtuit] et Blavet [Rostrenen et Kerpert]).

## 4.4. CALAGE DES MODELES

### 4.4.1. Paramètres

La modélisation des relations pluie/niveau/débit avec le logiciel GARDENIA<sup>®</sup> fait intervenir 8 paramètres globaux (capacité de stockage du sol, temps de tarissement, ...) définis pour chaque bassin versant étudiés.

Dans le cadre de ce projet, 2 réservoirs souterrains ont été retenus pour caractériser les 2 aquifères de socle : altérites (réservoir G1) et horizon fissuré (réservoir G2).

Les 8 paramètres caractérisant les réservoirs de la modélisation sont les suivants (cf. Illustration 41) :

- RUMAX (mm) : Réserve Facilement Utilisable maximale du sol (RFU moyenne à l'échelle du bassin versant) = hauteur du réservoir superficiel U ou réserve disponible pour l'ETP (si la hauteur dans le réservoir U est supérieure au seuil RUMAX, l'excédent s'écoule dans le réservoir intermédiaire H),
- RUIPER (mm) : hauteur dans le réservoir intermédiaire H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation (hauteur d'équilibre ruissellement-percolation),
- THG (mois) : temps de demi-percolation du réservoir H (temps caractéristique de percolation de l'eau de la surface vers la nappe) = temps de demi-montée du réservoir souterrain G1,
- TG1 (mois) : temps de demi-tarissement du premier réservoir souterrain G1,
- TG1-2 (mois) : temps de demi-percolation du réservoir G1 (temps caractéristique de percolation de l'eau du réservoir G1 au réservoir G2), = temps de demi-montée du réservoir souterrain G2,
- TG2 (mois) : temps de demi-tarissement du deuxième réservoir souterrain G2,
- S : coefficient d'emmagasinement moyen de l'aquifère sur le bassin versant,
- Niveau de base : niveau de l'aquifère quand il est totalement vide.

Le temps de demi-tarissement est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge du réservoir souterrain, le débit souterrain du réservoir est divisé par deux.

Le temps de demi-percolation caractérise la vitesse de réponse entre une pluie efficace et un accroissement du débit souterrain.

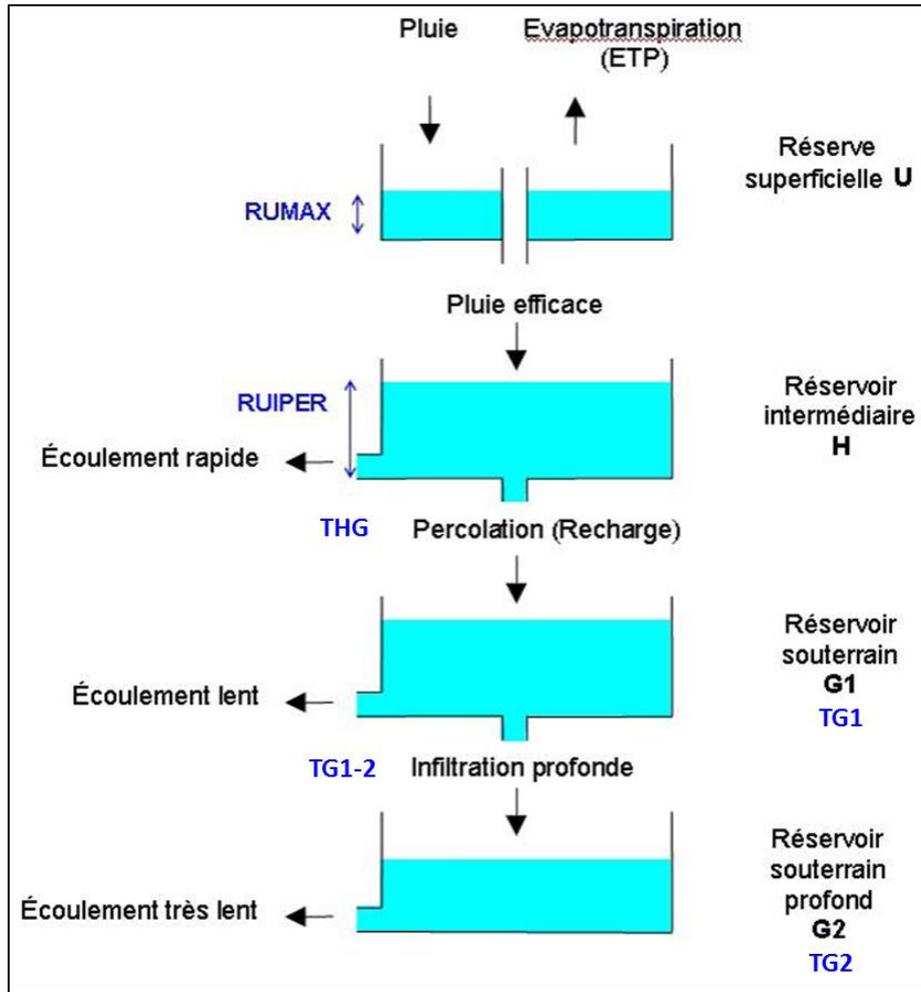


Illustration 41 : Schéma de la modélisation à deux réservoirs souterrains avec le logiciel GARDENIA© (RP-52832-FR)

En suivant la méthodologie utilisée dans le programme SILURES Bretagne (RP-56457-FR), le paramètre RUMAX est estimé suite à la comparaison interannuelle (au pas de temps de l'année hydrologique, c'est à dire de septembre à août) entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulee (lame d'eau écoulee sur le bassin versant : volume d'eau écoulee au niveau de l'exutoire divisé par la superficie du bassin) (cf. Annexe 5). C'est un paramètre nécessaire au calcul des pluies efficaces (Réserve Facilement Utilisable du sol). Il s'agit d'une première approche de calcul du paramètre RUMAX et celui-ci est par la suite optimisé par le modèle GARDENIA.

Les temps de demi-tarissement des deux réservoirs souterrains (TG1 et TG2) sont calculés d'après les courbes exponentielles de décrues régulières (durant les périodes où il n'y a pas ou peu d'influence de la pluviométrie) des débits journaliers des cours d'eau (cf. méthodologie au chapitre 2.3.1). Les valeurs sont utilisées comme paramètres initiaux de calage du modèle et donc par la suite optimisées.

| Bassin versant                                      | THG<br>(mois) | TG1<br>(mois) | TG2<br>(mois) |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Le Gouët à St-Julien (J1513010)                     | 0.37          | 0.7           | 1.7           |
| Le Gouët à Ploufragan [Saint-Barthélémy] (J1523020) | 0.12          | 0.4           | 2             |
| La Rosette à Mégrit (J1114010)                      | 0.33          | 0.7           | 1.1           |
| L'Arguenon à Jugon-les-Lacs (J1103010)              | 0.21          | 0.5           | 1             |
| Le Blavet à Kerien [Kerlouet] (J5202110)            | 0.24          | 0.5           | 1.2           |
| Le Blavet à Lanrivain [Pont D 87] (J5212120)        | 0.12          | 0.3           | 0.7           |
| Le Blavet à Mûr-de-Bretagne [Guerlédan] (J5412110)  | 0.18          | 0.3           | 0.7           |

Illustration 42 : Temps de demi-tarissement des débits calculés par ajustement d'une loi de Maillet, utilisés comme paramètres de calage initiaux des modèles

Les autres paramètres doivent être calés en respectant les inégalités suivantes :

- $THG \leq TG1 \leq TG2$ ,
- $THG \leq TG1-2 \leq TG2$ .

On peut noter que les paramètres TG1 et TG2 sont représentatifs de l'inertie du milieu souterrain.

#### 4.4.2. Calage des modèles

C'est la phase de calage, des données simulées sur les données observées, qui permet d'obtenir les fonctions de transfert, entre la pluie, le niveau piézométrique et le débit. Le calage a consisté à ajuster les paramètres du modèle (cf. Annexe 6) de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits de rivières et des niveaux de nappes aussi proches que possible des débits et niveaux effectivement mesurés, en obtenant un coefficient d'ajustement (R) maximal. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies, des débits et des niveaux piézométriques.

Chaque bassin versant a donné lieu à plusieurs essais de calage réalisés avec des piézomètres et des stations hydrométriques différents. Les résultats graphiques des différents calages réalisés sont fournis en Annexe 6. Les coefficients d'ajustement (R) figurent en bas des graphiques issus des modélisations.

Les débits sont de manière générale mieux calés que les niveaux piézométriques.

#### 4.4.3. Validation des calages

Il s'agit d'une étape importante permettant de vérifier la qualité du calage. Elle consiste à confronter les valeurs simulées à celles observées pour une période non utilisée durant la phase de calage, préalablement réservée pour cette étape (la période commune de données d'entrée disponibles est généralement 2004-2012 ; la période de vérification de la qualité du calage est généralement 1994-2012).

La qualité du calage peut être appréciée visuellement (en superposant les séries simulées et observées) mais aussi à l'aide de critères quantitatifs, comme les coefficients d'ajustement (R).

La période de validation est celle antérieure aux données piézométriques (généralement 1994-2012). Les coefficients d'ajustement obtenus sur ces périodes étant relativement similaires à

ceux de la période commune (2004-2012), on peut considérer les calages comme valides. Les graphiques de validation sont joints en Annexe 6.

## **4.5. RESULTATS OBTENUS SUITE AUX MODELISATIONS**

### **4.5.1. Résultats pour les 8 stations hydrométriques et commentaires**

Compte-tenu de la disponibilité des données, les modélisations ont été réalisées pour les périodes indiquées dans le tableau de l'Annexe 6 (généralement 2004-2012), après un calage des paramètres sur deux années (généralement 2010-2011). Les ajustements susceptibles de représenter au mieux la réalité ont été obtenus en considérant les paramètres détaillés dans le tableau de l'Annexe 6.

Les modélisations ont permis pour chaque bassin versant étudié :

- de trouver la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel de la rivière,
- d'examiner la corrélation de chaque niveau piézométrique avec le débit de la rivière associée (en particulier à l'étiage),
- d'analyser la représentativité de chaque piézomètre pour le retenir en tant qu'indicateur piézométrique,
- d'approcher les participations annuelles et mensuelles des eaux souterraines aux débits des rivières.

#### ***Bassin versant du Gouët***

- **Le Gouët à Saint Julien**

Les niveaux des piézomètres de Goudelin et Kerpert sont bien corrélés avec le débit de la rivière. Les calages obtenus semblent assez corrects (coefficient de corrélation d'environ 90% pour le débit et d'environ 80% pour la piézométrie).

Pour le piézomètre de Bréhand, le moins bon calage du niveau piézométrique (71%) s'explique par le comportement particulier de la nappe (ouvrage artésien, talonnage en hautes eaux, recharge rapide car nappe proche du sol, comportement piézométrique différent en recharge et en vidange, cycle pluriannuel).

- **Le Gouët à Ploufragan**

Malgré de bons coefficients de corrélation, le calage du débit s'est avéré difficile (cf. Illustration 43) car la station hydrométrique du Gouët à Ploufragan est influencée par le barrage de Saint Barthélémy situé en amont, ce qui se traduit notamment par des étiages « plats » (maintien artificiel d'un débit constant en aval du barrage, retenue et/ou lâchers d'eau) que le modèle ne peut pas reproduire.

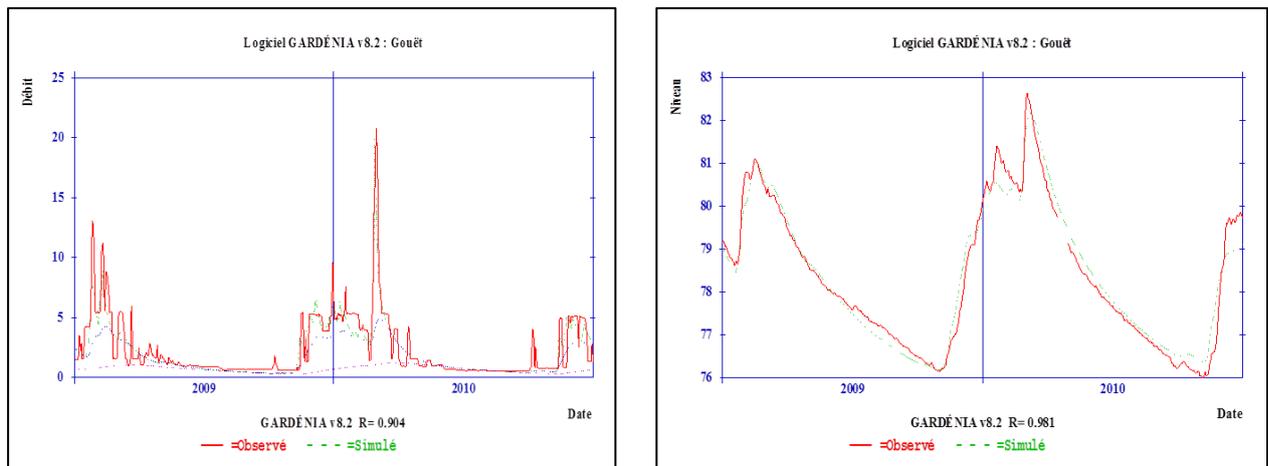


Illustration 43 : Modélisation Gardénia - Débit du Gouët à Ploufragan / Niveau du piézomètre de Goudelin - Calage des paramètres (2009-2010)

Comme la station du Gouët à Ploufragan est influencée, la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel est celle du Gouët à Saint Julien.

### **Bassin versant de l'Arguenon**

La formule donnée par le CG 22 (cf. chapitre 3.2.2.) permet de combiner les débits de la Rosette à Mégrit et de l'Arguenon à Jugon-les-Lacs pour focaliser la modélisation sur un bassin versant plus grand en superficie et plus représentatif du bassin versant en amont du barrage de la Ville Hatte. C'est donc la modélisation en entrée de retenue qui a été privilégiée dans cette étude par rapport aux modélisations de la Rosette à Mégrit et de l'Arguenon à Jugon-les-Lacs.

- **L'Arguenon en entrée de retenue**

Les niveaux des piézomètres de Trémeur et Pleurtuit sont bien corrélés avec le débit de la rivière. Les calages obtenus semblent assez corrects (coefficient de corrélation d'environ 90% pour le débit et d'environ 75% pour la piézométrie).

Pour le piézomètre de Quintenic, le moins bon calage du niveau piézométrique (61%) s'explique par le comportement particulier de la nappe (ouvrage artésien, talonnage en hautes eaux, recharge rapide car nappe proche du sol, comportement piézométrique différent en recharge et en vidange, cycle pluriannuel).

### **Bassin versant du Blavet**

- **Le Blavet à Kerien**

Les niveaux des piézomètres de Rostrenen et Kerpert sont bien corrélés avec le débit de la rivière. Les calages obtenus semblent assez corrects (coefficient de corrélation d'environ 87% pour le débit et d'environ 81% pour la piézométrie).

- **Le Blavet à Lanrivain**

Comme pour le Gouët à Ploufragan, le calage du débit s'est révélé difficile (cf. Illustration 44) car la station hydrométrique du Blavet à Lanrivain est influencée par le barrage de Kerné Uhel situé en amont, ce qui se traduit notamment par des étiages « plats » (maintien artificiel d'un débit constant en aval du barrage) que le modèle ne peut pas reproduire.

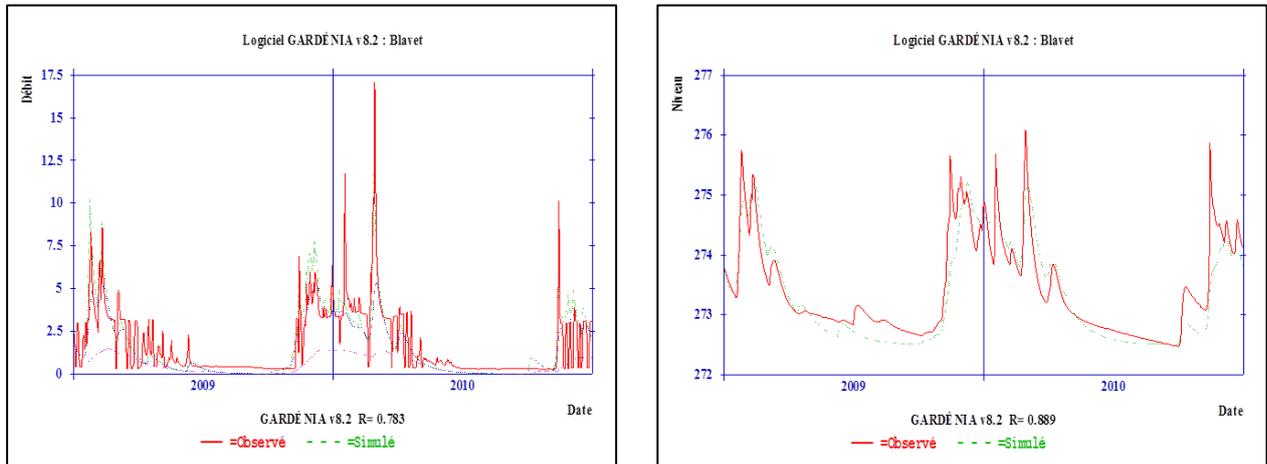


Illustration 44 : Modélisation Gardénia - Débit du Blavet à Lanrivain / Niveau du piézomètre de Kerpert - Calage des paramètres (2009-2010)

- **Le Blavet à Mûr de Bretagne**

La station hydrométrique du Blavet à Mûr-de-Bretagne est fermée depuis 2009 et influencée par le barrage de Guerlédan. Les données piézométriques sont disponibles depuis 2004 pour Kerpert et 2005 pour Rostrenen. La période commune de données disponibles (débit/niveau piézométrique) est donc trop courte (2005-2009), c'est pourquoi la modélisation du Blavet à Mûr-de-Bretagne n'a pas été privilégiée (Illustration 45).

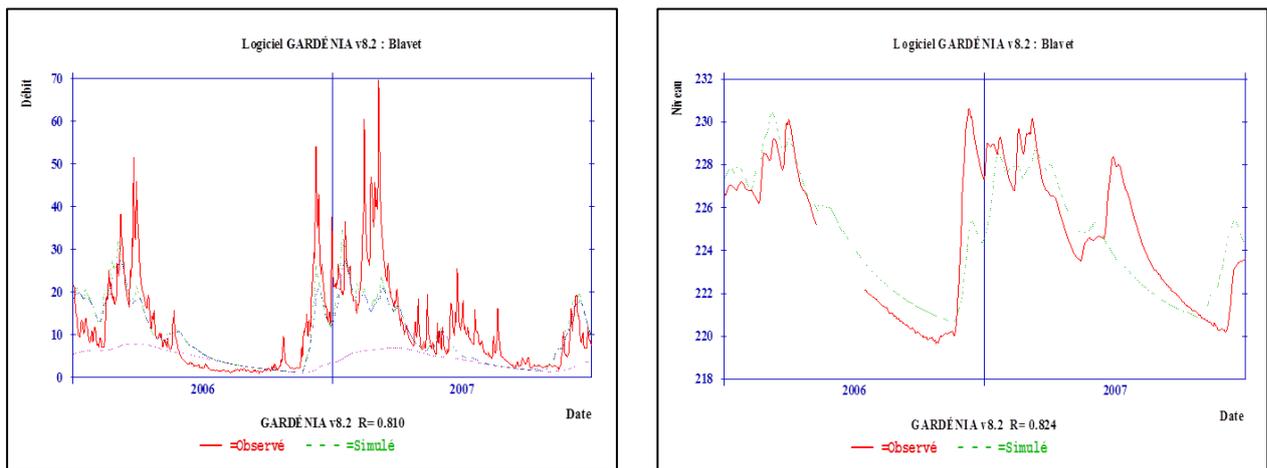


Illustration 45 : Modélisation Gardénia - Débit du Blavet à Mûr de Bretagne / Niveau du piézomètre de Rostrenen - Calage des paramètres (2006-2007)

Comme les stations Blavet à Lanrivain et du Blavet à Mûr-de-Bretagne sont influencées, la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel est celle du Blavet à Kerien.

#### 4.5.2. Résultats suite aux modélisations

Pour chaque rivière, une seule station de référence a été retenue (le Gouët à Saint Julien, l'Arguenon en entrée de retenue, le Blavet à Kerien). Seuls les graphiques issus de ces modélisations sont présentés en Annexe 6.

Les graphiques (i) de calage, (ii) de modélisation et (iii) de validation des niveaux piézométriques et des débits sont rassemblés en Annexe 6 :

- pour les débits (graphiques de gauche) : ils illustrent l'ajustement du débit total calculé (en vert) au débit mesuré à la station hydrologique (en rouge), et les débits des deux réservoirs souterrains (supérieur en bleu et inférieur en violet) lors des années de modélisation ;
- pour les niveaux piézométriques (graphiques de droite) : ils illustrent l'ajustement du niveau piézométrique calculé (en vert) au niveau piézométrique mesuré (en rouge).

L'illustration 46 compile les résultats obtenus à l'issue des modélisations réalisées (bilan hydrologique, et répartition des écoulements de surface et souterrains). Pour chaque bassin versant étudié un seul piézomètre a été retenu (cf. argumentaire au chapitre 4.6.). Les différentes colonnes indiquées dans le tableau ci-dessous sont :

- cours d'eau, numéro de la station, superficie du bassin versant,
- piézomètre retenu par bassin versant
- période de modélisation Gardénia
- sur la période 1994-2012, la valeur moyenne interrannuelle :
  - o des précipitations,
  - o de l'évapotranspiration réelle,
  - o de la pluie efficace,
  - o de l'écoulement rapide (en mm et en pourcentage de l'écoulement total),
  - o de l'écoulement intermédiaire (réservoir 1),
  - o de l'écoulement lent (réservoir 2).

Pour la période considérée, les précipitations tombées sur le bassin représentent une lame d'eau moyenne exprimée en millimètres par an, l'évapotranspiration réelle est également exprimée en millimètres par an et les précipitations efficaces correspondant au solde restant disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration, se répartissent en un écoulement arrivant à la rivière après un cheminement rapide (ruissellement de surface), un cheminement intermédiaire (ruissellement hypodermique et écoulement souterrain) et en un cheminement lent (écoulement souterrain uniquement).

| Bassin versant | Station hydrologique | N° station | Superficie BV (km <sup>2</sup> ) | Piézomètre retenu | Période modélisation Gardénia | Pluie totale (mm/an) | Evapo-transpiration (mm/an) | Pluie efficace (mm/an) | Ecoulement rapide (mm/an) (%) |     | Ecoulement intermédiaire réservoir 1 (mm/an) (%) |     | Ecoulement lent réservoir 2 (mm/an) (%) |     |
|----------------|----------------------|------------|----------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|-----|--|-----|---|-----|
|                |                      |            |                                  |                   |                               |                      |                             |                        |                               |     |  |     |   |     |
| Arguenon       | en entrée de retenue | /          | 317                              | Trémear           | 1994-2012                     | 825                  | 595                         | 230                    | 103                           | 45% | 74   | 32% | 53                                      | 23% |
| Gouët          | Saint-Julien         | J1513010   | 138                              | Kerpert           | 1994-2012                     | 954                  | 571                         | 383                    | 141                           | 37% | 172  | 45% | 70                                      | 18% |
| Blavet         | Kerien [Kerlouet]    | J5202110   | 20.6                             | Rostrenen         | 1994-2012                     | 1219                 | 662                         | 557                    | 249                           | 45% | 155  | 28% | 153                                     | 27% |

Illustration 46 : Résultats obtenus suite aux modélisations Gardénia

Les coefficients de corrélation (ajustement entre le débit mesuré et calculé de la rivière) obtenus suite à ces modélisations varient entre 87 et 89 % (cf. tableau de l'Annexe 6) et sont donc très satisfaisants. Pour l'ajustement du niveau piézométrique, les coefficients de corrélation obtenus suite à ces modélisations varient entre 74 et 85 % ; le coefficient est très satisfaisant pour le bassin versant du Blavet et un peu plus faible pour les bassins versants de l'Arguenon et du Gouët (respectivement 74 et 75 %).

Les modélisations Gardénia ont permis de quantifier la contribution des eaux souterraines au débit total des cours d'eau. Sur la période 1994-2012, la contribution moyenne annuelle est d'au moins 23% et au plus 58%. Dans le détail, c'est sur le bassin du Gouët où la participation des eaux souterraines à la rivière est la plus élevée et sur les bassins de l'Arguenon et du Blavet où elle est un peu moins élevée.

Les graphiques des débits (i) annuels et (ii) mensuels moyens interannuels (calculés sur la période de modélisation sur les différentes années hydrologiques) des bassins versants sont présentés à la fin de l'Annexe 6. Les débits sont exprimés en termes de lame d'eau écoulée sur le bassin versant (en mm). Ils se décomposent en débit rapide, intermédiaire et lent.

Les graphiques annuels détaillent l'importance que prend l'écoulement souterrain lors d'une année sèche (1996, 1997 et 2005) où le débit rapide (ruissellement) décroît plus fortement que les débits souterrains. Ce phénomène illustre le soutien de la nappe en période de sécheresse.

Les graphiques mensuels moyens interannuels montrent une influence prépondérante de l'écoulement lent, par rapport à l'écoulement intermédiaire, lors de la période d'étiage : globalement du mois de juin au mois de septembre. La tendance s'inverse pour les autres mois de l'année. Ce soutien de la nappe en période d'étiage atteint même son paroxysme aux mois de juillet, août, et septembre où une grande majorité de l'écoulement de la rivière provient de l'écoulement souterrain. Pendant la période de crue (décembre et janvier) l'écoulement rapide devient prépondérant.

#### **4.6. PIEZOMETRES RETENUS POUR REPRESENTER LES BASSINS VERSANTS ETUDIES**

A l'issue des travaux de modélisation, il est possible d'analyser la représentativité de chacun des piézomètres utilisés pour les 3 bassins versant étudiés, de façon à n'en retenir qu'un seul comme indicateur piézométrique pour chacun des bassins versants.

En raison des comportements piézométriques particuliers de la nappe à Bréhand et Quinténic, ces 2 ouvrages n'ont pas été retenus (calages Gardénia moins bons et relations nappes-rivières moins évidentes).

Les niveaux des piézomètres de Gouëlin et Kerpert sont bien corrélés avec le débit du Gouët. Compte-tenu de l'ancienneté du piézomètre, de la lithologie recoupée par l'ouvrage (y compris des altérites) et de sa très bonne corrélation avec le débit de la rivière, il a été jugé préférable de retenir le piézomètre de Kerpert. On peut ajouter que Kerpert est corrélé avec Trémuson qui, contrairement au piézomètre de Kerpert, est implanté dans la masse d'eau souterraine du Golfe de Saint-Brieuc où se trouve le Gouët.

Les niveaux des piézomètres de Trémur et Pleurtuit sont bien corrélés avec le débit de l'Arguenon. Compte-tenu de l'ancienneté du piézomètre, de la lithologie recoupée par l'ouvrage

et de sa présence dans la masse d'eau souterraine de l'Arguenon, il a été jugé préférable de retenir le piézomètre de Trémeur. Cet ouvrage est également positionné dans le bassin versant de l'Arguenon.

Les niveaux des piézomètres de Rostrenen et Kerpert sont bien corrélés avec le débit du Blavet. Compte-tenu du meilleur calage Gardénia, de la lithologie recoupée par l'ouvrage et de sa présence dans la masse d'eau souterraine du Blavet, il a été jugé préférable de retenir le piézomètre de Rostrenen.

Pour chaque bassin versant, les piézomètres de référence suivants ont donc été retenus, associés à la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel du bassin :

- bassin versant du Gouët : piézomètre de Kerpert (02782X0047/PZ), associé à la station hydrométrique du Gouët à Saint Julien (J1513010),
- bassin versant de l'Arguenon : piézomètre de Trémeur (02803X0036/PZ), associé à la station hydrométrique de l'Arguenon en entrée de retenue,
- bassin versant du Blavet : piézomètre de Rostrenen (03124X0088/F), associé à la station hydrométrique du Blavet à Kerien [Kerlouet] (J5202110).

#### **4.7. LIMITES D'UTILISATION DES MODELES**

Les modélisations ont été réalisées à l'aide d'un modèle global qui, comme son nom l'indique, ne peut en aucun cas permettre de quantifier l'impact d'une modification des valeurs ou d'une répartition différentes des prélèvements d'eau de surface sur le débit du cours d'eau.

Le niveau piézométrique de base (paramètre du modèle) est contraint par le logiciel GARDENIA : il est impossible de simuler des niveaux à l'étiage plus bas que ceux connus sur la période de mesure. Pour fixer des seuils piézométriques (vigilance, alerte, crise), il ne faudra donc pas utiliser les chroniques piézométriques issues de la modélisation, pour éviter de calculer des seuils trop optimistes (les niveaux piézométriques simulés étant plus hauts que les niveaux réels).

## 5. Elaboration d'indicateurs piézométriques

### 5.1. ANALYSE FREQUENTIELLE

L'analyse fréquentielle consiste, dans une chronique de mesures, à extraire les niveaux piézométriques pour chacun des mois et les classer par ordre croissant, ce qui revient à construire une distribution cumulée des fréquences (Illustration 47). Cela permet ainsi de situer un niveau par rapport à une fréquence d'occurrence pour chaque mois considéré (une fréquence de dépassement ou de non dépassement). Lorsque la chronique est suffisamment longue, il est possible de calculer des seuils de périodes de retour différentes. Un niveau piézométrique mensuel de période de retour « n ans sec » correspond à une fréquence de  $1/n$  (la période étant l'inverse de la fréquence).

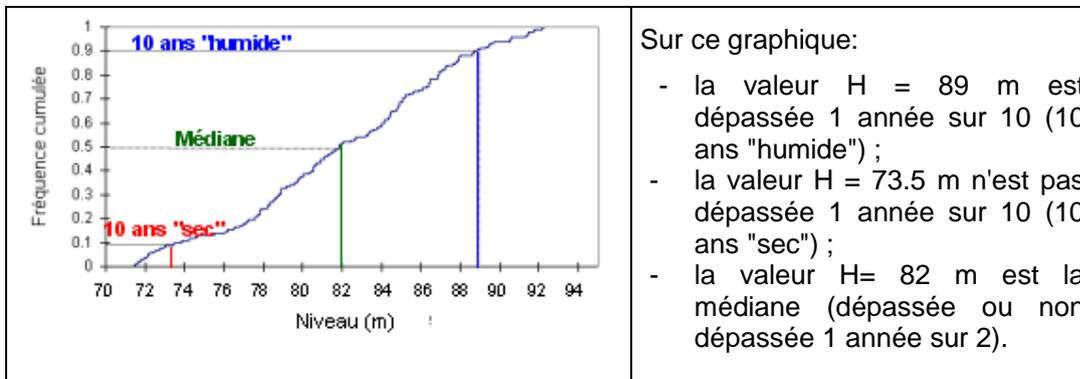


Illustration 47 : Courbe de fréquence cumulée (source : BRGM/RP-58139-FR)

Pour les piézomètres dont la chronique est inférieure à 10 ans, seuls les niveaux piézométriques mensuels de période de retour 5 ans sec et humide peuvent être calculés. Le calcul de périodes de retour 10 ans sec et 15 ans sec nécessiterait des chroniques plus longues.

Des précisions sur l'analyse fréquentielle et l'ajustement de lois de probabilité sont fournies en Annexe 4.

### 5.2. TRAVAIL AVEC DES PIEZOMETRES A CHRONIQUE PLUS LONGUE

Sur les piézomètres étudiés, les seuils historiquement bas sont approchés de façon incomplète en raison de la durée des chroniques (mesures depuis 2003 ou 2004). D'autre part, les modélisations GARDENIA ne permettent pas de simuler des niveaux à l'étiage plus bas que ceux connus sur la période de mesure. Néanmoins, certains piézomètres bretons possèdent des chroniques beaucoup plus longues que les piézomètres du département des Côtes d'Armor. Si les ouvrages anciens ont des chroniques piézométriques bien corrélées avec celles des récents, ils permettraient de calculer des périodes de retour supérieures à 10 ans grâce à une extension des chroniques des piézomètres récents.

**Ce travail est réalisé à titre expérimental pour tenter d'approcher les seuils historiquement bas sur les piézomètres récents. Les données du chapitre 5.2 doivent être utilisées en gardant en mémoire les incertitudes associées.**

### 5.2.1. Piézomètre de Ploërdut

Le piézomètre de Ploërdut, situé dans le Morbihan à 16 km au Sud de celui de Rostrenen, comporte des mesures depuis février 1980. Ce piézomètre recoupe la même lithologie que celui de Rostrenen (granite). Les pics enregistrés par ces deux piézomètres en hautes et basses eaux sont synchrones et la recharge débute à la même date sur les deux ouvrages (Illustration 48). Une corrélation entre ces deux piézomètres a donc été recherchée, afin de pouvoir étendre la chronique piézométrique de Rostrenen sur plus de 30 ans.

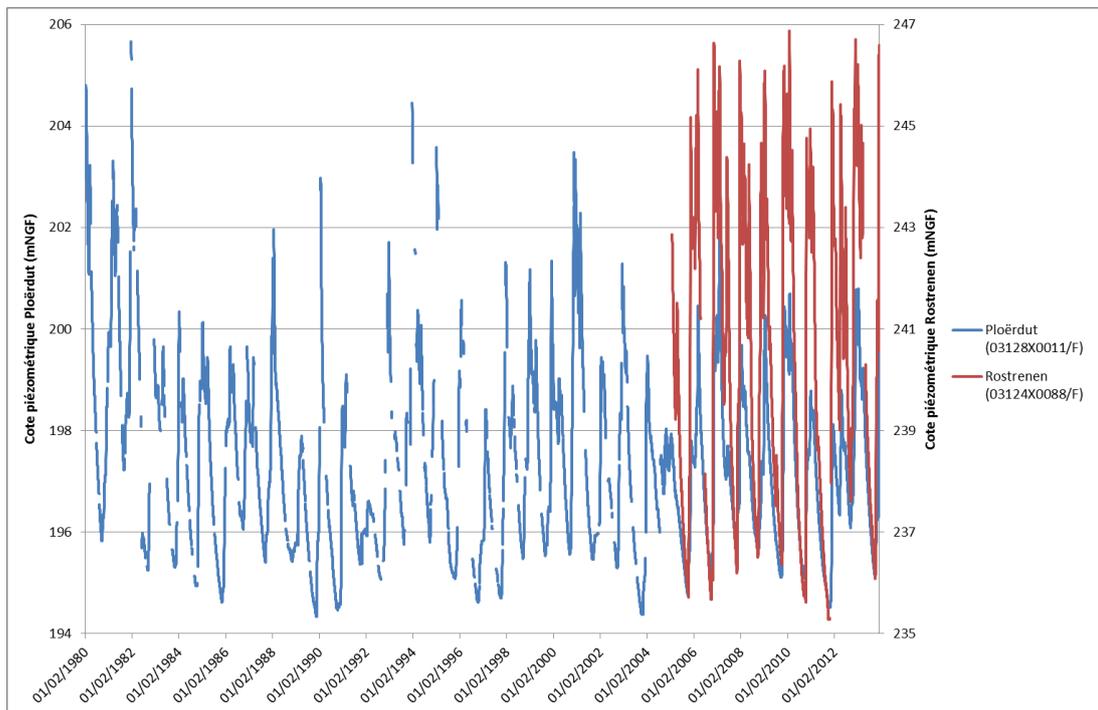


Illustration 48 : Chroniques piézométriques de Rostrenen (en rouge) et Ploërdut (en bleu)

L'illustration 49 montre que le niveau du piézomètre récent (Rostrenen) est assez bien corrélé avec le niveau du piézomètre ancien (coefficient de corrélation  $R^2=0.800$ ). L'équation de la droite de l'illustration 49 ( $y = 1.8163 x - 117.65$ ) permet de déduire le niveau du piézomètre récent à partir du niveau du piézomètre ancien.

Le calcul est réalisé<sup>7</sup> en tenant compte d'un intervalle de prévision d'une valeur particulière de Y en fonction de la variable explicative X (courbe en gris sur l'illustration 49, où X=niveau piézométrique (piézomètre ancien) et Y= niveau piézométrique (piézomètre récent)). Il s'agit de l'intervalle de confiance d'une prévision de Y sachant X. L'incertitude est minimum à proximité du centre de gravité du nuage de points (meilleure précision) et elle augmente lorsqu'on s'en éloigne (moins bonne précision).

<sup>7</sup> Le calcul se fait avec XLSTAT Version 2013.1 (copyright Addinsoft 1995-2013).

Chaque prévision de niveau du piézomètre récent, calculée à partir du niveau du piézomètre ancien, est ainsi associée à un écart-type sur la prédiction (valeur de 1,4 m NGF pour Rostrenen-Ploërdut, liée à la dispersion importante des points).

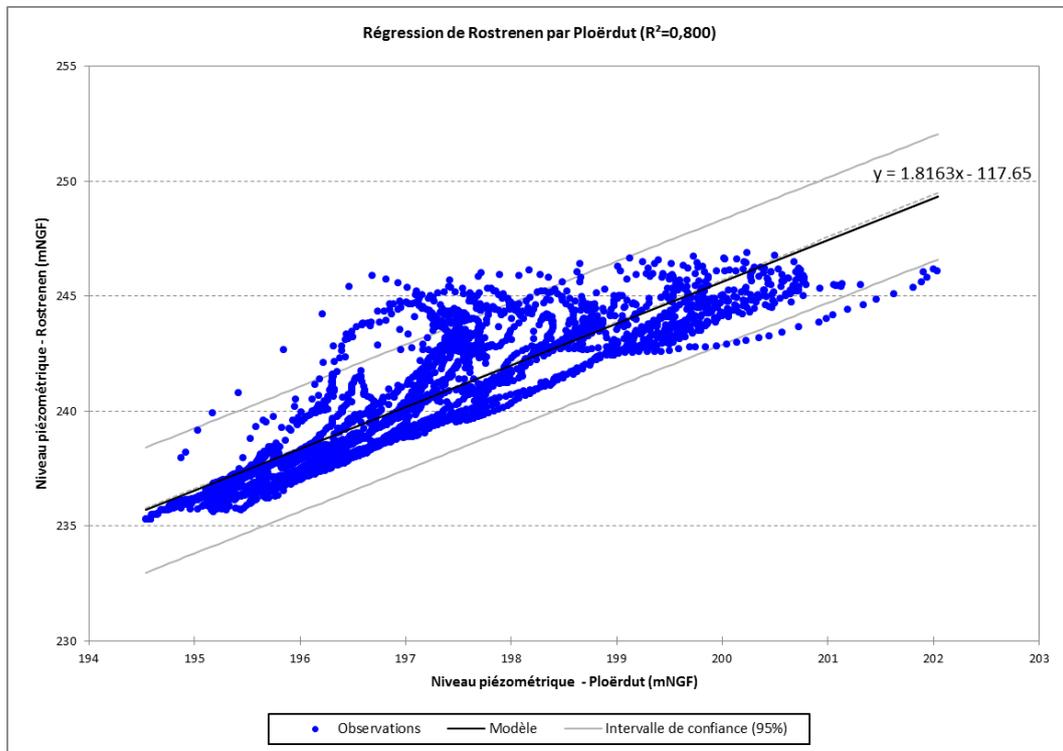


Illustration 49 : Corrélation du niveau piézométrique de Rostrenen et du niveau piézométrique de Ploërdut (et intervalle de confiance)

Grâce à une analyse fréquentielle (telle que décrite au chapitre 5.1.), des seuils piézométriques mensuels ont ensuite été calculés à partir de la chronique du piézomètre de Rostrenen étendue sur la période 1980-2013. Cette chronique est constituée :

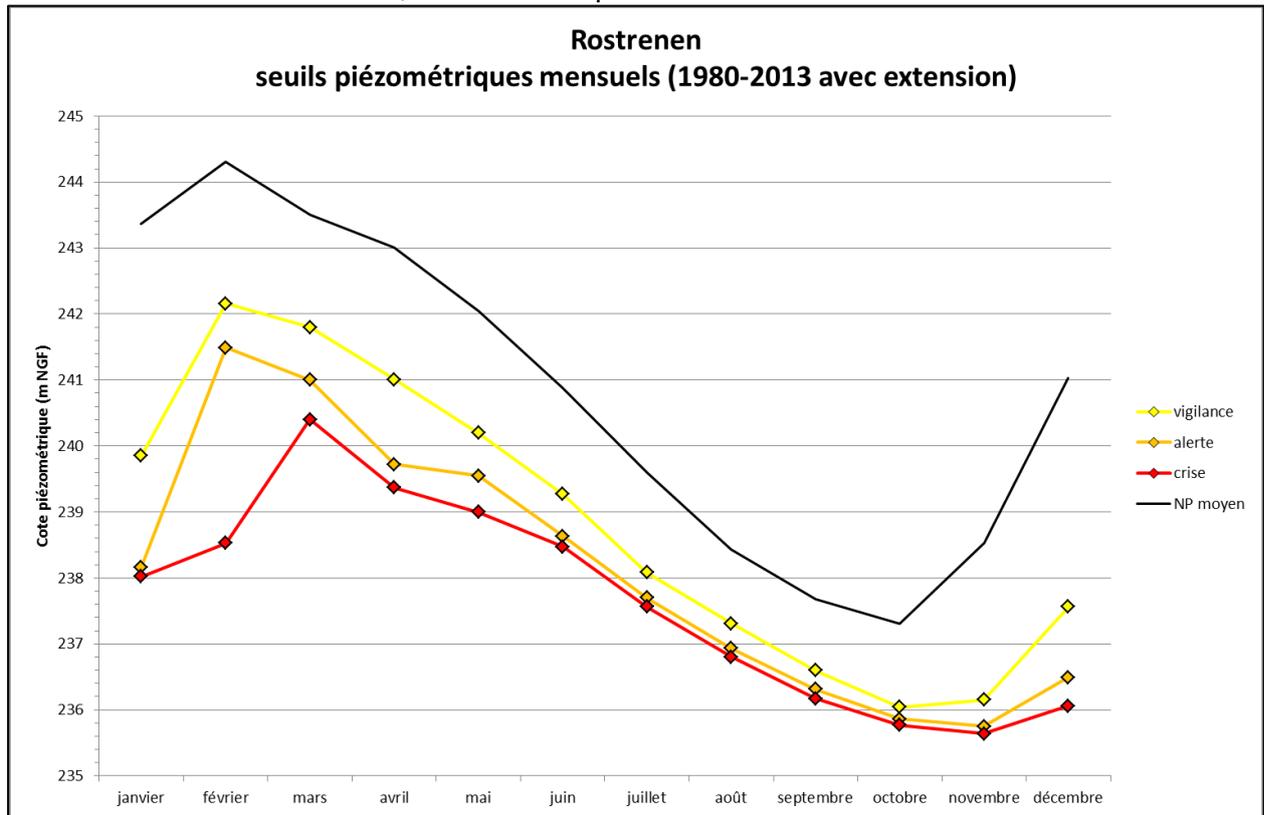
- données étendues issues de la corrélation avec Ploërdut (calcul de 1980 à 2004),
- données mesurées réelles du piézomètre de Rostrenen de 2005 à 2013.

3 seuils ont été calculés pour chaque mois (Illustration 50) :

- le seuil de « vigilance » qui correspond à un niveau piézométrique de période de retour 5 ans sec,
- le seuil d' « alerte » correspond à un niveau piézométrique de période de retour 10 ans sec,
- le seuil de « crise » correspond à un niveau piézométrique de période de retour 15 ans sec.

Les périodes de retour associées à ces 3 seuils (vigilance, alerte et crise) ont été proposées par le BRGM et acceptées en comité de pilotage. Se pose toutefois la question de la pertinence du

seuil 10 ans sec, très proche du seuil 15 ans sec.



|            |        | seuils    | janvier | février | mars  | avril  | mai    | juin   | juillet | août   | septembre | octobre | novembre | décembre |
|------------|--------|-----------|---------|---------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|----------|----------|
| 5 ans sec  | 20.00% | vigilance | 239.85  | 242.16  | 241.8 | 241.01 | 240.2  | 239.27 | 238.08  | 237.31 | 236.6     | 236.04  | 236.15   | 237.56   |
| 10 ans sec | 10.00% | alerte    | 238.16  | 241.49  | 241   | 239.72 | 239.55 | 238.63 | 237.7   | 236.93 | 236.31    | 235.86  | 235.75   | 236.49   |
| 15 ans sec | 6.67%  | crise     | 238.02  | 238.53  | 240.4 | 239.37 | 239    | 238.47 | 237.56  | 236.8  | 236.17    | 235.77  | 235.64   | 236.06   |

Illustration 50 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Rostrenen sur la période 1980-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Ploërdut)  
Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 1,4 m NGF

En 10 ans de chronique, le seuil de période de retour 10 ans sec n'a été dépassé qu'en 2010 et 2011. Le seuil de période de retour 15 ans sec n'a été dépassé qu'en 2011 et atteint ponctuellement en 2010.

Les niveaux piézométriques moyens mensuels du piézomètre de Rostrenen sont disponibles sur le site Internet ADES :

<http://www.ades.eaufrance.fr/TableauStats.aspx?dateDeb=16/02/2005&datefin=01/12/2020&code=03124X0088/F&profdeb=&proffin=>

### 5.2.2. Piézomètre de Saint-Hernin

Le piézomètre de Saint-Hernin, situé dans le Finistère à 41 km à l'Ouest de celui de Kerpert, comporte des mesures depuis avril 1992. Bien que ce piézomètre recoupe une lithologie différente de celui de Kerpert (schistes et grès pour Saint-Hernin et granite pour Kerpert), une corrélation entre ces deux piézomètres a été recherchée, afin de pouvoir étendre la chronique piézométrique de Kerpert sur plus de 20 ans. Les pics enregistrés par ces deux piézomètres en

hautes et basses eaux sont synchrones et la recharge débute à la même date sur les deux ouvrages (Illustration 51).

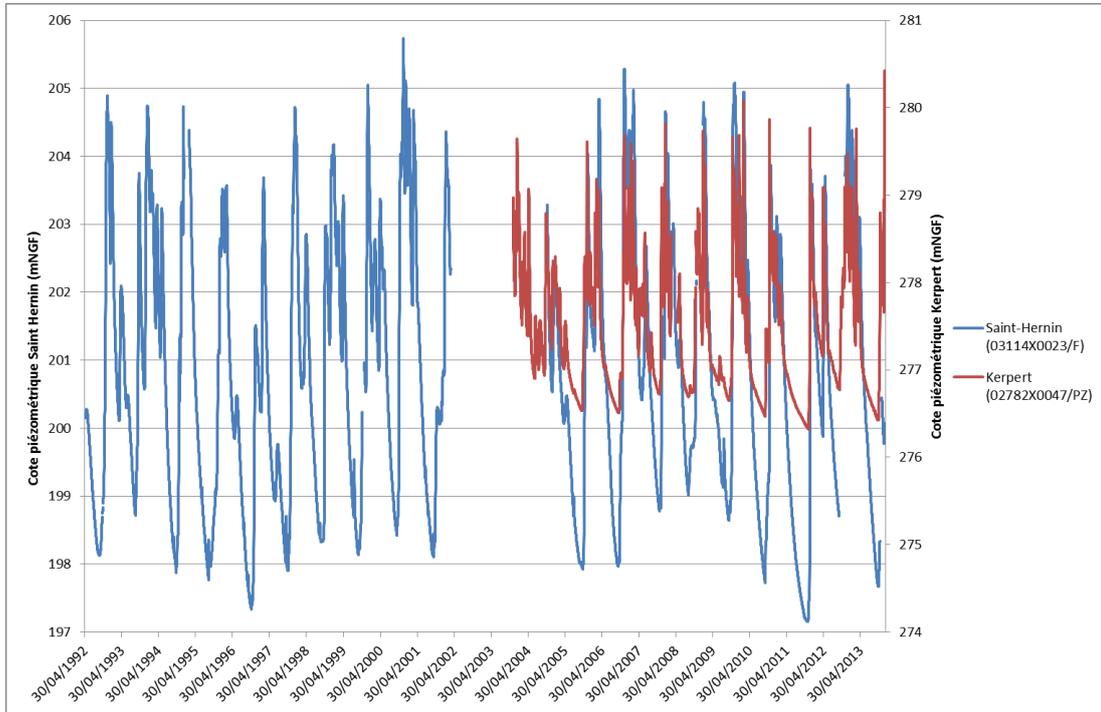


Illustration 51 : Chroniques piézométriques de Kerpert (en rouge) et Saint-Hernin (en bleu)

L'illustration 52 montre que le niveau du piézomètre récent (Kerpert) est assez corrélé avec le niveau du piézomètre ancien de Saint-Hernin (coefficient de corrélation  $R^2=0.780$ ), L'équation de la droite ( $y = 0.3366x + 209.84$ ) permet de déduire le niveau du piézomètre récent à partir du niveau du piézomètre ancien.

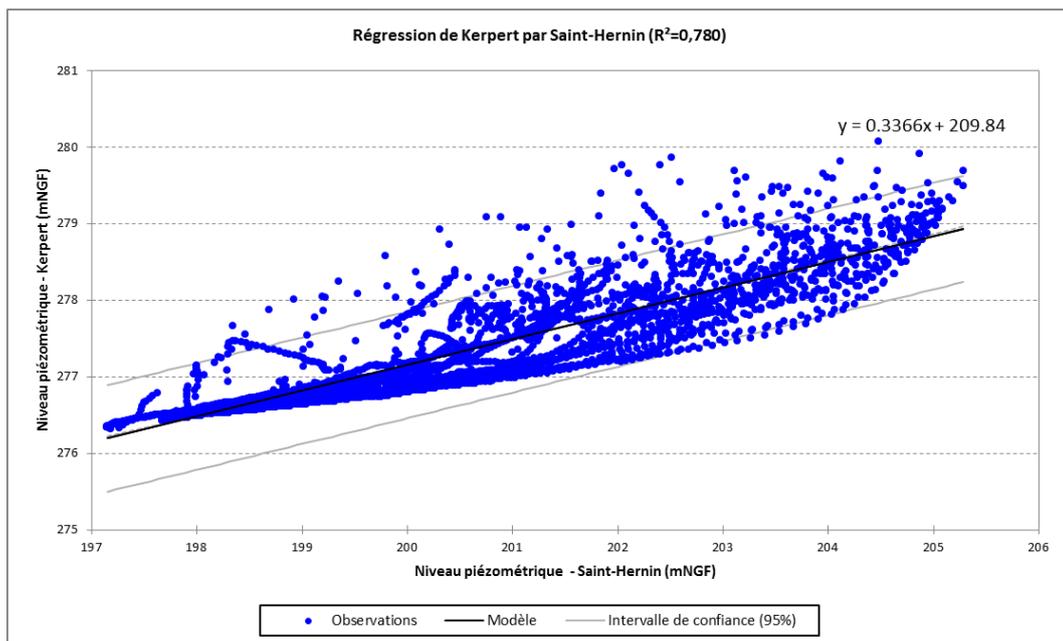
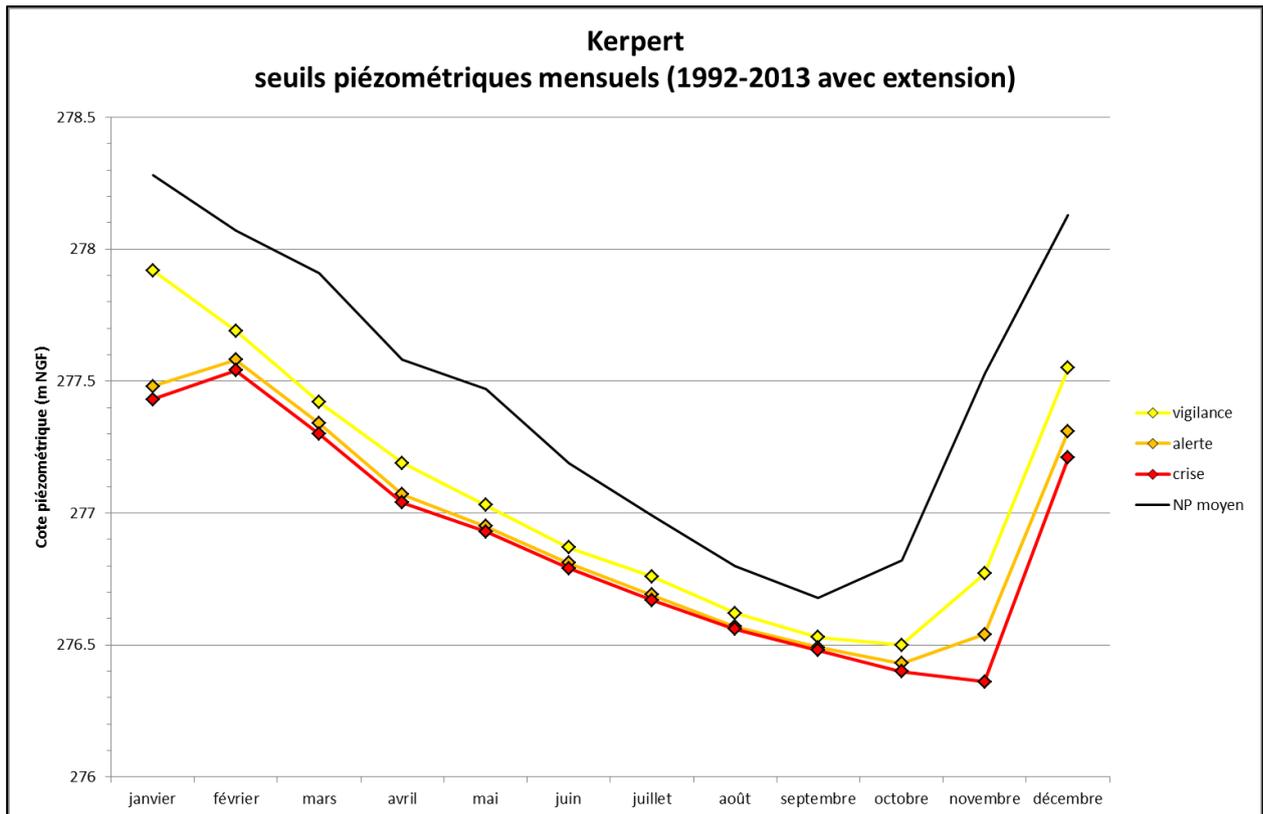


Illustration 52 : Corrélation du niveau piézométrique de Kerpert et du niveau piézométrique de Saint-Hernin (et intervalle de confiance)

Chaque prévision de niveau du piézomètre récent, calculée à partir du niveau du piézomètre ancien, est associée à un écart-type sur la prédiction (0,4 m NGF pour Kerpert/Saint-Hernin).

Des seuils piézométriques mensuels ont ensuite été calculés à partir de la chronique du piézomètre de Kerpert étendue sur la période 1992-2013 (Illustration 53) :

- données étendues issues de la corrélation avec Saint-Hernin (calcul de 1992 à 2003),
- données mesurées réelles du piézomètre de Kerpert de 2004 à 2013.



|            |        | seuils           | janvier | février | mars   | avril  | mai    | juin   | juillet | août   | septembre | octobre | novembre | décembre |
|------------|--------|------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|----------|----------|
| 5 ans sec  | 20.00% | <b>vigilance</b> | 277.92  | 277.69  | 277.42 | 277.19 | 277.03 | 276.87 | 276.76  | 276.62 | 276.53    | 276.5   | 276.77   | 277.55   |
| 10 ans sec | 10.00% | <b>alerte</b>    | 277.48  | 277.58  | 277.34 | 277.07 | 276.95 | 276.81 | 276.69  | 276.57 | 276.49    | 276.43  | 276.54   | 277.31   |
| 15 ans sec | 6.67%  | <b>crise</b>     | 277.43  | 277.54  | 277.3  | 277.04 | 276.93 | 276.79 | 276.67  | 276.56 | 276.48    | 276.4   | 276.36   | 277.21   |

*Illustration 53 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Kerpert sur la période 1992-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Saint-Hernin)  
Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 0,4 m NGF*

En 11 ans de chronique, le seuil de période de retour 10 ans sec n'a été dépassé qu'en 2010 et 2011. Le seuil de période de retour 15 ans sec n'a été dépassé qu'en 2011 et atteint ponctuellement en 2010.

Les niveaux piézométriques moyens mensuels du piézomètre de Kerpert sont disponibles sur le site Internet ADES :

<http://www.ades.eaufrance.fr/TableauStats.aspx?dateDeb=04/12/2003&datefin=29/11/2020&code=02782X0047/PZ&profdeb=&proffin=>

### 5.2.3. Piézomètre de Grandchamp

Le piézomètre de Grandchamp, situé dans le Morbihan à 73 km au Sud-Ouest de celui de Trémeur, comporte des mesures depuis janvier 1989. Bien que ce piézomètre recoupe une lithologie différente de celui de Trémeur (schistes et grès pour Grandchamp, schistes briovériens pour Trémeur), une corrélation entre ces deux piézomètres a été recherchée, afin de pouvoir étendre la chronique piézométrique de Trémeur sur plus de 20 ans. Les pics enregistrés par ces deux piézomètres en hautes et basses eaux sont synchrones et la recharge débute à la même date sur les deux ouvrages (Illustration 54).

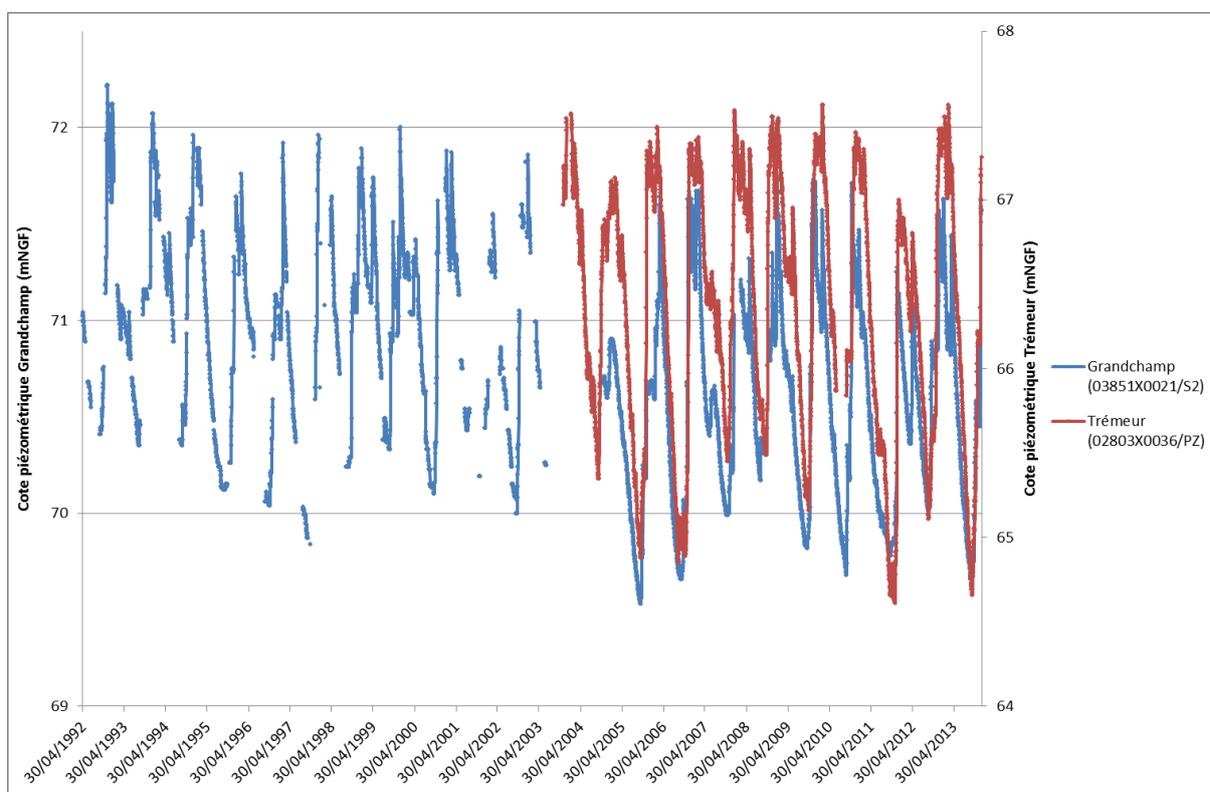


Illustration 54 : Chroniques piézométriques de Trémeur (en rouge) et Grandchamp (en bleu)

L'illustration 55 montre que le niveau du piézomètre récent (Trémeur) est assez corrélé avec le niveau du piézomètre de Grandchamp (coefficient de corrélation  $R^2=0.796$ ), L'équation de la droite ( $y = 1.3524 x - 29.107$ ) permet de déduire le niveau du piézomètre récent à partir du niveau du piézomètre ancien.

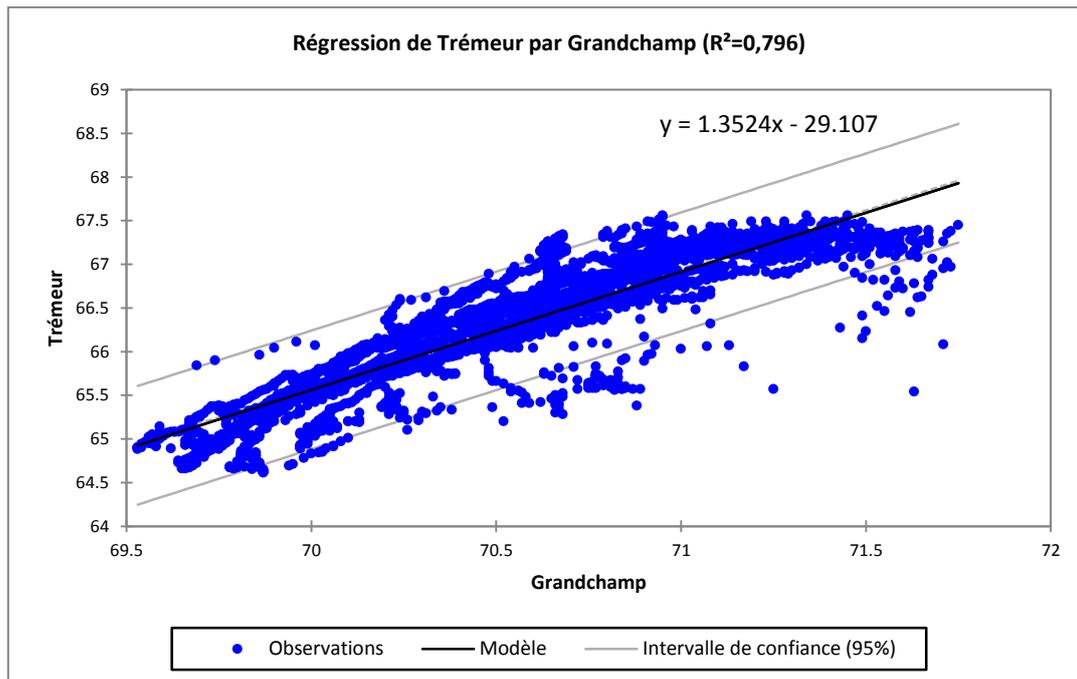
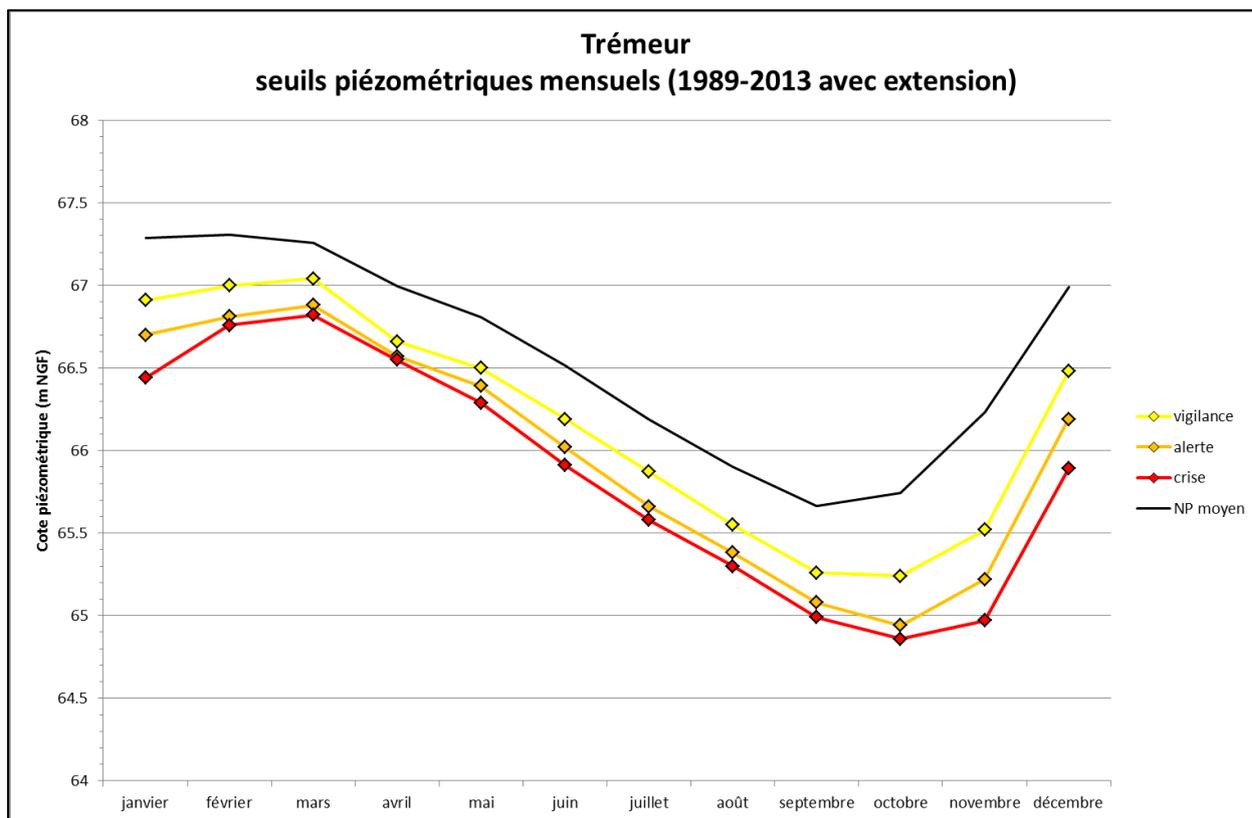


Illustration 55 : Corrélation du niveau piézométrique de Trémeur et du niveau piézométrique de Grandchamp (et intervalle de confiance)

Chaque prévision de niveau du piézomètre récent, calculée à partir du niveau du piézomètre ancien, est associée à un écart-type sur la prédiction (0,35 m NGF pour Kerpert-Saint Hernin).

Des seuils piézométriques mensuels ont ensuite été calculés à partir de la chronique du piézomètre de Trémeur étendue sur la période 1989-2013 (Illustration 56) :

- données étendues issues de la corrélation avec Grandchamp (calcul de 1989 à 2003),
- données mesurées réelles du piézomètre de Trémeur de 2003 à 2013.



|            |        |  | seuils           | janvier | février | mars  | avril | mai   | juin  | juillet | août  | septembre | octobre | novembre | décembre |
|------------|--------|--|------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-----------|---------|----------|----------|
| 5 ans sec  | 20.00% |  | <b>vigilance</b> | 66.91   | 67      | 67.04 | 66.66 | 66.5  | 66.19 | 65.87   | 65.55 | 65.26     | 65.24   | 65.52    | 66.48    |
| 10 ans sec | 10.00% |  | <b>alerte</b>    | 66.7    | 66.81   | 66.88 | 66.57 | 66.39 | 66.02 | 65.66   | 65.38 | 65.08     | 64.94   | 65.22    | 66.19    |
| 15 ans sec | 6.67%  |  | <b>crise</b>     | 66.44   | 66.76   | 66.82 | 66.55 | 66.29 | 65.91 | 65.58   | 65.3  | 64.99     | 64.86   | 64.97    | 65.89    |

Illustration 56 : Seuils piézométriques mensuels (en mètres) calculés sur le piézomètre de Trémeur sur la période 1989-2013 (extension à partir de la corrélation avec le piézomètre de Grandchamp).  
Les valeurs annoncées sont définies avec une incertitude de 0,346 m NGF

En 11 ans de chronique, le seuil de période de retour 10 ans sec a été dépassé 4 fois (2006 et de 2011 à 2013). Le seuil de période de retour 15 ans sec n'a été dépassé qu'en 2006 et 2011 et atteint ponctuellement en 2006 et 2013.

Les niveaux piézométriques moyens mensuels du piézomètre de Trémeur sont disponibles sur le site Internet ADES :

<http://www.ades.eaufrance.fr/TableauStats.aspx?dateDeb=03/12/2003&datefin=30/11/2020&code=02803X0036/PZ&profdeb=&proffin=>

#### 5.2.4. Exemple d'utilisation des seuils mensuels

A partir des niveaux piézométriques moyens mensuels disponibles sur ADES, le Conseil Général et le SDAEP pourront vérifier mois par mois l'évolution des niveaux piézométriques par rapport aux seuils mensuels calculés sur les piézomètres de référence, pour anticiper des périodes potentiellement problématiques à l'étiage.

Il faut noter que les différents seuils sont très rapprochés (quelques cm d'écart) et que l'incertitude associée aux calculs est supérieure à l'écart entre ces seuils. Il s'agit en effet des

limites de la méthode mais l'utilisation d'une corrélation avec des piézomètres anciens a permis d'approcher des seuils d'alerte (10 ans sec) et de crise (15 ans sec) et pas seulement de calculer des seuils de vigilance (5 ans sec calculés uniquement avec les années de mesure du piézomètre).

En tenant compte de leurs limites d'utilisation, ces seuils peuvent permettre d'alerter sur une situation critique à venir mais ne peuvent en aucun cas être utilisés en vue d'établir un arrêté sécheresse sur les bassins versants étudiés.

Comme l'année 2011 a été particulièrement sèche et qu'elle a entraîné des soucis de gestion de la ressource en eau par le CG 22, l'exemple présenté dans ce chapitre se focalisera sur cette année. Il consiste à comparer les niveaux piézométriques moyens mensuels mesurés à Kerpert lors de l'année 2011 et de les comparer aux seuils piézométriques mensuels définis au chapitre 5.2.2. (cf. Illustration 55).

|            |        | seuils    | janvier | février | mars   | avril  | mai    | juin   | juillet | août   | septembre | octobre | novembre | décembre |
|------------|--------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|----------|----------|
| 5 ans sec  | 20.00% | vigilance | 277.92  | 277.69  | 277.42 | 277.19 | 277.03 | 276.87 | 276.76  | 276.62 | 276.53    | 276.5   | 276.77   | 277.55   |
| 10 ans sec | 10.00% | alerte    | 277.48  | 277.58  | 277.34 | 277.07 | 276.95 | 276.81 | 276.69  | 276.57 | 276.49    | 276.43  | 276.54   | 277.31   |
| 15 ans sec | 6.67%  | crise     | 277.43  | 277.54  | 277.3  | 277.04 | 276.93 | 276.79 | 276.67  | 276.56 | 276.48    | 276.4   | 276.36   | 277.21   |
|            |        |           |         |         |        |        |        |        |         |        |           |         |          |          |
|            |        | situation | ok      | ok      | ok     | ale    | cri    | cri    | cri     | cri    | cri       | ale     | cri      | ok       |
| 2011       |        | NP moyen  | 278.18  | 277.72  | 277.50 | 277.05 | 276.90 | 276.75 | 276.64  | 276.55 | 276.48    | 276.41  | 276.35   | 277.73   |

Illustration 57 : Niveaux piézométriques moyens mensuels mesurés à Kerpert lors de l'année 2011 et comparaison aux seuils piézométriques mensuels

Les niveaux mesurés de janvier à mars 2011 restent au-dessus des seuils définis. En avril, le niveau moyen mensuel est inférieur au seuil d'alerte mais reste supérieur au seuil de crise ; ceci indique que le niveau piézométrique commence à être bas. De mai à septembre, les niveaux moyens mensuels sont inférieurs aux seuils de crise ; ceci indique que les niveaux piézométriques sont très bas. En octobre, le niveau moyen mensuel est inférieur au seuil d'alerte mais reste supérieur au seuil de crise. En novembre, le niveau repasse sous le seuil de crise. Et enfin en décembre, le niveau remonte au-dessus des seuils en raison de la reprise des pluies efficaces.

Le graphique de l'illustration 56 confirme qu'en 2011 les niveaux piézométriques mesurés de mai à novembre étaient bien les plus bas connus depuis la mise en service du point en 2003.

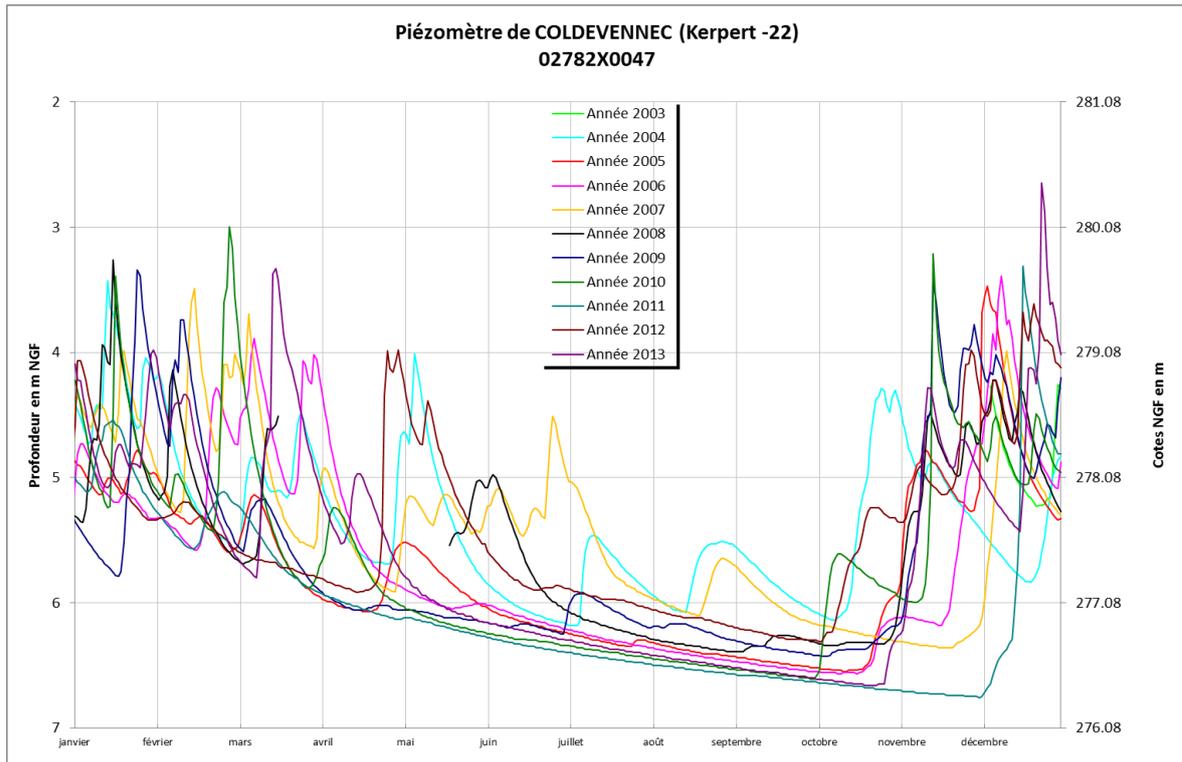


Illustration 58 : Superposition des chroniques piézométriques annuelles à Kerpert

### 5.3. ABAQUES DEBIT – NIVEAU PIEZOMETRIQUE

#### 5.3.1. Principe de l'abaque

Dans le cas d'une nappe en relation avec un cours d'eau dont elle assure le soutien d'étiage, l'objectif de gestion n'est pas tant piézométrique que débitmétrique : il faut en effet définir une cote piézométrique qui permette de garantir le Débit Objectif d'Etiage (DOE) du cours d'eau, qui constitue donc la contrainte.

L'indicateur piézométrique idéal serait donc un piézomètre dont les mesures permettent d'établir une régression avec les mesures de débit à la station hydrométrique de référence. Si des indicateurs piézométriques de ce type sont effectivement disponibles dans certains contextes géologiques particuliers, la grande majorité des corrélations entre mesures piézométriques et mesures de débit se présentent sous la forme d'un nuage de points plus ou moins étendu.

L'examen de la décroissance des niveaux piézométriques d'un piézomètre représentatif du bassin versant (indicateur) peut permettre d'estimer le débit d'étiage minimal à venir dans le cours d'eau en utilisant la corrélation débit-niveau piézométrique lisible sous forme d'abaque<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> STOLLSTEINER P. (2013) – Connaissance des ressources disponibles sur l'ensemble des bassins versants crayeux. Bassin Seine-Normandie en Champagne-Ardenne. Rapport final. BRGM/RP-61371-FR, 157 pages, 98 illustrations (figures et tableaux) et 3 annexes, CD.

### 5.3.2. Prise en compte du décalage temporel

Une relation entre le débit moyen journalier sur une station de jaugeage et le niveau piézométrique journalier d'un piézomètre de référence a donc été recherchée, en tenant compte de la correction du décalage temporel entre le niveau du piézomètre et le débit à la station (obtenu à partir du corrélogramme croisé entre les deux séries ; cf. chapitre 3.5. et Illustration 59). Les débits sont « en avance » par rapport au niveau piézométrique (la réaction du milieu souterrain aux pluies est plus lente).

| <b>Décalage (jours)</b> | <i>Gouët<br/>(St Julien)</i> | <i>Arguenon<br/>(entrée retenue)</i> | <i>Blavet (Kerien)</i> |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| <b>Kerpert</b>          | 1                            |                                      |                        |
| <b>Trémeur</b>          |                              | 4                                    |                        |
| <b>Rostrenen</b>        |                              |                                      | 5                      |

*Illustration 59 : Décalage temporel entre la piézométrie et le débit des rivières d'après les corrélogrammes croisés*

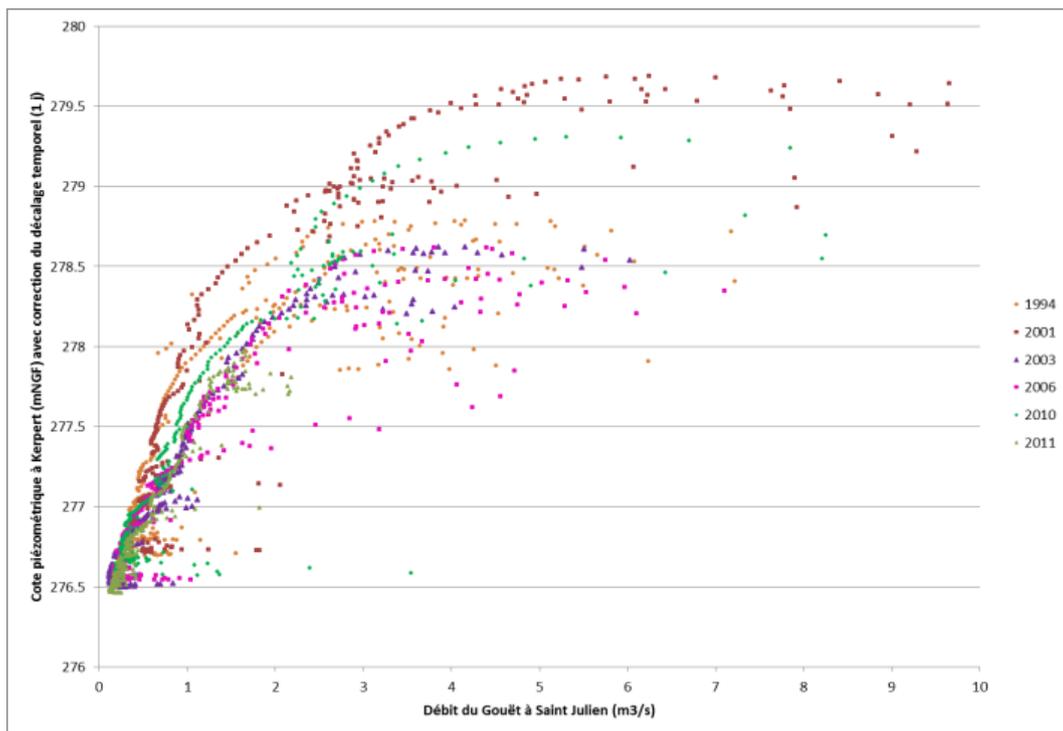
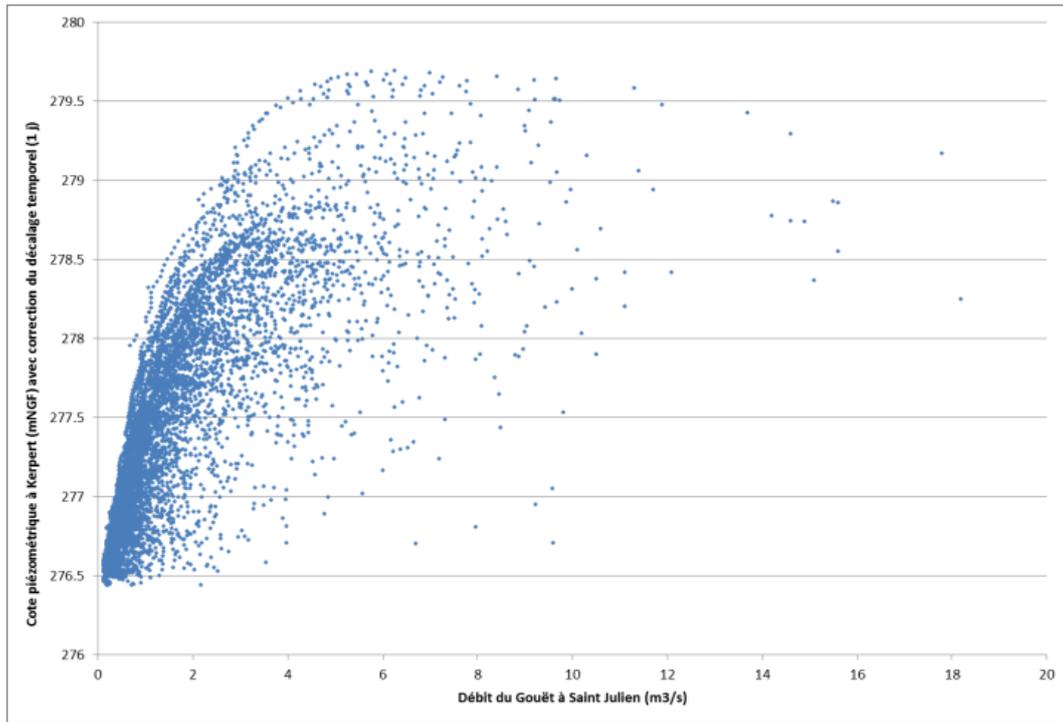
Les couples de valeurs débit – niveau piézométrique simulés avec le logiciel Gardenia ont été utilisés pour réaliser des abaques. Comme évoqué précédemment (cf. chapitre 5.2), les modélisations GARDENIA ne permettent pas de simuler des niveaux piézométriques à l'étiage plus bas que ceux connus sur la période de mesure. Ces abaques ne représenteront donc pas les niveaux les plus bas que l'on pourrait rencontrer lors d'années plus sèches que celles connues depuis la mise en place des piézomètres (2003-2005).

### 5.3.3. Abaques pour le bassin versant du Gouët

Les couples de valeurs débit du Gouët à Saint Julien – niveau piézométrique simulé à Kerpert (avec le logiciel GARDENIA, avec correction du décalage temporel de 1 jour entre les séries) peuvent être visualisés sur le graphique suivant (Illustration 60) :

La dispersion des points, constituant cette corrélation, peut s'expliquer par l'influence de la pluviométrie, du ruissellement et de la dynamique de la nappe qui ne sont pas identiques chaque année.

En ne s'intéressant, pour la prévision d'un débit d'étiage, qu'aux courbes débit-niveau piézométrique en phase de vidange (de mars à octobre, avec suppression des données intervenant lors des petits épisodes pluvieux d'étiage - Illustration 60 en bas), on réduit fortement la largeur du nuage.



*Illustration 60 : Corrélation entre le débit du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Kerpert (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle)*

L'analyse des évolutions annuelles permet de constater :

- que celles-ci s'effectuent suivant des courbes quasiment parallèles,

- que la courbe de vidange est relativement fiable jusqu'à l'atteinte du niveau le plus bas de l'année hydrologique en cours (resserrement des points en bas à gauche du graphique du bas de l'illustration 60).

Cette analyse met en évidence qu'il est possible de définir, en début de période de vidange, la courbe de décroissance probable du débit d'étiage pour les mois qui viennent.

La courbe enveloppe extérieure représente la situation la plus défavorable (cf. Illustration 61) : elle définit le débit minimal du cours d'eau pour une cote piézométrique donnée.

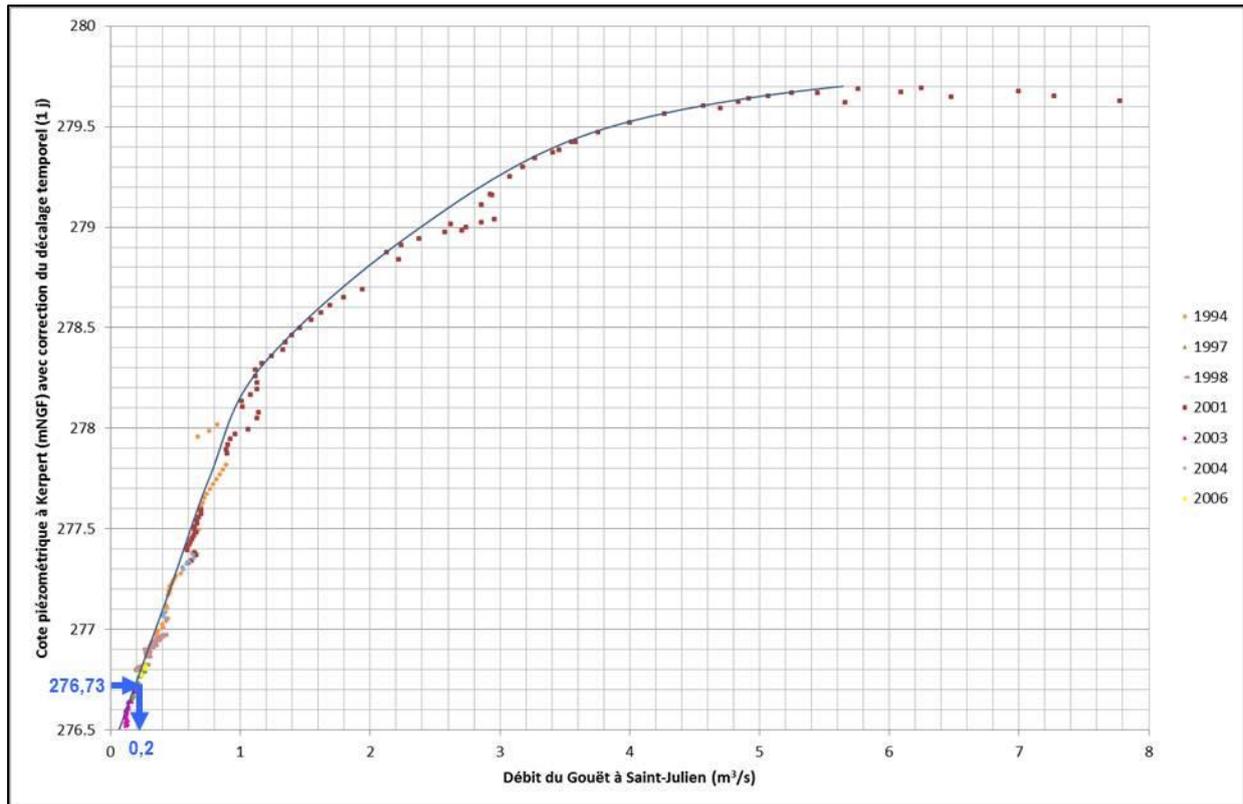


Illustration 61 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique simulé à Kerpert

A l'aide du graphique ci-dessus et de la valeur de décroissance moyenne du niveau piézométrique de Kerpert (1.39 cm/j dans les altérites et 0.49 cm/j dans l'horizon fissuré ; cf. Illustration 23 au chapitre 2.3.4.), il apparaît donc possible de réaliser une estimation du débit d'étiage le plus critique à l'horizon de quelques jours à quelques mois.

Connaissant le niveau piézométrique et le débit du jour (j) on pourra en déduire, en suivant cette courbe, le débit minimal du jour (j+n) à l'aide du niveau piézométrique correspondant au jour j diminué de la valeur de la baisse journalière occasionnée par ces (n) jours.

Par exemple : au 1<sup>er</sup> mars 2011, le débit du Gouët à Saint-Julien est  $Q=1.95 \text{ m}^3/\text{s}$  et le niveau piézométrique à Kerpert est  $NP=277.88 \text{ m NGF}$ . Si on se place 4 mois plus tard au 1<sup>er</sup> juillet 2011, compte-tenu de la baisse piézométrique le niveau devient  $NP=276.73 \text{ m NGF}$  (2 mois de baisse à 1.39 cm/j et 2 mois de baisse à 0.49 cm/j – cf. chapitres 2.3.2 et 2.3.4). En observant l'abaque (Illustration 61), le débit associé à cette cote piézométrique est  $Q=0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette valeur approximative constitue le débit d'étiage le plus critique que le cours d'eau aurait pu atteindre au 1<sup>er</sup> juillet 2011 en l'absence total de précipitations durant 4 mois (il faut cependant

garder en mémoire les incertitudes associées au calcul de la baisse du niveau piézométrique, cf. chapitre 2.3.2). Le débit mesuré à cette date a été en réalité  $Q=0.233 \text{ m}^3/\text{s}$  (notamment en raison de pluies survenues fin mars et début mai 2011).

Une approximation plus précise du débit d'étiage pourrait être faite en tenant compte des spécificités de l'année considérée (pluie, débit, niveau piézométrique). En effet, on a expliqué ci-dessus que la dispersion des points observée sur l'illustration 60 pouvait s'expliquer par l'influence de la pluviométrie, du ruissellement et de la dynamique de la nappe qui ne sont pas identiques chaque année.

L'illustration 62 ci-dessous présente des courbes de tendance annuelles de la corrélation entre le débit du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique simulé à Kerpert. Seules certaines années sont représentées, les corrélations débit-niveau piézométrique n'étant pas suffisantes les autres années.

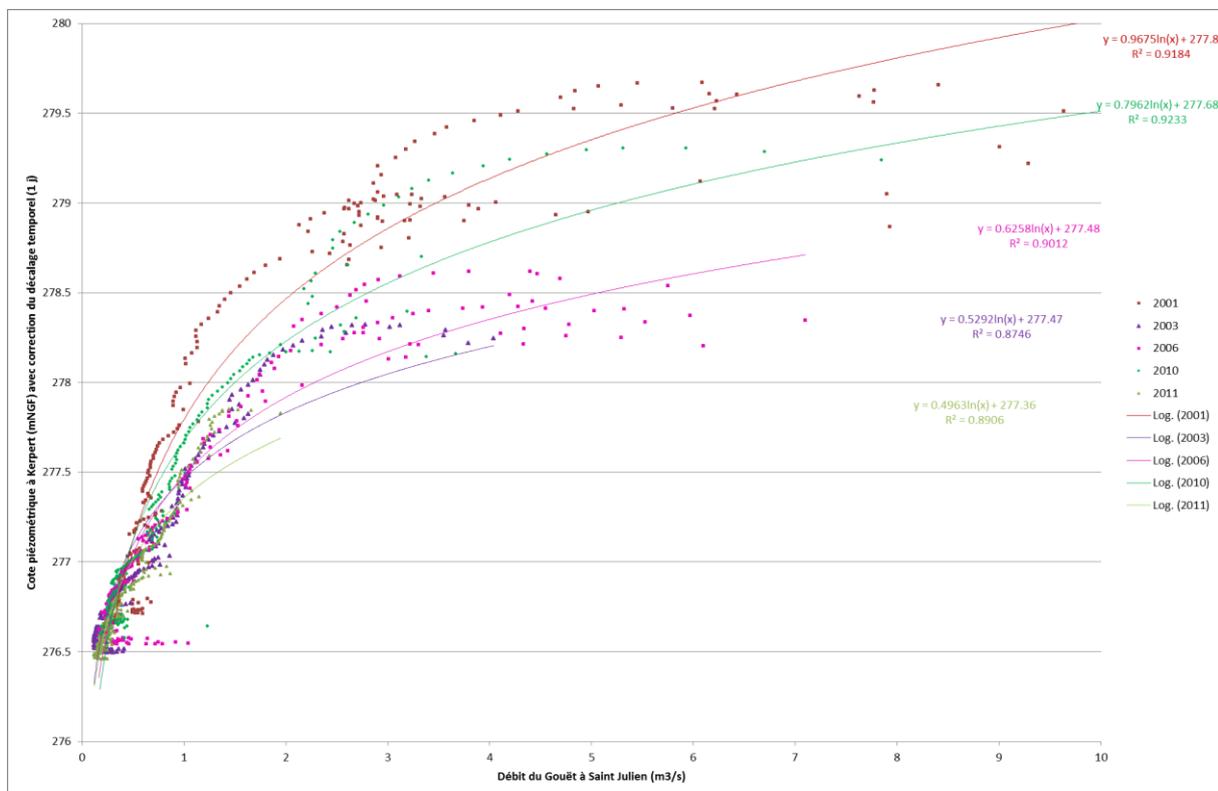


Illustration 62 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique journalier simulé à Kerpert pendant la période de vidange

Remarque : les courbes de tendance sont assez correctement calées en basses eaux mais pas en hautes eaux ce qui doit limiter leur usage à la période souhaitée.

L'estimation du débit d'étiage probable de l'année considérée pourrait être faite en utilisant la formule mathématique de l'année dont les conditions météorologiques-hydrométriques-piézométriques se rapprochent le plus de l'année considérée. Le CG 22 et le SDAEP pourront se rapprocher du BRGM pour obtenir des éléments sur la piézométrie et les pluies efficaces de l'année en cours.

Par exemple : considérons que l'année 2007 se soit déroulée dans les mêmes conditions que l'année 2006. Au 1<sup>er</sup> mars 2007, le débit du Gouët à Saint-Julien est  $Q=7.03 \text{ m}^3/\text{s}$  et le niveau piézométrique à Kerpert est  $NP=278.88 \text{ m NGF}$ . Si on se place 4 mois plus tard au 1<sup>er</sup> juillet 2007, compte-tenu de la baisse piézométrique le niveau devient  $NP=277.73 \text{ m NGF}$  (2 mois de baisse à  $1.39 \text{ cm/j}$  et 2 mois de baisse à  $0.49 \text{ cm/j}$ ). En utilisant la formule de la courbe de tendance de l'année 2006, le débit calculé à cette cote piézométrique est  $Q=1.49 \pm 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  (l'incertitude est estimée d'après la dispersion des points ; cf. Illustration 63). Cette valeur constitue le débit d'étiage probable que le cours d'eau pourrait atteindre au 1<sup>er</sup> juillet 2007 si les conditions météorologiques-hydrométriques-piézométriques de 2007 suivaient celles de 2006 (pour information : le débit mesuré à cette date a été en réalité  $Q=1.56 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

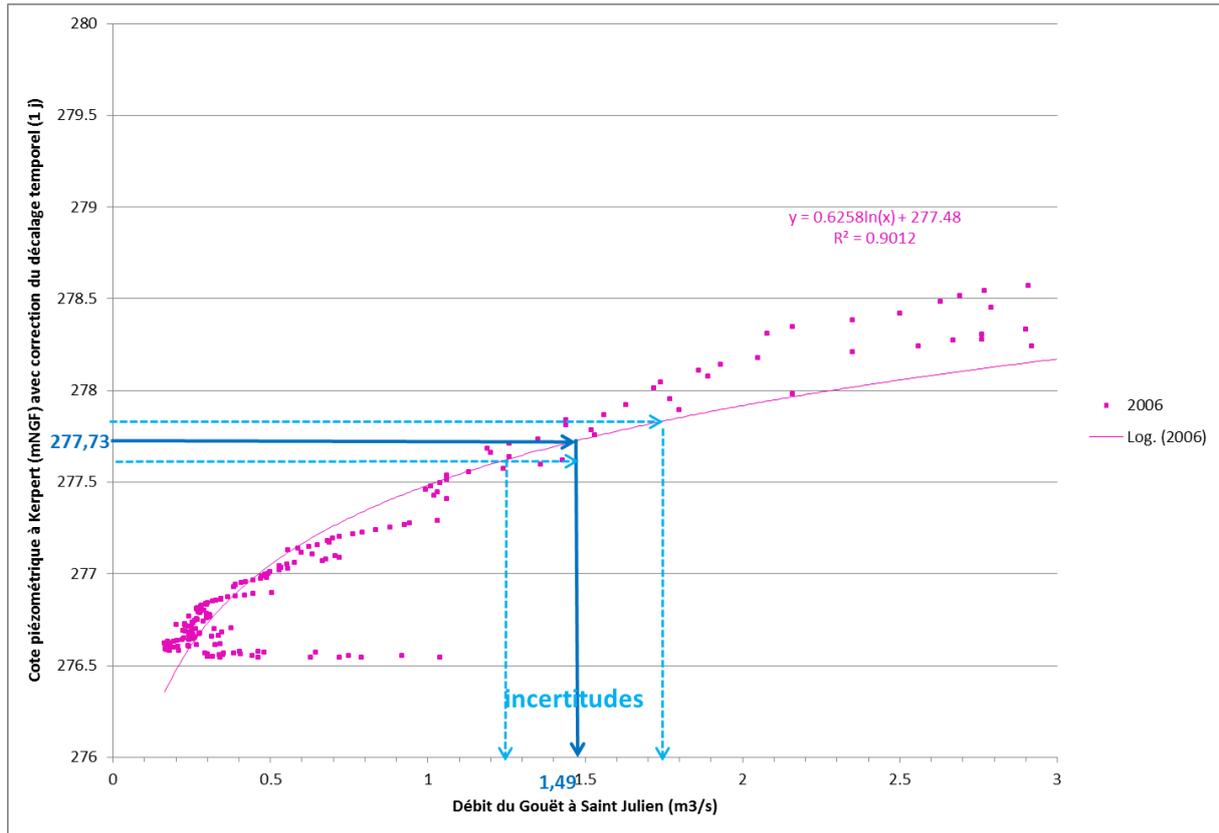


Illustration 63 : Courbe de tendance 2006 des relations entre le débit moyen journalier du Gouët à Saint-Julien et le niveau piézométrique journalier simulé à Kerpert pendant la période de vidange

#### 5.3.4. Abaques pour le bassin versant de l'Arguenon

Les couples de valeurs débit de l'Arguenon en entrée de retenue - niveau piézométrique simulé à Trémeur (avec le logiciel GARDENIA, avec correction du décalage temporel de 4 jours entre les séries) peuvent être visualisés sur le graphique ci-dessous (Illustration 64).

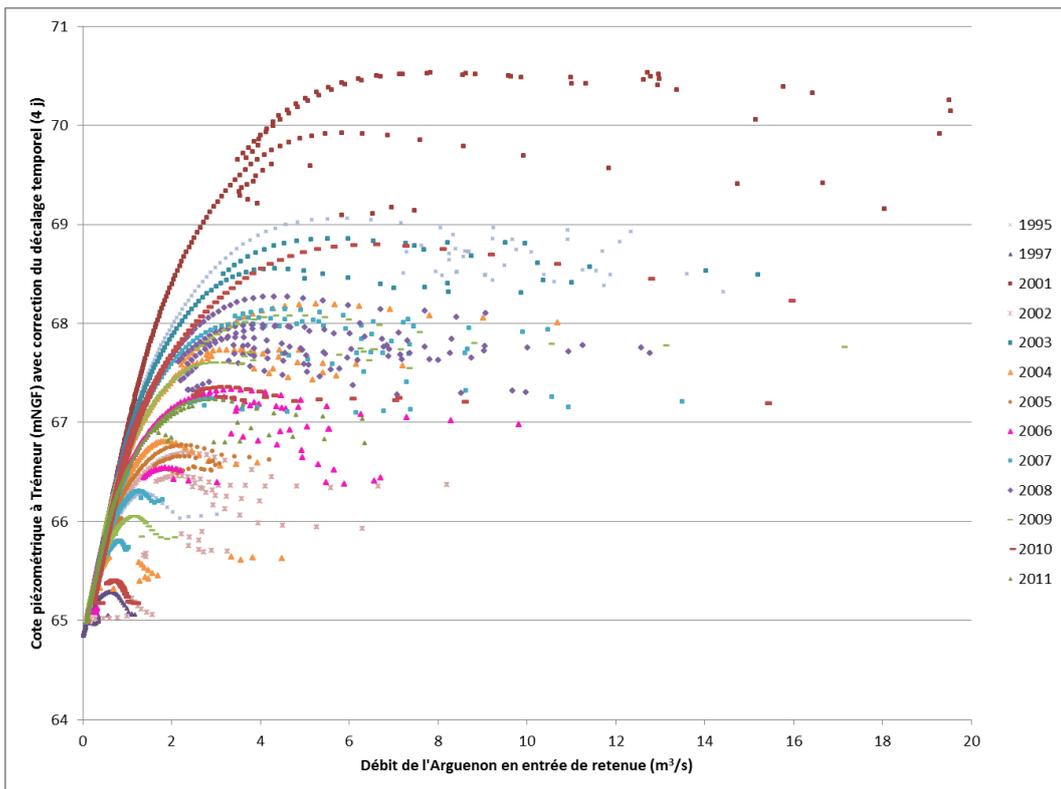
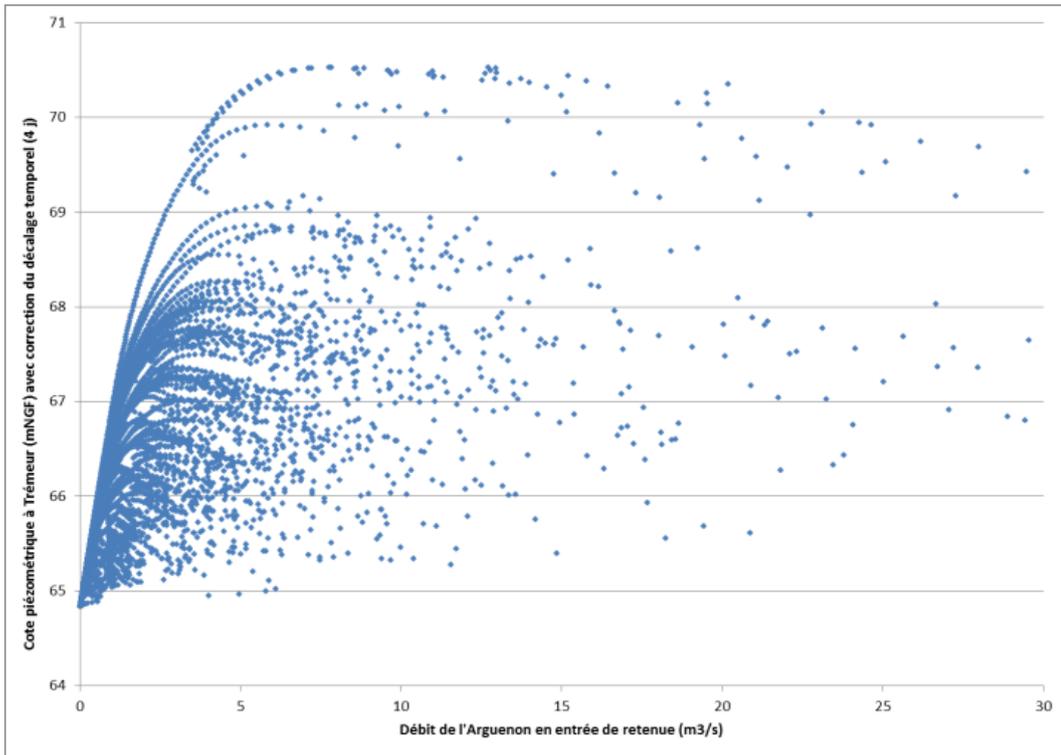


Illustration 64 : Corrélation entre le débit de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Trémeur (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle)

Tout comme pour le bassin versant du Gouët, une courbe enveloppe extérieure peut être tracée pour l'Arguenon : elle représente la situation la plus défavorable (Illustration 65) et elle définit le débit minimal du cours d'eau pour une cote piézométrique donnée.

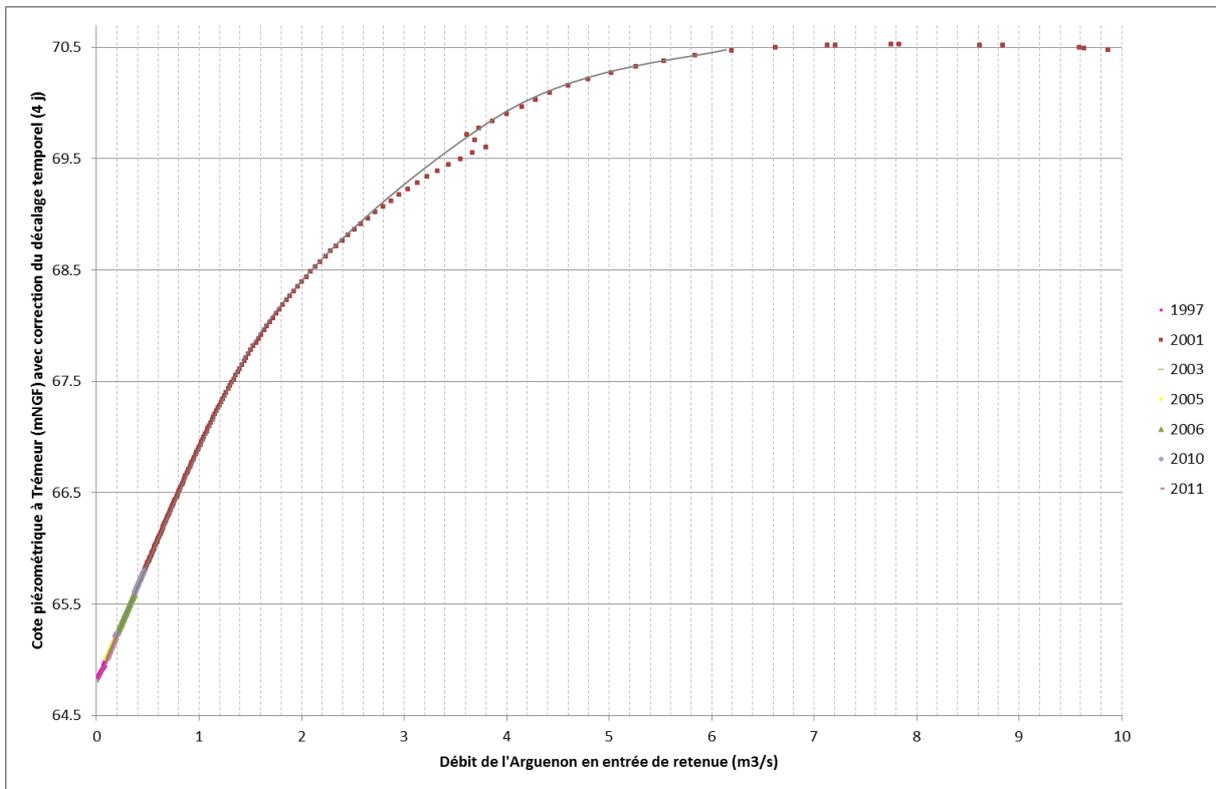


Illustration 65 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé à Trémeur

L'illustration 66 ci-dessous présente des courbes de tendance annuelles de la corrélation entre le débit de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé à Trémeur. Ceci permet de prendre en compte les spécificités de chaque année (pluie, débit, niveau piézométrique). Seules certaines années sont représentées, les corrélations débit-niveau piézométrique n'étant pas suffisantes les autres années.

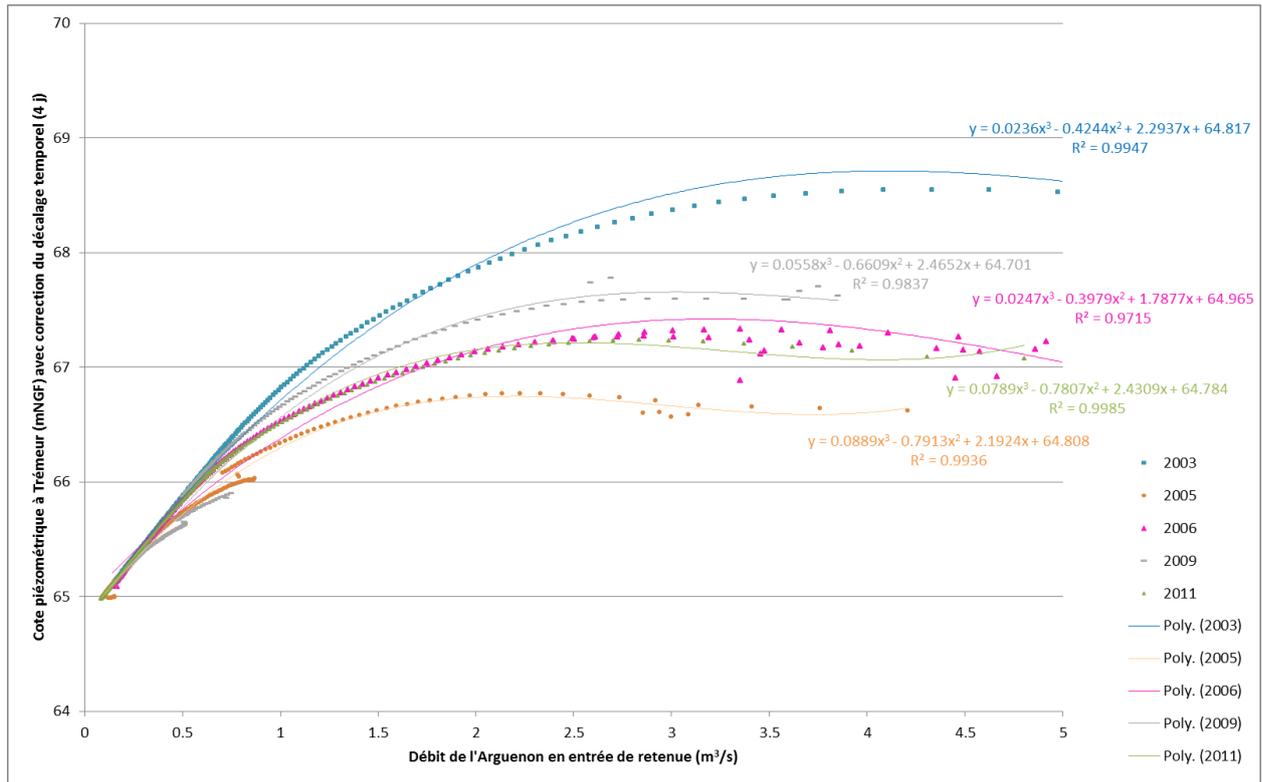


Illustration 66 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier de l'Arguenon en entrée de retenue et le niveau piézométrique simulé à Trémeur pendant la période de vidange

### 5.3.5. Abaques pour le bassin versant du Blavet

Les couples de valeurs débit du Blavet à Kerien - niveau piézométrique simulé à Rostrenen (avec le logiciel GARDENIA, avec correction du décalage temporel de 5 jours entre les séries) peuvent être visualisés sur le graphique ci-dessous (Illustration 67).

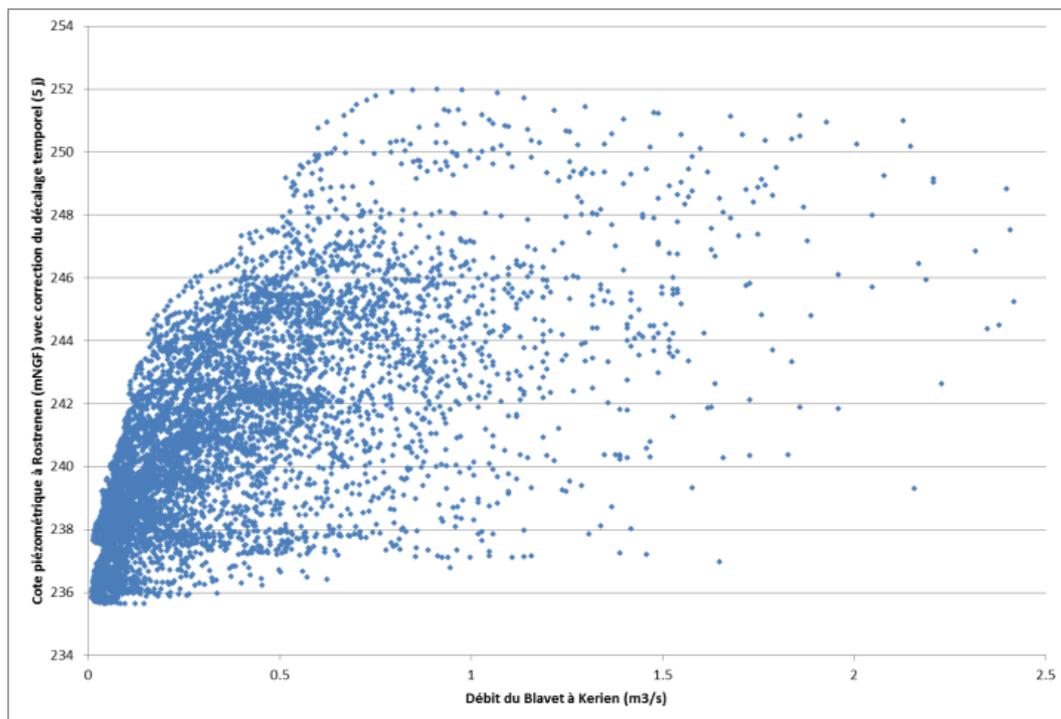


Illustration 67 : Corrélation entre le débit du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé (Gardenia) à Rostrenen (chronique complète en haut et en phase de vidange en bas avec décomposition annuelle)

Le bassin versant du Blavet en amont de Kerien représente la tête du bassin versant. Il est donc très influencé par la pluviométrie très élevée sur l'amont du bassin. C'est pourquoi les

courbes de vidange sont davantage bruitées que pour les bassins versants du Gouët et de l'Arguenon (Illustration 67).

Tout comme pour les autres bassins versants, une courbe enveloppe extérieure peut être tracée pour le Blavet : elle représente la situation la plus défavorable (cf. Illustration 68) et elle définit le débit minimal du cours d'eau pour une cote piézométrique donnée.

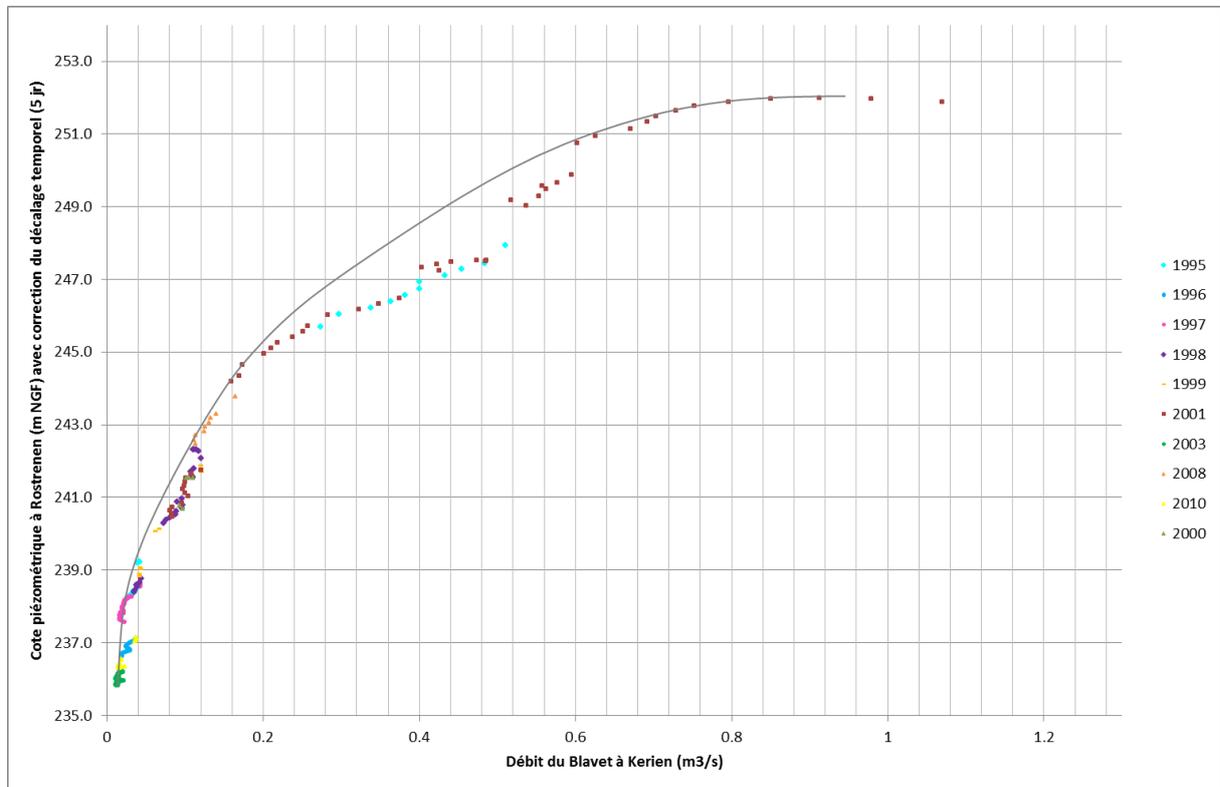


Illustration 68 : Courbe enveloppe extérieure de la corrélation entre le débit du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé à Rostrenen

L'illustration 69 ci-dessous présente des courbes de tendance annuelles de la corrélation entre le débit du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé à Rostrenen. Ceci permet de prendre en compte les spécificités de chaque année (pluie, débit, niveau piézométrique). Seules certaines années sont représentées, les corrélations débit-niveau piézométrique n'étant pas suffisantes les autres années.

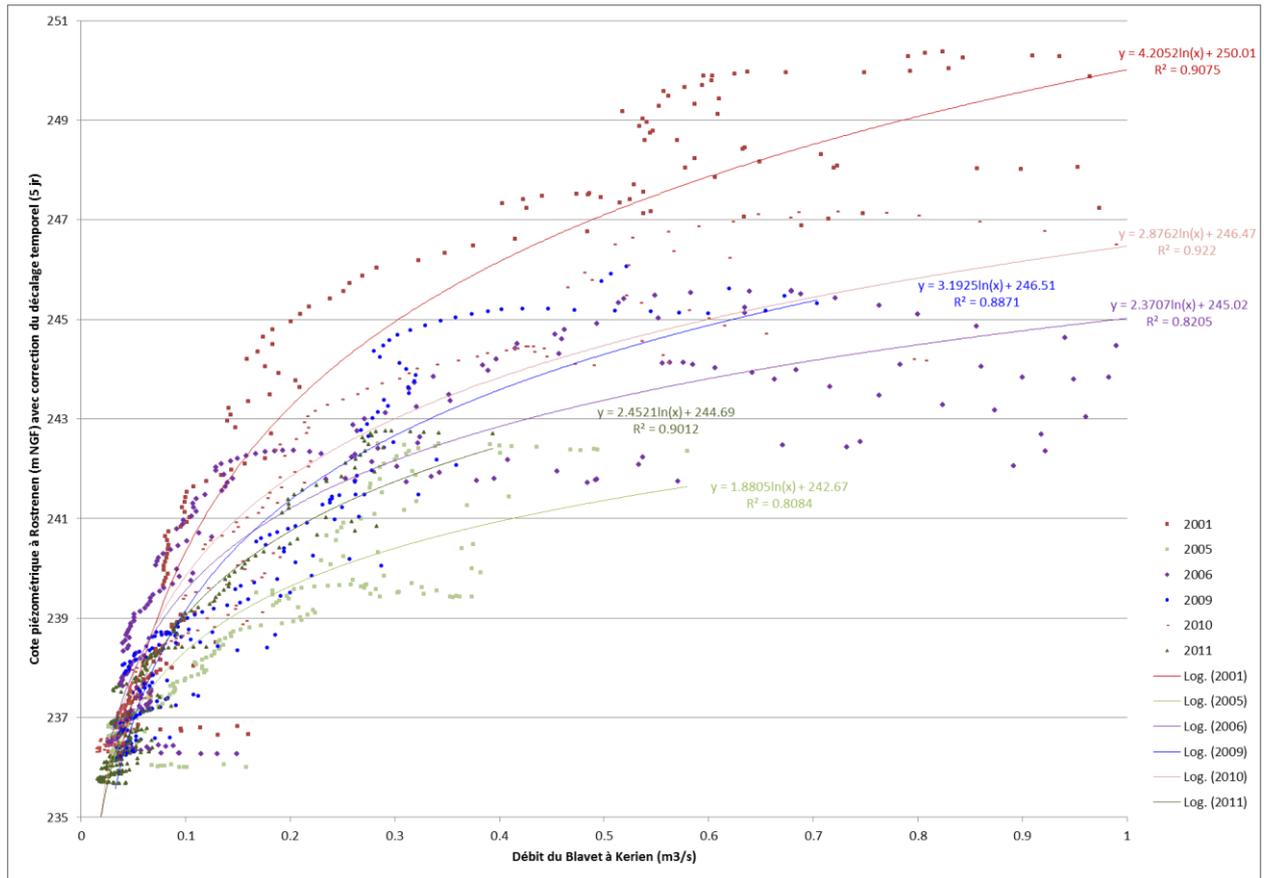


Illustration 69 : Courbes de tendance annuelles des relations entre le débit moyen journalier du Blavet à Kerien et le niveau piézométrique simulé à Rostrenen pendant la période de vidange

### 5.3.6. Exemple d'utilisation des abaques à partir des débits objectif d'étiage

Des exemples d'utilisation des abaques en « prévision » ont été présentés précédemment mais ces abaques peuvent également être utilisés « en remontant le temps ».

Les débits réservés pour les 3 cours d'eau en aval des barrages sont les suivants (Illustration 70 - données CG 22) :

|  | Débits réservés en m <sup>3</sup> /s |                     |                     |
|--|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
|  | Arguenon<br>Aval barrage             | Gouët<br>Ploufragan | Blavet<br>Lanrivain |
| 1 <sup>er</sup> juin au 30 novembre (étiage) | 0.100                                | 0.200               | 0.150               |
| 1 <sup>er</sup> décembre au 30 mai           | 0.150                                | 0.500               | 0.200               |

Illustration 70 : Débits réservés (m<sup>3</sup>/s) aux stations de jaugeages situées en aval des barrages (source : CG 22)

Les abaques présentés précédemment sont basés sur le débit d'une station de jaugeage située en amont des barrages (l'Arguenon en entrée de retenue, le Gouët à Saint Julien et le Blavet à Kerien) alors que les débits réservés sont donnés à l'aval des barrages (l'Arguenon en aval du

barrage, le Gouët à Ploufragan et le Blavet à Lanrivain). Pour le Gouët et le Blavet, il est possible de calculer le débit amont équivalent aux débits réservés en aval en utilisant les ratios calculés précédemment sur les lames d'eau (cf. chapitre 3.4). Pour l'Arguenon, les données de débit en aval du barrage n'ont pas été fournies au BRGM par le CG 22. Compte tenu des ratios calculés sur le Blavet et le Gouët (proches de 1), on retiendra l'hypothèse d'un ratio de 1 entre les lames d'eau amont et aval du barrage pour l'Arguenon.

Les débits réservés en aval des barrages correspondraient donc aux débits suivants sur les stations en amont des barrages :

|  | Débits en m <sup>3</sup> /s |              |        |
|--|-----------------------------|--------------|--------|
|  | Arguenon                    | Gouët        | Blavet |
|  | Entrée retenue              | Saint-Julien | Kerien |
| 1 <sup>er</sup> juin au 30 novembre (étiage) | 0.100                       | 0.194        | 0.140  |
| 1 <sup>er</sup> décembre au 30 mai           | 0.150                       | 0.485        | 0.187  |

*Illustration 71 : Débits (m<sup>3</sup>/s) aux stations de jaugeage amont correspondant aux débits réservés aux stations de jaugeages situées en aval des barrages*

On considère que le CG 22 souhaite calculer au 1<sup>er</sup> mai (soit un mois avant le débit réservé d'étiage, c'est-à-dire au milieu de la période de reconstitution des réserves dans les barrages, qui s'étend au 1<sup>er</sup> avril au 31 mai d'après les données transmises par le CG 22) quel serait le débit à l'étiage au 1<sup>er</sup> août (au milieu de la période estivale de maintien de la réserve), soit 3 mois plus tard.

Prenons l'exemple du Gouët : connaissant le débit réservé à respecter au 1<sup>er</sup> août (0,200 m<sup>3</sup>/s à Ploufragan soit 0,194 m<sup>3</sup>/s à Saint-Julien), quel devrait être le débit au 1<sup>er</sup> mai pour assurer cet étiage et à quelle cote piézométrique ce débit est-il associé ? En reportant sur l'abaque le débit amont correspondant au débit réservé aval (en vert sur l'illustration 72), on peut déterminer le niveau piézométrique à Kerpert correspondant à l'étiage (276,73 m NGF). Connaissant la vitesse de décroissance de la piézométrie à Kerpert (cf. 2.3.2 – 0,49 cm/jour pendant 3 mois, soit 45,08 cm – et flèche rouge sur l'illustration 72), on peut calculer le niveau piézométrique à la date de prévision (1<sup>er</sup> mai : 277,18 m NGF) et déterminer le débit correspondant grâce à l'abaque (en bleu sur l'illustration 72). Il s'agit du débit minimum qu'il faudrait respecter au 1<sup>er</sup> mai pour garantir le maintien du débit réservé à l'étiage, soit 0,4 m<sup>3</sup>/s à Saint-Julien.

En utilisant le ratio lame d'eau aval / lame d'eau amont, on en déduit que le débit qu'il faudrait respecter le 1<sup>er</sup> mai au niveau du Gouët à Ploufragan est de 0,41 m<sup>3</sup>/s afin de garantir le débit réservé à l'étiage.

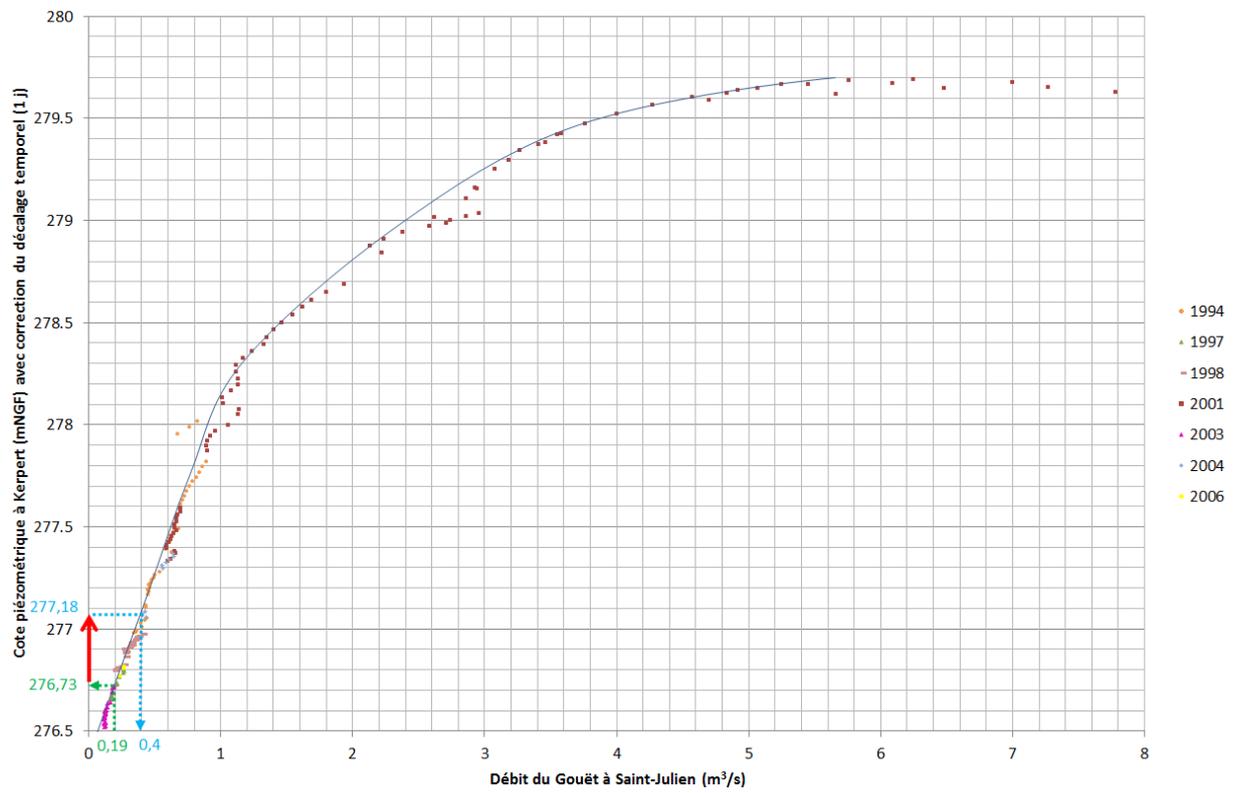


Illustration 72 : Exemple d'utilisation de l'abaque débit – niveau piézométrique à partir des débits objectifs d'étiage

## 5.4. INDICATEURS PIEZOMETRIQUES RETENUS

L'illustration 73 récapitule les indicateurs piézométriques retenus pour les trois bassins versants étudiés.

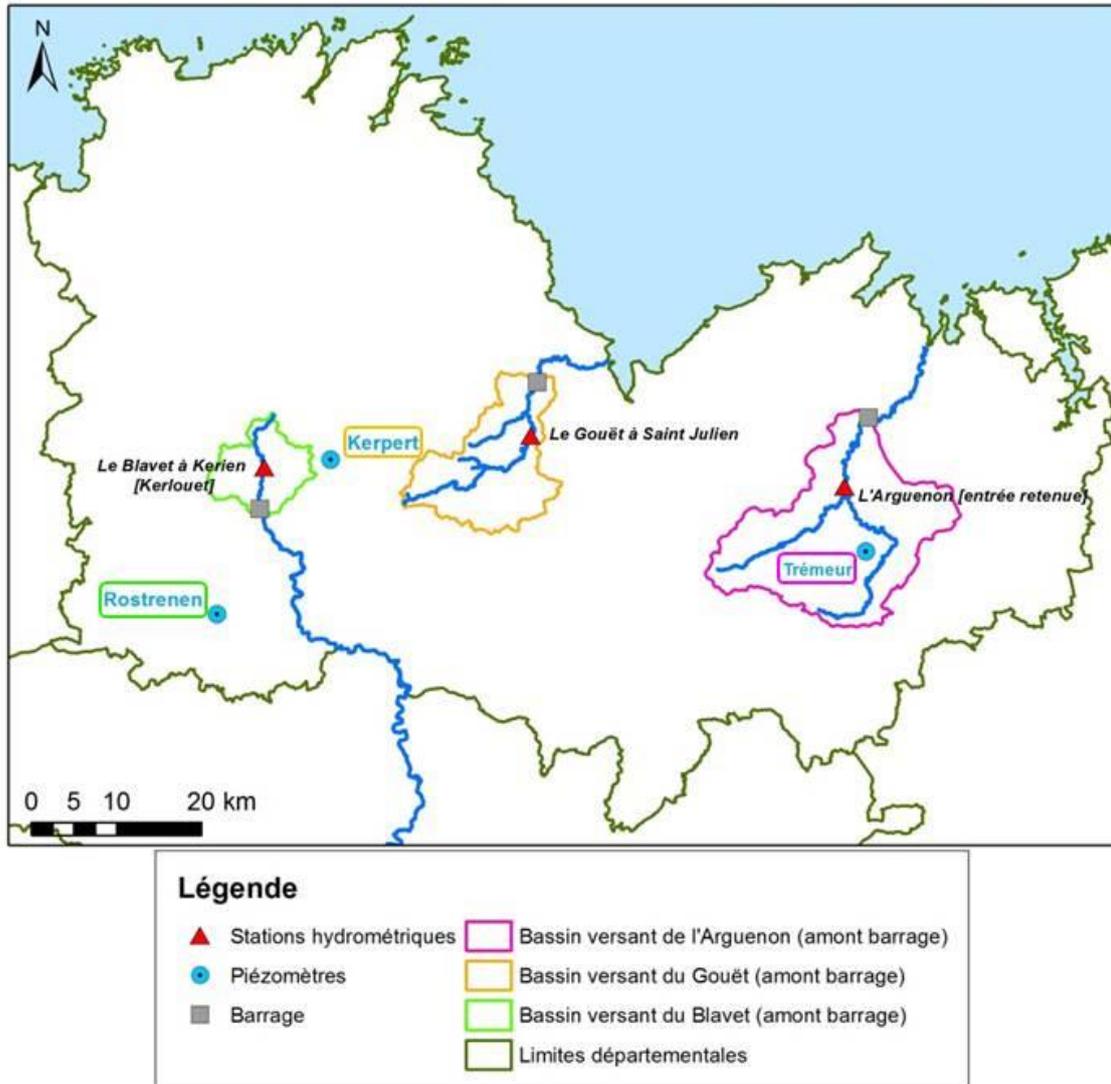


Illustration 73 : Localisation des piézomètres de référence et des stations de jaugeage représentatives retenus pour chaque bassin versant

Des indicateurs piézométriques ont été calculés par analyse fréquentielle mensuelle des niveaux piézométriques et ont permis de déterminer plusieurs seuils (Illustration 74) : de période de retour quinquennale sèche (seuil de vigilance), décennale sèche (seuil d'alerte) et quinze ans secs (seuil de crise). Ces seuils peuvent être utilisés à toute période de l'année par le CG 22 et le SDAEP et constituer une pré-alerte pour identifier une situation critique à venir pour la gestion des ressources en eau. Comme indiqué précédemment (cf. chapitre 5.2.4), l'incertitude associée aux calculs est importante et ces seuils ne peuvent en aucun cas être utilisés en vue d'établir des arrêtés sécheresse. Se pose également la question de la pertinence du seuil 10 ans sec, très proche du seuil 15 ans sec.

| Bassin versant | Station hydrométrique représentative      | Piézomètre indicateur     | Seuils     | Seuils piézométriques (m NGF) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Incertitude (m NGF) |
|----------------|---|---------------------------|------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
|                |   |                           |            | J                             | F      | M      | A      | M      | J      | J      | A      | S      | O      | N      | D      |                     |
| Gouët          | Le Gouët à Saint Julien<br>J1513010       | Kerpert<br>02782X0047/PZ  | 5 ans sec  | 277.92                        | 277.69 | 277.42 | 277.19 | 277.03 | 276.87 | 276.76 | 276.62 | 276.53 | 276.5  | 276.77 | 277.55 | 0.4                 |
|                |   |                           | 10 ans sec | 277.48                        | 277.58 | 277.34 | 277.07 | 276.95 | 276.81 | 276.69 | 276.57 | 276.49 | 276.43 | 276.54 | 277.31 |                     |
|                |   |                           | 15 ans sec | 277.43                        | 277.54 | 277.3  | 277.04 | 276.93 | 276.79 | 276.67 | 276.56 | 276.48 | 276.4  | 276.36 | 277.21 |                     |
| Arguenon       | L'Arguenon en entrée de retenue           | Trémeur<br>02803X0036/PZ  | 5 ans sec  | 66.91                         | 67     | 67.04  | 66.66  | 66.5   | 66.19  | 65.87  | 65.55  | 65.26  | 65.24  | 65.52  | 66.48  | 0.35                |
|                |   |                           | 10 ans sec | 66.7                          | 66.81  | 66.88  | 66.57  | 66.39  | 66.02  | 65.66  | 65.38  | 65.08  | 64.94  | 65.22  | 66.19  |                     |
|                |   |                           | 15 ans sec | 66.44                         | 66.76  | 66.82  | 66.55  | 66.29  | 65.91  | 65.58  | 65.3   | 64.99  | 64.86  | 64.97  | 65.89  |                     |
| Blavet         | Le Blavet à Kerien [Kerlouet]<br>J5202110 | Rostrenen<br>03124X0088/F | 5 ans sec  | 239.85                        | 242.16 | 241.8  | 241.01 | 240.2  | 239.27 | 238.08 | 237.31 | 236.6  | 236.04 | 236.15 | 237.56 | 1.4                 |
|                |   |                           | 10 ans sec | 238.16                        | 241.49 | 241    | 239.72 | 239.55 | 238.63 | 237.7  | 236.93 | 236.31 | 235.86 | 235.75 | 236.49 |                     |
|                |   |                           | 15 ans sec | 238.02                        | 238.53 | 240.4  | 239.37 | 239    | 238.47 | 237.56 | 236.8  | 236.17 | 235.77 | 235.64 | 236.06 |                     |

Illustration 74 : Tableau récapitulatif des seuils de gestion estimés pour chaque piézomètre de référence

Les corrélations débits des rivières / niveaux piézométriques (Gouët-Kerpert, Arguenon-Trémeur et Blavet-Rostrenen) ont été représentées via diverses courbes (abaques).

Ces courbes peuvent être utilisées de deux manières :

- En prévision (estimation du débit de basses eaux le plus critique) : connaissant ces corrélations et les valeurs des décroissances piézométriques, il est possible d'estimer un débit d'étiage à partir d'un débit de hautes eaux. Par exemple : quel pourrait être le débit du Gouët au 1<sup>er</sup> juillet sachant qu'au 1<sup>er</sup> mars il est de 4 m<sup>3</sup>/s ? (Illustration 61)
- En remontant le temps (estimation d'un débit hautes eaux et d'une cote piézométrique d'alerte pour garantir le débit d'étiage de chaque cours d'eau) : connaissant le débit minimum à respecter à l'étiage, quel devrait être le débit en hautes eaux pour assurer cet étiage et à quelle cote piézométrique ce débit est-il associé ? (Illustration 72)

## 6. Conclusion

Le projet « Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor » avait pour objectif de produire des indicateurs piézométriques utilisables par le CG 22 pour améliorer la gestion de ses 3 principales retenues destinées à l'alimentation en eau potable du département (barrages sur les rivières de l'Arguenon, du Gouët et du Blavet). Le département souhaite disposer d'outils permettant d'anticiper le remplissage des retenues, afin d'assurer la distribution d'eau à l'étiage.

La définition d'indicateurs en milieu de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans constituait un test méthodologique.

L'étude du contexte hydrogéologique des 3 bassins versants étudiés (bassins en amont des retenues) et des 13 piézomètres associés a permis de sélectionner 2 à 3 piézomètres représentatifs des bassins versants (3 pour l'Arguenon [piézomètres de Quinténic, Trémeur et Pleurtuit], 3 pour le Gouët [Goudelin, Bréhand et Kerpert] et 2 pour le Blavet [Rostrenen et Kerpert]) puis de caractériser la dynamique et l'inertie des nappes associées aux piézomètres.

Compte-tenu de la présence de 3 stations hydrométriques sur l'Arguenon, 2 sur le Gouët, 3 sur le Blavet, c'est un total de 21 modélisations globales pluie - niveau piézométrique - débit des rivières qui ont été réalisées avec le logiciel GARDENIA<sup>®</sup>. Ces modélisations ont servi :

- à reconstituer les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes sur la période 1994-2012,
- à analyser la représentativité des piézomètres,
- à examiner la corrélation des niveaux piézométriques et des débits des rivières (en particulier à l'étiage),
- et à approcher les participations annuelles et mensuelles des eaux souterraines aux débits des rivières.

Pour chaque bassin versant, un seul piézomètre de référence a été retenu, associé à la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel du bassin :

- bassin versant du Gouët : piézomètre de Kerpert (02782X0047/PZ), associé à la station hydrométrique du Gouët à Saint Julien (J1513010),
- bassin versant de l'Arguenon : piézomètre de Trémeur (02803X0036/PZ), associé à la station hydrométrique de l'Arguenon en entrée de retenue,
- bassin versant du Blavet : piézomètre de Rostrenen (03124X0088/F), associé à la station hydrométrique du Blavet à Kerien [Kerlouet] (J5202110).

Les chroniques de ces 3 piézomètres ont ensuite été étendues grâce à des corrélations avec des piézomètres plus anciens existant dans les départements voisins (Morbihan et Finistère, suivis piézométriques existants depuis les années 1980-90). Des indicateurs piézométriques ont été calculés par analyse fréquentielle mensuelle des niveaux piézométriques (détermination des fréquences de dépassement d'un certain niveau). Plusieurs seuils ont été obtenus : de période de retour quinquennale sèche (seuil de vigilance), décennale sèche (seuil d'alerte) et quinze ans secs (seuil de crise). La corrélation avec des piézomètres plus anciens a permis d'approcher des périodes de retour 10 et 15 ans sec et pas seulement une période de retour 5 ans sec, compte tenu des courtes durées des chroniques piézométriques disponibles sur le département des Côtes d'Armor. Les incertitudes associées à ces seuils sont importantes et

ces seuils ne peuvent en aucun cas être utilisés en vue d'établir des arrêtés sécheresse. Compte-tenu des relations nappes-rivières sur les 3 bassins, ces seuils permettent d'identifier le degré de criticité de la gestion des ressources en eau au cours de l'année.

Les corrélations débits des rivières / niveaux piézométriques (Gouët-Kerpert, Arguenon-Trémeur et Blavet-Rostrenen) ont été approfondies et représentées via diverses courbes de corrélation. Connaissant ces corrélations et les valeurs des décroissances piézométriques, il est possible d'estimer un débit d'étiage à partir d'un débit de hautes eaux (exemple : quel pourrait être le débit du Gouët au 1<sup>er</sup> juillet sachant qu'au 1<sup>er</sup> mars il est de 4 m<sup>3</sup>/s ?). L'autre usage de ces courbes se fait « en remontant le temps » : connaissant le débit minimum à respecter à l'étiage, quel devrait être le débit en hautes eaux pour assurer cet étiage et à quelle cote piézométrique ce débit est-il associé ?

Le test méthodologique de recherche d'indicateurs piézométriques, en milieu de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans, semble donc assez concluant. Néanmoins, ces indicateurs devront être ajustés lorsque les chroniques piézométriques seront plus longues (durée supérieure à au moins 15 ans).

Comme une méthodologie de travail a été validée dans le cadre de cette étude, un projet similaire serait réalisable pour les autres prises d'eau AEP superficielles et souterraines du département.

Pour chacun des bassins versants étudiés, un modèle Gardénia pluie - niveau piézométrique - débit de la rivière a été calé. En fonction des besoins du département (appui aux problèmes d'inondation et gestion des étiages), il est envisageable de faire fonctionner ces modèles en mode prévision des débits de cours d'eau et des niveaux de nappe. Par exemple, en actualisant les modèles avec les données de l'année en cours, il est possible de faire dès le printemps une prédiction des débits à l'étiage selon plusieurs scénarii de pluie.

## 7. Bibliographie

- MOUGIN B., ALLIER D., BLANCHIN R., CARN A., COURTOIS N., GATEAU C., PUTOT E., collaboration JEGOU J-P., LACHASSAGNE P., STOLLSTEINER P. et WYNS R. (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR - 129 p., 37 ill., 7 ann. dont 2 planches.
- MOUGIN B., collaboration : JEGOU J-P. (2008) - SILURES Suivi - Gestion du réseau de surveillance piézométrique régional de Bretagne - Valorisation des données des 52 piézomètres et annuaire 2008 - Rapport final - BRGM/RP-56914-FR - 73 p., 26 ill., 2 ann.
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles . Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290.
- PINSON S., ALLIER D., STOLLSTEINER P., MARDHEL V., WUILLEUMIER A. (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes.
- ROSENBROCK H.H. (1960) - An automatic method for finding the greatest or the least value of a fonction. Computer journal 3.3., p. 175-184, Oct. 1960.
- SEGUIN J.J., décembre 2009- Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes - Orientations méthodologiques. Rapport BRGM/RP-58139-FR, 115 p., 113 fig.
- STOLLSTEINER P. avec la collaboration de WUILLEUMIER A., BESSIERE H., SEGUIN J.J. (2011) – Guide pour la détermination des indicateurs piézométriques en vue d'une gestion quantitative de la ressource. Rapport final BRGM/RP-61374-FR.
- STOLLSTEINER P. (2013) – Connaissance des ressources disponibles sur l'ensemble des bassins versants crayeux. Bassin Seine-Normandie en Champagne-Ardenne. Rapport final. BRGM/RP-61371-FR, 157 pages, 98 illustrations (figures et tableaux) et 3 annexes, CD.
- THIERY.D. (2003) - Logiciel GARDENIA. version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p.
- THIERY.D. (2014) - Logiciel GARDENIA. version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport final BRGM/RP-62787-FR, 116 p., 2 ann.
- WYNS, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.
- WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France, t. 175, n°1, pp. 21-34.



## **Annexe 1**

### **Analyse préalable des piézomètres**

| Informations générales |                |             |           |           |   |                  |   |             |  |  |                           |                          |                                   |                                 |                                   | Critères de pérennité du point  |  |  |                              |   |   |  |  |   |               |                                      |     |       |   |   |
|------------------------|----------------|-------------|-----------|-----------|---|------------------|---|-------------|--|--|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|--|------------------------------|---|---|--|--|---|---------------|--------------------------------------|-----|-------|---|---|
| CODE BSS               | COMMUNE        | Département | X (m) L2E | Y (m) L2E | Libre : L<br>Captif : C<br>Semi Captif : SC | Code masse d'eau | Point unique sur la masse d'eau<br>oui<br>non | Code entité | Influence des mesures par pompages<br>Faible<br>Moyenne<br>Forte | Type d'influence<br>Annuelle<br>Saisonnnière | Date de début des mesures | Réseau DCE<br>oui<br>non | Réseau BSH National<br>oui<br>non | Réseau BSH Bassin<br>oui<br>non | Réseau BSH Régional<br>oui<br>non | Réseau sécheresse<br>oui<br>non | Etat général de l'ouvrage                    |  |                              | Environnement de l'ouvrage                          |   | Aspect foncier   |  |   |               |                                      |     |       | Risque pour les personnes<br>oui<br>non | Pérennité de l'ouvrage<br>Forte<br>Moyenne<br>Faible<br>Très faible |
|                        |                |             |           |           |   |                  |   |             |  |  |                           |                          |                                   |                                 |                                   |                                 | Etat de l'ouvrage<br>Bon<br>Moyen<br>Mauvais | Etat et protection de la tête de l'ouvrage/Protection du matériel<br>Bon<br>Moyen<br>Mauvais | Risque d'assec<br>Non<br>Oui | Contexte environnemental<br>Bon<br>Moyen<br>Mauvais | Risque de détérioration ou de vandalisme<br>Faible<br>Moyen<br>Fort, répété | Accessibilité<br>Bonne<br>Moyenne<br>Mauvaise  | Propriétaire parcelle<br>Public<br>Privé | Propriétaire ouvrage<br>Public<br>Privé | Type d'accord |                                      |     | Loyer |   |   |
|                        |                |             |           |           |   |                  |   |             |  |  |                           |                          |                                   |                                 |                                   |                                 |  |  |                              |   |   | Bail emphytéotique<br>Convention avec servitudes<br>Convention sans servitudes<br>Accord écrit | Détail                                   |   | Oui<br>Non    |                                      |     |       |   |   |
| 02794X0063/PZ          | Bréhand        | 22          | 234607    | 2390480   | L   | 4009             | non   | 618x        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Privé                                    | Public                                  | Accord écrit  | Contrat de Bail                      | oui | non   | Forte                                   |   |
| 02047X0072/FZ          | Gouelin        | 22          | 204486    | 2414428   | L   | 4039             | non   | 617d        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Concession de voirie                 | oui | non   | Forte                                   |   |
| 02782X0047/PZ          | Kerpert        | 22          | 194186    | 2392568   | L   | 4039             | non   | 629a        | Faible   |  | 2003                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Privé                                    | Public                                  | Accord écrit  | Contrat de Bail                      | oui | non   | Forte                                   |   |
| 02413X0065/FZ          | Louargat       | 22          | 178452    | 2410105   | L   | 4058             | oui   | 617d        | Faible   |  | 2003                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Autorisation d'Occupation Temporaire | non | non   | Forte                                   |   |
| 03152X0027/F           | Merdrignac     | 22          | 246520    | 2365818   | L   | 4015             | non   | 616b        | Moyenne  | Saisonnnière                                 | 2004                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Autorisation d'Occupation Temporaire | non | non   | Forte                                   |   |
| 02796X0044/FZ          | Ploguenast     | 22          | 222544    | 2375131   | L   | 4015             | non   | 616m        | Faible   |  | 2003                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Autorisation d'Occupation Temporaire | non | non   | Forte                                   |   |
| 02034X0082/PZ          | Pommerit-Jaudy | 22          | 189244    | 2430486   | L   | 4040             | oui   | 617x        | Faible   |  | 2003                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Privé                                    | Public                                  | Accord écrit  | Contrat de Bail                      | oui | non   | Forte                                   |   |
| 02442X0111/F           | Quintenic      | 22          | 248863    | 2402089   | L   | 4013             | non   | 618x        | Faible   |  | 2004                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Contrat de Bail                      | oui | non   | Forte                                   |   |
| 02812X0238/PZ          | Quiou(Le)      | 22          | 277977    | 2380547   | L   | 4014             | non   | 585a        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Privé                                    | Public                                  | Accord écrit  | Contrat de Bail                      | oui | non   | Forte                                   |   |
| 03124X0088/F           | Rostrenen      | 22          | 181000    | 2374180   | L   | 4010             | non   | 636a        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Convention Météo France - BRGM       | non | non   | Forte                                   |   |
| 02803X0036/PZ          | Trémeur        | 22          | 257343    | 2382227   | L   | 4013             | non   | 618y        | Faible   |  | 2003                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Autorisation d'Occupation Temporaire | non | non   | Forte                                   |   |
| 02431X0106/F           | Trémuson       | 22          | 216864    | 2405606   | L   | 4009             | non   | 617d        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Convention de servitudes             | non | non   | Forte                                   |   |
| 02451X0023/F           | Pleurtuit      | 35          | 274385    | 2408202   | L   | 4014             | non   | 618b        | Faible   |  | 2005                      | oui                      | non                               | non                             | non                               | non                             | Bon  | Bon  | non                          | Bon   | Faible  | Bonne  | Public                                   | Public                                  | Accord écrit  | Convention de servitudes             | oui | non   | Forte                                   |   |

Illustration A1.1 : Pérennité des piézomètres

| Code BSS      | Commune        | Bassin versant             | Masse d'eau souterraine | Altitude (m NGF) | Profondeur (m) | Géologie             | Epaisseur d'altération (m) | Hauteur fissurée (m) | Zone captée (prof. en m) | Niveau capté     | Productivité zone captée (m³/h) | Battement moyen (m) | Cote NGF moyenne (m NGF) | Cote NGF minimale (m NGF) | Cote NGF maximale (m NGF) | Qfissuré utile SILURES (m3/h) | Epaisseur fissurée utile SILURES (m) | Inertie régionale BV SILURES | Piézo tamponné / réactif | Talonnage en hautes eaux | Cycles (annuels / pluriannuels) | Profondeur des arrivées d'eau | Dénoyage arrivées d'eau |
|---------------|----------------|----------------------------|-------------------------|------------------|----------------|----------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 02794X0063/PZ | BREHAND        | Le Gouessant               | Golfe de St Brieuc      | 69               | 24             | Schistes et grès     | 7                          | 6                    | 16 à 24                  | fissuré          | 2.77                            | 2.29                | 68.15                    | 65.66                     | 69.23                     | 19.38                         | 42                                   | très faible                  | mitigé                   | OUI (69 m NGF)           | annuel+ pluriannuel             | 8m, 15m et 26.5m              | non                     |
| 02047X0072/PZ | GOUDELIN       | Le Leff                    | Trieux-Leff             | 85               | 30             | Volcanique           | 16                         | 6                    | 14 à 22                  | altéré + fissuré | 2.02                            | 4.14                | 78.03                    | 75.09                     | 82.64                     | 15.83                         | 47                                   | forte                        | tamponné                 | non                      | annuel                          | 28m et 29m                    | non                     |
| 02782X0047/PZ | KERPAPT        | Le Trieux                  | Trieux-Leff             | 283              | 31             | Granite              | 13                         | 18                   | 11 à 31                  | altéré + fissuré | 5.04                            | 2.9                 | 277.49                   | 276.32                    | 280.08                    | 8.43                          | 30.1                                 | moyenne                      | réactif                  | non                      | annuel                          | 8m, 13m et 21m                | non                     |
| 02413X0065/PZ | LOUARGAT       | Le Léguer                  | Baie de Lannion         | 151              | 31             | Micaschistes         | 10                         | 12                   | 19 à 31                  | fissuré          | 3.28                            | 2.27                | 147.14                   | 145.42                    | 148.94                    | 11.91                         | 43.56                                | faible                       | mitigé                   | non                      | annuel+ pluriannuel             | 9m, 12m et 25m                | non                     |
| 03152X0027/F  | MERDRIGNAC     | L'Yvel                     | Vilaine                 | 152              | 37             | Schistes briovériens | 9                          | 6                    | 16 à 37                  | fissuré          | 1.67                            | 4.73                | 146.95                   | 143.2                     | 151.03                    | 11.72                         | 42                                   | très faible                  | tamponné                 | non                      | annuel+ pluriannuel             | 11.5m, 23m et 33m             | non                     |
| 02796X0044/PZ | PLOGUENAST     | Le Lié                     | Vilaine                 | 240              | 34             | Micaschistes         | 16                         | 18                   | 14 à 34                  | altéré + fissuré | 5.66                            | 3.72                | 238.04                   | 232.8                     | 239.62                    | 20.08                         | 63.85                                | faible                       | tamponné                 | OUI (239.5 m NGF)        | annuel+ pluriannuel             | 17m et 31m                    | non                     |
| 02034X0082/PZ | POMMERIT-JAUDY | Le Jaudy                   | Guindy-Jaudy-Bizien     | 53               | 31             | Schistes et grès     | 0.5                        | 20                   | 11 à 31                  | fissuré          | 6.86                            | 2.34                | 48.63                    | 46.33                     | 50.1                      | 6.75                          | 19.69                                | -                            | réactif                  | non                      | annuel+ pluriannuel             | 8m, 12m et 23m                | non                     |
| 02442X0111/F  | QUINTENIC      | Rivières côtières          | Arguenon                | 63               | 31             | Schistes briovériens | 5.5                        | 16                   | 15 à 31                  | fissuré          | 7.38                            | 3.6                 | 61.47                    | 56.85                     | 63.33                     | 19.38                         | 42                                   | -                            | tamponné                 | OUI (63 m NGF)           | annuel+ pluriannuel             | 9m, et de 13 à 31m            | non                     |
| 02812X0238/PZ | LE QUIOU       | La Rance                   | Rance-Frémur            | 21               | 28.5           | Faluns               | -                          | -                    | 8 à 28.5                 | -                | -                               | 0.56                | 19.69                    | 19.21                     | 20.36                     | -                             | -                                    | -                            | mitigé                   | non                      | annuel                          | 3m, 8m, 17m et 26m            | non                     |
| 03124X0088/F  | ROSTRENE       | Le Canal de Nantes à Brest | Blavet                  | 259              | 28             | Granite              | 10                         | 12                   | 16 à 28                  | fissuré          | 3.14                            | 9.82                | 240.55                   | 235.28                    | 246.88                    | 12.28                         | 47                                   | très faible                  | réactif                  | non                      | annuel                          | 13m et 26m                    | OUI                     |
| 02803X0036/PZ | TREMEUR        | L'Arguenon                 | Arguenon                | 68               | 32             | Schistes briovériens | 0                          | 20                   | 12 à 32                  | fissuré          | 12.08                           | 2.04                | 66.37                    | 64.61                     | 67.56                     | 21.75                         | 36                                   | -                            | mitigé                   | non                      | annuel                          | 25m et 29m                    | non                     |
| 02431X0106/F  | TREMUSON       | L'lc                       | Golfe de St Brieuc      | 140              | 28             | Gneiss               | 7                          | 12                   | 16 à 28                  | fissuré          | 4.04                            | 2.23                | 137.41                   | 136.11                    | 139.35                    | 15.83                         | 47                                   | -                            | réactif                  | non                      | annuel                          | 7m et de 16 à 28m             | non                     |
| 02451X0023/F  | PLEURTUIT      | La Rance                   | Rance-Frémur            | 57               | 28             | Gneiss               | 11                         | 12                   | 16 à 28                  | fissuré          | 3.99                            | 1.65                | 55.37                    | 54.41                     | 55.37                     | 17.62                         | 53                                   | -                            | réactif                  | non                      | annuel                          | 3m et 22m                     | non                     |

Illustration A1.2 : Caractéristiques des piézomètres

## **Annexe 2**

### **Liens vers les fiches BSS Eau des 13 piézomètres étudiés**



| Code BSS      | Libellé   | Commune        | Lien BSS Eau  |
|---------------|---|----------------|---|
| 02794X0063/PZ | Piézomètre des PORTES CARGOUËT (Bréhand - 22)   | Brehand        | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02794X0063/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02794X0063/PZ</a> |
| 02047X0072/PZ | Piézomètre du RESTOU (Goudelin - 22)            | Goudelin       | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02047X0072/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02047X0072/PZ</a> |
| 02782X0047/PZ | Piézomètre de COLDEVENNEC (Kerpert -22)         | Kerpert        | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02782X0047/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02782X0047/PZ</a> |
| 02413X0065/PZ | Piézomètre de KERBOLL (Louargat -22)            | Louargat       | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02413X0065/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02413X0065/PZ</a> |
| 03152X0027/F  | Piézomètre de LA PEIGNIE (Merdrignac - 22)      | Merdrignac     | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=03152X0027/F">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=03152X0027/F</a>   |
| 02796X0044/PZ | Piézomètre de LA HUTTE CHARLES (Plouguenast-22) | Plouguenast    | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02796X0044/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02796X0044/PZ</a> |
| 02034X0082/PZ | Piézomètre de BELLEVUE (Pommerit-Jaudy -22)     | Pommerit-Jaudy | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02034X0082/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02034X0082/PZ</a> |
| 02442X0111/F  | Piézomètre de la VALLEE (Quintenic - 22)        | Quintenic      | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02442X0111/F">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02442X0111/F</a>   |
| 02812X0238/PZ | Piézomètre du GUEMAIN (Le Quiou - 22)           | Quiou (Le)     | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02812X0238/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02812X0238/PZ</a> |
| 03124X0088/F  | Piézomètre du MINIQU (Rostrenen - 22)           | Rostrenen      | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=03124X0088/F">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=03124X0088/F</a>   |
| 02803X0036/PZ | Piézomètre de la ZONE ARTISANALE (Trémur -22)   | Tremur         | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02803X0036/PZ">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02803X0036/PZ</a> |
| 02431X0106/F  | Piézomètre de l'AERODROME (Trémuson - 22)       | Tremuson       | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02431X0106/F">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02431X0106/F</a>   |
| 02451X0023/F  | Piézomètre de l'AEROPORT (Pleuruit - 35)        | Pleuruit       | <a href="http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02451X0023/F">http://fichebsseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=02451X0023/F</a>   |



## **Annexe 3**

### **Fiches détaillées des stations hydrométriques (source : Banque HYDRO)**





### L'ARGUENON à JUGON-LES-LACS

Code station : J1103010 Bassin versant : 104 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22 Altitude : 31 m Bassin-versant topographique : 104 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 03/01/1972 12:00 Mise hors service :  
 Type : station à une échelle Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : pas ou faiblement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 03/01/1972 12:00 au X = 254343 m Y = 2388480 m

Date & Evénement :

Station remplacée : néant Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO  Validés douteux  Provisoires  Validés bons  Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO  Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



### LA ROSETTE à MEGRIT

Code station : J1114010      Bassin versant : 102 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne      E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22      Altitude : 40 m      Bassin-versant topographique : 102 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 01/03/1973 12:00      Mise hors service :  
 Type : station à une échelle      Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : pas ou faiblement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 01/03/1973 12:00 au      X = 260376 m      Y = 2383896 m

Date & Evènement :

Station remplacée : néant      Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO       Validés douteux       Provisoires       Validés bons       Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO       Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      | XXX  |      |      | XXX  | XXX  | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



### LE GOUET à SAINT-JULIEN

Code station : J1513010      Bassin versant : 138 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne      E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22      Altitude : 100 m      Bassin-versant topographique : 138 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 31/03/1978 12:00      Mise hors service :  
 Type : station à une échelle      Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : pas ou faiblement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 31/03/1978 12:00 au      X = 217705 m      Y = 2395662 m

Date & Evénement :

Station remplacée : néant      Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO       Validés douteux       Provisoires       Validés bons       Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO       Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      | XXX  | XXX  | XXX  | XXX  | XXX  | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



### LE GOUET à PLOUFRAGAN [SAINT-BARTHELEMY]

Code station : J1523020 Bassin versant : 194 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22 Altitude : 80 m Bassin-versant topographique : 194 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 01/12/1978 12:00 Mise hors service :  
 Type : station à une échelle Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : fortement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 01/12/1978 12:00 au X = 218615 m Y = 2402689 m

Date & Evénement :

Station remplacée : néant Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO  Validés douteux  Provisoires  Validés bons  Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO  Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      | XXX  | XXX  |      |      | XXX  |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



### LE BLAVET à KERIEN [KERLOUET]

Code station : J5202110 Bassin versant : 20.6 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22 Altitude : 220 m Bassin-versant topographique : 20.6 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 01/10/1980 12:00 Mise hors service :  
 Type : station à une échelle Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : pas ou faiblement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 01/10/1980 12:00 au X = 186424 m Y = 2391682 m

Date & Événement :

Station remplacée : néant Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO  Validés douteux  Provisoires  Validés bons  Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO  Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs | XXX  |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |



### LE BLAVET à LANRIVAIN [PONT D 87]

Code station : J5212120      Bassin versant : 92 km<sup>2</sup>

Producteur : DREAL Bretagne      E-mail : olivier.nauleau@developpement-durable.gouv.fr

Département : 22      Altitude : 240 m      Bassin-versant topographique : 92 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 01/01/1993 00:00      Mise hors service :  
 Type : station à une échelle      Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : fortement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 01/01/1993 00:00 au      X = 186237 m      Y = 2386178 m

Date & Evénement :

Station remplacée : néant      Station de remplacement : néant

Données constituées à partir de :

Producteur associé : CG Côtes d'Armor

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO       Validés douteux       Provisoires       Validés bons       Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO       Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



### LE BLAVET à MUR-DE-BRETAGNE [GUERLEDAN]

Code station : J5412110 Bassin versant : 620 km<sup>2</sup>

Producteur : EDF E-mail : DTG-DEMANDE-DONNEES-HYDRO@edf.fr

Département : 22 Altitude : 82 m Bassin-versant topographique : 620 Km<sup>2</sup>  
 Mise en service le : 01/01/1931 12:00 Mise hors service :  
 Type : station à une échelle Statut : station avec signification hydrologique  
 Régime : pas ou faiblement

Coordonnées : LAMBERT II étendu  
 du 01/01/1931 12:00 au X = 202049 m Y = 2368156 m

**Commentaires :**  
 LES VALEURS PUBLIEES REPRESENTENT LES DEBITS NATURELS RECONSTITUES DU BLAVET A GUERLEDAN. POINT DE MESURE RATTACHE AU RESEAU HYDROMETRIQUE NATIONAL DE BASE.

**Date & Evénement :**

Station remplacée : néant Station de remplacement : néant  
 Données constituées à partir de :  
 Producteur associé :

#### Données disponibles

Légende :

Débits :

Inconnus dans HYDRO  Validés douteux  Provisoires  Validés bons  Invalidés

Hauteurs :

Inconnus dans HYDRO  Disponibles

| Années   | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| Années   | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Débits   |      |      |      |      |      |      | XXX  |      |      |      |      |
| Hauteurs |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



## **Annexe 4**

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



## 1. Période de retour

La période de retour  $T_p$  de l'évènement  $X \geq x_p$  est le **temps moyen** qui sépare deux occurrences successives de cet évènement. Sur un intervalle de temps  $T$ , il y a donc, en moyenne, un évènement d'intensité supérieur ou égale à  $x_p$ .

La période de retour est une notion probabiliste. On démontre que :

$$E[T_p] = \frac{1}{\text{Pr ob}(X \geq x_p)}$$

La définition classiquement donnée est, pour un pas de temps régulier de une unité dans la série ( $\Delta t = 1$  année par exemple) :

$$T_p = \frac{1}{1 - F(x_p)} = \frac{1}{1 - p}$$

où  $F(x)$  est la probabilité  $p$  de non dépassement de la valeur  $x_p$ .

$$F(x_p) = P(X \leq x_p) = p$$

Pour un pas de temps  $\Delta t$  de la série étudiée, la période de retour est définie par :

$$T = \frac{\Delta t}{1 - F(x_p)}$$

Un évènement de fréquence théorique de non dépassement  $p=0.8$  a une période de retour de 5 ans : il sera, en moyenne sur une longue période, atteint ou dépassé 1 fois tous les 5 ans.

Un évènement de fréquence théorique de non dépassement  $p=0.2$  a une période de retour de 1.25 ans : il sera, en moyenne sur une longue période, atteint ou dépassé 8 fois tous les 10 ans ou 4 fois tous les 5 ans.

Quelques valeurs :

|   |        |      |      |     |     |     |      |      |       |
|---|--------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-------|
| probabilité de non dépassement $p$<br>(fréquence théorique) | 0.1    | 0.2  | 0.4  | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.9  | 0.95 | 0.99  |
| Période de retour $T$<br>(année)                            | 1.11   | 1.25 | 1.67 | 2   | 2.5 | 5   | 10   | 20   | 100   |
| Dépassement<br>(année)                                      | 9 / 10 | 4/5  | 3/5  | 1/2 | 2/5 | 1/5 | 1/10 | 1/20 | 1/100 |

Par exemple, le "quinquennal sec" correspond à une probabilité de non dépassement de 0.2 (et non de 0.8) ; l'évènement est dépassé en moyenne 4 années sur 5.

Remarque : la période de retour, est une notion commode, car elle permet de passer d'une probabilité à un temps, mais elle est ambiguë car elle **ne fait référence à aucune notion de régularité ou de périodicité**.

#### Conditions d'application

La notion de période de retour étant de nature probabiliste, les séries traitées (les 12 mois) doivent donc respecter les hypothèses classiques :

- de stationnarité de la série étudiée (pas de tendance significative à la hausse ou à la baisse),
- d'indépendance des valeurs successives de la série (pas d'autocorrélation),
- d'homogénéité (pas de rupture significative par exemple).

#### Exemple d'application erronée de la période de retour

Piézomètre 03593X0055 captant la nappe du Cénomani (commune de Bouloire, 72)  
Les niveaux sont fortement autocorrélés (cf. diagrammes ACF de la figure A1).

**Le niveau 84.5 m dont la "période de retour" déterminée à partir de la courbe de fréquence cumulée serait de "5 ans humide", est dépassé en réalité 4 fois en 4 ans, de 2001 à 2004.**

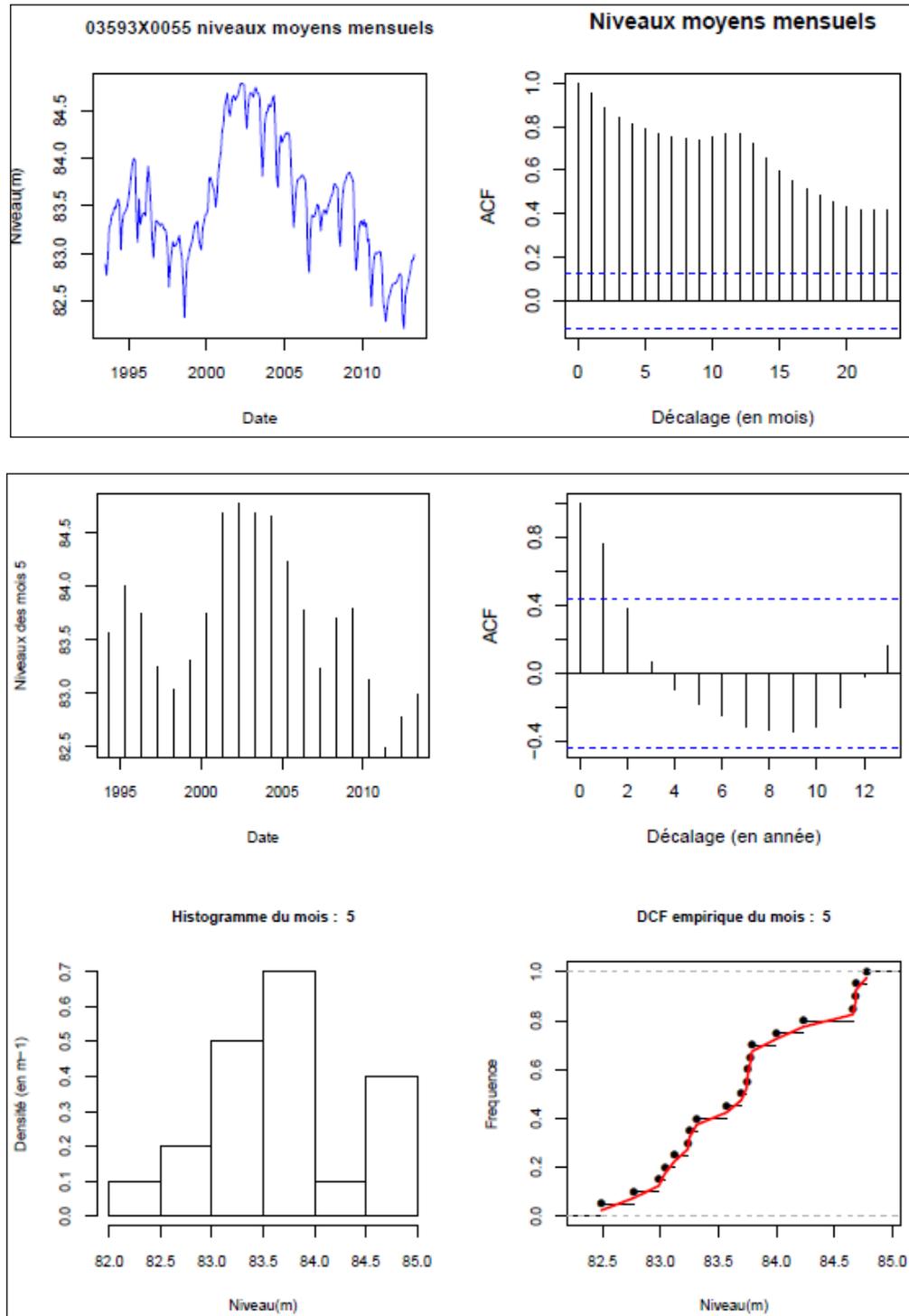
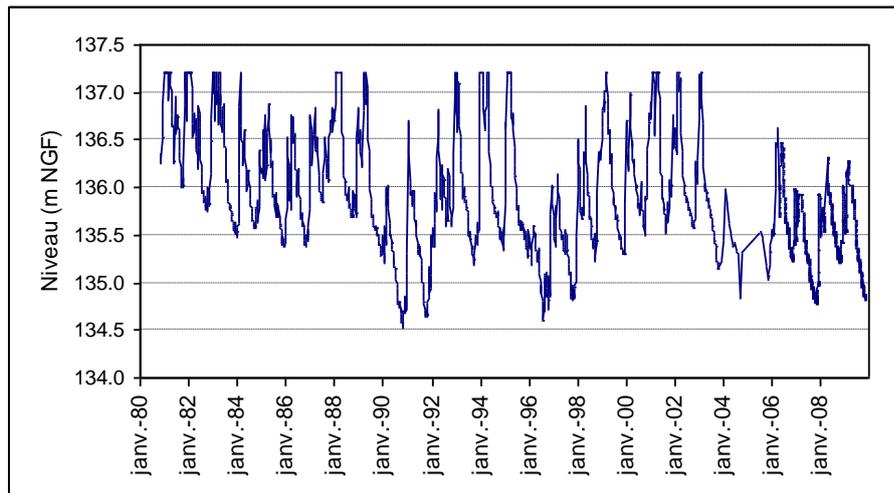


Illustration A1 - Analyse des niveaux des mois de mai du piézomètre de Bouloire (72) captant la nappe du Cénomanién

### Autre 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 décadales 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 décadales

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

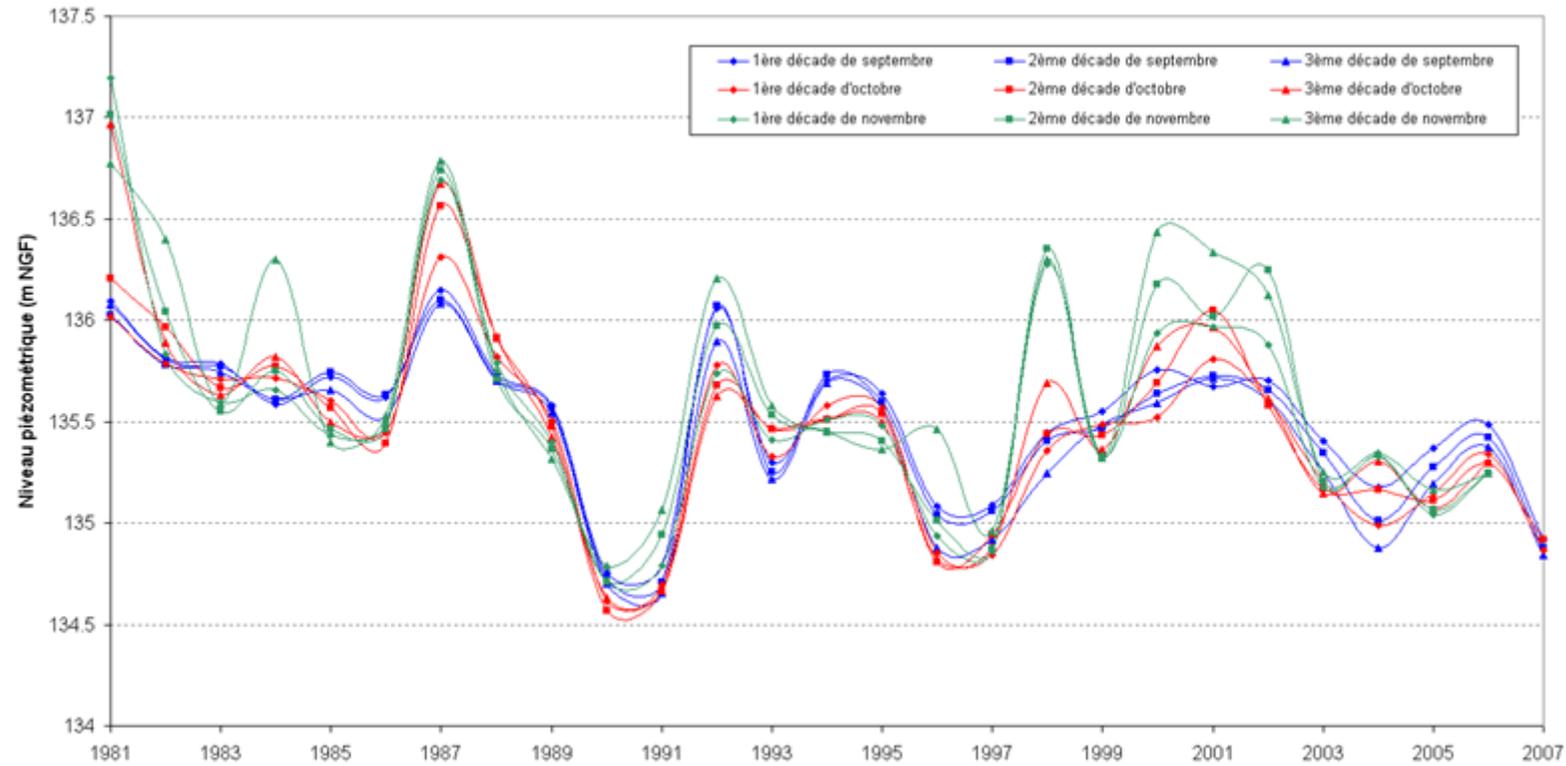


Illustration A3 - Séries des niveaux piézométriques moyens décadaires en période d'étiage, de 1981 à 2007  
(piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache)



La distribution cumulée des fréquences pour la 3<sup>ème</sup> décennie de Novembre est présentée par l'illustration A3.

Il faut préalablement vérifier que la série constituée de ces valeurs décennales ne présente pas d'autocorrélation.

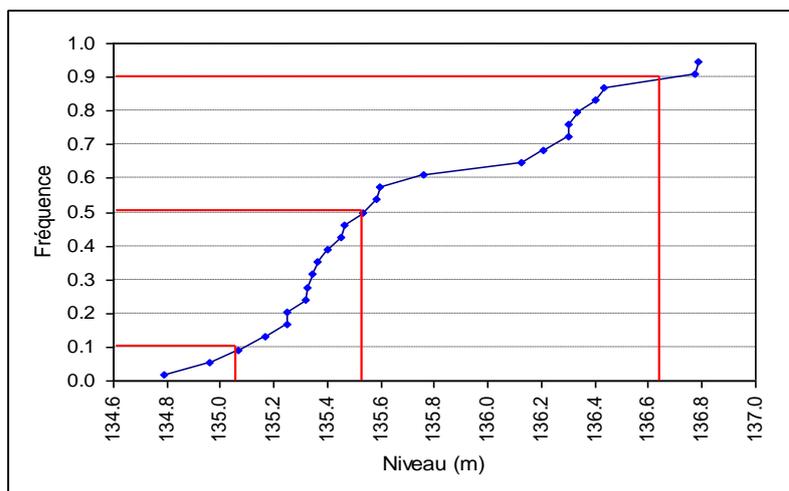


Illustration A3 - Courbe de fréquence cumulée des niveaux du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour la 3<sup>ème</sup> décennie de novembre

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

## 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.

#### **4.1. 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).

#### **4.2. Contrôle de la série constituée**

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

En revanche, 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).

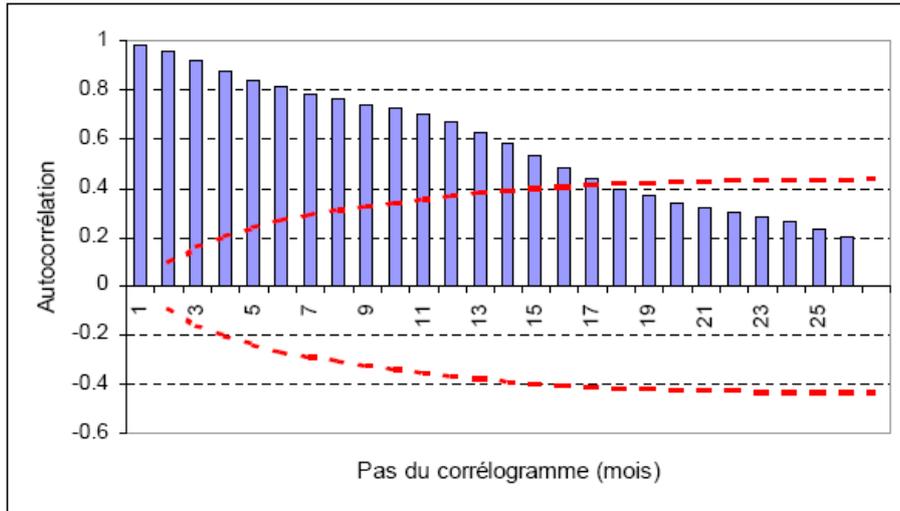


Illustration A5 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Janvier 1969 à Mars 2005

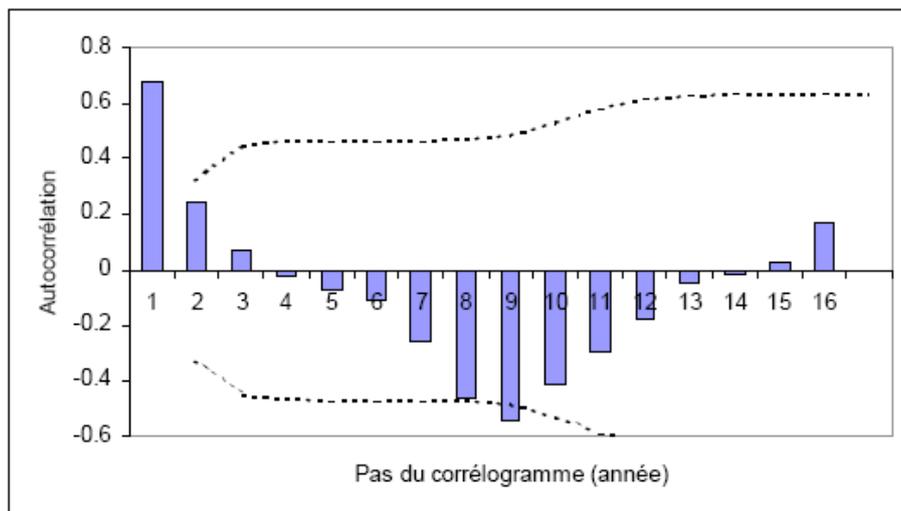


Illustration A6 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Décembre (1969 à 2004)

### 4.3. 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 ou le rejet du modèle testé.

### 4.4. Quantification des incertitudes

Une fois le modèle fréquentiel retenu, les incertitudes sur les valeurs calculées, 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.

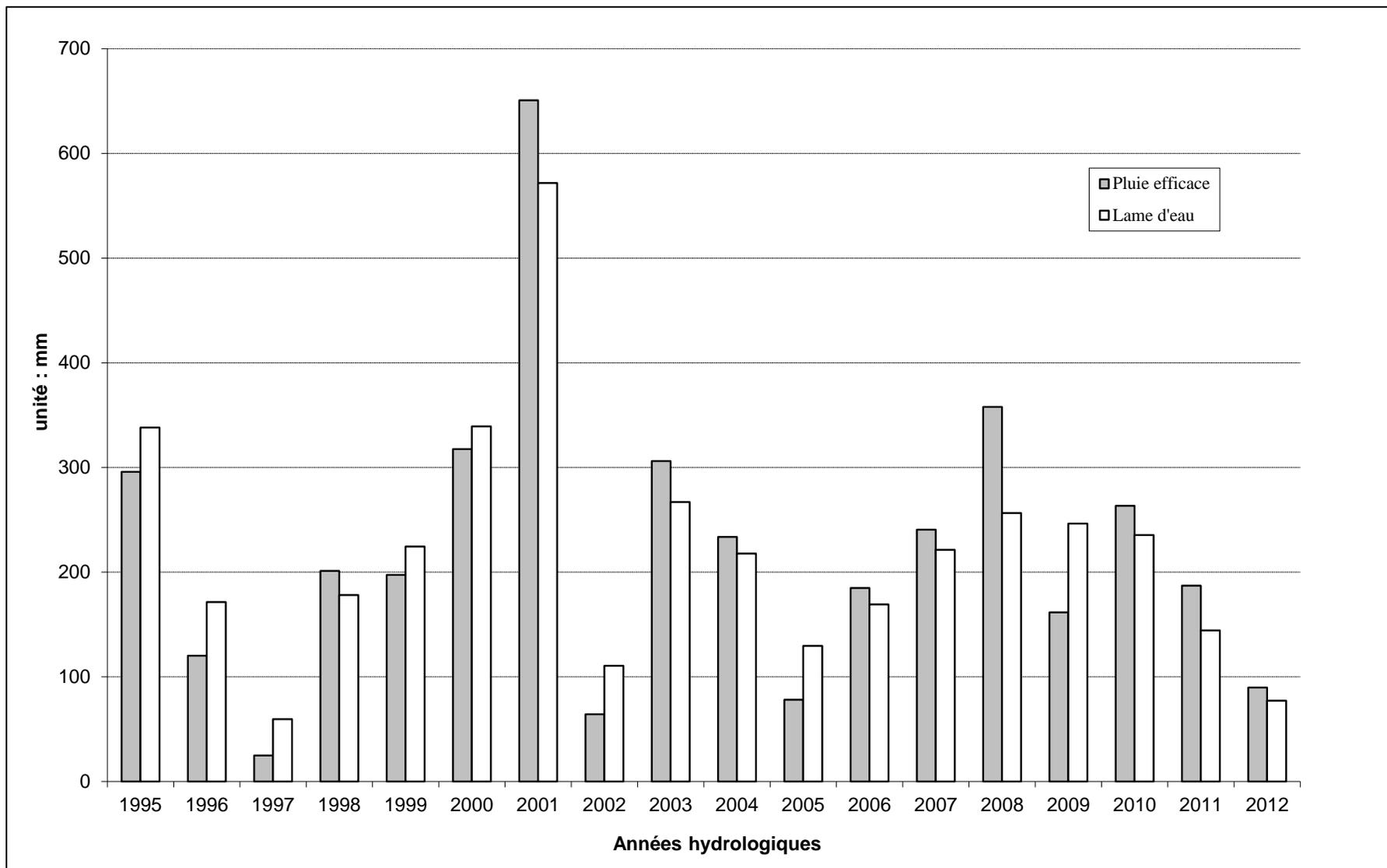
L'intervalle de confiance est d'autant plus petit que l'adéquation entre la loi ajustée et l'échantillon est bonne. Il est d'autant plus petit que le seuil de confiance considéré est petit.

Le niveau d'une nappe dont le modèle fréquentiel nous dit que sa probabilité d'occurrence est de  $p$  % 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.

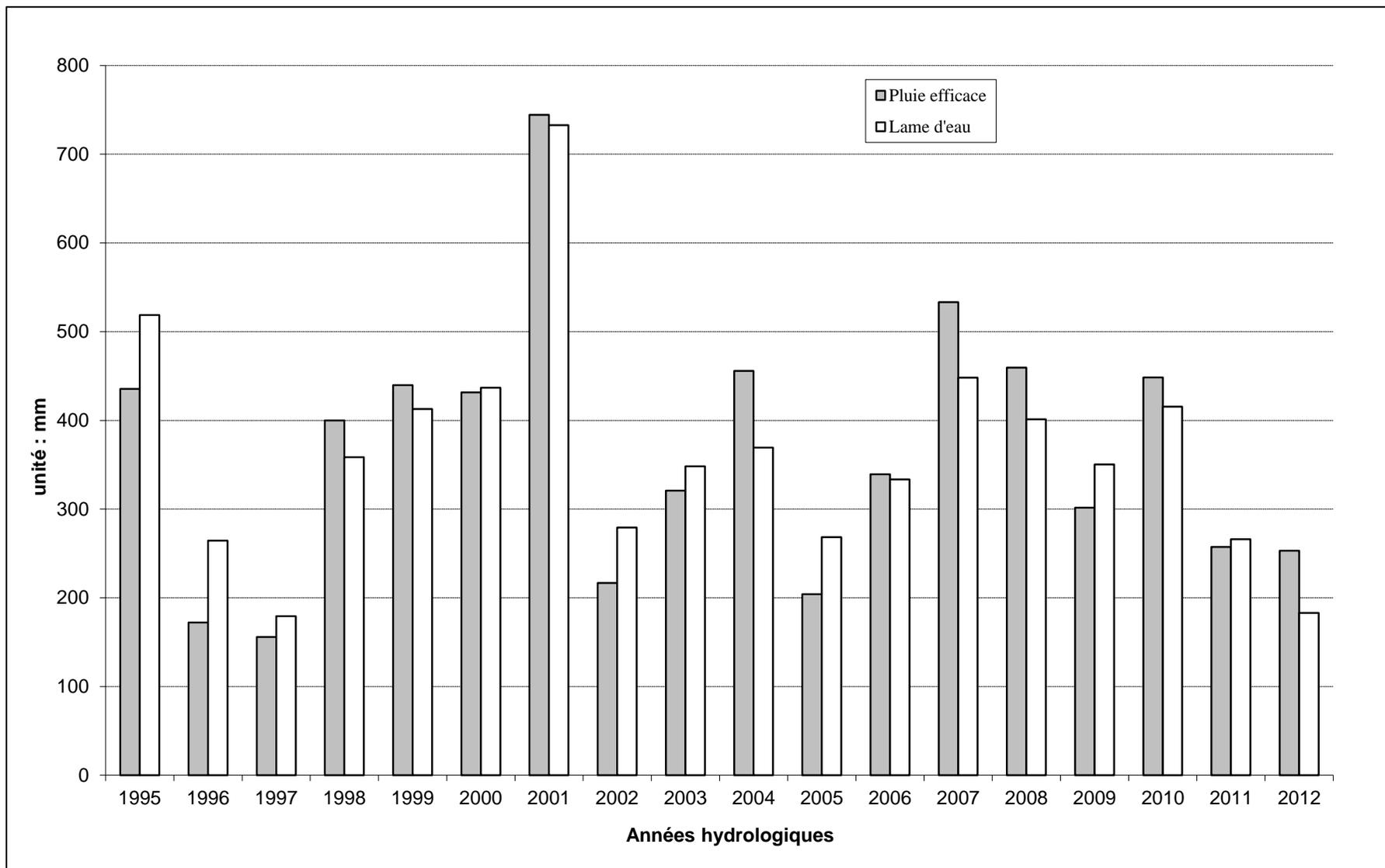
## **Annexe 5**

### **Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces**

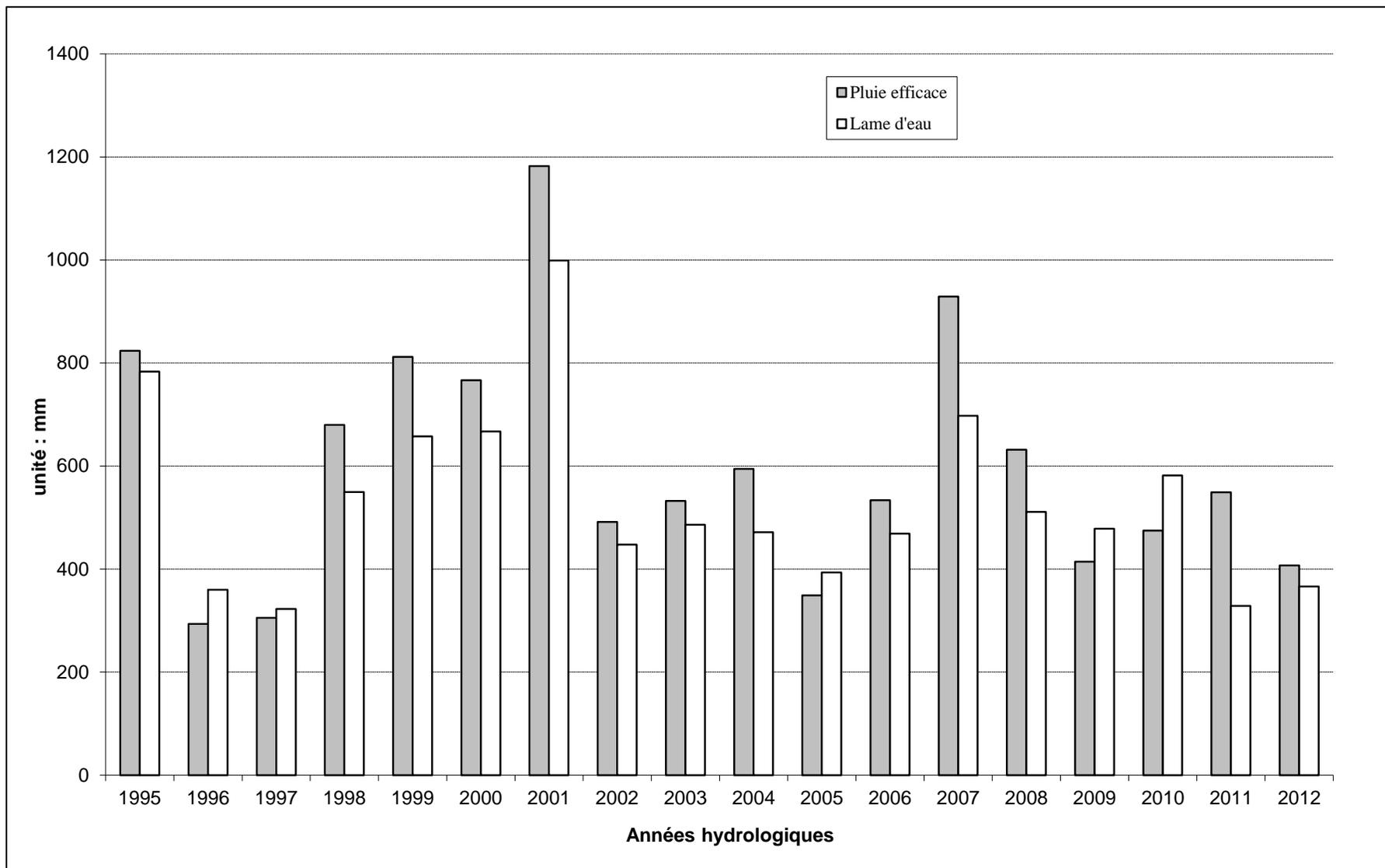




*Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour le bassin versant de l'Arguenon en entrée de retenue  
(Réserve Facilement Utilisable maximale du sol : RFU=185 mm)*



Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour le bassin versant du Gouët à Saint-Julien (RFU=160 mm)



Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour le bassin versant du Blavet à Kerien [Kerlouet] (RFU=170 mm)



## **Annexe 6**

### **Résultats des modélisations Gardénia©**

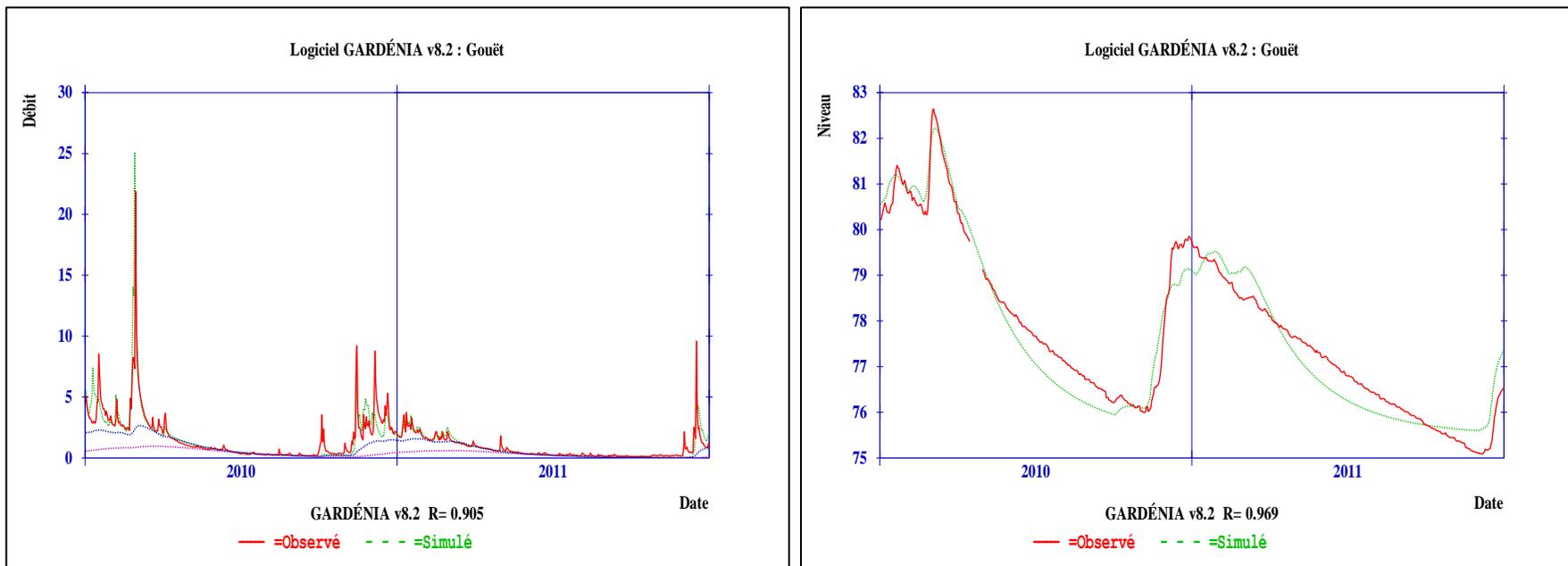
**Paramètres retenus pour les modélisations -  
Débits mesurés et calculés des bassins versants -  
Niveaux piézométriques mesurés et calculés -  
Débits annuels rapides, intermédiaires et lents des  
bassins versants -  
Débits mensuels rapides, intermédiaires et lents des  
bassins versants**



| Bassin versant | Station hydrologique          | N° station | Superficie BV (km <sup>2</sup> ) | Piézomètre retenu | Années calage | Corrélation débit (%) | Corrélation piézo (%) | Période modélisation Gardénia | Corrélation débit (%) | Corrélation piézo (%) | RUMAX (mm) | RUIPER (mm) | THG (mois) | TG1 (mois) | TG1-2 (mois) | TG2 (mois) | Niveau base (m NGF) | S (-)    |
|----------------|-------------------------------|------------|----------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------|------------|------------|--------------|------------|---------------------|----------|
| Arguenon       | Jugon-les-Lacs                | J1103010   | 104                              | Pleurtuit         | 2010-2011     | 94%                   | 88%                   | 1994-2012                     | 89%                   | 70%                   | 150        | 28          | 0.30       | 0.40       | 0.70         | 1.80       | 54.40               | 1.90E-02 |
| Rosette        | Mégrit                        | J1114010   | 102                              | Trémeur           | 2010-2011     | 92%                   | 80%                   | 1994-2012                     | 88%                   | 65%                   | 150        | 20          | 0.45       | 0.50       | 0.70         | 2.10       | 64.40               | 1.00E-02 |
| Arguenon       | en entrée de retenue          | /          | 317                              | Trémeur           | 2010-2011     | 94%                   | 87%                   | 1994-2012                     | 89%                   | 74%                   | 150        | 20          | 0.30       | 0.50       | 0.70         | 2.10       | 64.80               | 1.22E-02 |
| Gouët          | Saint-Julien                  | J1513010   | 138                              | Kerpert           | 2010-2011     | 88%                   | 77%                   | 1994-2012                     | 89%                   | 75%                   | 160        | 30          | 0.20       | 0.56       | 1.40         | 1.85       | 276.40              | 2.57E-02 |
| Gouët          | Ploufragan [Saint-Barthélémy] | J1523020   | 180                              | Goudelin          | 2009-2010     | 90%                   | 98%                   | 1998-2012                     | 87%                   | 92%                   | 122        | 90          | 0.25       | 0.70       | 1.00         | 3.20       | 75.10               | 1.70E-02 |
| Blavet         | Kerien [Kerlouet]             | J5202110   | 20.6                             | Rostrenen         | 2010-2011     | 94%                   | 92%                   | 1994-2012                     | 87%                   | 85%                   | 500        | 35          | 0.35       | 0.70       | 0.70         | 1.30       | 235.50              | 6.90E-03 |
| Blavet         | Lanrivain [Pont D 87]         | J5212120   | 92                               | Kerpert           | 2009-2010     | 74%                   | 90%                   | 1999-2012                     | 77%                   | 87%                   | 200        | 40          | 0.12       | 0.30       | 0.50         | 0.70       | 272.50              | 2.40E-02 |
| Blavet         | Mûr-de-Bretagne [Guerlédan]   | J5412110   | 620                              | Rostrenen         | 2006-2007     | 81%                   | 82%                   | 1994-2009                     | 79%                   | 86%                   | 40         | 300         | 0.10       | 0.50       | 0.68         | 2.30       | 219.50              | 1.40E-02 |

*Paramètres retenus pour les modélisations Gardénia© (avec en bleu les modélisations pour lesquelles les graphiques sont présentés ci-dessous)*

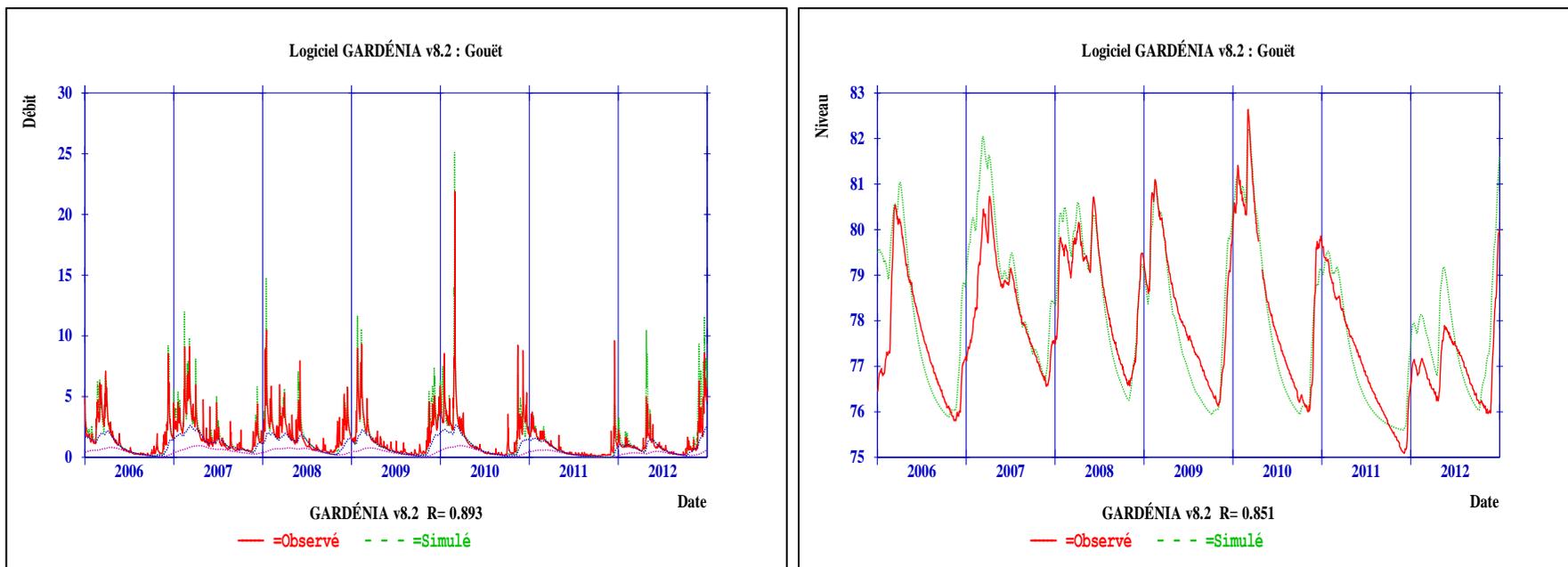
## Gouët à Saint-Julien



### Modélisation Gardénia

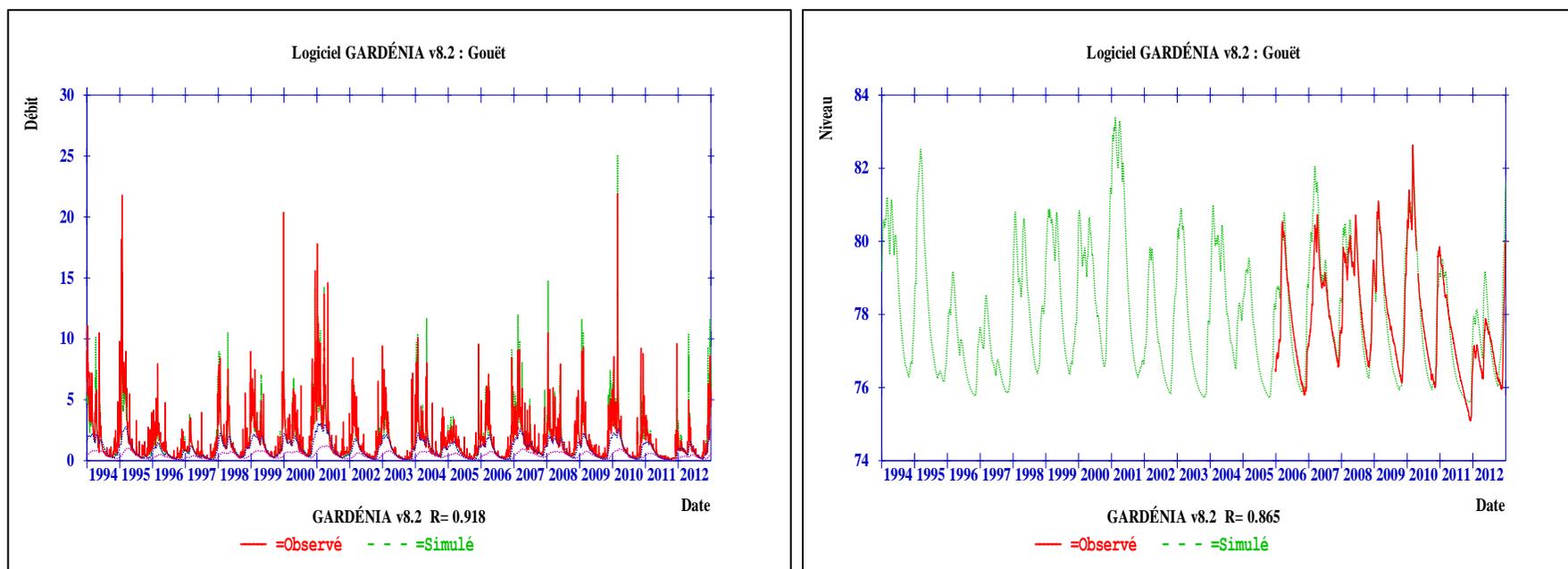
Débit du Gouët à St Julien - Niveau du piézomètre de Goudelin

Calage des paramètres (2010-2011)



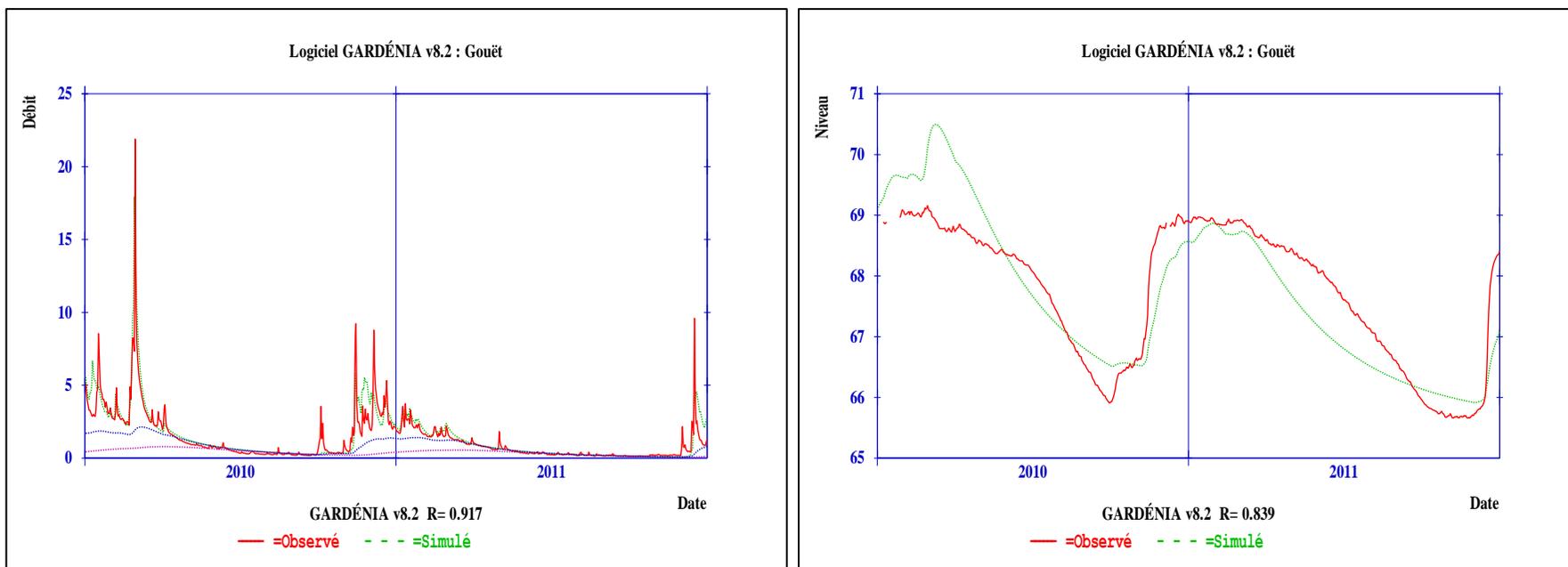
### Modélisation Gardénia

Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Goudelin, mesurés et calculés (période 2006-2012)



### Modélisation Gardénia

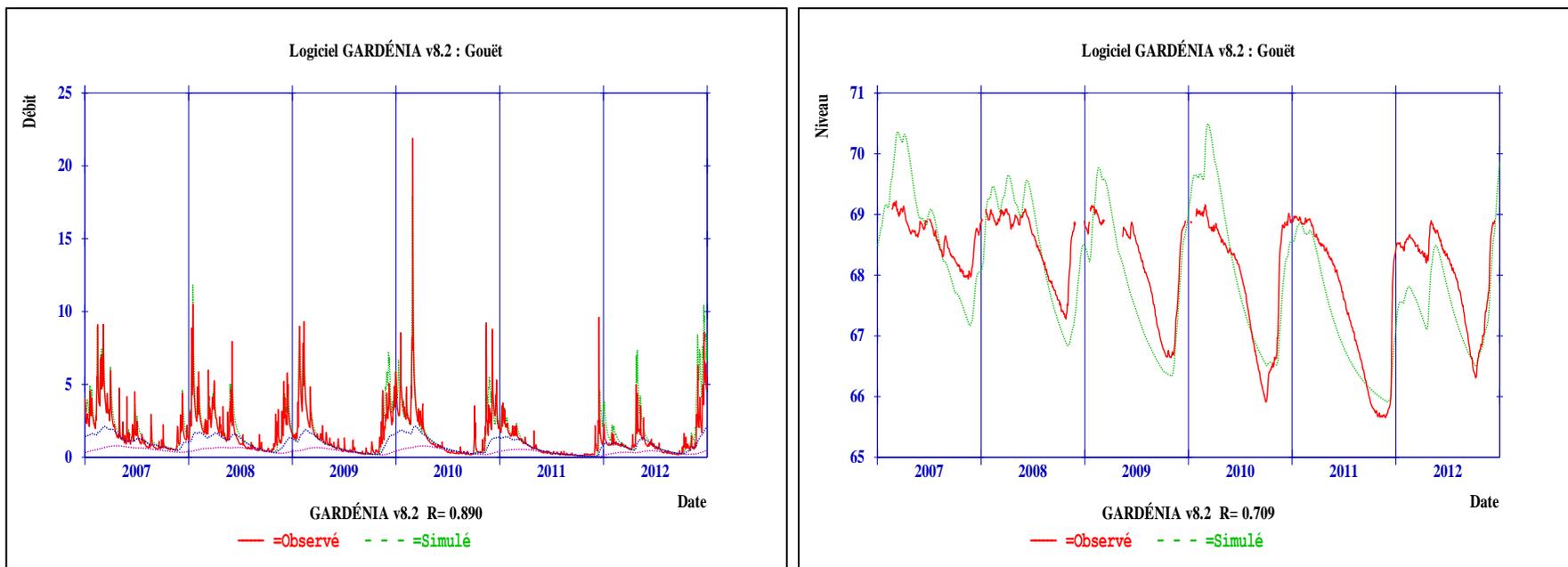
Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Goudelin, mesurés et calculés (période 1994-2012)



### Modélisation Gardénia

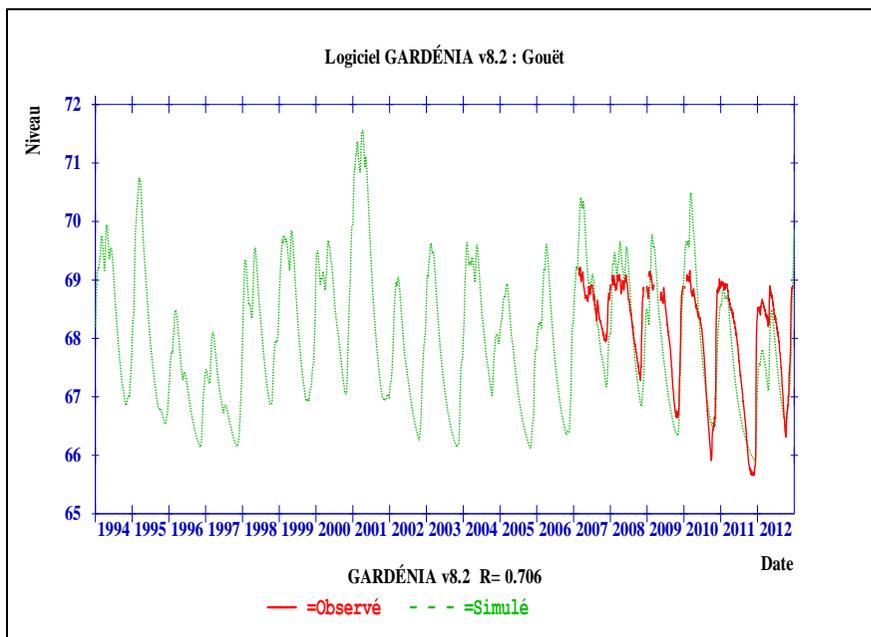
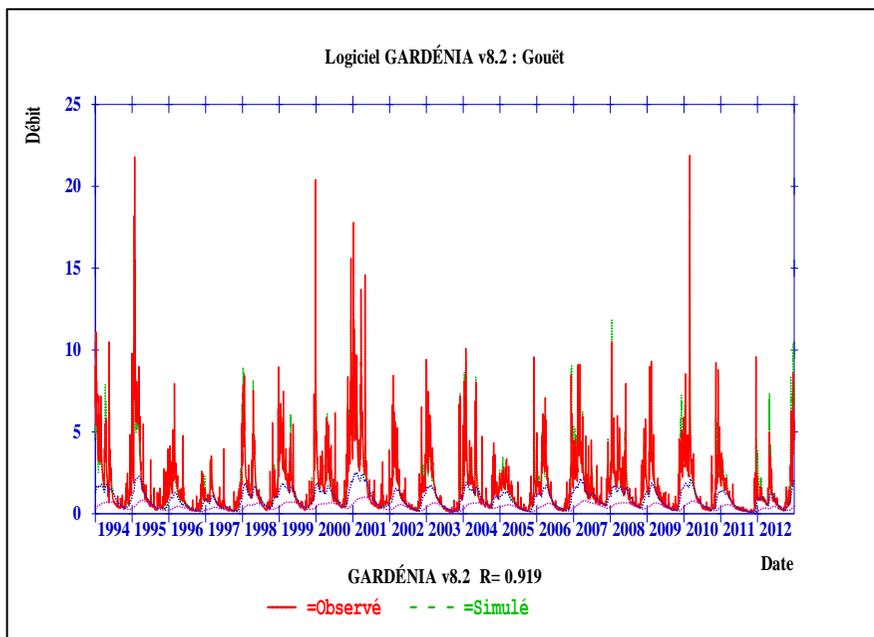
Débit du Gouët à St Julien - Niveau du piézomètre de Bréhand

Calage des paramètres (2010-2011)



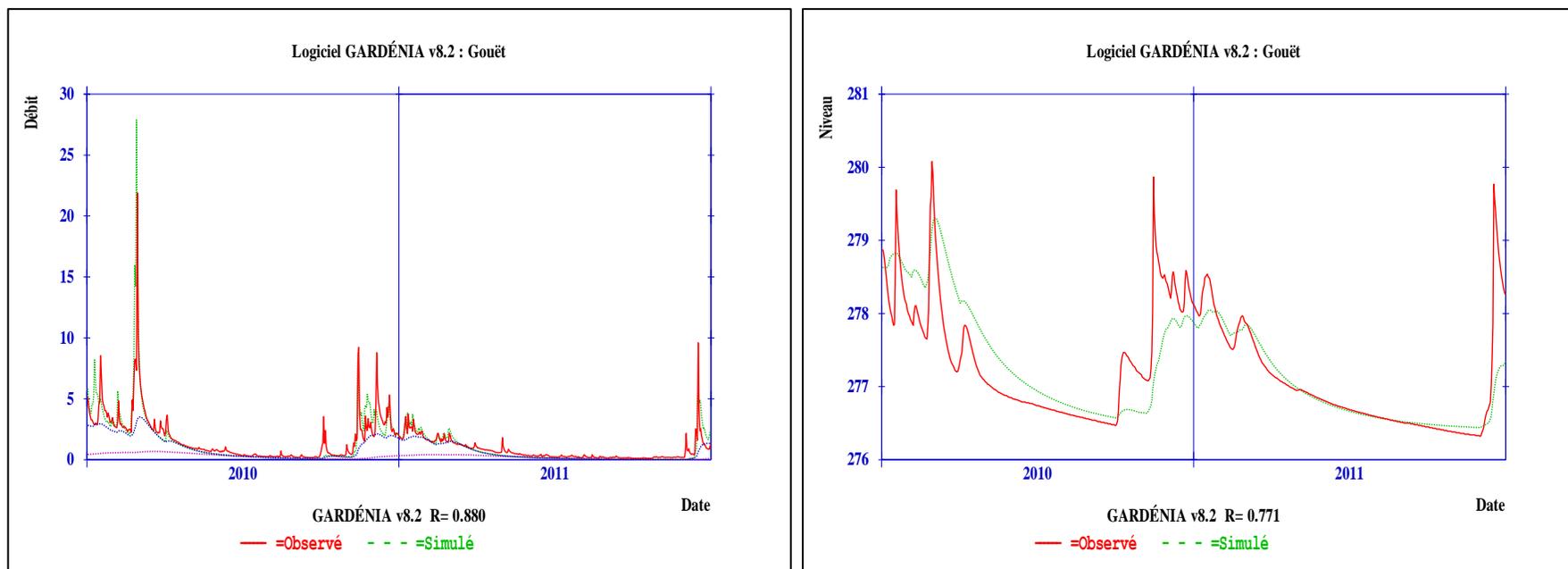
### Modélisation Gardénia

**Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Bréhand, mesurés et calculés (période 2007-2012)**



**Modélisation Gardénia**

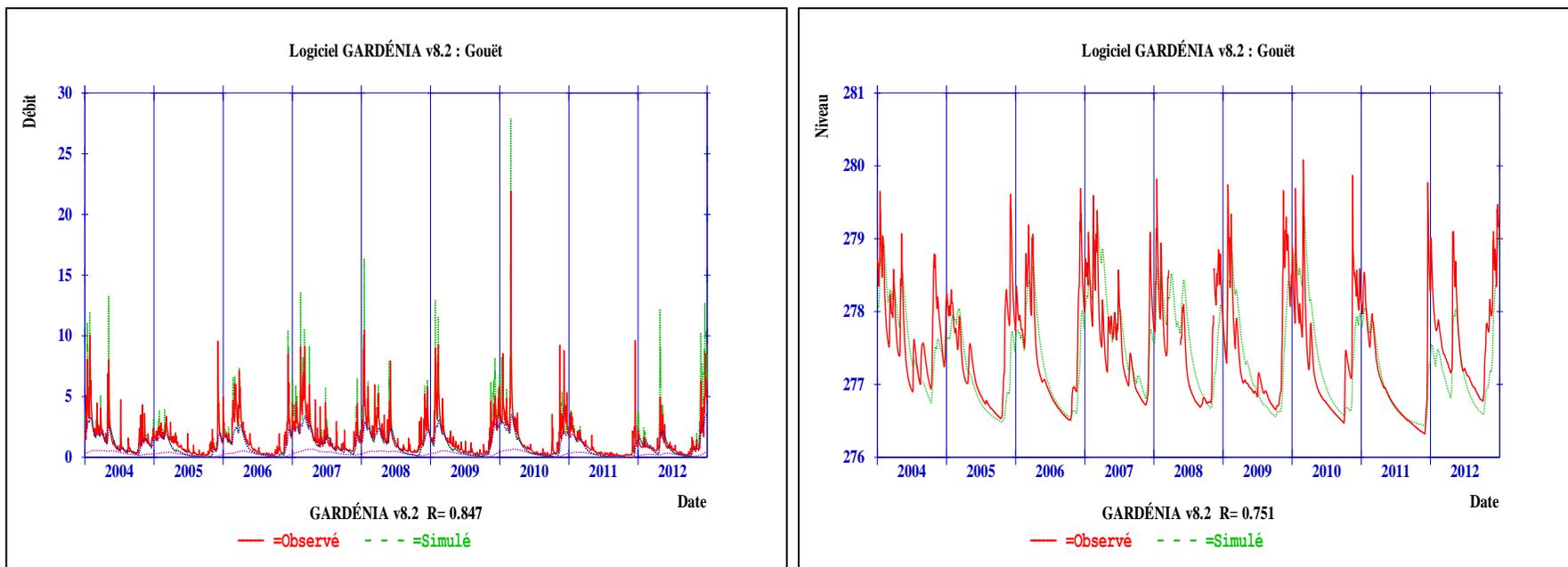
**Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Bréhand, mesurés et calculés (période 1994-2012)**



### Modélisation Gardénia

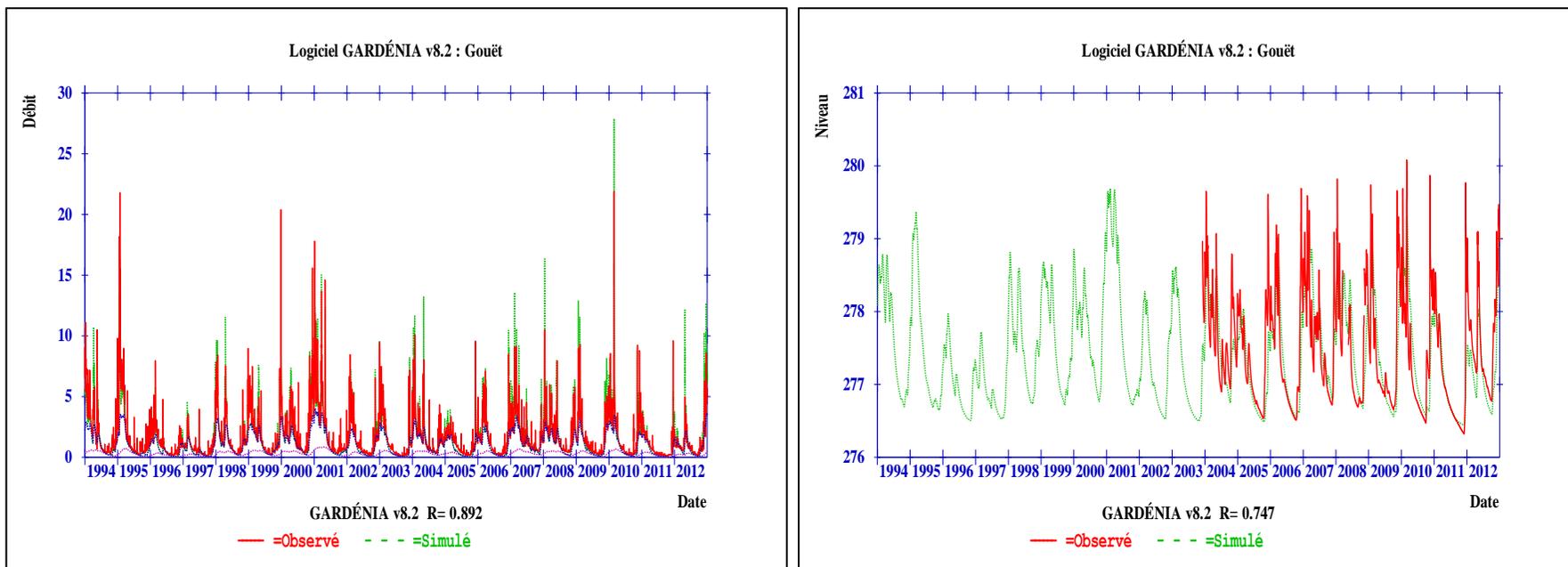
Débit du Gouët à St Julien - Niveau du piézomètre de Kerpert

Calage des paramètres (2010-2011)



**Modélisation Gardénia**

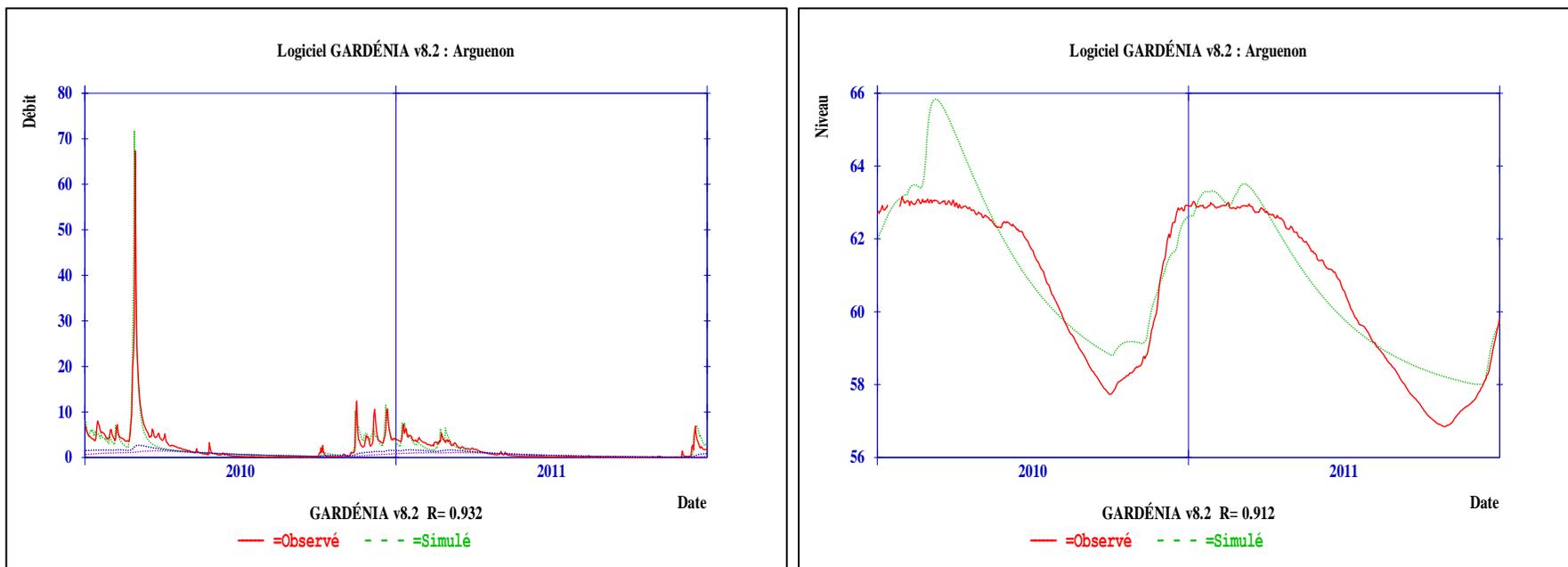
**Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Kerpert, mesurés et calculés (période 2004-2012)**



### Modélisation Gardénia

Débit du Gouët à St Julien et niveau du piézomètre de Kerpert, mesurés et calculés (période 1994-2012)

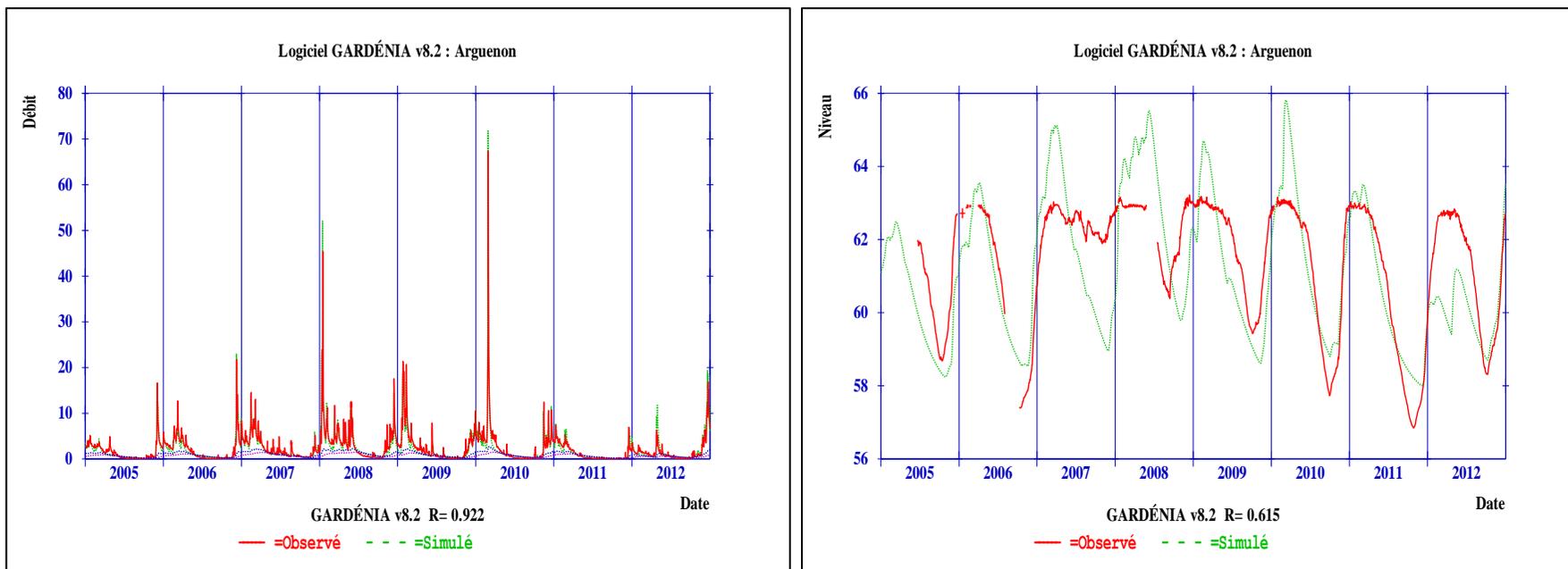
## Arguenon en entrée de retenue



### Modélisation Gardénia

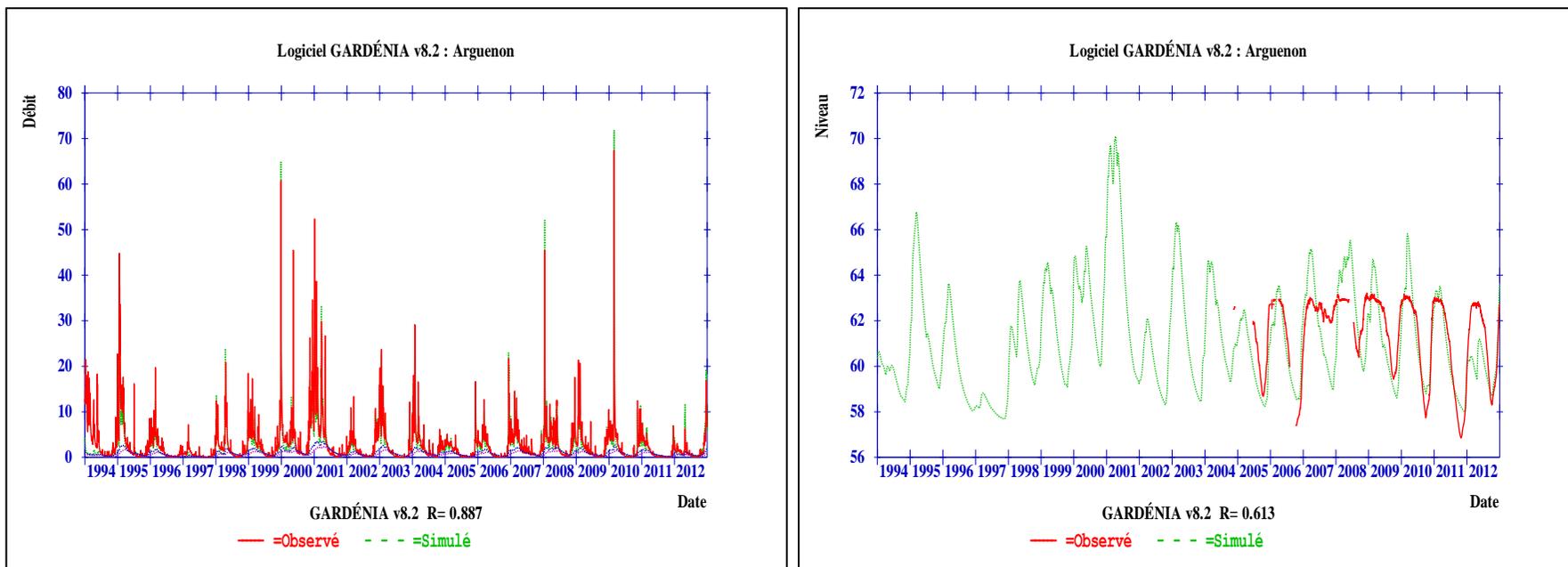
Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue - Niveau du piézomètre de Quinténic

Calage des paramètres (2010-2011)



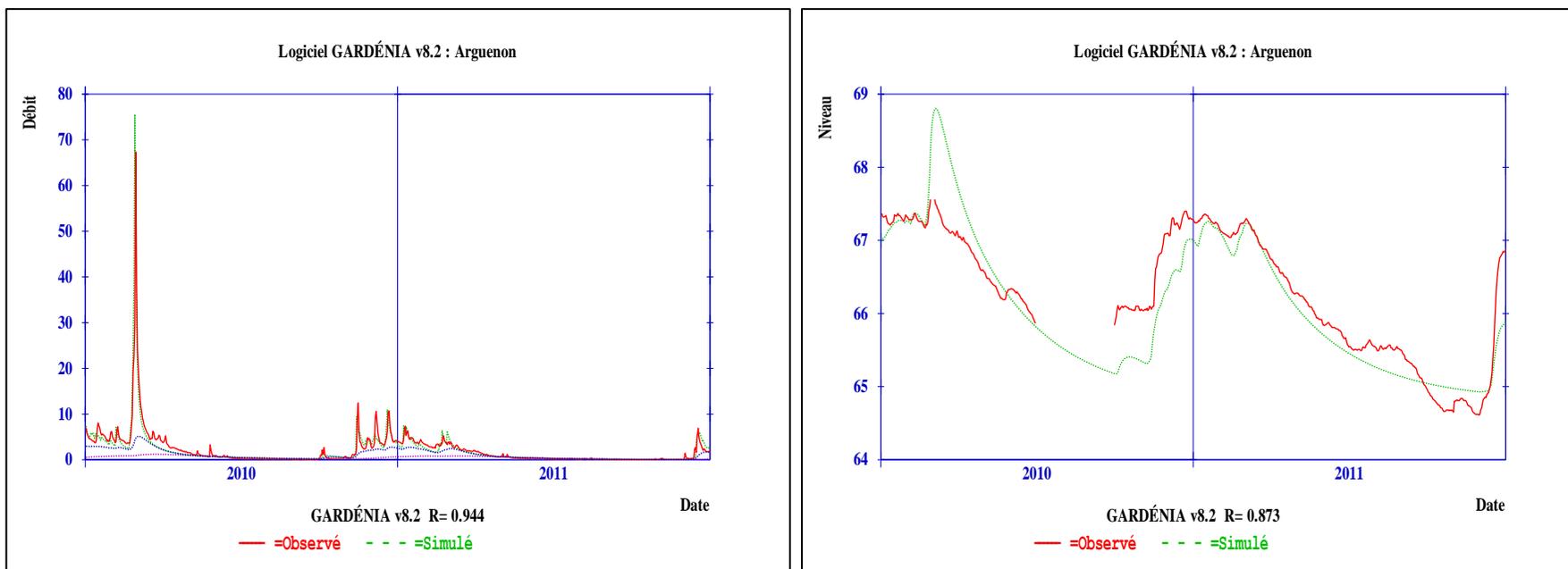
### Modélisation Gardénia

Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Quinténic, mesurés et calculés (période 2005-2012)



### Modélisation Gardénia

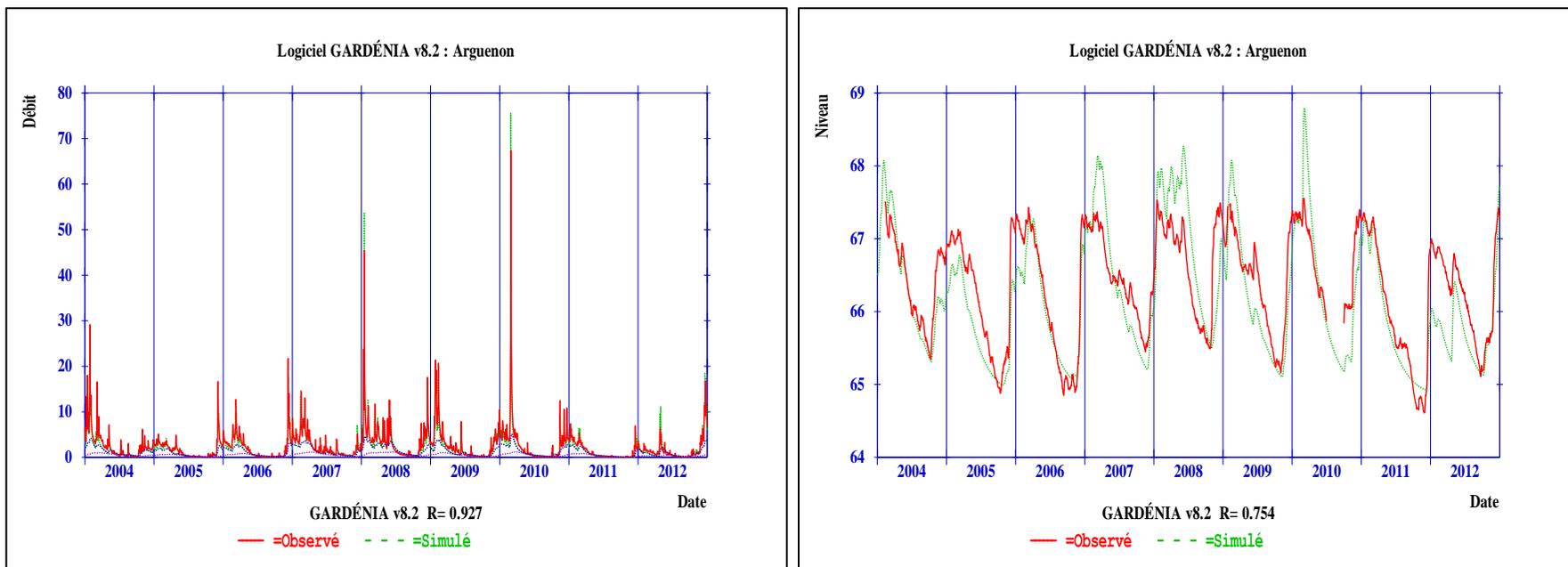
**Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Quinténic, mesurés et calculés (période 1994-2012)**



### Modélisation Gardénia

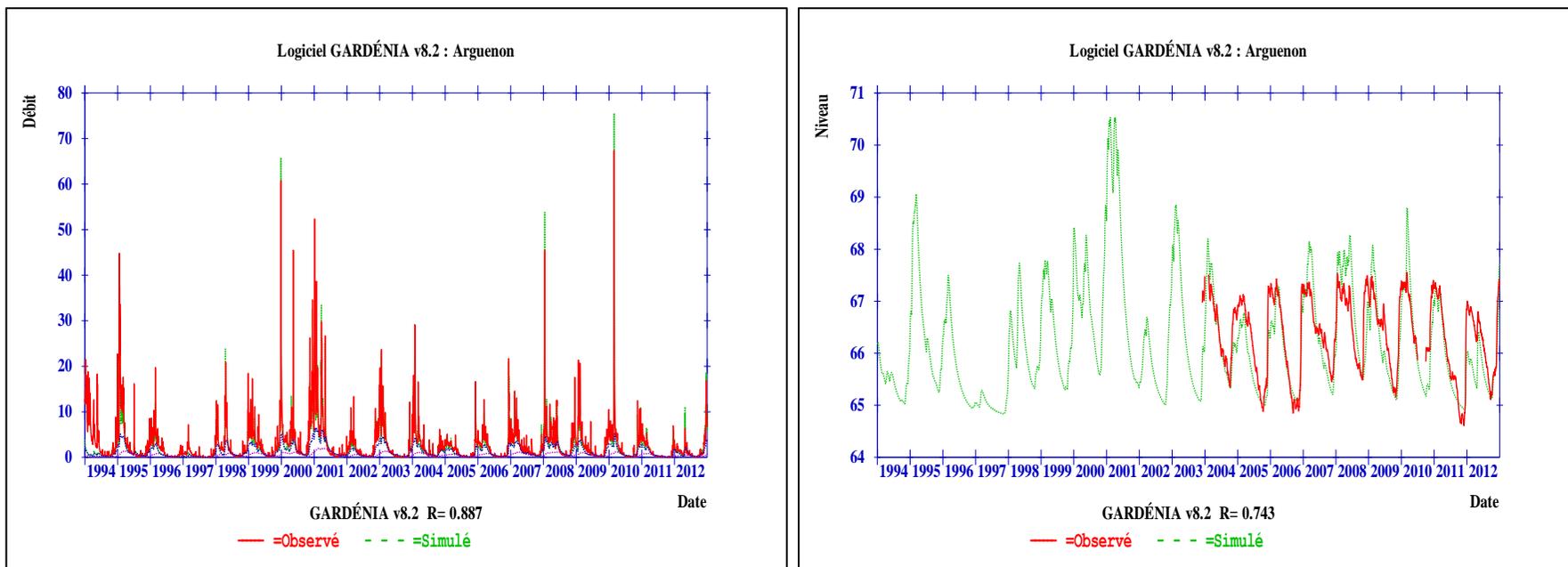
Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue - Niveau du piézomètre de Trémeur

Calage des paramètres (2010-2011)



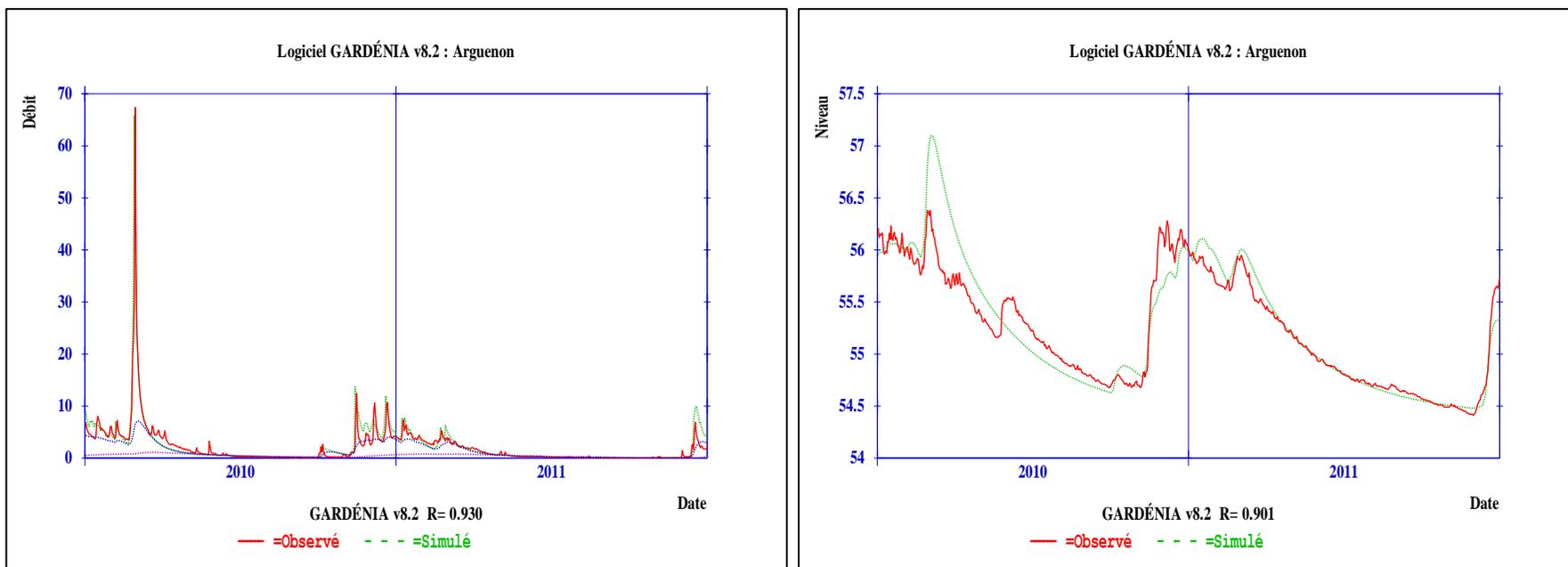
### Modélisation Gardénia

Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Trémeur, mesurés et calculés (période 2004-2012)



### Modélisation Gardénia

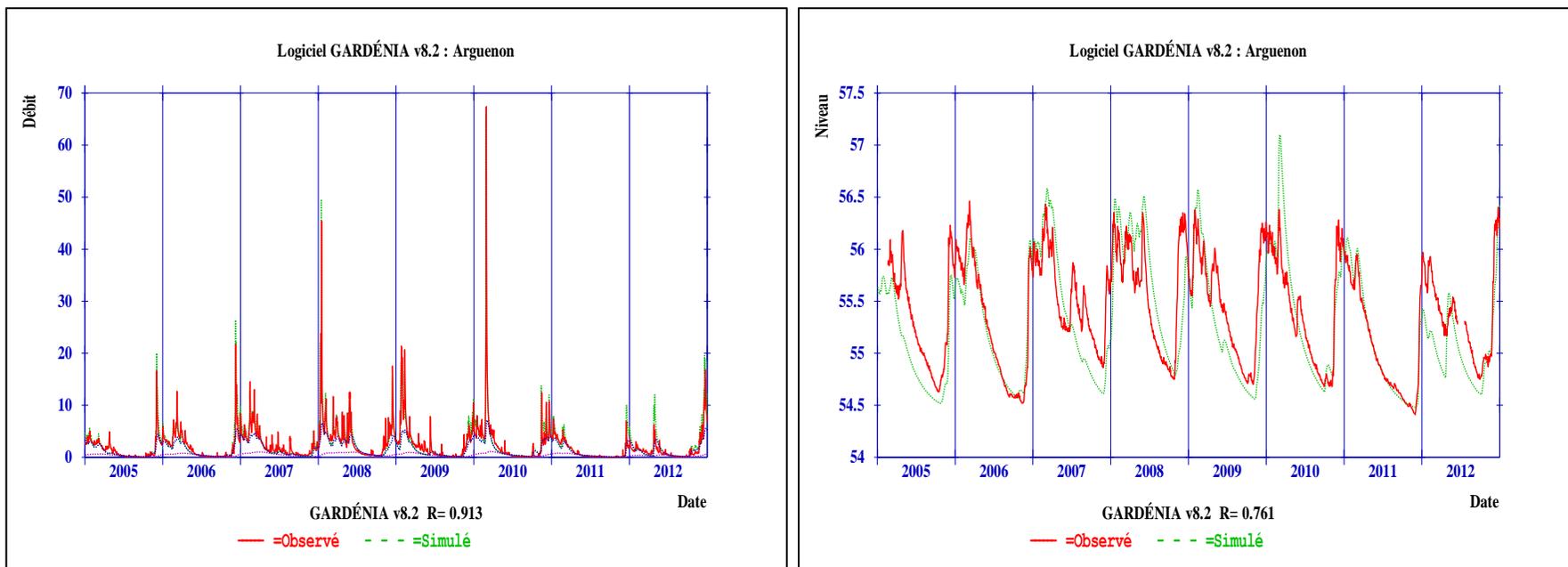
Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Trémeur, mesurés et calculés (période 1994-2012)



### Modélisation Gardénia

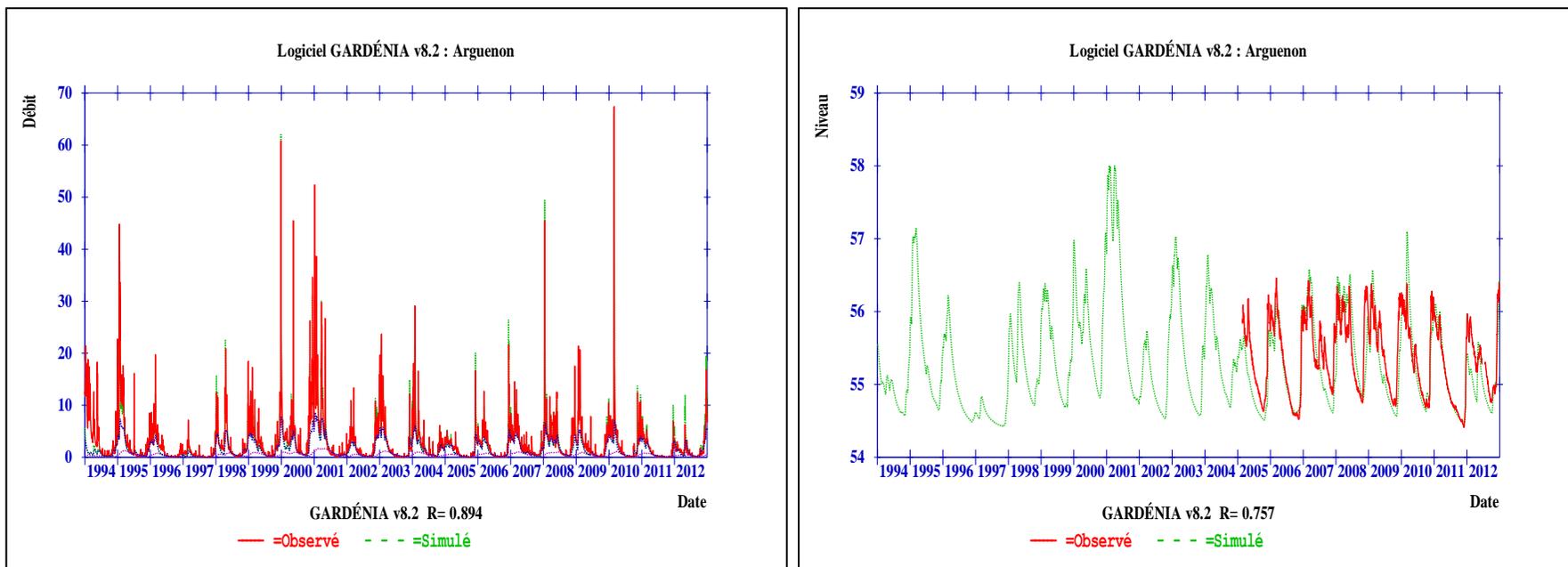
Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue - Niveau du piézomètre de Pleurtuit

Calage des paramètres (2010-2011)



### Modélisation Gardénia

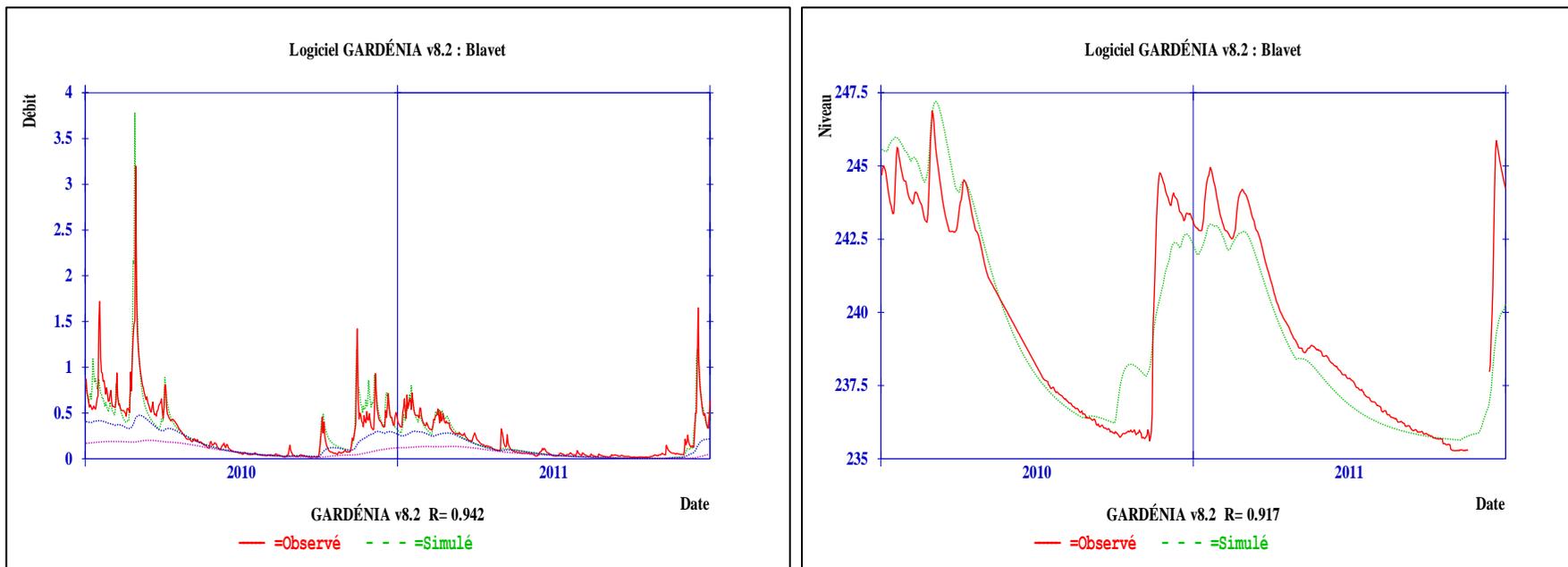
Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Pleurtuit, mesurés et calculés (période 2005-2012)



### Modélisation Gardénia

Débit de l'Arguenon à l'entrée de la retenue et niveau du piézomètre de Pleurtuit, mesurés et calculés (période 1994-2012)

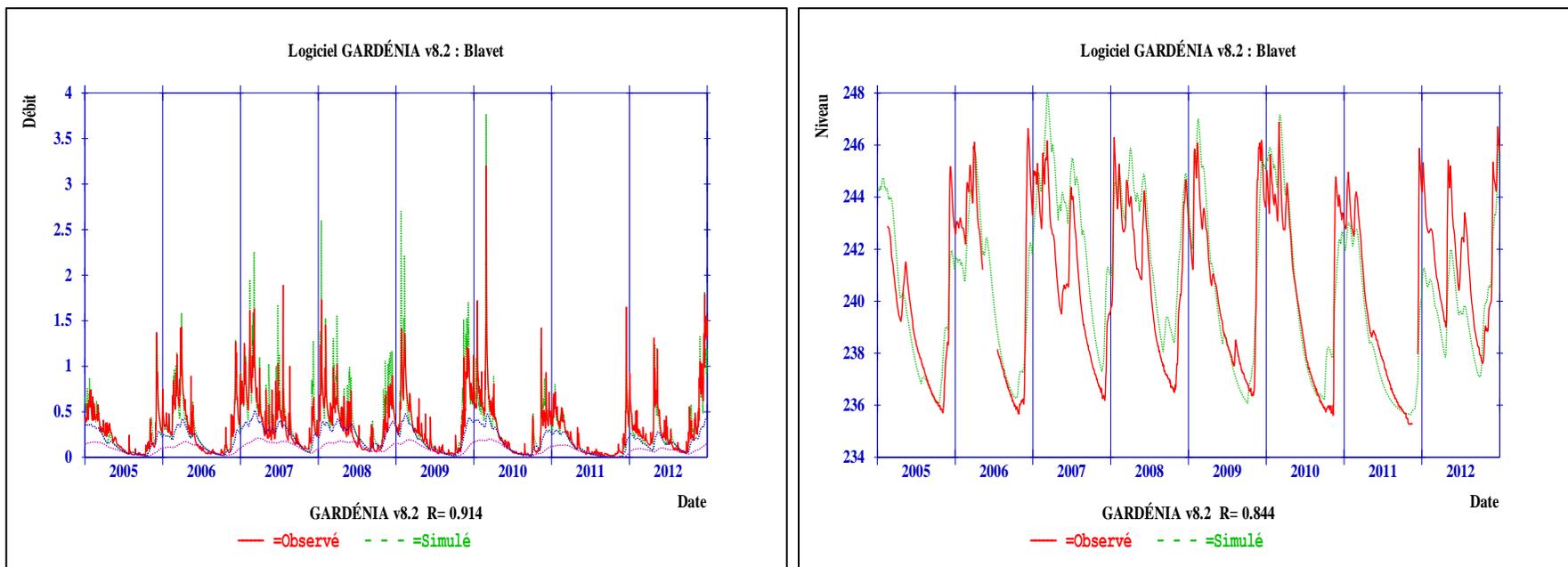
## Blavet à Kerien



### Modélisation Gardénia

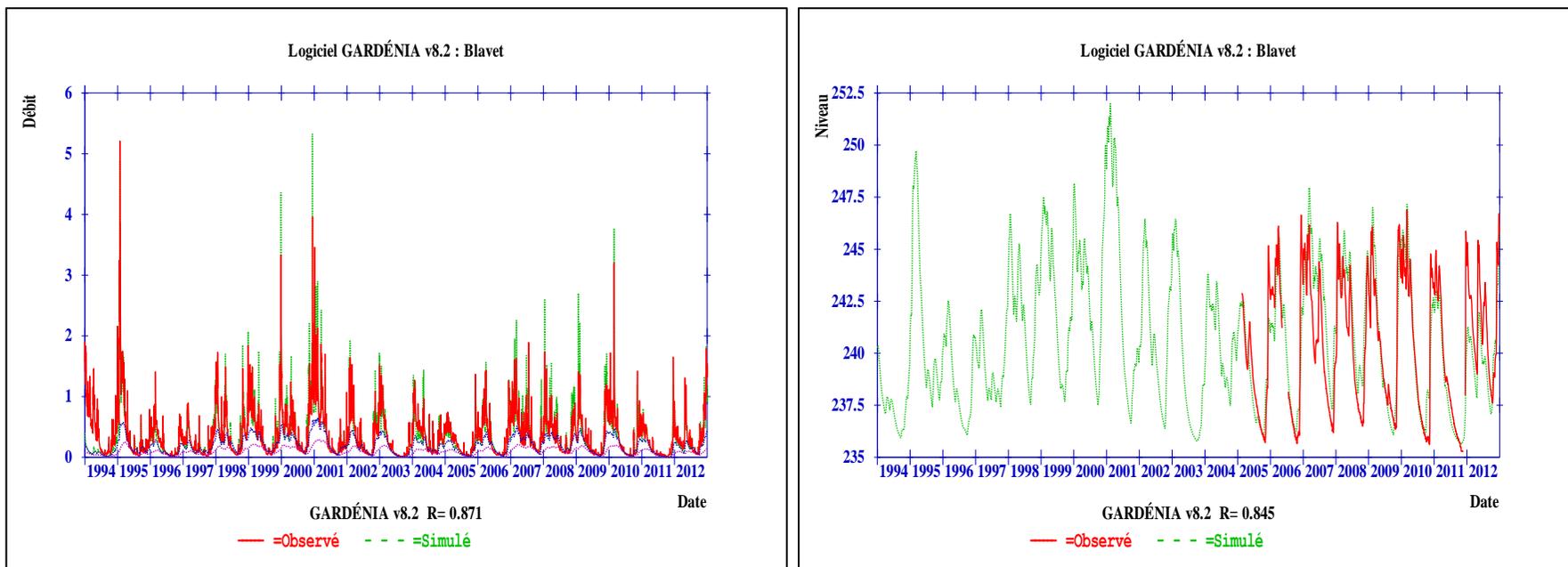
Débit du Blavet à Kérien - Niveau du piézomètre de Rostrenen

Calage des paramètres (2010-2011)



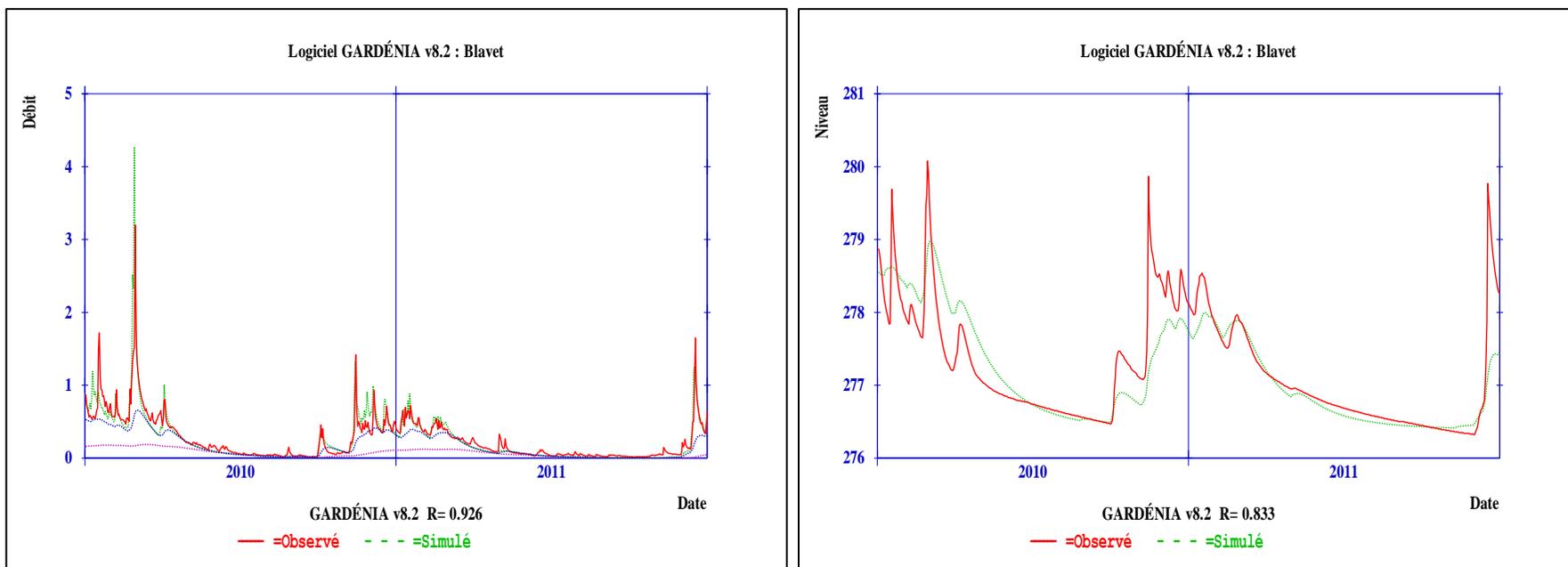
### Modélisation Gardénia

Débit du Blavet à Kérien et niveau du piézomètre de Rostrenen, mesurés et calculés (période 2005-2012)



### Modélisation Gardénia

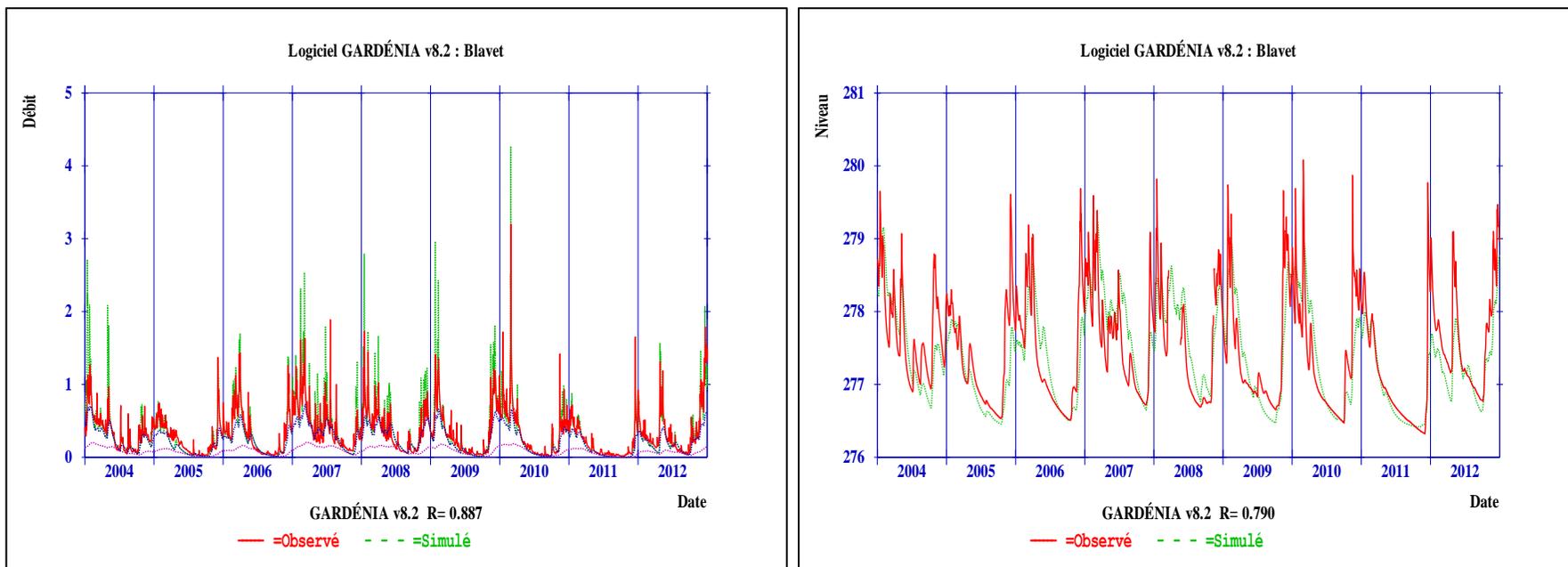
Débit du Blavet à Kérien et niveau du piézomètre de Rostrenen, mesurés et calculés (période 1994-2012)



### Modélisation Gardénia

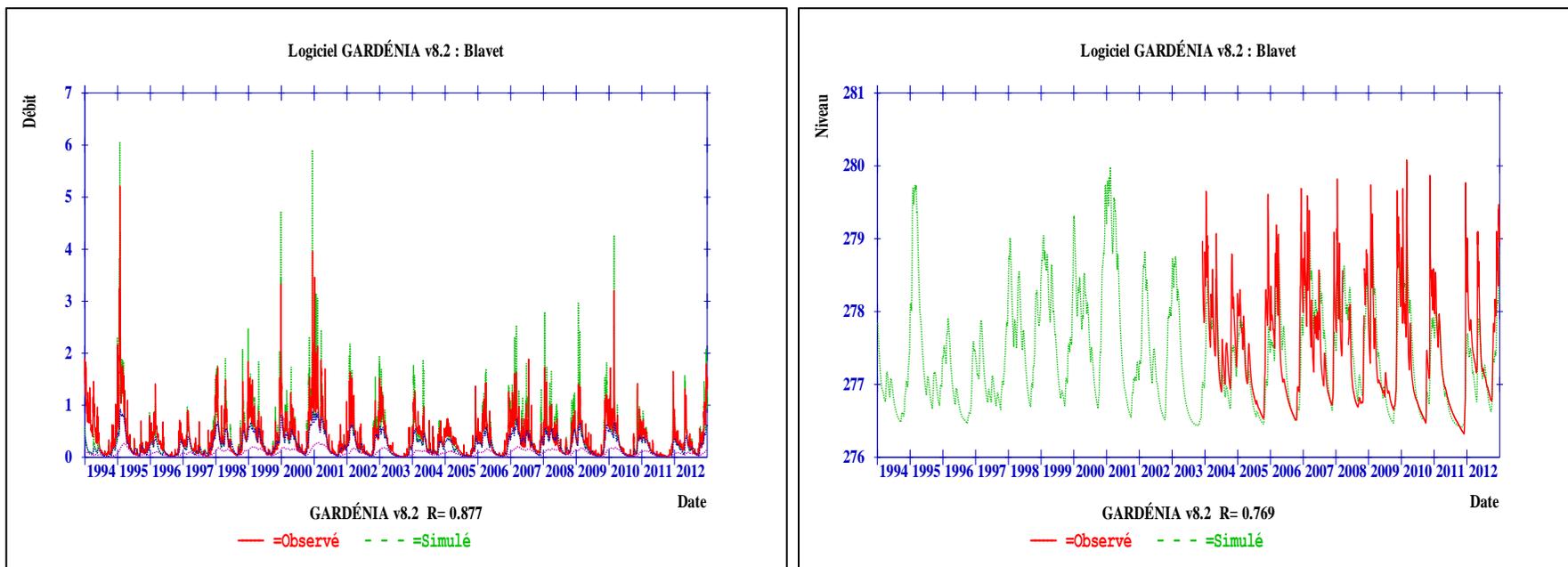
Débit du Blavet à Kérien - Niveau du piézomètre de Kerpert

Calage des paramètres (2010-2011)



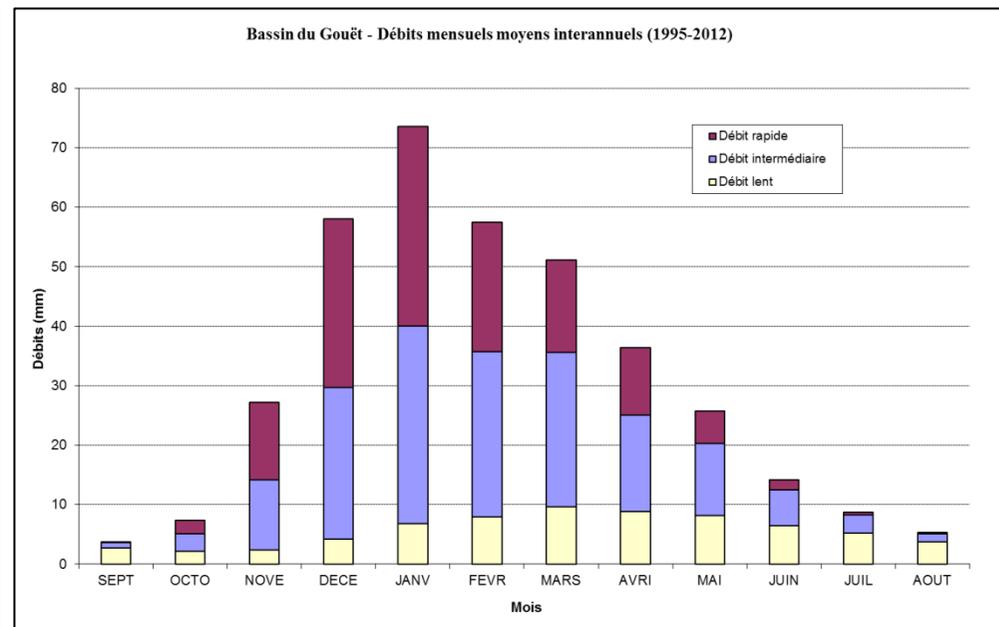
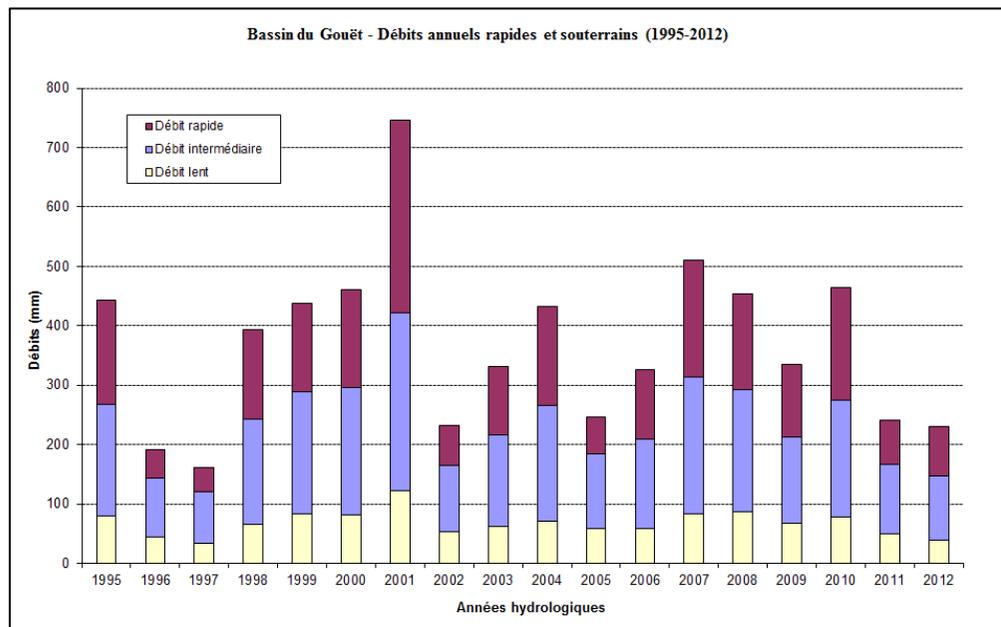
### Modélisation Gardénia

Débit du Blavet à Kérien et niveau du piézomètre de Kerpert, mesurés et calculés (période 2004-2012)



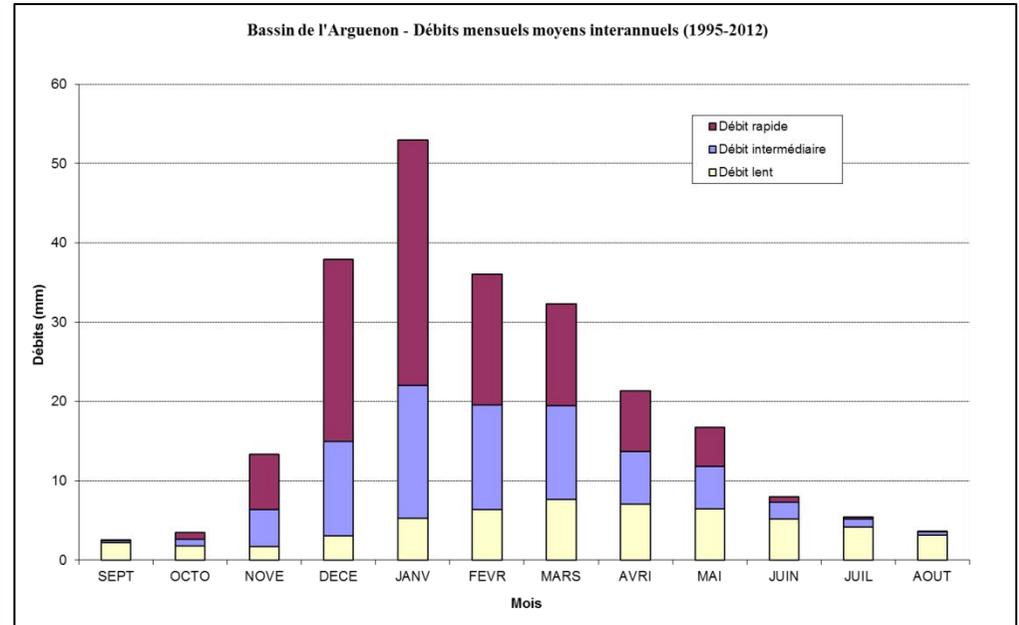
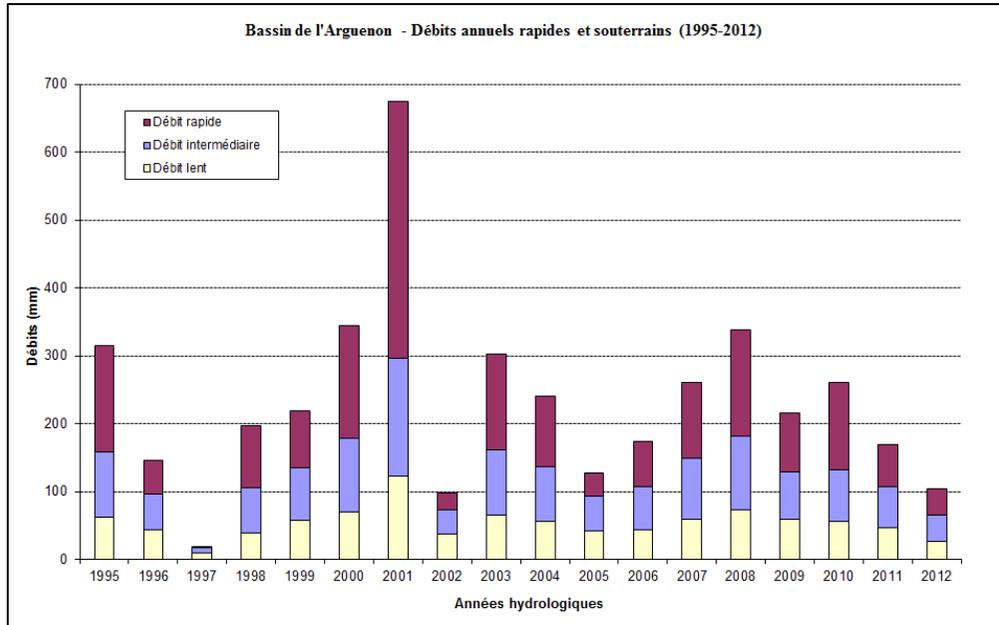
### Modélisation Gardénia

Débit du Blavet à Kérien et niveau du piézomètre de Kerpert, mesurés et calculés (période 1994-2012)



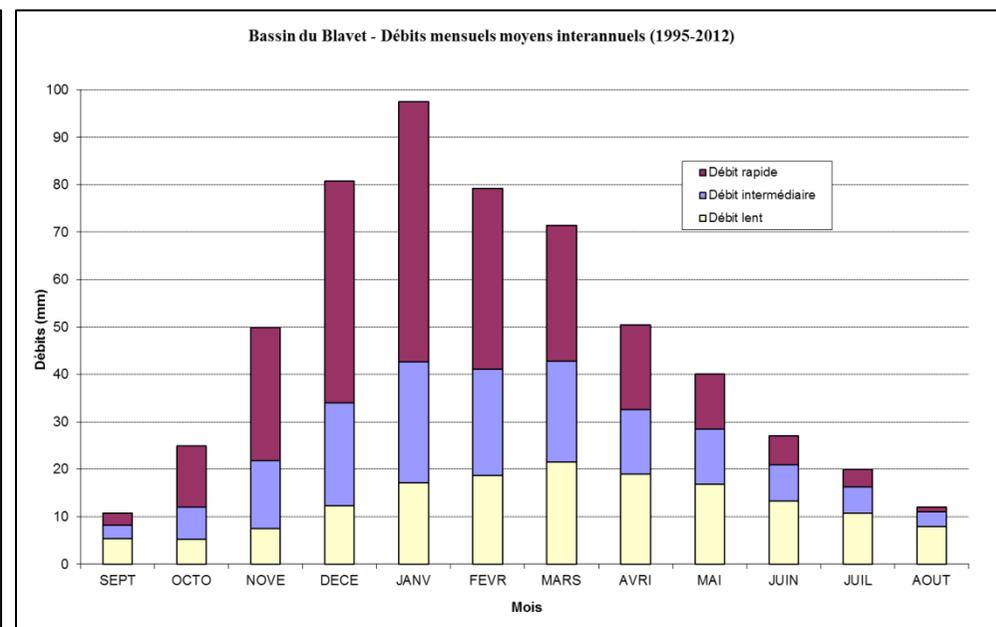
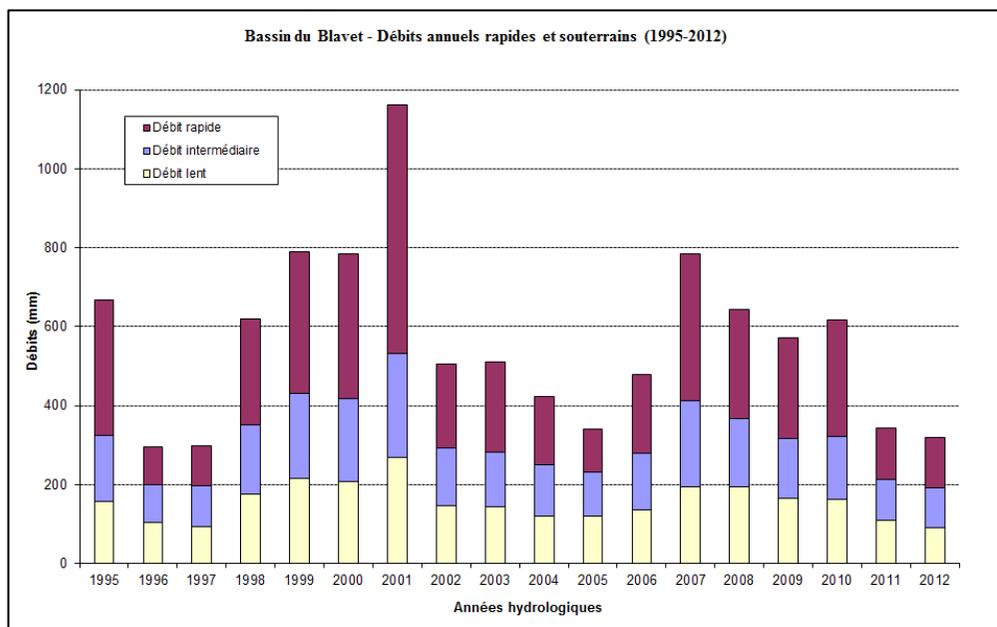
*Débits annuels du bassin versant du Gouët à Saint-Julien avec le piézomètre de Kerpert*

*Débits mensuels moyens interannuels du Gouët à Saint-Julien avec le piézomètre de Kerpert*



*Débits annuels du bassin versant de l'Arguenon en entrée de retenue avec le piézomètre de Trémeur*

*Débits mensuels moyens interannuels de l'Arguenon en entrée de retenue avec le piézomètre de Trémeur*



*Débits annuels du bassin versant du Blavet à Kérien avec le piézomètre de Rostrenen*

*Débits mensuels moyens interannuels du Blavet à Kérien avec le piézomètre de Rostrenen*





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

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

**Direction Régionale Bretagne**  
Rennes Atalante Beaulieu  
2 rue de Jouanet  
35700 Rennes  
Tél. : 02 99 84 26 70