

**AQUIFER PROJECT: “Innovative instruments for an integrated management of groundwater in a context of an increasing scarcity of hydrological resources”**

**LIVRABLE DU PROJET:**

**E2.2.1 “Prédiction des niveaux des eaux souterraines : une solution innovante pour soutenir la gestion des eaux souterraines”**

*Date: 30/04/2023*



## Synthèse

Le projet Interreg Sudoe AQUIFER intitulé "Outils innovants pour l'intégration des eaux souterraines dans un contexte de raréfaction des ressources en eau" est financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre du programme Interreg SUDOE V (2014-2020). Son objectif principal est de capitaliser, tester, diffuser et transférer des pratiques innovantes pour la préservation, la surveillance et la gestion intégrée des aquifères, utiles lors de la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau souterraine. Pour atteindre cet objectif, le projet est divisé en 4 groupes de tâches spécifiques regroupant 15 tâches concrètes avec 25 livrables et 10 résultats. De plus, le projet comprend trois groupes de tâches transversales regroupant 17 tâches concrètes.

Ce document fait référence au **livrable de l'activité 2.2 - E2.2.1 "Prédiction des niveaux des eaux souterraines : une solution innovante pour soutenir la gestion des eaux souterraines"**.

Après avoir reproduit une chronique piézométrique passée à l'aide d'un modèle pluie-niveau développé par le BRGM (GARDENIA<sup>1</sup>), les prévisions des niveaux piézométriques des six mois suivants sont émises en fonction de différents scénarios climatiques. Les résultats de ces modélisations sont mis à disposition et actualisés mensuellement sur la plateforme internet MétéEAU Nappes (<https://meteeanappes.brgm.fr/fr>).

Ce travail a été réalisé sur 10 piézomètres inclus dans le Bulletin de Situation Hydrologique (BSH)<sup>2</sup> du bassin Adour-Garonne ou localisés dans l'emprise de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne, en France. Cinq piézomètres localisés sur la péninsule ibérique ont été modélisés : 2 points de suivi de la nappe alluviale du Llobregat et 1 point de suivi du Campo de Carthagen, en Espagne, et 2 points de suivi localisés sur la Vallée du Tage, au Portugal.

Les données d'entrée utilisées sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et, dans certains cas, les prélèvements. La calibration est effectuée à l'aide des chroniques de suivi des eaux souterraines, collectées au pas de temps journalier ou mensuel, sur une période de 10 à 15 ans ou plus.

Les travaux de calibration sur les 10 piézomètres localisés en France ont permis de reproduire de façon très satisfaisante les chroniques piézométriques enregistrées tandis que des données d'entrée (prélèvements et/ou données météorologiques) de meilleure qualité associées à une meilleure connaissance du fonctionnement des eaux souterraines permettraient de significativement améliorer les résultats obtenus sur les piézomètres localisés en Espagne et au Portugal.

Ces résultats ont été mis en ligne sur la plateforme MétéEAU Nappes pour les 10 points de suivi localisés en France. La mise à jour régulière et automatique des données piézométriques et des données météorologiques permet une mise à jour mensuelle des prévisions des niveaux

---

<sup>1</sup> Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>

<sup>2</sup> <https://www.eaufrance.fr/publications/bsh>

piézométriques sur ces points. Ce travail n'a pas pu être réalisé pour les points localisés sur la péninsule ibérique, les données nécessaires n'étant pas disponibles en ligne, via des API<sup>3</sup>, sur les points modélisés. Les équipements réalisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER, Activité 1.2, permettent néanmoins d'acquérir des données en temps réel, facilitant leur mise en ligne via des plateformes de diffusion de données. Si ce verrou vient à être levé dans le cadre de futurs travaux, les modélisations réalisées pourront être mises à jour et chargées de façon à obtenir les mêmes résultats que sur les points de suivi localisés en France.

L'outil MétéEAU Nappes représente une étape importante dans l'intégration des aquifères dans la gestion des ressources en eau et dans l'anticipation des conditions estivales dans un contexte de raréfaction de la ressource.

---

<sup>3</sup> "Application Programming Interface", soit interface de programmation d'application en Français

## Sommaire

1. Contexte et objectifs.....	10
2. Modélisation hydrogéologique globale.....	11
2.1. Le modèle GARDENIA.....	11
2.1.1. Principe général.....	11
2.1.2. Les paramètres d'entrée du modèle.....	14
2.1.3. Phase d'initialisation.....	14
2.1.4. Phase de calage.....	14
2.1.5. Equations du bilan hydrologique.....	15
2.1.6. Les paramètres hydrologiques du modèle.....	15
2.2. Prévision du niveau de la nappe.....	16
3. Choix des points à modéliser.....	16
3.1. Les sites étudiés.....	16
3.2. Choix des points modélisés.....	18
3.2.1. Sur le bassin Adour-Garonne (France) :.....	18
3.2.2. Sur le delta du Llobregat (Espagne).....	23
3.2.3. Sur le Campo de Cartagena (Espagne).....	25
3.2.4. Sur la vallée du Tage (Portugal).....	29
4. Méthodologie utilisée.....	31
4.1. Données d'entrée et de calage des modèles.....	31
4.2. Paramètres initiaux du calage.....	31
4.3. Résultats du calage.....	31
5. Application au bassin Adour-Garonne (France).....	31
5.1. Données d'entrée.....	31
5.1.1. Pluie.....	31
5.1.2. Evapotranspiration (ETP).....	33
5.1.3. Prélèvements.....	34
5.2. Données de calage.....	34
5.3. Paramètres initiaux du calage.....	41
5.3.1. Capacité de stockage en eau du sol.....	41
5.3.2. Temps de demi-tarissement.....	41
5.4. Résultats et interprétations des modélisations.....	42
5.4.1. BSS002DEZW - Bioule.....	42
5.4.2. BSS002CZWH - Les Barthes.....	44
5.4.3. BSS002DDAH - Saint-Porquier.....	46
5.4.4. BSS002DAWQ - Pédeloup.....	48
5.4.5. BSS002DDZV - Saint-Pierre.....	49
5.4.6. BSS002DETB - Pradas.....	51
5.4.7. BSS002CZMA - Pomiès.....	53
5.4.8. BSS002KGEL - Saint-Elix.....	54
5.4.9. BSS002LPFG - Verniolle.....	56
5.4.10. BSS002FMPK - Tarsac.....	57
5.5. Prévisions du niveau de la nappe.....	59
6. Application au delta du Llobregat (Espagne).....	67
6.1. Données d'entrée.....	67

6.2.	Données de calage.....	67
6.3.	Paramètres initiaux du calage .....	69
6.4.	Résultats et interprétations des modélisations .....	69
6.4.1.	<i>Piézomètre « P »</i> .....	69
6.4.2.	<i>Piézomètre « SV »</i> .....	71
6.5.	Prévisions du niveau de la nappe.....	72
7.	Application au Campo de Cartagena (Espagne) .....	72
7.1.	Données d'entrée .....	72
7.2.	Données de calage.....	73
7.3.	Paramètres initiaux du calage .....	73
7.4.	Résultats et interprétations des modélisations .....	74
7.5.	Prévisions du niveau de la nappe.....	76
8.	Application à la vallée du Tage (Portugal) .....	76
8.1.	Données d'entrée .....	76
8.2.	Données de calage.....	76
8.3.	Paramètres initiaux du calage .....	78
8.4.	Résultats et interprétations des modélisations .....	78
8.4.1.	<i>Salvaterra de Magos</i> .....	78
8.4.2.	<i>Escaroupim</i> .....	80
8.5.	Prévisions du niveau de la nappe.....	81
9.	La plateforme internet MétéEAU'Nappes .....	82
9.1.	Le site vitrine .....	82
9.2.	L'application MétéEAU'Nappes : .....	83
10.	Conclusion .....	88
11.	Bibliographie .....	89

## Liste des illustrations

Illustration 1	– Schéma de principe du modèle GARDENIA (Source : Thiéry, 2014).....	12
Illustration 2	– Schéma le plus simple : un seul réservoir souterrain (Source : Thiéry, 2014) ....	13
Illustration 3	– Schéma complexe : deux réservoirs souterrains.....	13
Illustration 4	– Schéma complexe : un réservoir souterrain à deux orifices de vidange. ....	14
Illustration 5	– Paramètres du modèle GARDENIA .....	15
Illustration 6	– Localisation des sites d'étude.....	17
Illustration 7	– Localisation des points modélisés .....	19
Illustration 8	– Côtes piézométriques enregistrées sur les points modélisés localisés sur le bassin Adour-Garonne .....	22
Illustration 9	– Localisation des piézomètres « P » et « SV » (Llobregat, Espagne).....	23
Illustration 10	– Côtes piézométriques enregistrées sur les points modélisés localisés sur le site du Delta de Llobregat (Espagne) .....	24
Illustration 11	– Localisation des piézomètres sur le site de Campo de Cartagena (Espagne) ..	25

Illustration 12 - Côtes piézométriques enregistrées sur les points localisés sur le site du Cartagena (Espagne) .....	27
Illustration 13 – Localisation des piézomètres sur la vallée du Tage (Portugal) .....	29
Illustration 14 - Côtes piézométriques enregistrées sur les points localisés dans la vallée du Tage (Portugal).....	30
Illustration 15 – Association Piézomètre – Station météorologique - Pluie .....	32
Illustration 16 – Association Piézomètre – Station météorologique - ETP .....	34
Illustration 17 – Chroniques piézométriques et pluviométriques (France) .....	39
Illustration 18 – Estimation de la capacité de stockage en eau du réservoir sol .....	41
Illustration 19 - <i>Estimation du temps de demi-décroissance de niveaux (Source : Saplaïroles et al., 2015)</i> .....	42
Illustration 20 – Paramètres assurant le calage optimal à Bioule (BSS002DEZW) sur la période 1996-2022 .....	43
Illustration 21 - Calage pluie-niveau à Bioule (BSS002DEZW) sur la période 1996-2022 .....	44
Illustration 22 – Paramètres assurant le calage optimal aux Barthes (BSS002CZWH) sur la période 1996-2022 .....	45
Illustration 23 - Calage pluie-niveau aux Barthes (BSS002CZWH) sur la période 1996-2022 ..	45
Illustration 24 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Porquier (BSS002DDAH) sur la période 1982-2022 .....	47
Illustration 25 - Calage pluie-niveau à Saint-Porquier (BSS002DDAH) sur la période 1982-2022 .....	47
Illustration 26 – Paramètres assurant le calage optimal à Pédeloup (BSS002DAWQ) sur la période 1999-2022 .....	49
<i>Illustration 27 - Calage pluie-niveau à Pédeloup (BSS002DAWQ) sur la période 1999-2022 ...</i>	49
Illustration 28 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Pierre (BSS002DDZV) sur la période 1999-2022 .....	50
<i>Illustration 29 - Calage pluie-niveau à Saint-Pierre (BSS002DDZV) sur la période 1999-2022.</i>	51
Illustration 30 – Paramètres assurant le calage optimal à Pradas (BSS002DETB) sur la période 1999-2022 .....	52
<i>Illustration 31 - Calage pluie-niveau à Pradas (BSS002DETB) sur la période 1999-2022 .....</i>	52
Illustration 32 – Paramètres assurant le calage optimal à Pomiès (BSS002CZMA) sur la période 2005-2022 .....	54
<i>Illustration 33 - Calage pluie-niveau à Pomiès (BSS002CZMA) sur la période 2005-2022 .....</i>	54
Illustration 34 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Elix (BSS002KGEL) sur la période 1996-2022 .....	55
Illustration 35 - Calage pluie-niveau à Saint-Elix (BSS002KGEL) sur la période 1996-2022.....	56
Illustration 36 – Paramètres assurant le calage optimal à Verniolle (BSS002LPFG) sur la période 1996-2022 .....	57
Illustration 37 - Calage pluie-niveau à Verniolle (BSS002LPFG) sur la période 1996-2022 .....	57

Illustration 38 – Paramètres assurant le calage optimal à Tarsac (BSS002FMPK) sur la période 1996-2022.....	58
Illustration 39 - Calage pluie-niveau à Tarsac (BSS002FMPK) sur la période 1996-2022 .....	59
Illustration 40 – Prévision du niveau de la nappe au 1 <sup>er</sup> semestre 2023 sur les sites étudiés (France) .....	63
Illustration 41 - Chroniques piézométriques et pluviométriques (Llobregat, Espagne).....	68
Illustration 42 – Paramètres assurant le calage optimal au piézomètre P dans la vallée du Llobregat sur la période 1993-2020.....	70
Illustration 43 - Calage pluie-niveau sur le piézomètre « P » (Llobregat - Espagne) sur la période 1993-2020.....	70
Illustration 44 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre (BSS002KGEL) sur la période xxx.....	71
Illustration 45 - Comparaison entre valeurs de piézométrie calibrées (vert) et observées (noir) pour le piézomètre SV du site de Vall Baixa (Llobregat - Espagne) sur la période 1994-2020 ..	72
Illustration 46 – Chroniques piézométrique (283810010) et pluviométrique (Cartagena, Espagne) .....	73
Illustration 47 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre (283810010)) sur la période 2009-2021 .....	74
Illustration 48 - Comparaison entre valeurs de piézométrie simulées (vert) et observées (rouge) pour le piézomètre 283810010 du site de Cartagena (Espagne) sur la période 2009-2021 .....	75
Illustration 49 - Chroniques piézométriques et pluviométriques (Portugal).....	77
Illustration 50 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre de Salvaterra sur la période 2001 - 2021 .....	79
Illustration 51 - Comparaison des séries observée et simulée avec le modèle « pluie – piézométrie » développé pour le piézomètre de Salvaterra de Magos (Portugal) sur la période 2000-2021.....	79
Illustration 52 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre d’Escouparim sur la période 2000 - 2006.....	80
Illustration 53 - Comparaison entre observations et résultats de calibration de la piézométrie au piézomètre d’Escaroupim (Portugal). La période considérée pour la calibration s’étend de 2000 à 2006, les données de cumuls de pluie entre 2010 et 2015 impactent la vidange du modèle.....	81
Illustration 54 – Site Vitrine MétéEAU’Nappes.....	83
Illustration 55 – Page de connexion à l’application MétéEAU’Nappes .....	83
Illustration 56 – MétéEAU’Nappes – Partie cartographique.....	84
Illustration 57 – MétéEAU’Nappes - Symbologie .....	84
Illustration 58 – MétéEAU’Nappes – Accès à la partie graphique .....	85
Illustration 59 – MétéEAU’Nappes – Fiche piézomètre .....	86
Illustration 60 – MétéEAU’Nappes – Fiche piézomètre : IPS superposé aux prévisions.....	87
Illustration 61 – MétéEAU’Nappes – Points modélisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER .....	87

Illustration 62 – MétéEAU'Nappes – Points modélisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER  
– Zoom sur le Sud-Ouest de la France ..... 88



# 1. Contexte et objectifs

Le projet Interreg Sudoe AQUIFER intitulé "Outils innovants pour l'intégration des eaux souterraines dans un contexte de raréfaction des ressources en eau" est financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre du programme Interreg SUDOE V (2014-2020). Il a pour but de capitaliser, tester, diffuser et transférer des pratiques innovantes pour la préservation, la surveillance et la gestion intégrée des aquifères, afin d'aider la prise de décisions pour la gestion des ressources en eau souterraine.

Ce projet associe 9 partenaires du Sud-Ouest de l'Europe : l'IGME (Instituto Geológico y Minero de España), le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières,) l'ISA-LEAF (Instituto Superior de Agronomia), Aqua-Valley, CWP (Association catalane pour l'innovation et l'internationalisation du secteur de l'eau), PPA (Associação Parceria Portuguesa para a Água), CUADLL (Comunitat d'usuaris d'aigua de la vall baixa i delta del Llobregat) et CRCC (Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena).

Le projet SUDOE AQUIFER est divisé en 4 groupes de tâches spécifiques regroupant 15 tâches concrètes avec 25 livrables et 10 résultats. Il comprend trois groupes de tâches transversales regroupant 17 tâches concrètes. Ce document fait référence au **livrable de l'activité 2.2 : E2.2.1 - "Prédiction des niveaux des eaux souterraines : une solution innovante pour soutenir la gestion des eaux souterraines"**.

Depuis plusieurs années, le BRGM travaille sur la plateforme Internet « MétéEAU Nappes » (<https://meteeaunappes.brgm.fr/fr>) qui offre un ensemble de services permettant le suivi du comportement actuel et futur de certains aquifères en France et ainsi la disponibilité de la ressource en eau par anticipation sur plusieurs points de suivis du niveau des nappes d'eau souterraine associés à un modèle global (Mougin et al., 2018 et 2020 ; Surdyck et al., 2022).

Si plus de 500 points permettent de suivre le niveau piézométrique des nappes libres du bassin Adour-Garonne, en France, en temps réel (<https://ades.eaufrance.fr/>), aucune chronique n'avait fait l'objet d'une modélisation offrant la possibilité de prévoir le niveau des nappes à 6 mois. De la même façon en Espagne et au Portugal, si le niveau des nappes d'eau souterraines est régulièrement suivi sur les sites d'étude du projet SUDOE AQUIFER, aucune chronique n'a, jusqu'à présent, été exploitée de façon à prévoir leur niveau à plusieurs mois.

La tâche 2.2 du projet SUDOE AQUIFER avait pour objectif de combler ce manque en modélisant les chroniques piézométriques de 6 ouvrages français du bulletin de situation hydrologique (BSH, <https://www.eaufrance.fr/publications/bsh>), de 3 piézomètres situés sur les sites d'étude en Espagne et 2 piézomètres situés au Portugal. Les prévisions des niveaux de la nappe ont été émises selon différents scénarios climatiques (chapitres 5, 6, 7 et 8). Les résultats sont mis à disposition sur la plateforme internet MétéEAU Nappes (chapitre 9).

Ce document a été écrit par Sandra Beranger (BRGM), responsable du développement de ce produit pour le projet AQUIFER, avec la contribution de Pierre Le Cointe et Vivien Hakoun (BRGM).

## 2. Modélisation hydrogéologique globale

### 2.1. LE MODELE GARDENIA

#### 2.1.1. Principe général

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) (Thiéry, 2003, 2014) est un modèle hydrologique global à réservoirs pour la simulation des bassins versants. Il est téléchargeable gratuitement depuis le site du BRGM : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant> (accès janvier 2023).

À partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, il permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) ;  
et / ou
- le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

Comme explicité sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, GARDÉNIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de 3 ou 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les **premières dizaines de centimètres du sol** dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) : **ce réservoir sol est dit « progressif »** ; il est régi par des lois quadratiques. Il modélise la partie sol du système hydrologique. Le principal paramètre influant ce réservoir est la capacité du réservoir sol progressif, mesurée en mm, qui représente la « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ou la « capacité de rétention » hors eau liée.
- une **zone intermédiaire** qui produit un écoulement rapide : ce réservoir H représente la **zone non saturée**. Il est alimenté en eau par la pluie nette provenant du réservoir sol, et est vidangé par deux exutoires :
  - Percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle),
  - Écoulement rapide vers l'exutoire du bassin, le ruissellement, selon une loi non-linéaire contrôlée par la hauteur d'eau dans ce réservoir.

Le ruissellement est prépondérant quand le réservoir H a un taux de remplissage élevé.

Deux paramètres hydrologiques régissent son comportement :

- Le temps de demi-percolation (en mois) : C'est le temps caractérisant la vidange du réservoir intermédiaire, donc la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement de la composante lente du débit.
- HRuiPer (en mm) : C'est la hauteur d'eau (en mm) dans le réservoir H pour laquelle il y a une répartition égale entre écoulement rapide et percolation.

- **une ou deux zones aquifères** qui produisent l'écoulement lent : ce.s réservoir.s souterrain.s G1.2 représente.nt généralement l'**aquifère**. Il.s est.s alimenté.s en eau par le réservoir intermédiaire via la percolation et est vidangé par écoulement lent suivant une loi de vidange exponentielle. Les schémas de principe du fonctionnement de ces réservoirs sont précisés sur les Illustration 2 à Illustration 4 pour 1 ou 2 réservoirs souterrains, avec 1 ou 2 orifices de vidange.

Le temps de vidange est contrôlé par le temps de demi-tarissement (en mois), temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de cette composante lente de l'écoulement est divisé par deux.

Un autre paramètre intervient dans le dimensionnement de ce réservoir G1 : le coefficient d'emménagement apparent global de la nappe, non influencé par un apport extérieur.

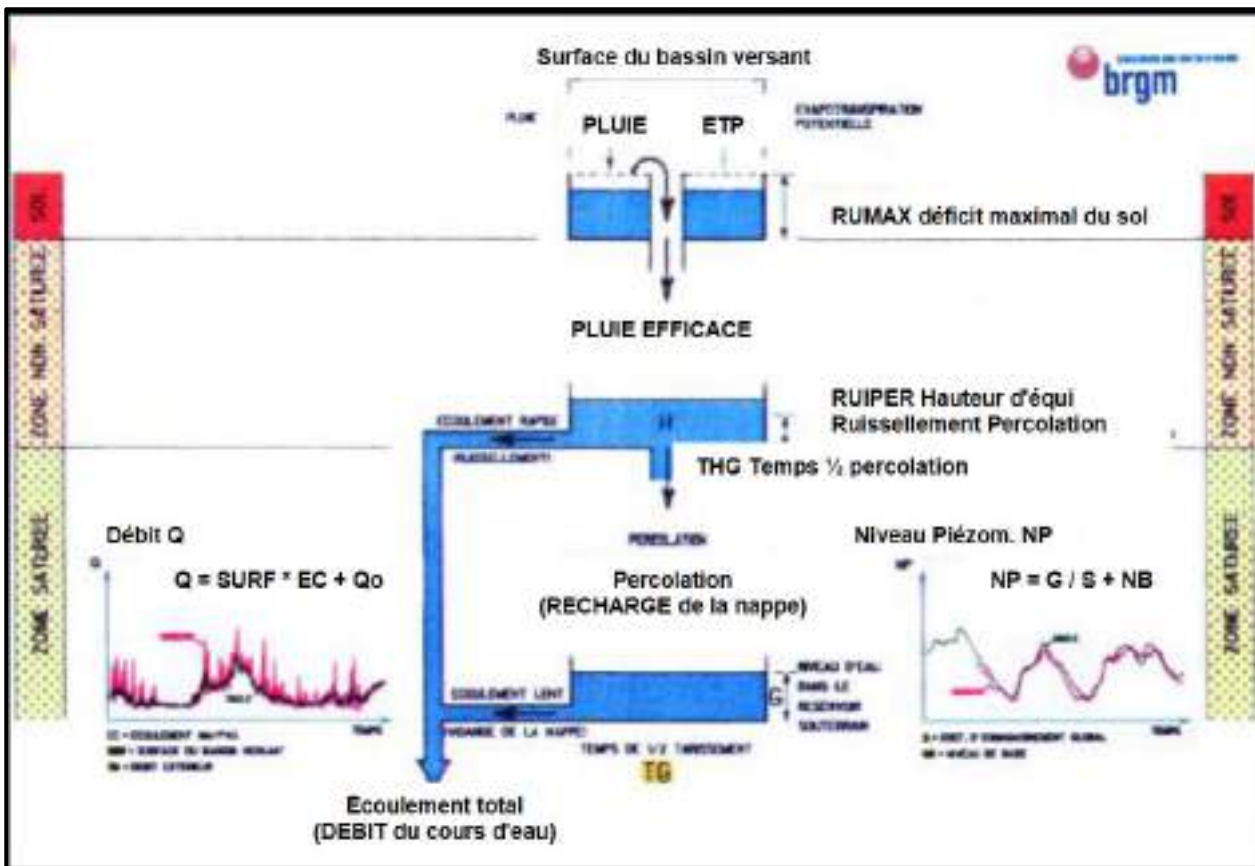


Illustration 1 – Schéma de principe du modèle GARDENIA (Source : Thiéry, 2014)

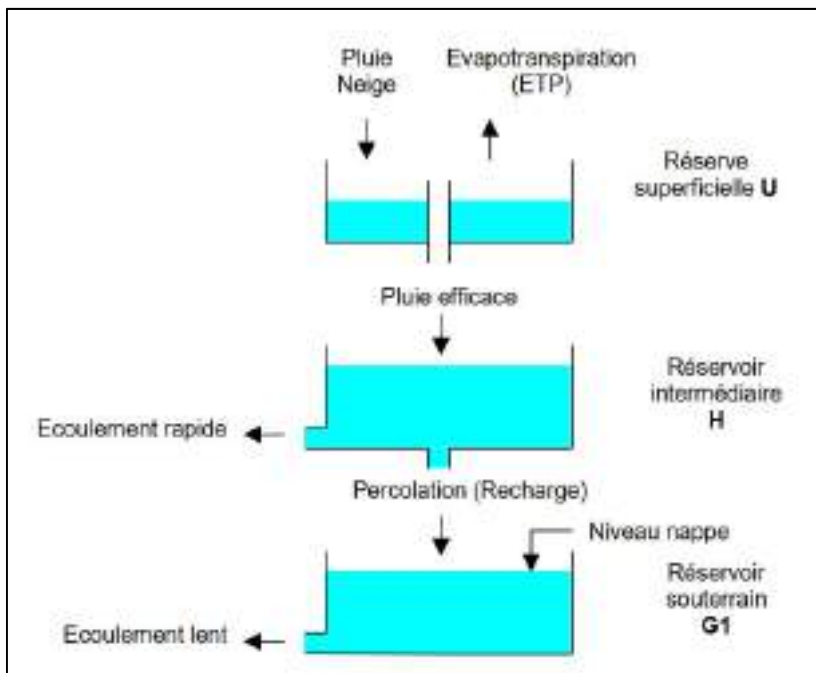


Illustration 2 – Schéma le plus simple : un seul réservoir souterrain (Source : Thiéry, 2014)

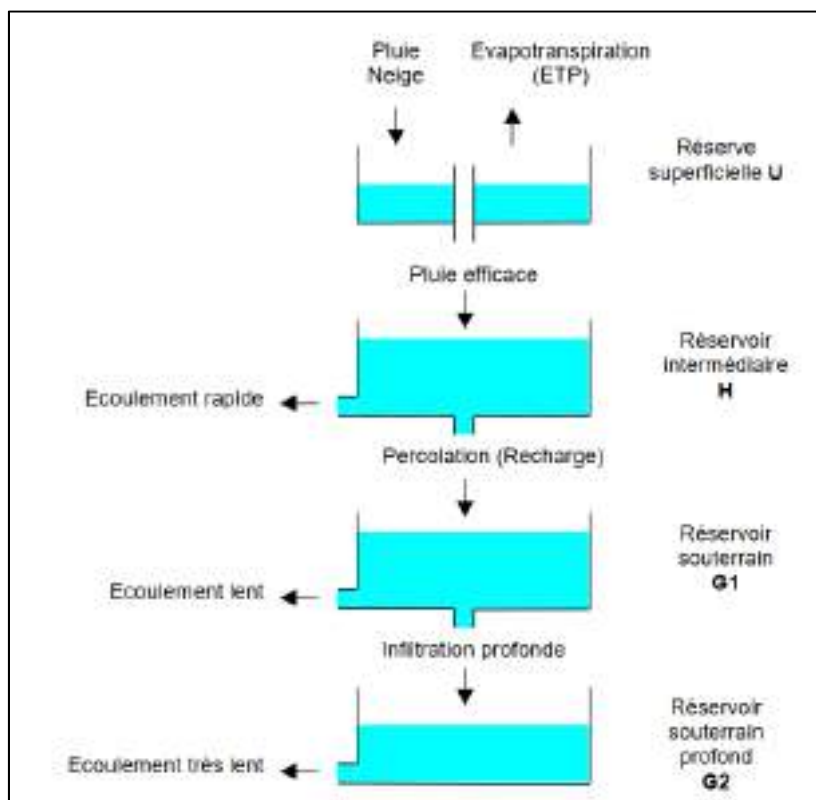


Illustration 3 – Schéma complexe : deux réservoirs souterrains

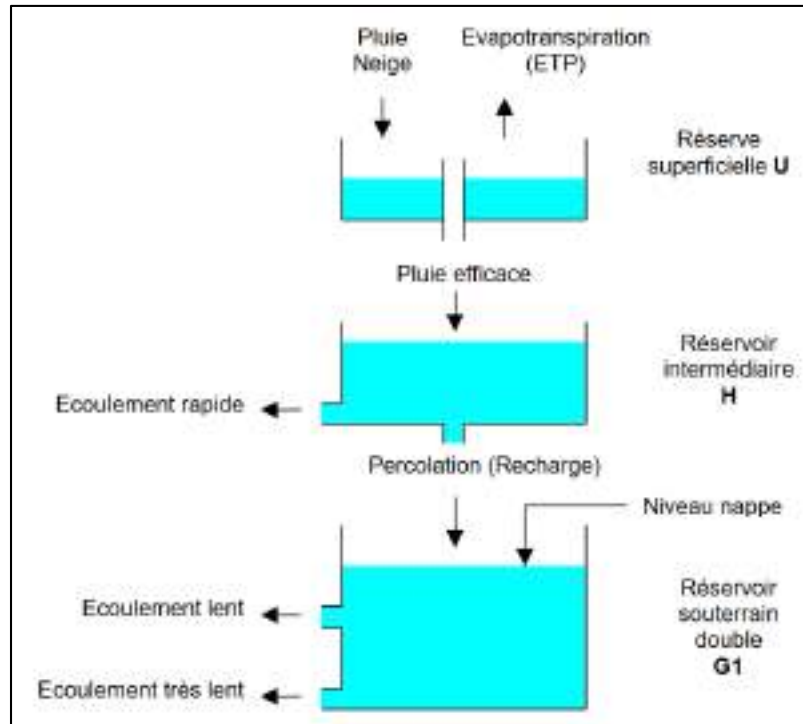


Illustration 4 – Schéma complexe : un réservoir souterrain à deux orifices de vidange.

### 2.1.2. Les paramètres d'entrée du modèle

Les variables et données d'entrée du modèle sont la pluie et l'ETP, ainsi qu'un jeu de paramètres initiaux (cf. paragraphe 2.1.6). Le pas de temps des données peut être variable, mais le pas de temps de calcul est fixe (p.ex. horaire, journalier, mensuel).

La modélisation se fait en plusieurs phases, comme décrit ci-dessous.

### 2.1.3. Phase d'initialisation

La période d'initialisation (non utilisée pour le calage) dépend de l'inertie du système hydrologique ; plus le système a de la « mémoire » plus la période doit être longue. Cela suppose de disposer de chroniques de pluie et ETP sur une période aussi longue que possible antérieurement à la période de calage.

Pour les différentes modélisations réalisées, la période d'initialisation prise en compte est de 20 années pour les piézomètres localisés en France, 2 années dans les cas espagnol et portugais. Cette différence s'explique par les historiques de chroniques météorologique importants (depuis 1958) auxquels nous avons accès en France, ce qui n'a pas été le cas pour les données collectées en Espagne et au Portugal.

### 2.1.4. Phase de calage

Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les données d'entrée (pluie, ETP) et les données de sortie (débit 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. 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.

### 2.1.5. Equations du bilan hydrologique

L'exploitation des modèles hydrologiques globaux GARDENIA pluie – débit et pluie – niveau piézométrique permet de quantifier les différents termes du bilan hydrologique.

Les équations du bilan hydrologique global pluie – débit sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Pluie} &= \text{ETR} + \text{PEF} \\ \text{PEF} &= Q_{\text{RAP}} + Q_{\text{SOUT}} + d\text{STO} \\ Q_{\text{Rivière}} &= (Q_{\text{RAP}} + Q_{\text{SOUT}}) + Q_{\text{Echange}} \end{aligned}$$

avec :

*Pluie* : Hauteur de pluie précipitée sur le bassin

*ETR* : Hauteur d'eau évapotranspirée sur le bassin

*PEF* : Hauteur de pluie efficace ou écoulement global

$Q_{\text{RAP}}$  : Hauteur d'eau écoulee rapide (Ruissellement superficiel + écoulement karstique rapide)

$Q_{\text{SOUT}}$  : Hauteur d'eau écoulee correspondant à l'écoulement souterrain lent

$Q_{\text{Echange}}$  : Hauteur d'eau écoulee correspondant au débit d'échange avec d'autres systèmes hydrologiques :

$$Q_{\text{Echange}} > 0 \text{ si apports extérieurs au bassin}$$

$$Q_{\text{Echange}} < 0 \text{ si sortie d'eau du bassin}$$

Dans les modélisations hydrologiques globales pluie – niveau piézométrique, le niveau piézométrique est déduit de la hauteur d'eau dans le réservoir souterrain (*G*) par la relation :

$$NP = \frac{G}{SG} + NB$$

avec :

*NP* : Niveau piézométrique

*G* : Hauteur d'eau dans le réservoir souterrain

*SG* : Coefficient d'emmagasinement global

*NB* : Niveau de base (niveau qui serait atteint en l'absence totale d'alimentation au bout d'un temps infini)

### 2.1.6. Les paramètres hydrologiques du modèle

Le jeu de paramètres à caler lors de la phase de calage est explicité dans le Illustration 5 :

*Illustration 5 – Paramètres du modèle GARDENIA*

	Paramètre	Unité	Dénomination
Paramètres hydroclimatiques	BV	km <sup>2</sup>	Surface du bassin versant
	Débit d'échange	m <sup>3</sup> /s	Débit d'échange avec d'autres systèmes hydrologiques <i><math>Q_{Echange} &gt; 0</math> si apports extérieurs au bassin</i> <i><math>Q_{Echange} &lt; 0</math> si sortie d'eau du bassin</i>
	Coeff_Emmag	%	Coefficient d'emménagement de la nappe
	Niv_Base	m	Niveau de base local de la nappe
	Corr. Pluie	%	Coefficient correcteur de la pluie
	Corr. ETP	%	Coefficient correcteur de l'ETP
	RUMAX	mm	Capacité du réservoir du sol
	RUMAX_PROG	mm	Capacité du réservoir sol progressif. Cette alternative à la RUMAX permet de rendre compte des variations de l'ETP en fonction du taux d'humidité du sol.
	RUIPER	mm	Hauteur d'égal ruissellement - percolation
	THG	Pas de temps	Temps de demi-percolation vers la nappe
	TG1	Pas de temps	Temps de demi-tarissement rapide du réservoir souterrain 1
	TG1_2	Pas de temps	Temps de demi-transfert entre les réservoirs souterrains 1 et 2
	Seuil_Sout1	mm	Seuil d'écoulement souterrain 1
	TG2	Pas de temps	Temps de demi-tarissement lent du réservoir souterrain 2
Déficit_Init	mm	Déficit initial du réservoir sol progressif	
Influence des	F_Pomp_Nap	-	Coefficient d'influence du pompage
	Tr_Pomp_Nap	Pas de temps	Temps de demi-montée de pompage
	Ts_Pomp_Nap	Pas de temps	Temps de stabilisation de pompage

## 2.2. PREVISION DU NIVEAU DE LA NAPPE

Le logiciel GARDENIA peut être utilisé pour prévoir le niveau de la nappe à plusieurs mois. Il utilise dans ce cas les données climatiques passées pour évaluer les niveaux d'eau qui seraient observés avec ces scénarios climatiques. Moyennant un nombre suffisant de scénarios climatiques (une cinquantaine), GARDENIA classe statistiquement les scénarios de niveaux d'eau potentiellement observables et dresse les courbes enveloppe :

- des niveaux d'eau observables en l'absence de pluie,
- des 10% des niveaux d'eau les plus bas potentiellement observables,
- des 20% des niveaux d'eau les plus bas potentiellement observables
- de la moyenne des niveaux d'eau observables,
- des 20% des niveaux d'eau les plus hauts potentiellement observables
- des 10% des niveaux d'eau les plus hauts potentiellement observables.

## 3. Choix des points à modéliser

### 3.1. LES SITES ETUDIÉS

Le projet SUDOE AQUIFER teste les pratiques innovantes sur 4 sites d'étude, à savoir :



Prévision du niveau des eaux souterraines : une solution innovante pour soutenir la gestion des eaux souterraines

- Le bassin Adour-Garonne, localisé dans le Sud-Ouest de la France
- Le delta du Llobregat, localisé au Sud de Barcelonne, en Espagne,
- Le Campo de Cartagena, localisé dans la région de Murcie, en Espagne,
- La vallée du Tage, localisée en mont de Lisbonne, au Portugal.

Ces sites sont repris sur la carte de la Illustration 6.



*Illustration 6 – Localisation des sites d'étude*

Plus précisément, dans le cadre de ce projet, les partenaires se sont engagés à modéliser :

- 6 piézomètres du bassin Adour-Garonne (France) associés au Bulletin de Situation Hydrologique,
- 2 piézomètres du delta du Llobregat (Espagne),
- 1 piézomètre du Campo de Cartagena (Espagne),
- 2 piézomètres de la vallée du Tage (Portugal),

A ces points de suivi se sont ajoutés 4 piézomètres du bassin Adour-Garonne (France) associés à la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne, leur modélisation étant importante afin de pouvoir évaluer les volumes prélevables sur cette plaine alluviale, travaux également réalisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER et faisant l'objet du rapport xxx.



## 3.2. CHOIX DES POINTS MODELISES

### 3.2.1. Sur le bassin Adour-Garonne (France) :

Parmi les 32 points que comptent le BSH du bassin Adour-Garonne, les points suivants les nappes alluviales ont été privilégiés, ces masses d'eau étant soumises à une pression anthropique importante en période d'étiage.

Les points sélectionnés sont :

- BSS002DEZW – Bioule (Commune de Bioule, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002CZWH - Les Barthes (Commune de Les Barthes, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002DDAH - Saint-Porquier (Commune de Saint-Porquier, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002KGEL - Saint-Elix (Commune de Saint-Elix-Le-Château, département de Haute-Garonne),
- BSS002LPFG – Verniolle (Commune de Verniolle, département de l'Ariège),
- BSS002FMPK – Tarsac (Commune de Tarsac, département du Gers).

A ces points s'ajoutent 4 ouvrages localisés dans l'emprise du modèle hydrodynamique en 3 dimensions de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne :

- BSS002DAWQ - Pédeloup (Commune de La-Ville-Dieu-Du-Temple, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002DDZV - Saint-Pierre (Commune de Lacourt-Saint-Pierre, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002DETB – Pradas (Commune de Saint-Etienne-de-Tulmont, département de Tarn-et-Garonne),
- BSS002CZMA – Pomiès (Commune de Saint-Nicolas-de-la-Grave, département de Tarn-et-Garonne).

Ces points de suivi sont localisés sur l'illustration 7 et leurs chroniques piézométriques enregistrées historiquement sont reprises sur l'illustration 8.

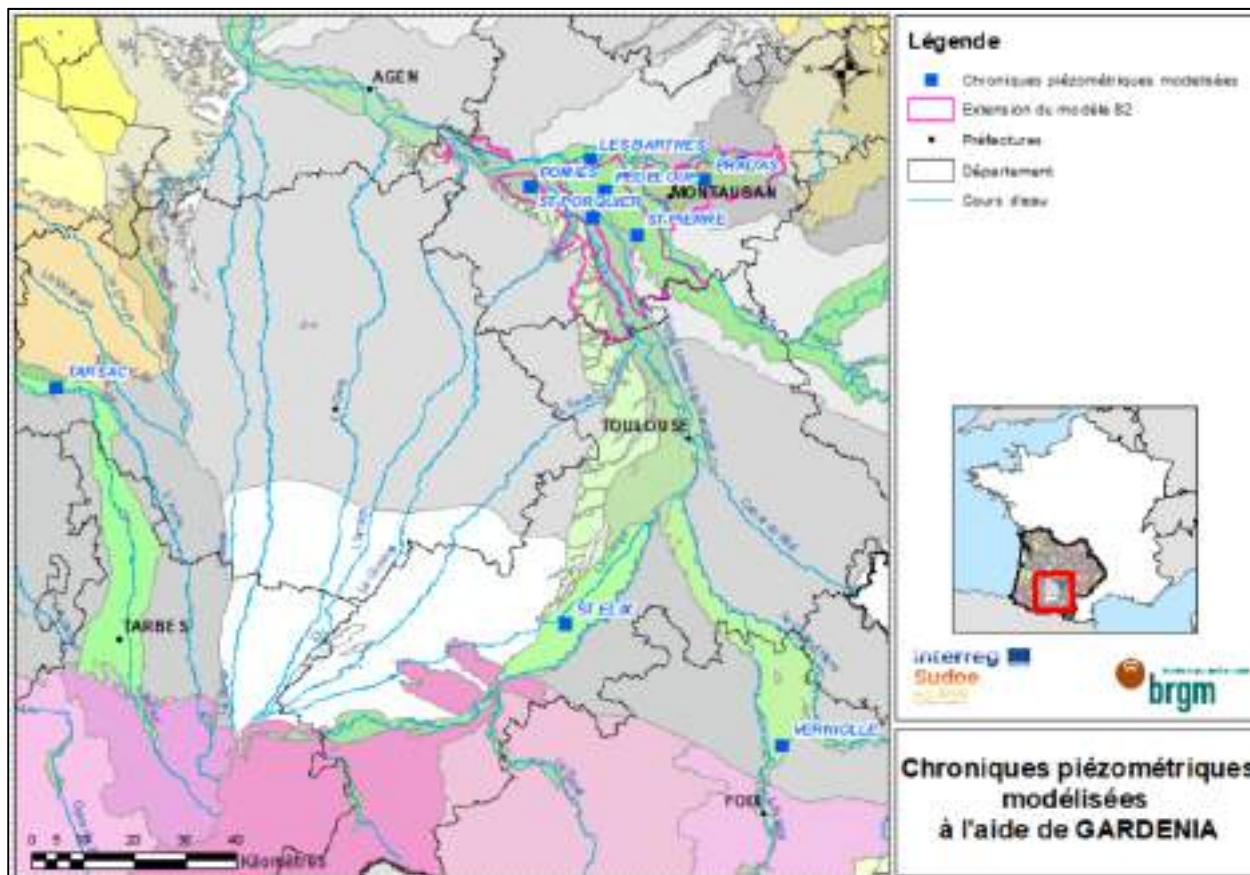
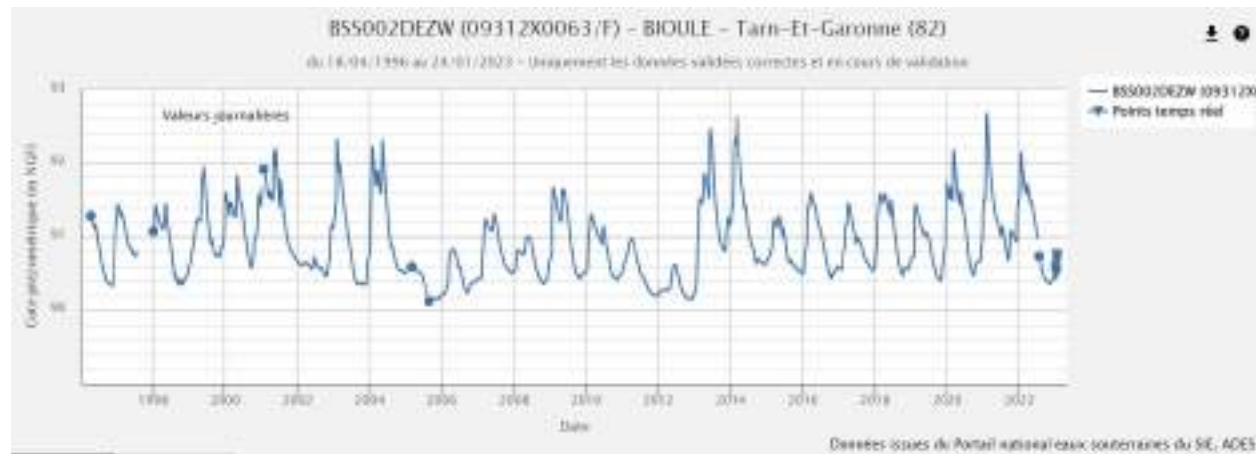


Illustration 7 – Localisation des points modélisés





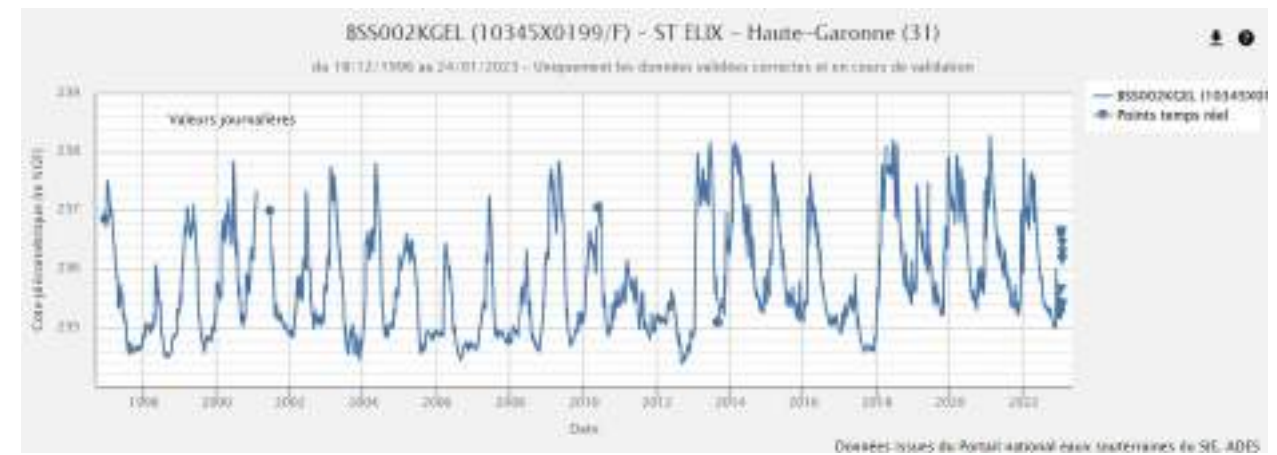
Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002DEZW – Bioule (Source : [Point d'eau 09312X0063/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



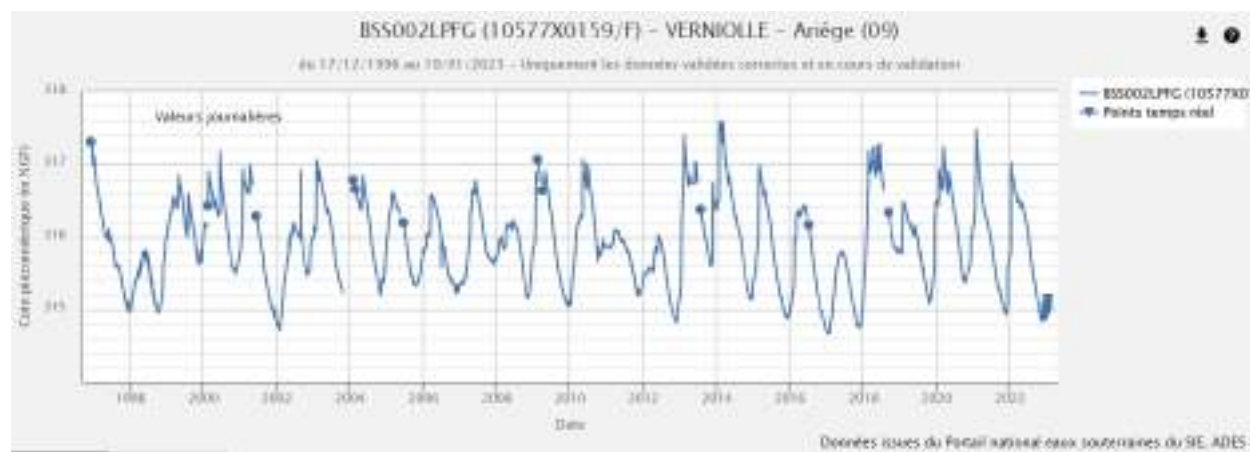
Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002CZWH – Les Barthes (Source : [Point d'eau 09301X0028/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



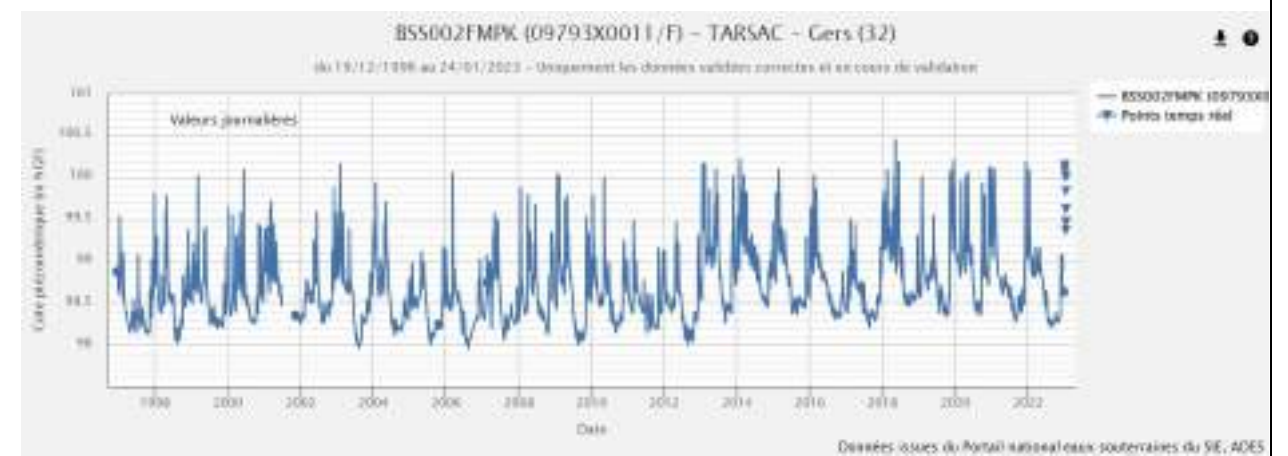
Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002DDAH – St-Porquier (Source : [Point d'eau 09306X0091/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002KGEL – St-Elix (Source : [Point d'eau 10345X0199/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002LPFG – Verniolle (Source : [Point d'eau 10577X0159/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



Côte piézométrique enregistrée sur le point BSS002FMPK – Tarsac (Source : [Point d'eau 09793X0011/F - Site public - ADES \(eaufrance.fr\)](#))



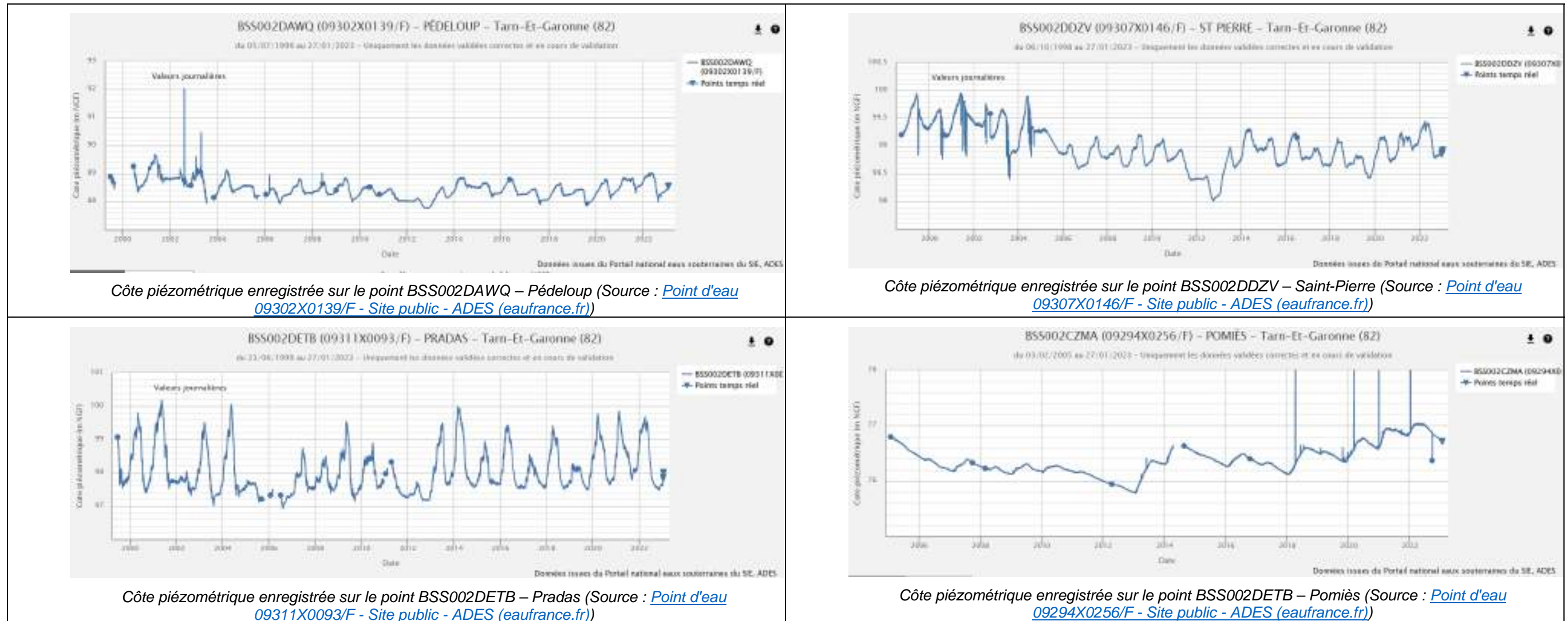


Illustration 8 – Côtes piézométriques enregistrées sur les points modélisés localisés sur le bassin Adour-Garonne

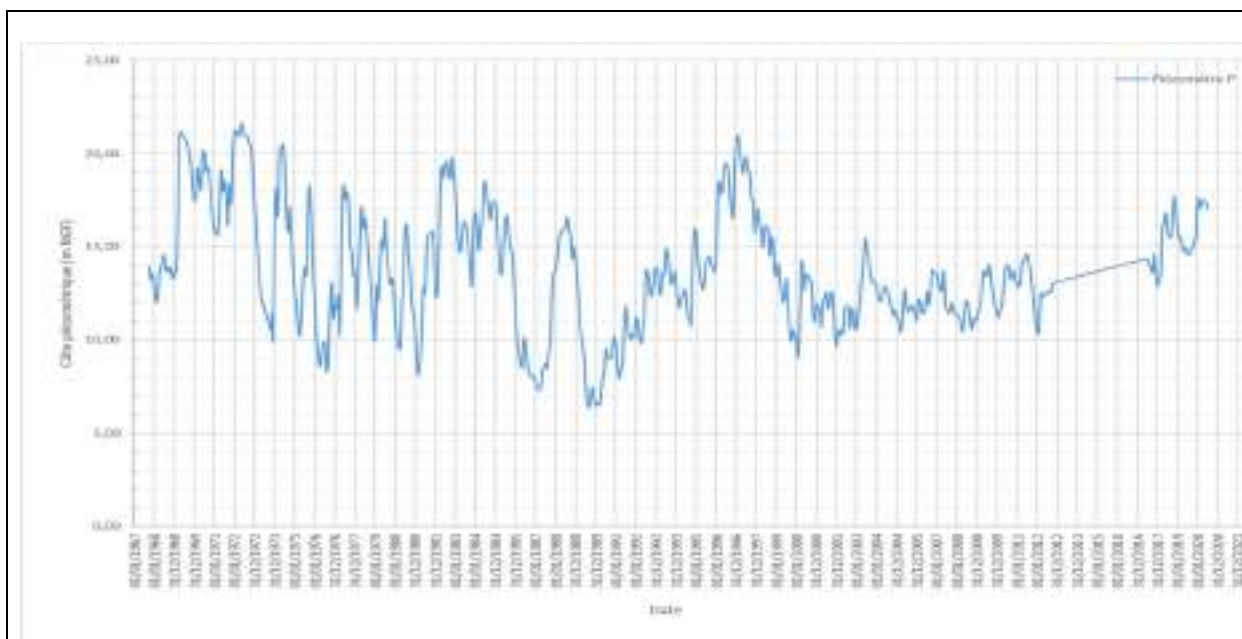
### 3.2.2. Sur le delta du Llobregat (Espagne)

Sur le delta du Llobregat, le partenaire du projet, CUADLL, a transmis les chroniques de suivi de 2 piézomètres : « P » et « SV ».

Ces points sont localisés sur Illustration 9 et les chroniques piézométriques enregistrées sont reprises sur l'illustration 10.



*Illustration 9 – Localisation des piézomètres « P » et « SV » (Llobregat, Espagne)*



Piezomètre « P »



Piezomètre « SV »

Illustration 10 – Côtes piézométriques enregistrées sur les points modélisés localisés sur le site du Delta de Llobregat (Espagne)



### 3.2.3. Sur le Campo de Cartagena (Espagne)

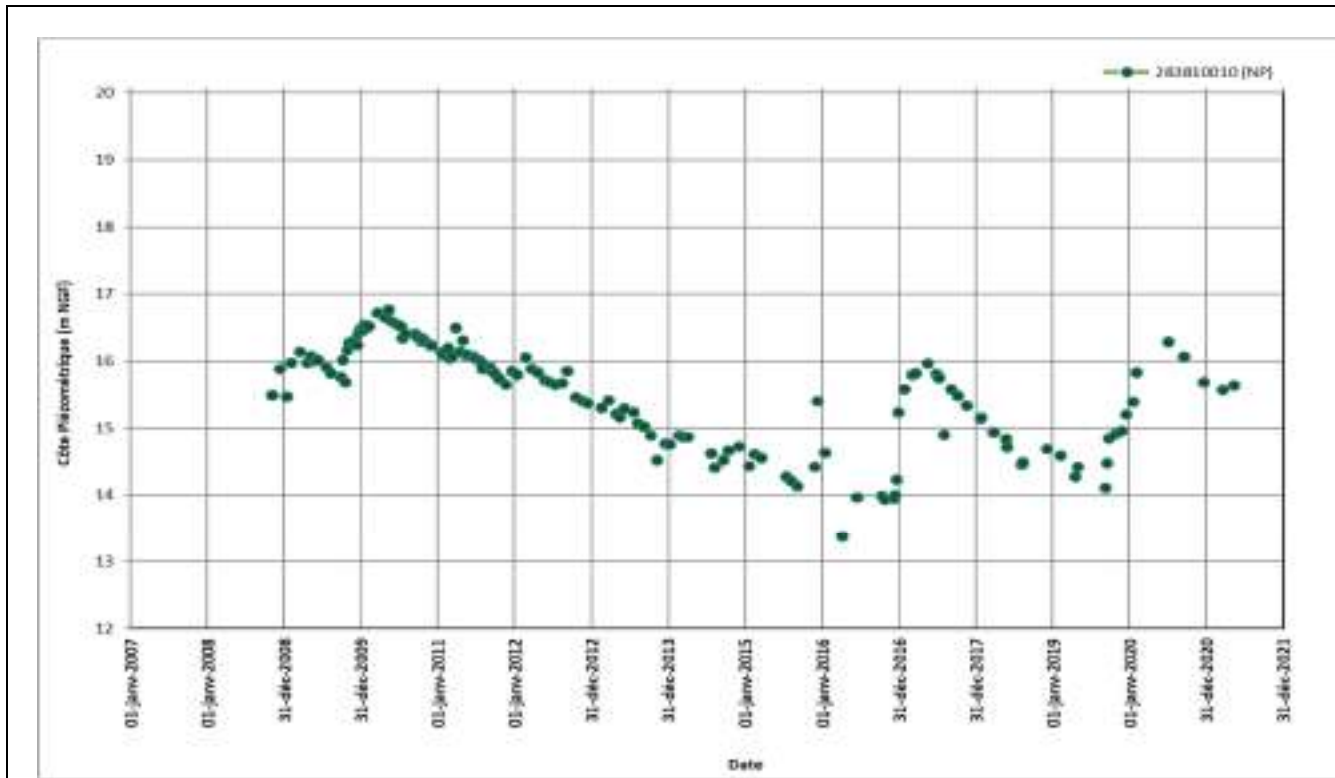
Sur le site de Campo de Cartagena, le partenaire du projet, IGME, a transmis les chroniques de suivi de 4 piézomètres, reprises sur l'illustration 12 et localisés sur l'illustration 11. Parmi ces données, un point a été choisi, celui de Venta del Pino, pour sa chronique présentant un suivi manuel au pas de temps assez régulier.



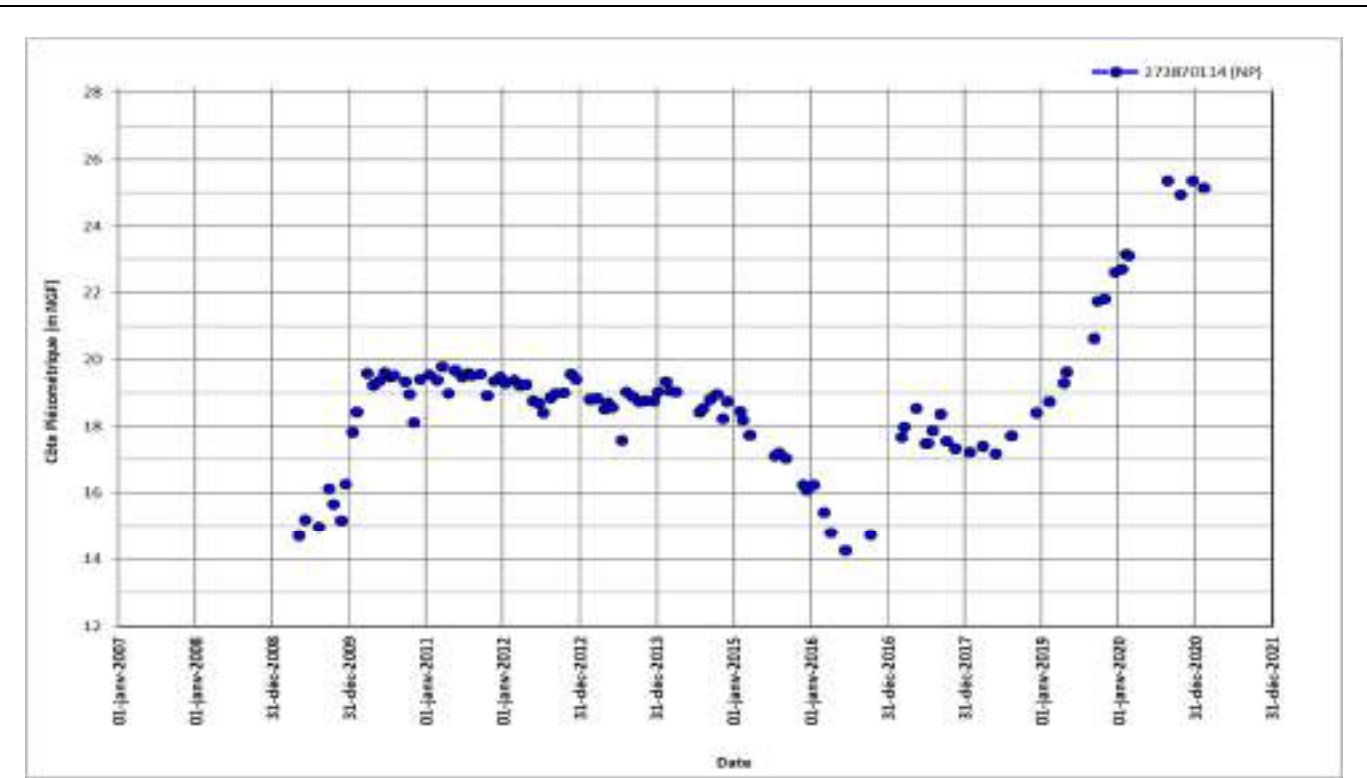
*Illustration 11 – Localisation des piézomètres sur le site de Campo de Cartagena (Espagne)*



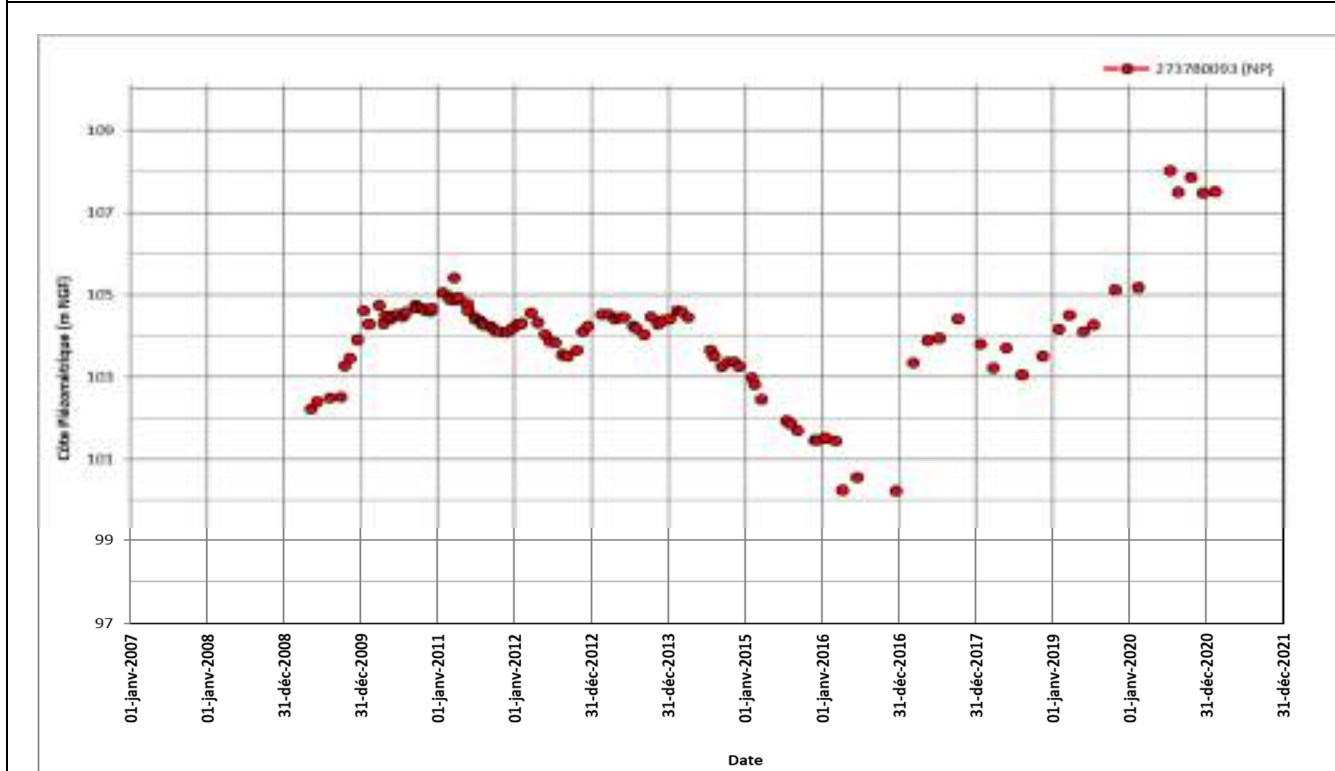




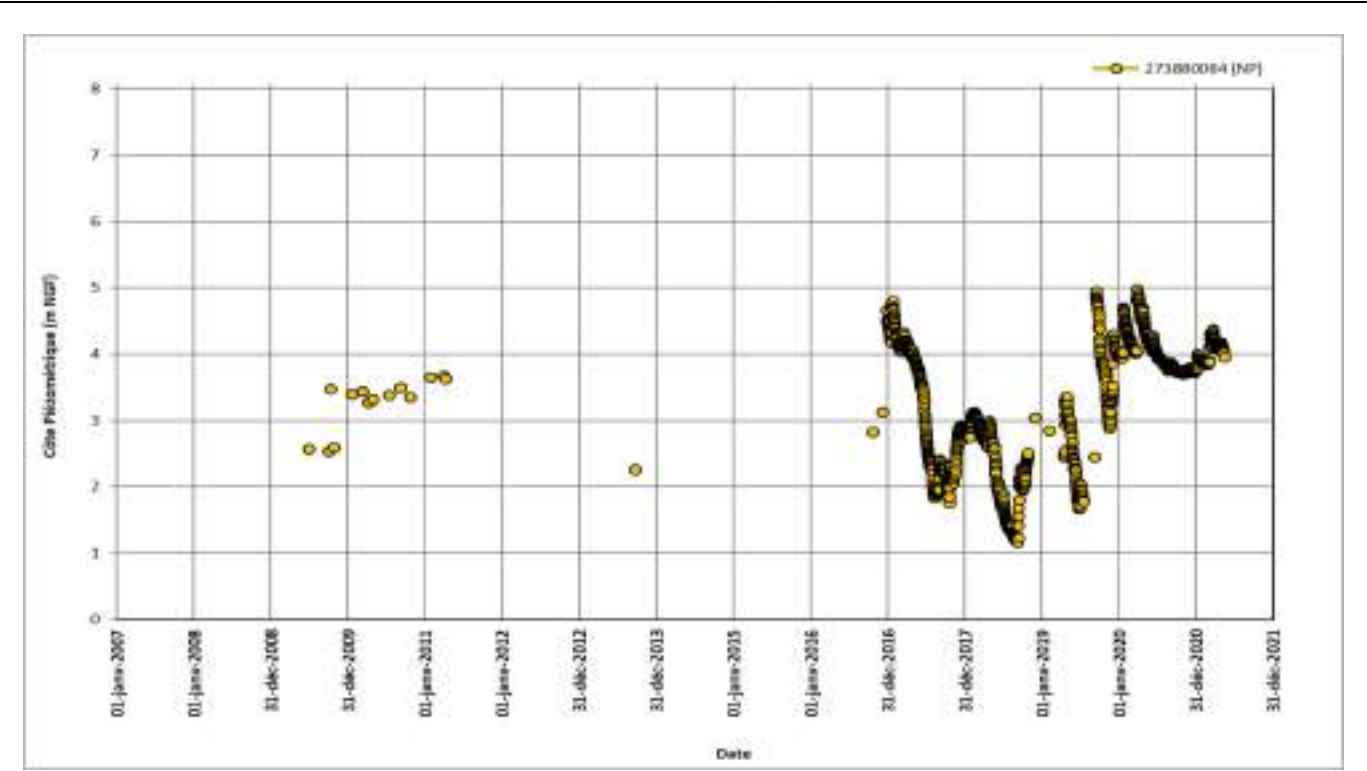
Piézomètre 383810010 – Venta del Pino



Piézomètre 273870114 – Cortijo de la Palma



Piézomètre 273780093 Avileses 2



Piézomètre 273880084 – Cebas Golf 2

Illustration 12 - Côtes piézométriques enregistrées sur les points localisés sur le site du Cartagena (Espagne)



### 3.2.4. Sur la vallée du Tage (Portugal)

Sur la vallée du Tage, trois sites avec suivi piézométrique ont été explorés et deux ont été retenus pour la modélisation. Ces trois sites étaient : S. de Magos (ref. SNIRH<sup>4</sup> 391/33), Azinhaga (ref. SNIRH 341/17) et Escaroupim (ref. SNIRH 377/94). Ils sont localisés sur et les côtes piézométriques enregistrées sont reproduites sur l'illustration 14.

Le choix des deux sites retenus pour cette étude s'est fait sur la base d'une analyse préalable des données disponibles et de l'impact des lacunes de données (cumuls pluviométriques, ETP et piézométrie) sur les résultats de modélisation. Cette analyse a permis de qualifier les résultats au regard des incertitudes associées aux données. Les deux sites sélectionnés, qui présentent le moins d'incertitude, sont celui de Salvaterra de Magos et celui d'Escaroupim.



Illustration 13 – Localisation des piézomètres sur la vallée du Tage (Portugal)

<sup>4</sup> <https://snirh.apambiente.pt/>

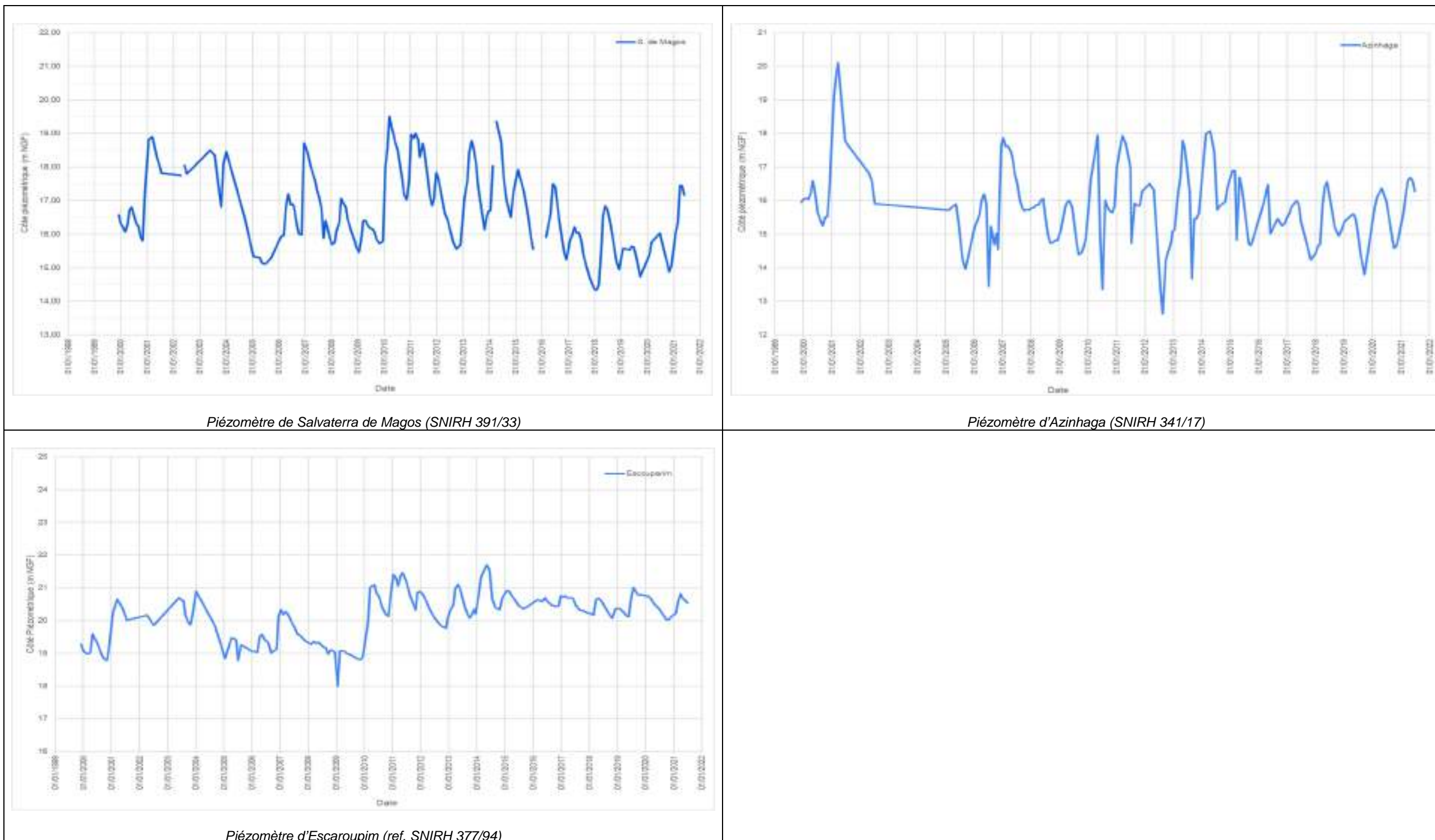


Illustration 14 - Côtes piézométriques enregistrées sur les points localisés dans la vallée du Tage (Portugal)

## 4. Méthodologie utilisée

### 4.1. DONNEES D'ENTREE ET DE CALAGE DES MODELES

Les données d'entrée sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et, le cas échéant, les prélèvements. Les données de calage, dans GARDENIA, sont de deux types : niveaux piézométriques et données de débit.

Dans la présente étude, les données de débit n'ont pas été utilisées, les points de suivi piézométriques étant localisés proche de grands cours d'eau dont les aménagements et la gestion ne permettent pas une exploitation de la chronique de débit à des fins de calage du modèle.

Les sources de données et de calage étant différentes d'un site à un autre, les méthodes d'obtention et d'analyse sont détaillées dans les chapitres 5 à 8 selon le site étudié.

### 4.2. PARAMETRES INITIAUX DU CALAGE

### 4.3. RESULTATS DU CALAGE

Dans chaque paragraphe présentant les résultats de modélisation, les niveaux piézométriques simulés sont représentés pour les différents points de suivi et comparés aux niveaux observés.

Le coefficient permettant de rendre compte de la qualité du calage est le coefficient de NASH. Il est basé sur le calcul du rapport de la variance d'erreur de la série chronologique modélisée divisé par la variance de la série chronologique observée. Plus celui-ci se rapproche de 1, meilleure est la modélisation de la chronique piézométrique.

## 5. Application au bassin Adour-Garonne (France)

Les points de suivi modélisés sur le bassin Adour-Garonne sont détaillés dans le paragraphe 3.2.1.

### 5.1. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée sont la pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les prélèvements.

#### 5.1.1. Pluie

Le modèle SAFRAN fournit les chroniques météorologiques depuis 1955. SAFRAN est un système d'analyse à mésoéchelle qui utilise des observations de surface, combinées à des

données d'analyse de modèles météorologiques pour produire, au pas de temps horaire, les paramètres suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Dans le présent travail, les pluies et ETP SAFRAN ont été utilisées au pas de temps journalier.

Les chroniques pluie et ETP ont été extraites de la publitèque de Météo-France (fichiers disponibles pour l'ensemble des mailles du territoire Français pour la période 1958 à 2020). Un script Python a été développé pour extraire de ces fichiers de données les mailles qui concernent la zone d'étude et reconstituer des séries temporelles de pluie et d'ETP pour chacune de ces mailles.

Les données de pluie SAFRAN de la maille du point de suivi sont considérées comme fiable, mais comme l'émission d'une prévision nécessite des données météorologiques actualisées au pas de temps mensuel (cf. paragraphe 9), et que les données SAFRAN ne sont mises à jour qu'annuellement, il a été nécessaire d'assembler la chronique de la maille SAFRAN du point de suivi à la chronique de la station météorologique représentative de ce point de suivi.

Pour ce faire, les zones climatiques homogènes (« zones symposium ») SAFRAN ont été utilisées et la station météorologique en service, de préférence de type 0 ou 1, la plus pertinente a été sélectionnée et associée au point de suivi. Dans certains cas (absence de station de référence, station disposant d'une chronique courte, etc.), les chroniques de pluie de plusieurs stations ont été comparées aux chroniques SAFRAN de chaque maille retenue.

Afin de ne pas introduire de biais dans la chronique de pluie du fait de l'assemblage de deux sources de données de pluie distinctes, la chronique de pluie de chaque maille SAFRAN dans laquelle se trouve un piézomètre a été comparée aux chroniques des stations météorologiques retenues. Cette comparaison s'est appuyée sur des comparaisons graphiques et sur des tests statistiques. Globalement, les deux sources de données de pluie sont très bien corrélées. Seule la maille associée au piézomètre de Saint-Elix (BSS002KGEL) présente une corrélation moins bonne avec la station de Muret-Lherm, tout comme avec la station de Palaminy, toutes deux portant localisées dans la même zone climatique homogène.

Ce travail a permis de **rattacher chaque piézomètre modélisé à une station météorologique de référence**, listée dans le Illustration 15.

*Illustration 15 – Association Piézomètre – Station météorologique - Pluie*

Piézomètre – Code BSS	Piézomètre - Dénomination	Station météorologique
BSS002DEZW	Bioule	Montauban
BSS002CZWH	Les Barthes	Castelsarrasin
BSS002DDAH	Saint-Porquier	Montauban
BSS002DAWQ	Pédeloup	Castelsarrasin
BSS002DDZV	Saint-Pierre	Montauban
BSS002DETB	Pradas	Montauban



BSS002CZMA	Pomiès	Castelsarrasin
BSS002KGEL	Saint-Elix	Muret-Lherm
BSS002LPFG	Verniolle	Montaut
BSS002FMPK	Tarsac	Maumusson

Les données de pluie insérées dans le modèle GARDENIA sont :

- Les pluies de la station de Montauban, corrigées d'un coefficient de correction fonction de la pente de la régression linéaire entre les pluies de la maille SAFRAN correspondant au piézomètre et la station météorologique, pour les modélisations des piézomètres BSS002DEZW (Bioule), BSS002DDAH (Saint-Porquier), BSS002DDZV (Saint-Pierre) et BSS002DETB (Pradas). Cette station météorologique présente en effet un historique de suivi suffisamment long (antérieur au 1<sup>er</sup> août 1958) pour s'affranchir de la combinaison des 2 sources de données de pluie.
- Les pluies des stations de Castelsarrasin, Muret-Lherm, Montaut et Maumusson, corrigées d'un coefficient de correction fonction de la pente de la régression linéaire entre les pluies de la maille SAFRAN correspondant au piézomètre et la station météorologique, et complétées par les données de pluie SAFRAN de la maille correspondant au piézomètre pour les piézomètres BSS002CZWH (Les Barthes), BSS002DAWQ (Pédeloup), BSS002CZMA (Pomiès), BSS002KGEL (Saint-Elix), BSS002LPFG (Verniolle) et BSS002FMPK (Tarsac).

### 5.1.2. Evapotranspiration (ETP)

Si le modèle SAFRAN fournit également l'évapotranspiration sur une grille de calcul régulière de 8 km x 8 km depuis 1955, ces données n'ont pas été retenues. Différents tests réalisés au BRGM montrent en effet de fortes variations dans ces données entre deux éditions SAFRAN et Météo-France émet également une vigilance quant à l'utilisation de ces données sur la pluriannuelle.

Aussi, les données ETP des stations météorologiques ont été privilégiées. Les données ETP des mailles SAFRAN ont été utilisées pour évaluer l'écart d'ETP entre 2 mailles, et notamment entre la maille où se trouve le piézomètre à modéliser et la maille où se trouve la ou les stations météorologiques à tester / utiliser. La pente de la régression linéaire entre les données ETP de ces deux mailles correspond au coefficient de correction appliqué à l'ETP dans GARDENIA.

Comme les stations météorologiques de Castelsarrasin, Muret-Lherm et Montauban ont arrêté de collecter les données nécessaires au calcul de l'ETP en 2000, 2010 et 2021 respectivement, la chronique ETP de la station de Toulouse – Blagnac a été utilisée pour tous les piézomètres modélisés, à l'exception du point BSS002FMPK (Tarsac) pour lequel la chronique de la station de Tarbes-Lourdes-Pyrénées a été utilisée (cf. Illustration 16). Ces chroniques ont été complétées par les chroniques de la maille SAFRAN correspondant à la station météorologique, corrigées par régression linéaire, pour les quelques jours de données manquantes sur la longueur de la chronique ETP.



Illustration 16 – Association Piézomètre – Station météorologique - ETP

Piézomètre – Code BSS	Piézomètre - Dénomination	Station météorologique
BSS002DEZW	Bioule	Toulouse - Blagnac
BSS002CZWH	Les Barthes	Toulouse - Blagnac
BSS002DDAH	Saint-Porquier	Toulouse - Blagnac
BSS002DAWQ	Pédeloup	Toulouse - Blagnac
BSS002DDZV	Saint-Pierre	Toulouse - Blagnac
BSS002DETB	Pradas	Toulouse - Blagnac
BSS002CZMA	Pomiès	Toulouse - Blagnac
BSS002KGEL	Saint-Elix	Toulouse - Blagnac
BSS002LPFG	Verniolle	Toulouse - Blagnac
BSS002FMPK	Tarsac	Tarbes-Lourdes-Pyrénées

### 5.1.3. Prélèvements

Les piézomètres modélisés étant localisés dans des plaines alluviales à usage dominant agricole, il est possible que certaines chroniques piézométriques soient impactées par des prélèvements associés à l'irrigation, même si les points ne sont pas localisés au voisinage immédiat de points de prélèvements.

Lors du calage des modélisations avec GARDENIA, la prise en compte, ou non, des prélèvements a été testée pour estimer l'amélioration, ou non, de la modélisation. Les tests ont porté sur :

- la prise en compte des prélèvements annuels à l'échelle départementale (source : BNPE ; [Accueil | BNPE \(eaufrance.fr\)](#)), répartis sur l'année et pondérés par GARDENIA,
- la prise en compte de prélèvements répartis sur les mois de juin à septembre, et répartis selon le schéma 10% - 40% - 40% - 10% sur ces 4 mois (répartition issue de l'étude EAUCEA) et pondérés par GARDENIA.

Lorsque les prélèvements contribuaient à l'amélioration des résultats de modélisation, cette dernière façon de procéder permettait une amélioration significative du calage.

## 5.2. DONNEES DE CALAGE

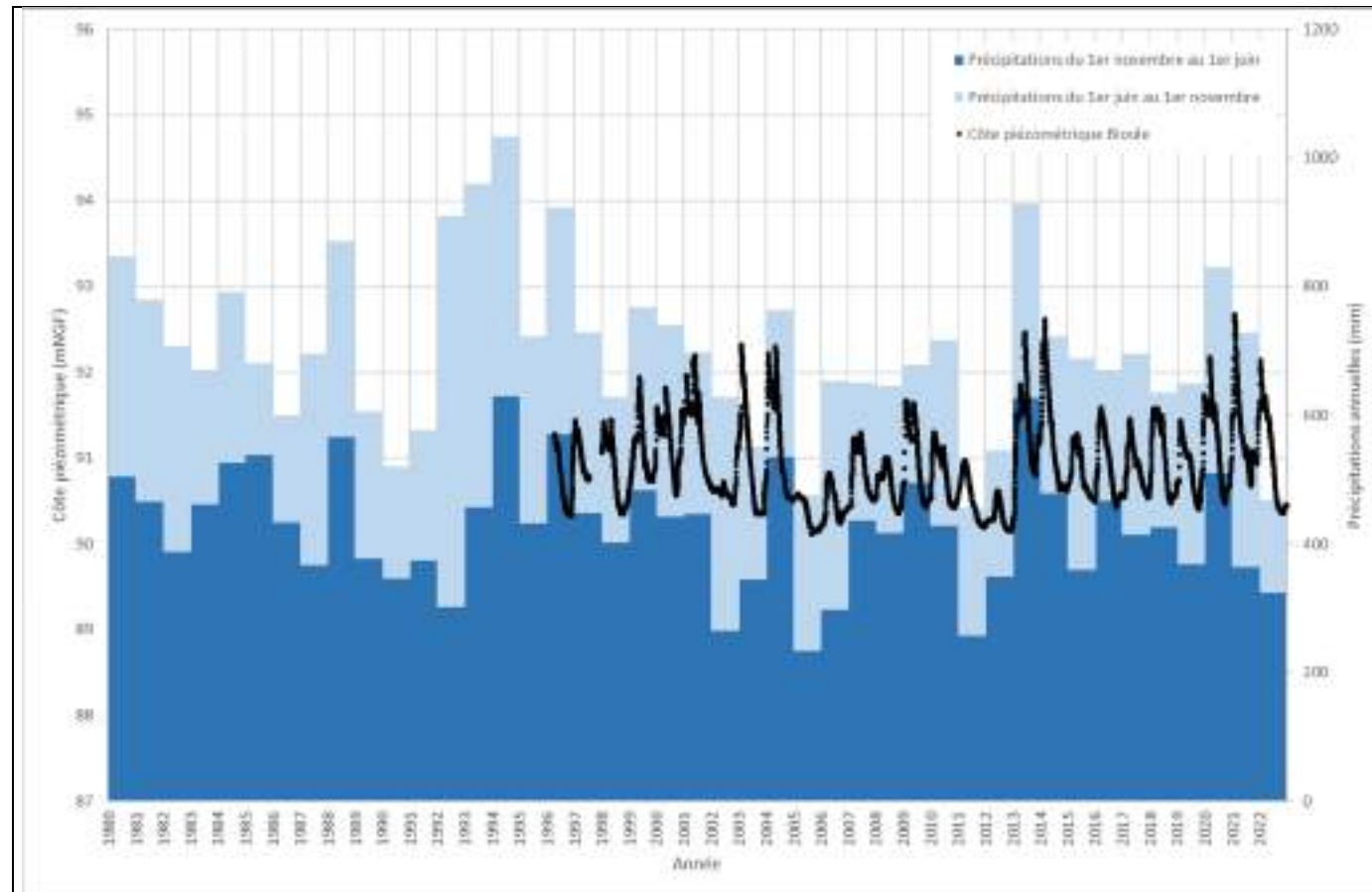
Les données piézométriques proviennent de la base de données ADES ([Accès aux données - ADES \(eaufrance.fr\)](#)). L'ensemble de la chronique piézométrique a été prise en compte, depuis le début de suivi du point jusqu'au 31 décembre 2022.

Ce choix a été fait afin de maximiser la période de calage du modèle et la prise en compte éventuelle des fluctuations interannuelles climatiques qui peuvent exister sur certains points. Les

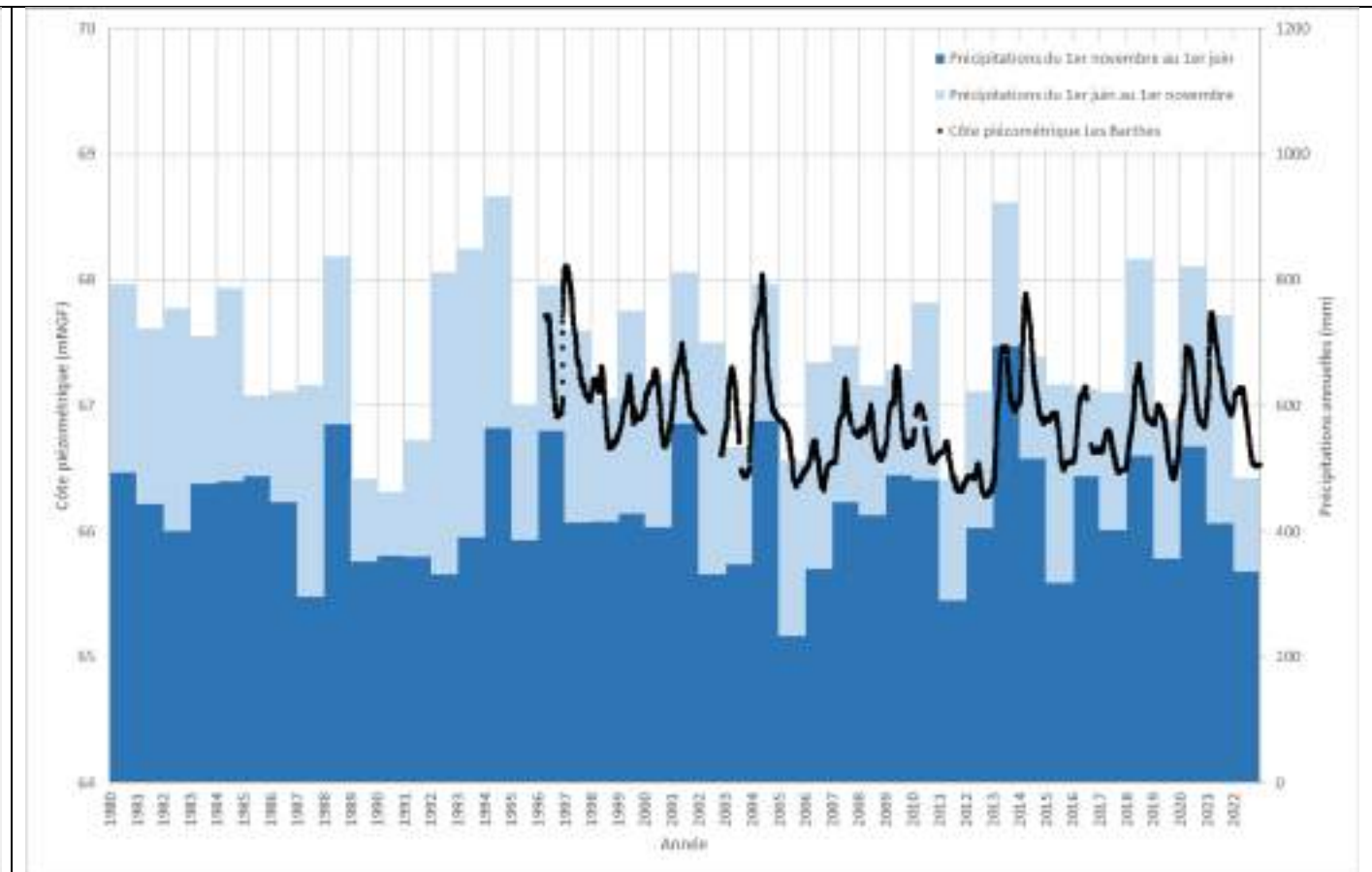
données de chroniques piézométriques ont été vérifiées et les données présentant des anomalies supprimées.

Les chroniques piézométriques sont représentées sur la Illustration 17, en utilisant le même axe temporel et en représentant les précipitations différemment selon qu'elles ont eu lieu entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 31 mai ou entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 octobre. Ce choix a été fait pour distinguer les précipitations ayant eu lieu durant la période associée à la recharge des nappes sur cette zone géographique, même si cette période peut fluctuer de plusieurs semaines d'une année à l'autre.

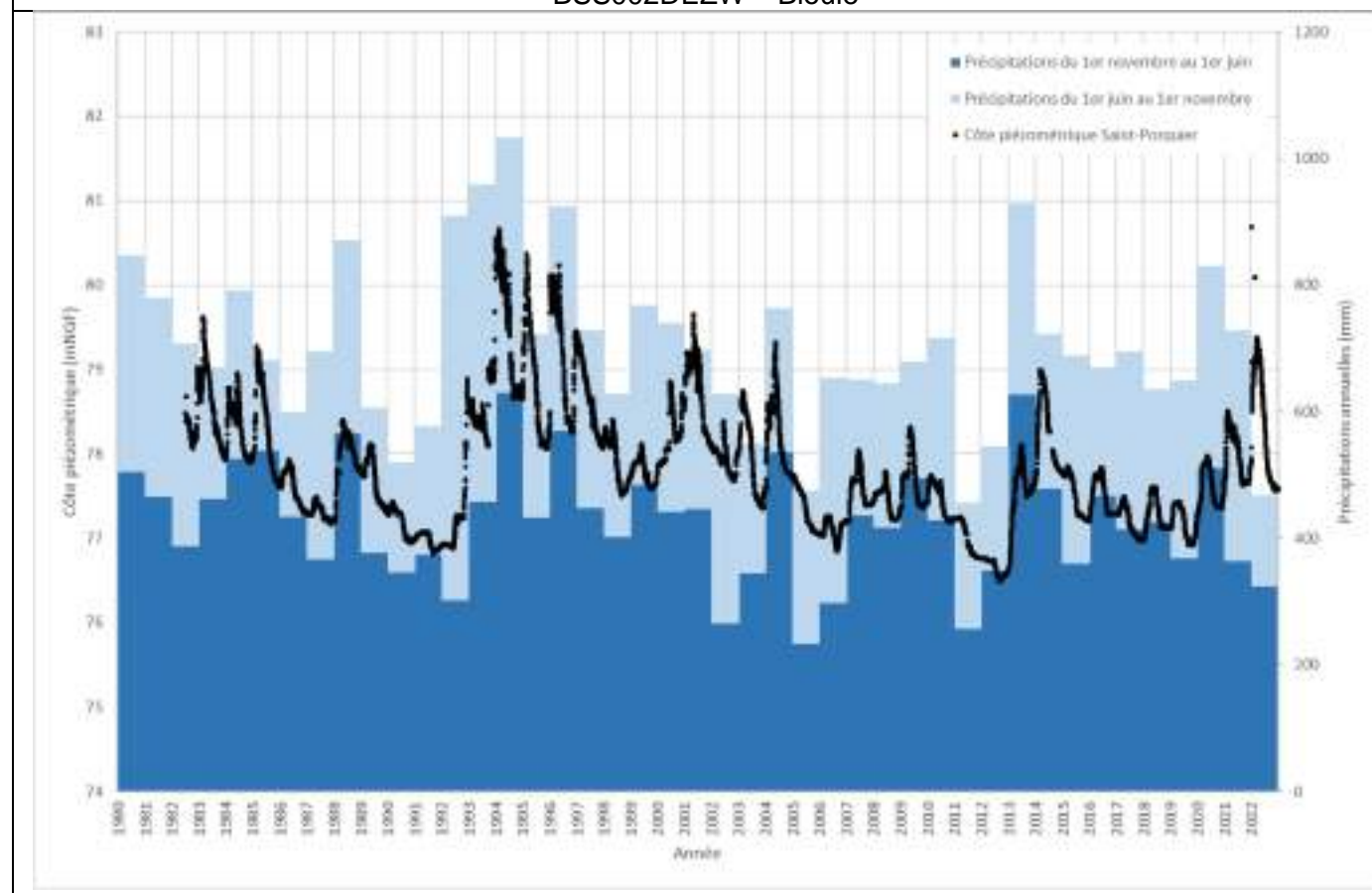




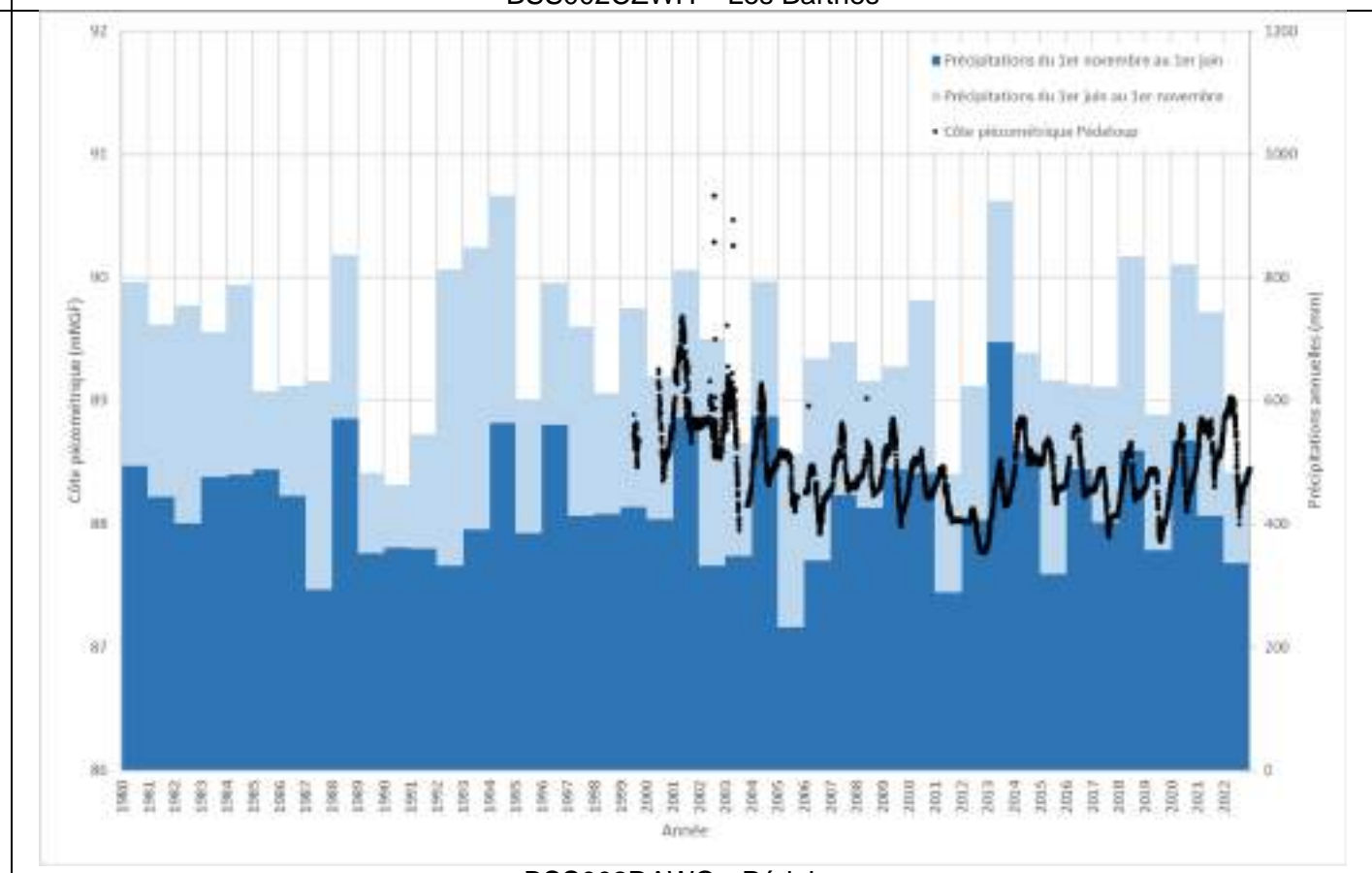
BSS002DEZW – Bioule



BSS002CZWH – Les Barthes

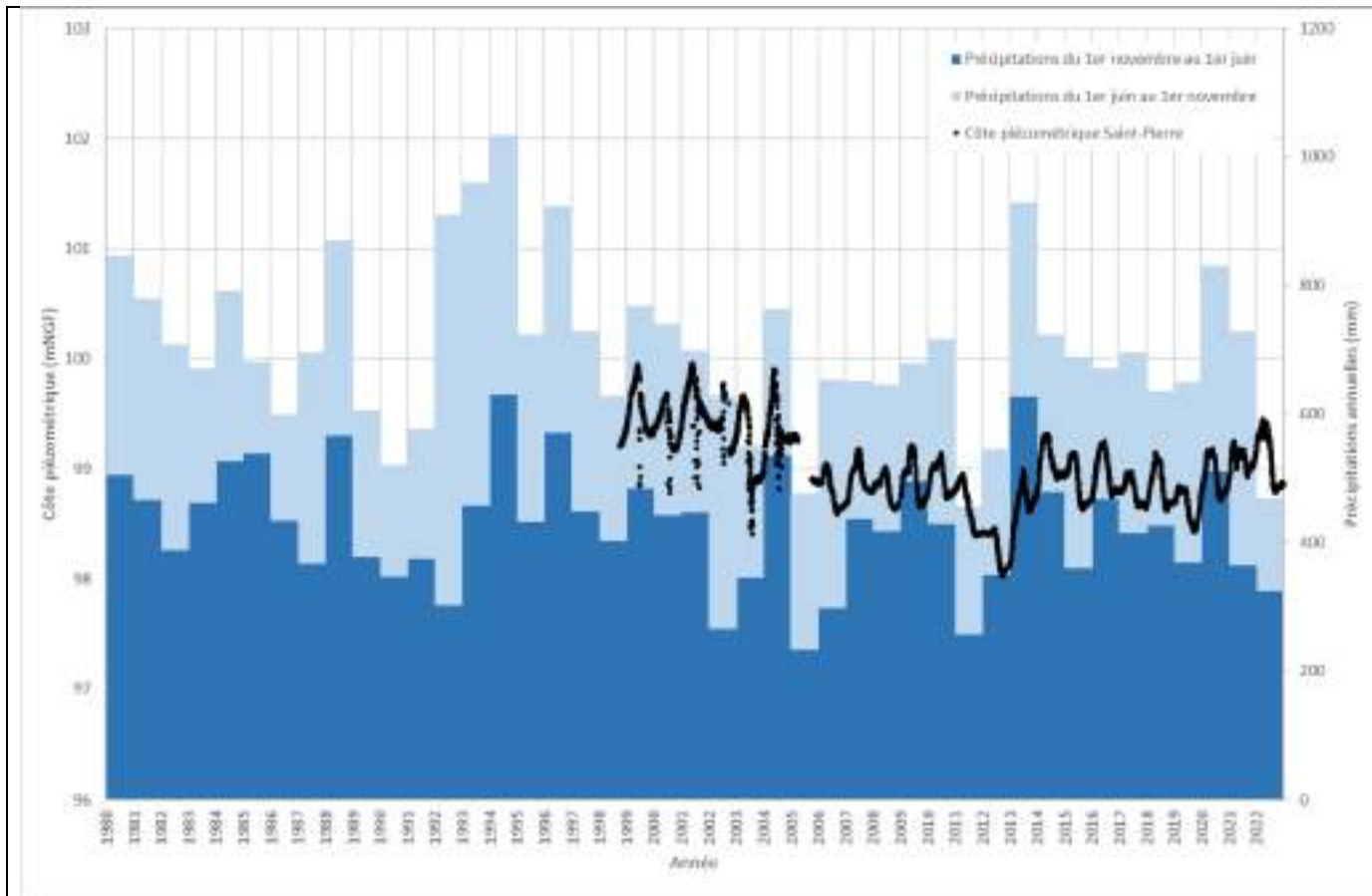


BSS002DDAH – Saint-Porquier

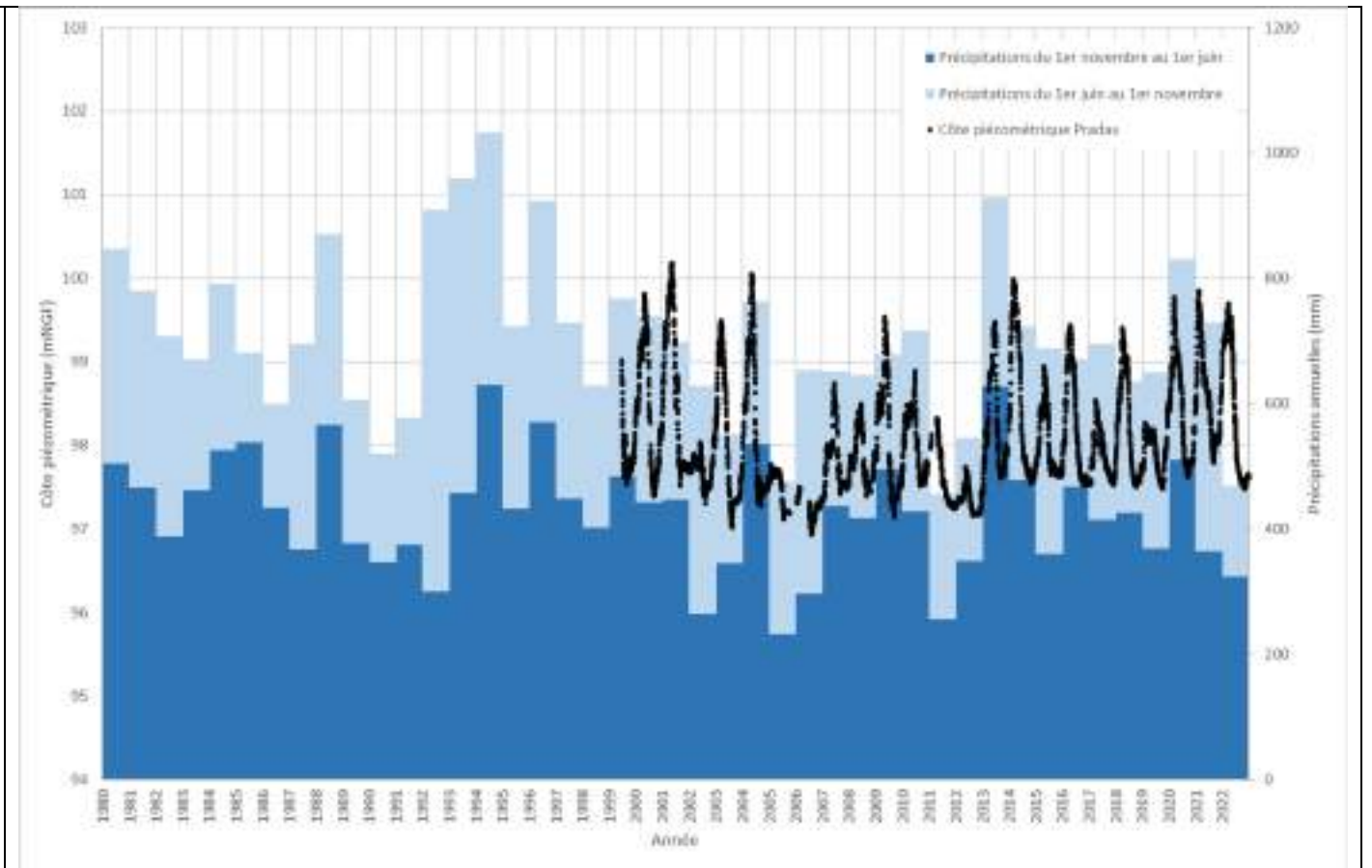


BSS002DAWQ - Pédeloup

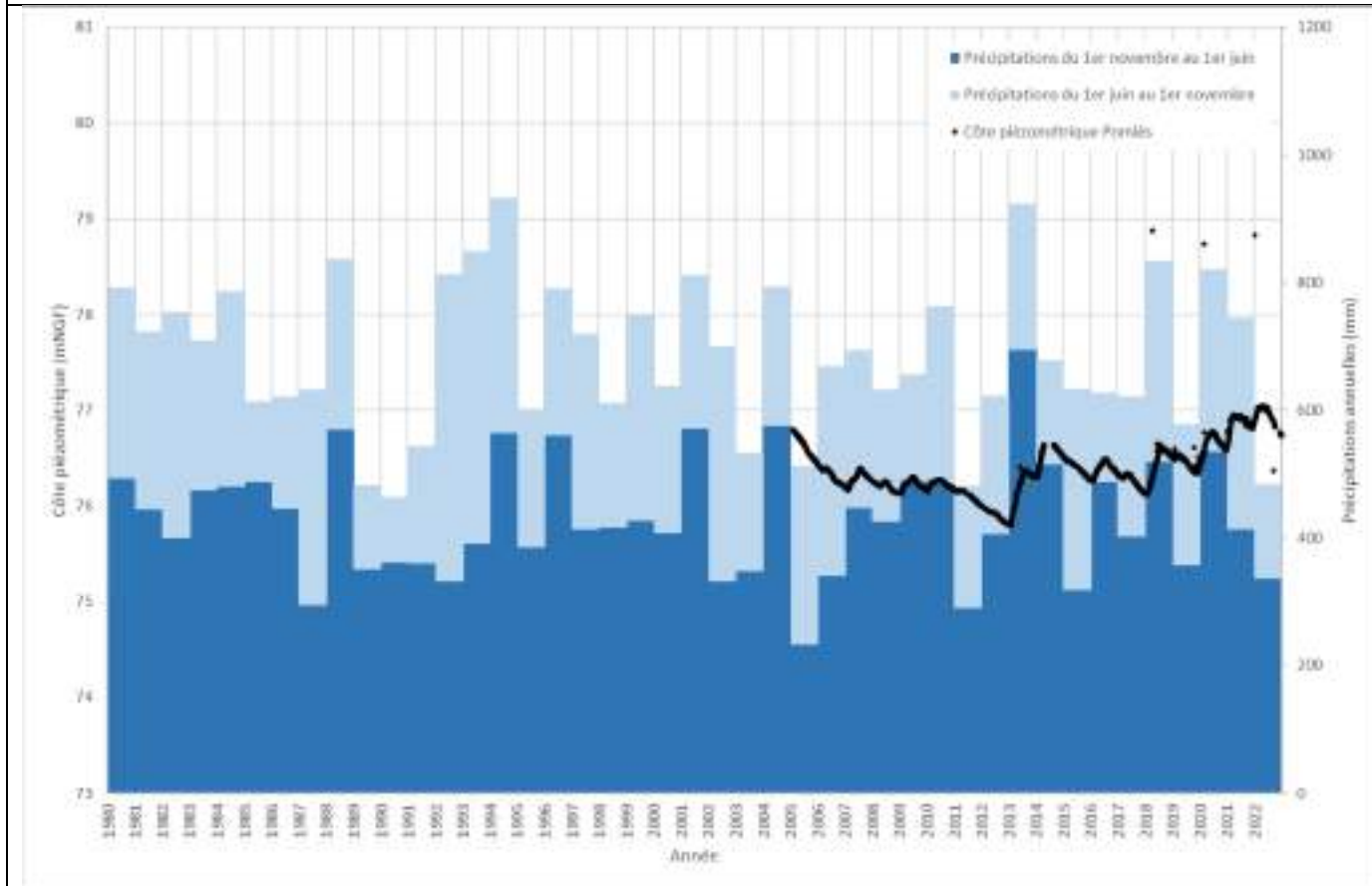




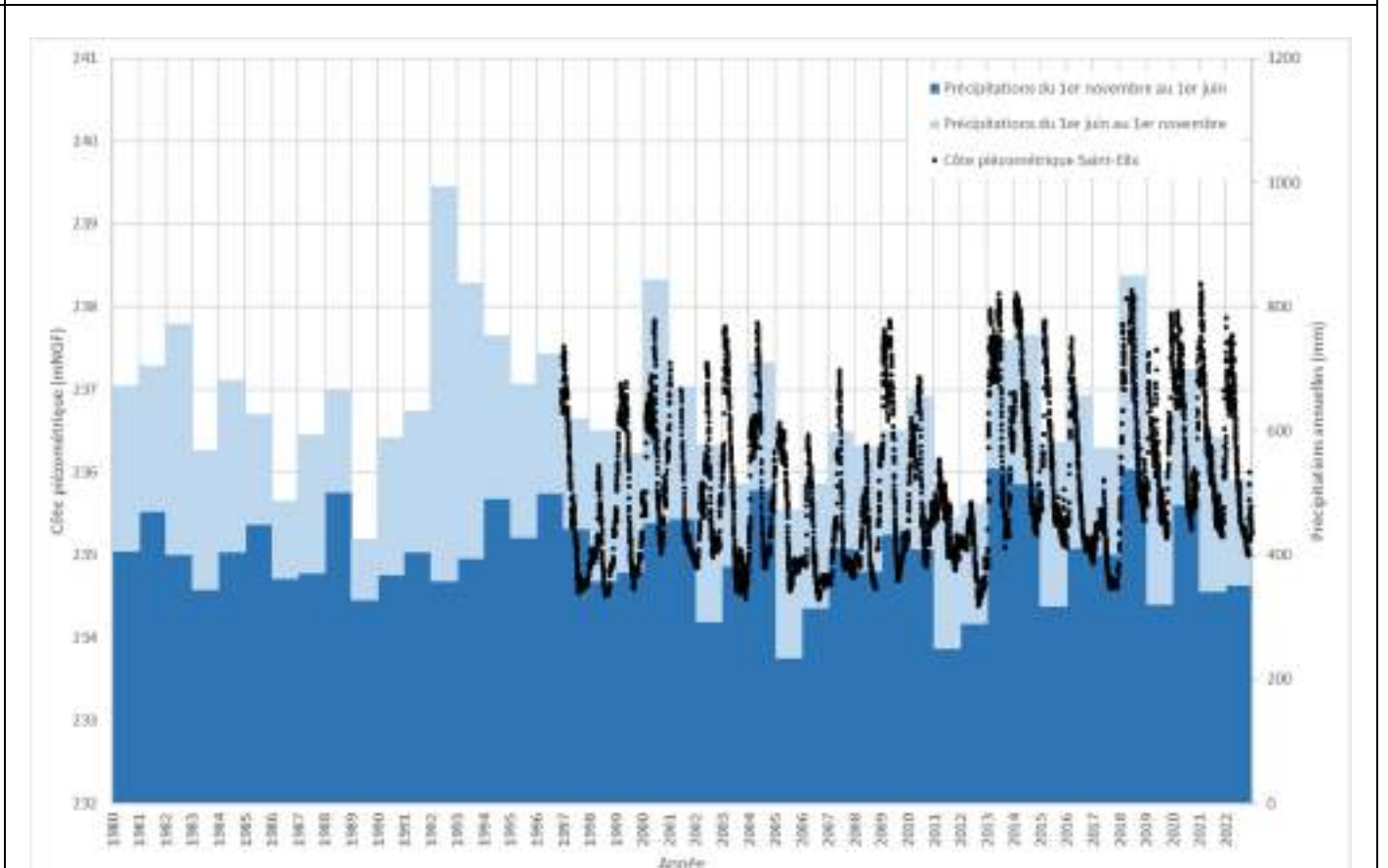
BSS002DDZV – Saint-Pierre



BSS002DETB - Pradas



BSS002CZMA - Pomiès



BSS002KGEL – Saint-Elix

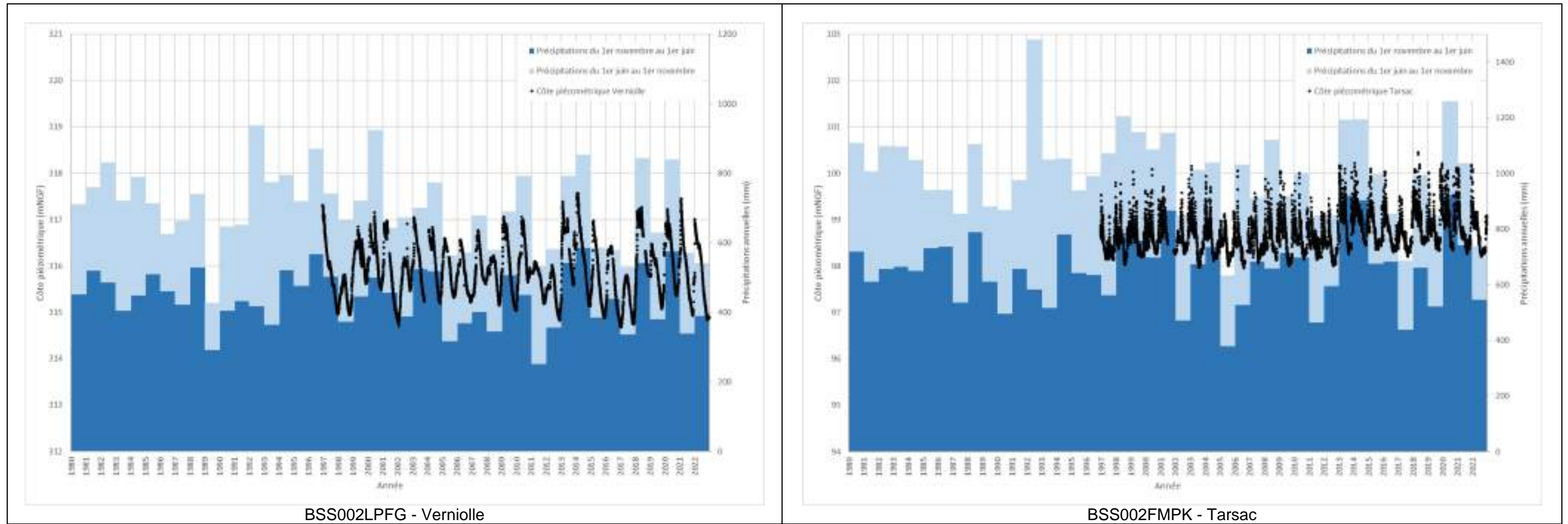


Illustration 17 – Chroniques piézométriques et pluviométriques (France)



### 5.3. PARAMETRES INITIAUX DU CALAGE

#### 5.3.1. Capacité de stockage en eau du sol

Une carte de la Capacité de Stockage en Eau (CSE) du réservoir sol a été utilisée pour estimer le paramètre « capacité du réservoir sol progressif ». Elle est issue de la base de données de l'European Soil Data Centre, créée à partir de l'European Soil DataBase (ESDB), de l'Harmonized World Soil Database (HWSD) et de la Soil-Terrain Database (SOTER).

Des règles de pédo-transfert ont été utilisées pour définir une cartographie de la capacité en eau disponible (Total Available Water Capacity, TAWC) pour le sol superficiel et le sous-sol (Hiederer, 2013). La somme de ces deux composantes est assimilée à la capacité de stockage en eau du réservoir sol, c'est-à-dire son aptitude à stocker de l'eau. Elle est utilisée comme première estimation de la capacité du réservoir sol progressif. Ces données sont consignées, pour chaque piézomètre modélisé, dans l'illustration 18.

*Illustration 18 – Estimation de la capacité de stockage en eau du réservoir sol*

Piézomètre – Code BSS	Piézomètre - Dénomination	Estimation de la capacité sol réservoir à partir des données CSE
BSS002DEZW	Bioule	180 mm
BSS002CZWH	Les Barthes	187 mm
BSS002DDAH	Saint-Porquier	194 mm
BSS002DAWQ	Pédeloup	194 mm
BSS002DDZV	Saint-Pierre	194 mm
BSS002DETB	Pradas	194 mm
BSS002CZMA	Pomiès	180 mm
BSS002KGEL	Saint-Elix	194 mm
BSS002LPFG	Verniolle	180 mm
BSS002FMPK	Tarsac	194 mm

#### 5.3.2. Temps de demi-tarissement

Le temps de demi-tarissement peut être estimé à partir du temps de demi-décroissance des niveaux en période d'étéage. Un travail en ce sens a été réalisé dans le cadre du projet ERESSAR (Saplaïroles et al., 2015) visant à caractériser la sensibilité à la sécheresse des eaux souterraines dans l'ex-région Midi-Pyrénées. Les temps de demi-décroissance des niveaux de nappe, en



l'absence de toute recharge, avaient alors été évalués pour chaque chronique piézométrique disponible sur la région. Ce travail a été repris comme indicateur de l'ordre de grandeur du paramètre temps de demi-tarissement. Ces données sont consignées, pour chaque piézomètre, dans le Illustration 19.

Illustration 19 - Estimation du temps de demi-décroissance de niveaux (Source : Saplaïroles et al., 2015)

Piézomètre – Code BSS	Piézomètre - Dénomination	Temps de demi-décroissance
BSS002DEZW	Bioule	44 jours (±17 jours)
BSS002CZWH	Les Barthes	33 jours (±9 jours)
BSS002DDAH	Saint-Porquier	40 jours (±23 jours)
BSS002DAWQ	Pédeloup	23 jours (±14 jours)
BSS002DDZV	Saint-Pierre	30 jours (±7 jours)
BSS002DETB	Pradas	34 jours (±21 jours)
BSS002CZMA	Pomiès	108 jours (±56 jours)
BSS002KGEL	Saint-Elix	14 jours (±5 jours)
BSS002LPFG	Verniolle	91 jours (±24 jours)
BSS002FMPK	Tarsac	15 jours (±5 jours)

## 5.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES MODELISATIONS

### 5.4.1. BSS002DEZW - Bioule

La chronique piézométrique de Bioule a été calée sur la période 1996-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain double, influencé par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (2.6%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1 et 2, le seuil d'écoulement souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.7991. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 177 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans le Illustration 36.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 4.71 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 93.12 %, ce qui constitue une valeur élevée mais encore acceptable dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 20 – Paramètres assurant le calage optimal à Bioule (BSS002DEZW) sur la période 1996-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
224.42	<b>163.96</b>	<b>0.2322</b>	<b>1.057</b>	<b>4.709</b>	<b>6.455</b>	<b>0.1986</b>	<b>0.00328</b>	<b>2.156</b>	<b>93.12</b>	<b>0.7991</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 21). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. On notera simplement les hautes eaux les plus importantes enregistrées sur ce point sont un peu sous-estimées (en 2001, 2003, 2004, 2013, 2014, 2020). Les étiages sont, eux, dans l'ensemble bien modélisés, avec seulement les étiages 2008 à 2011 qui sont un peu sous-estimés.

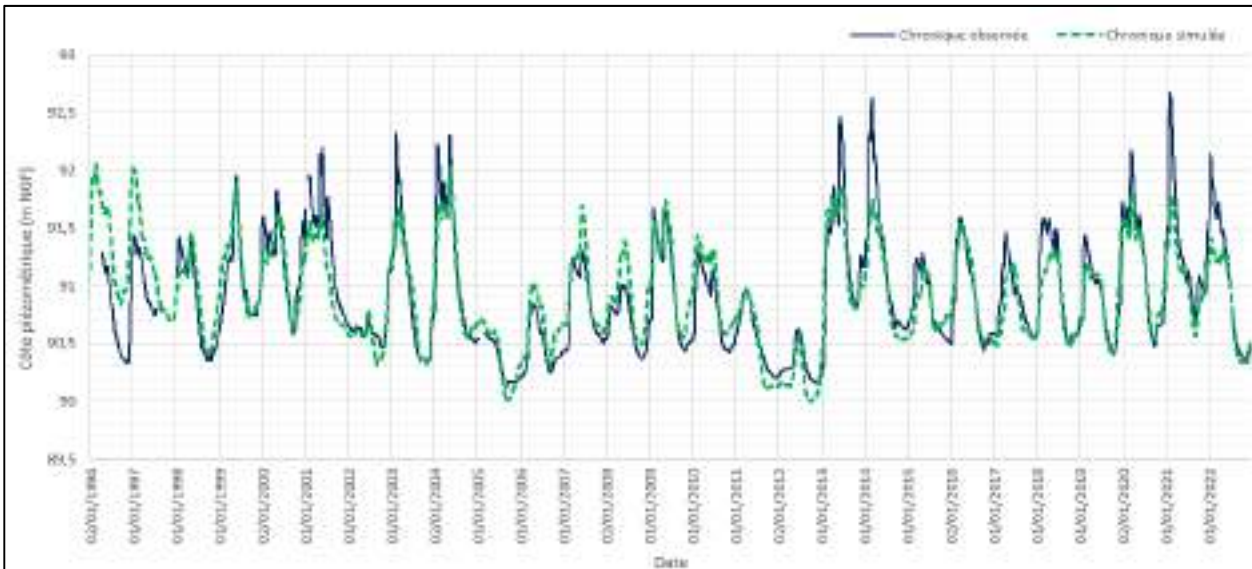


Illustration 21 - Calage pluie-niveau à Bioule (BSS002DEZW) sur la période 1996-2022

#### 5.4.2. BSS002CZWH – Les Barthes

La chronique piézométrique des Barthes a été calée sur la période 1996-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué de deux réservoirs souterrains, influencés par des pompages. Néanmoins, l'application MétéEAU'Nappes (paragraphe 9) ne permettant d'inclure qu'un seul réservoir actuellement, le modèle initialement calé a été revu afin de ne prendre en compte qu'un seul réservoir. Ceci entraîne une dégradation du coefficient de Nash de 0.011. Les pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (0.6%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8383. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 204 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l'illustration 22.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 10.85 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 65 %, ce qui constitue une valeur relative faible mais encore acceptable dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 22 – Paramètres assurant le calage optimal aux Barthes (BSS002CZWH) sur la période 1996-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
176.581	4.107	0.003279	11.509	10.87	N.A.	0.2636	0.003279	5.579	65.039	0.8489

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 23). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. On notera simplement une sur-estimation des hautes eaux en 2010-2011 et une sur-estimation de l'étiage en 2017 et dans une moindre mesure en 2019.

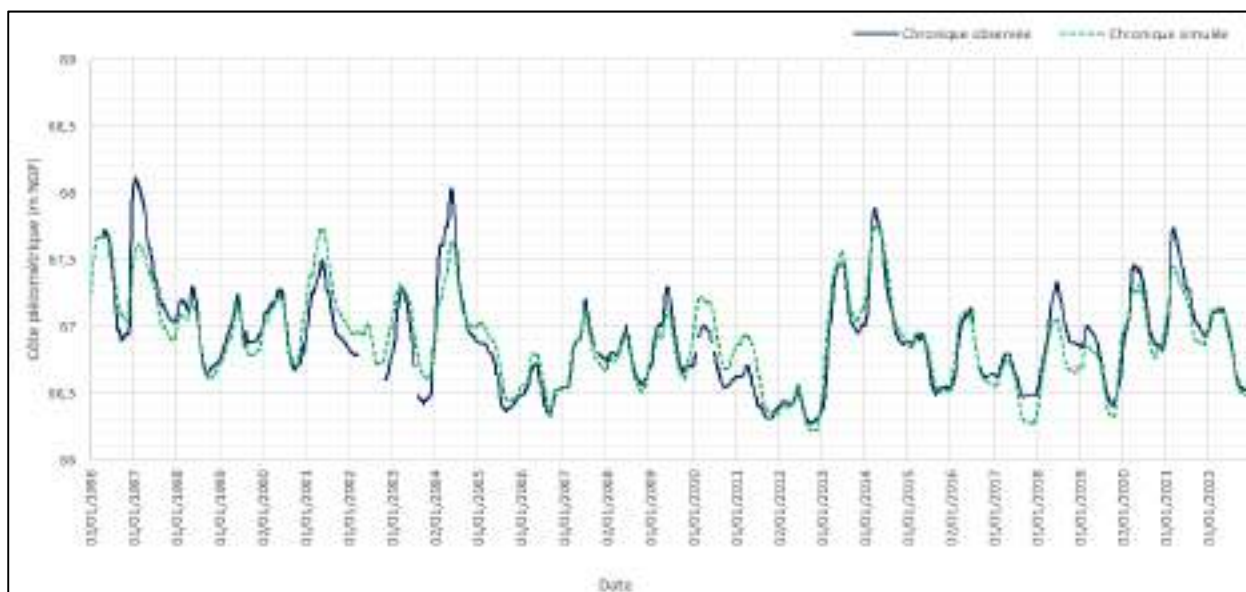


Illustration 23 - Calage pluie-niveau aux Barthes (BSS002CZWH) sur la période 1996-2022

### 5.4.3. BSS002DDAH - Saint-Porquier

La chronique piézométrique de Saint-Porquier a été calée sur la période 1982-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué de deux réservoirs souterrains, influencés par des pompages. Néanmoins, l'application MétéEAU'Nappes (paragraphe 9) ne permettant d'inclure qu'un seul réservoir actuellement, le modèle initialement calé a été revu afin de ne prendre en compte qu'un seul réservoir. Les pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre, avec une importance double jusqu'en 1996 par rapport aux années plus récentes (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (1.2%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.7904. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 197 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 26.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 2.439 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 27.98 %.

Illustration 24 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Porquier (BSS002DDAH) sur la période 1982-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
247.118	<b>5.034</b>	<b>1.194</b>	<b>10.769</b>	<b>2.439</b>	<b>N.A.</b>	<b>0.4674</b>	<b>0.003279</b>	<b>6</b>	<b>27.98</b>	<b>0.7885</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 25). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. Le temps de demi-stabilisation de la nappe est très long, 6 mois. L'ajout d'un second réservoir souterrain permet d'améliorer la cohérence des paramètres estimés. On notera simplement une difficulté du modèle à adapter la baisse de niveaux piézométriques sur les années 2000-2003 après les années 1990 enregistrant des niveaux importants et on observe le phénomène inverse sur les années 2015-2017 après les recharges importantes observées en 2013 et 2014. De plus, l'année 2022 n'est globalement pas bien modélisée sur ce point de suivi.

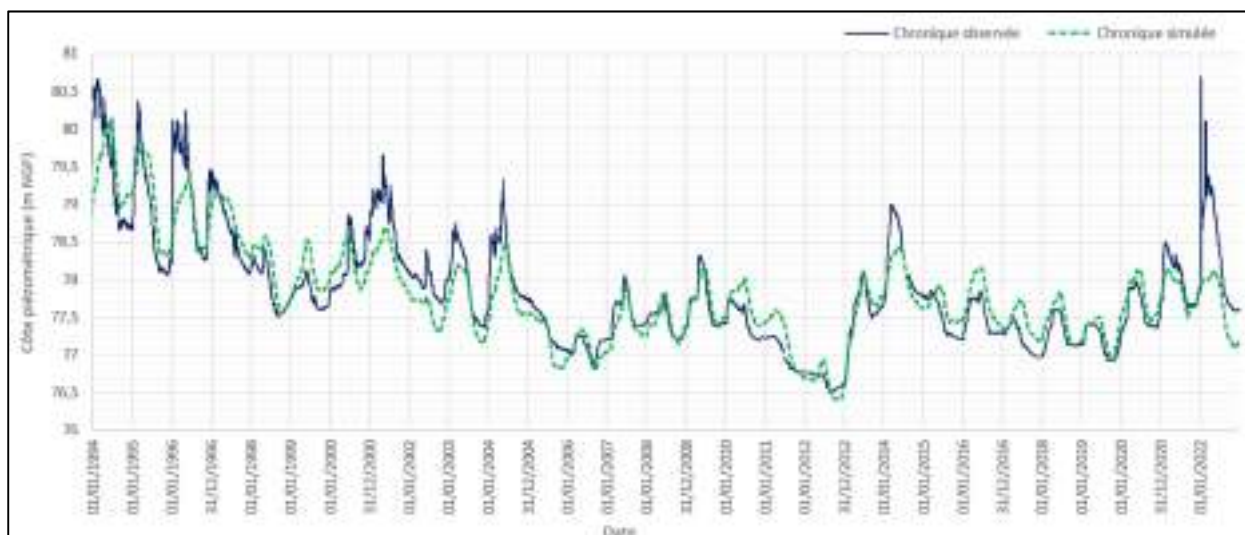


Illustration 25 - Calage pluie-niveau à Saint-Porquier (BSS002DDAH) sur la période 1982-2022

#### 5.4.4. BSS002DAWQ – Pédeloup

La chronique piézométrique de Pédeloup a été calée sur la période 1999-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain, influencés par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre, selon la répartition (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (0.8%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emmagasinement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8093. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 204 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l'*Illustration 27*.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 9.423 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 41.5 %, ce qui constitue une valeur acceptable dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 26 – Paramètres assurant le calage optimal à Pédeloup (BSS002DAWQ) sur la période 1999-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
327.802	1	0.003279	23.682	9.423	N.A.	0.2082	0.003279	2.813	41.527	0.8093

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les tendances observées (Illustration 27). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. Seule la recharge de l'année 2022 est sous-estimée, tandis que les hautes eaux des années 2013 et 2014 tendent à être un peu sur-estimées.

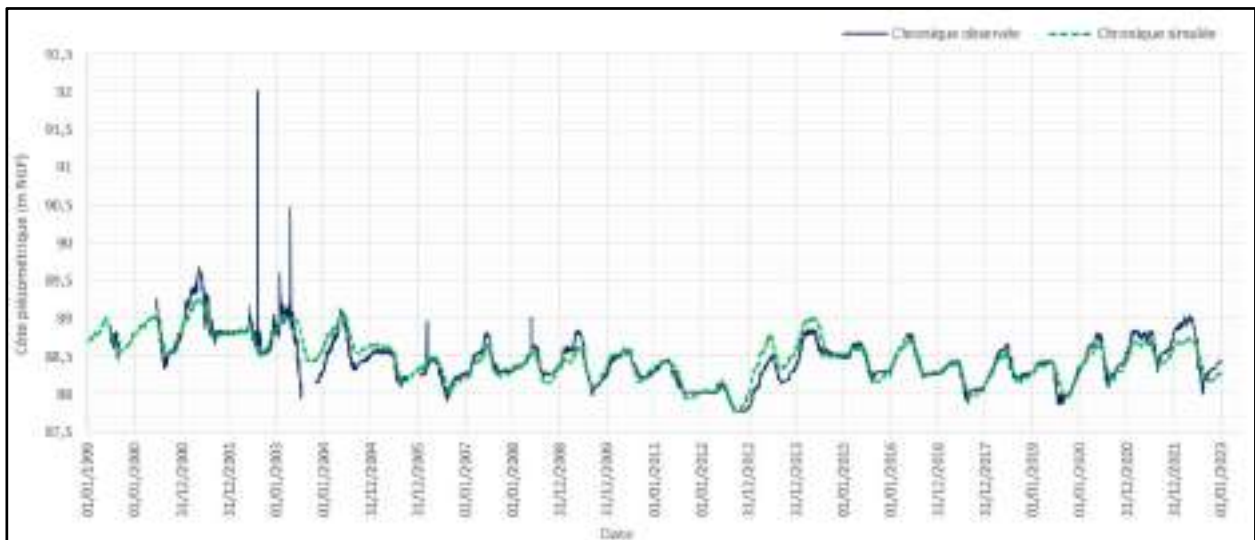


Illustration 27 - Calage pluie-niveau à Pédeloup (BSS002DAWQ) sur la période 1999-2022

#### 5.4.5. BSS002DDZV – Saint-Pierre

La chronique piézométrique de Saint-Pierre a été calée sur la période 1998-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.



Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain double, influencés par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre, selon la répartition (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (1.3%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, les temps de demi-tarissement des réservoirs souterrains 1 et 2, le seuil d'écoulement souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8093. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 204 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l'illustration 27.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 8.171 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 45.3 %, ce qui constitue une valeur acceptable dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 28 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Pierre (BSS002DDZV) sur la période 1999-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emménagement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
260.28	<b>10</b>	<b>0.7062</b>	<b>14.99</b>	<b>8.171</b>	<b>39.515</b>	<b>0.2287</b>	<b>0.003279</b>	<b>3.078</b>	<b>45.274</b>	<b>0.8093</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les tendances observées (Illustration 29). Les recharges et vidanges annuelles sont très bien retranscrites.

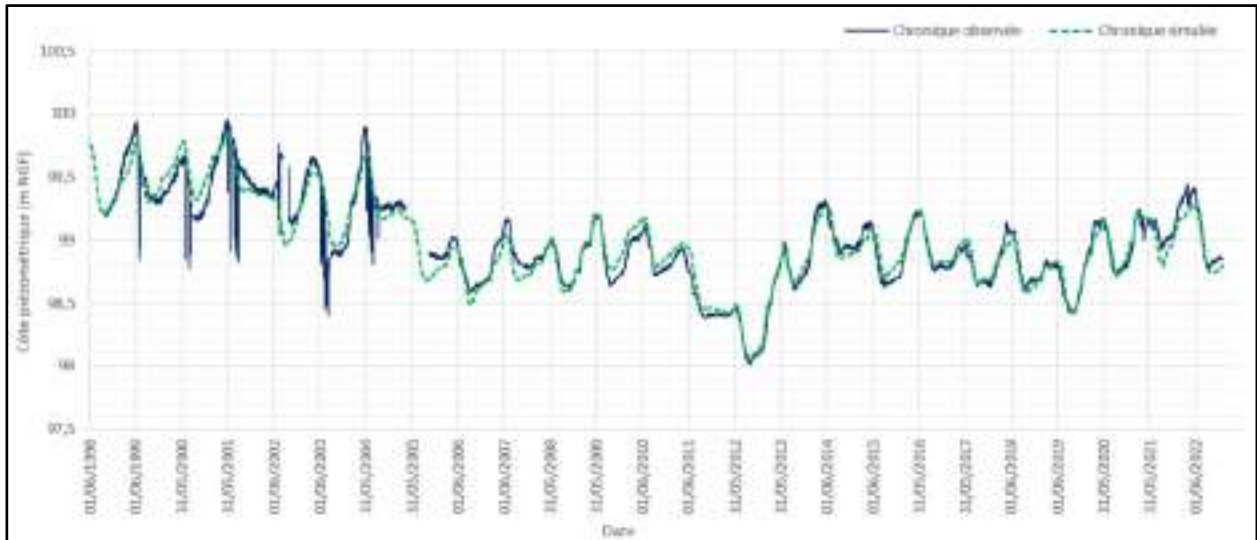


Illustration 29 - Calage pluie-niveau à Saint-Pierre (BSS002DDZV) sur la période 1999-2022

#### 5.4.6. BSS002DET B – Pradas

La chronique piézométrique de Pradas a été calée sur la période 1999-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain double, influencés par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre, selon la répartition (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (1.6%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, les temps de demi-tarissement des réservoirs souterrains 1 et 2, le seuil d'écoulement souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8085. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 186 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Coite et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l' *Illustration 27*.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 3.047 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 70.3 %, ce qui constitue une valeur acceptable dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 30 – Paramètres assurant le calage optimal à Pradas (BSS002DETB) sur la période 1999-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
307.629	<b>18.677</b>	<b>0.2143</b>	<b>1.033</b>	<b>3.047</b>	<b>4.507</b>	<b>0.4042</b>	<b>0.003279</b>	<b>1.832</b>	<b>70.331</b>	<b>0.8085</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les tendances observées (Illustration 31). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. Quelques étiages sont sur-estimés en 2005, 2011, 2012, 2015, 2019, et 2022. A l'inverse, certaines recharges sont sous-estimées en 2001, 2014, 2016, 2018, 2021 et 2022. Le calage réalisé correspond au meilleur compris observé par rapport à ces éléments.

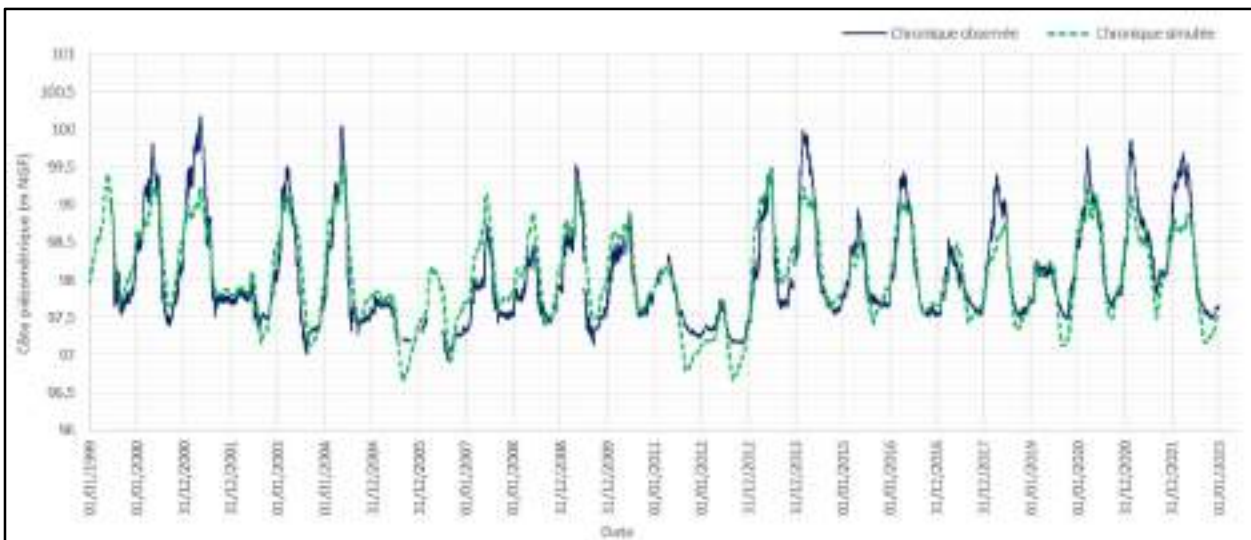


Illustration 31 - Calage pluie-niveau à Pradas (BSS002DETB) sur la période 1999-2022

#### 5.4.7. BSS002CZMA – Pomiès

La chronique piézométrique de Pomiès a été calée sur la période 2005-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain, influencés par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur toute l'année et doublés entre 2006 et 2014.

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (0.6%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, les temps de demi-tarissement des réservoirs souterrains 1 et 2, le seuil d'écoulement souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emmagasinement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.7971. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 225 mm. Cette valeur est cohérente avec les données des autres piézomètres modélisés dans le Tarn-et-Garonne et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l'illustration 32.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 22.99 %, ce qui est relativement élevé sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 98.8 %, ce qui constitue une valeur élevée dans ce contexte de nappe alluviale, mais correspond au fonctionnement de la nappe alluviale sur ce secteur. Une zone moins perméable serait en effet localisée entre le sol et la nappe, expliquant l'allure de la chronique enregistrée sur ce point de suivi.

Illustration 32 – Paramètres assurant le calage optimal à Pomiès (BSS002CZMA) sur la période 2005-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
100	9986.9	3.617	12.752	22.99	0.05	0.4969	10	0.05	98.845	0.7971

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les tendances observées (Illustration 33). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. Seule la recharge de l'année 2022 n'est pas bien reproduite par le modèle.

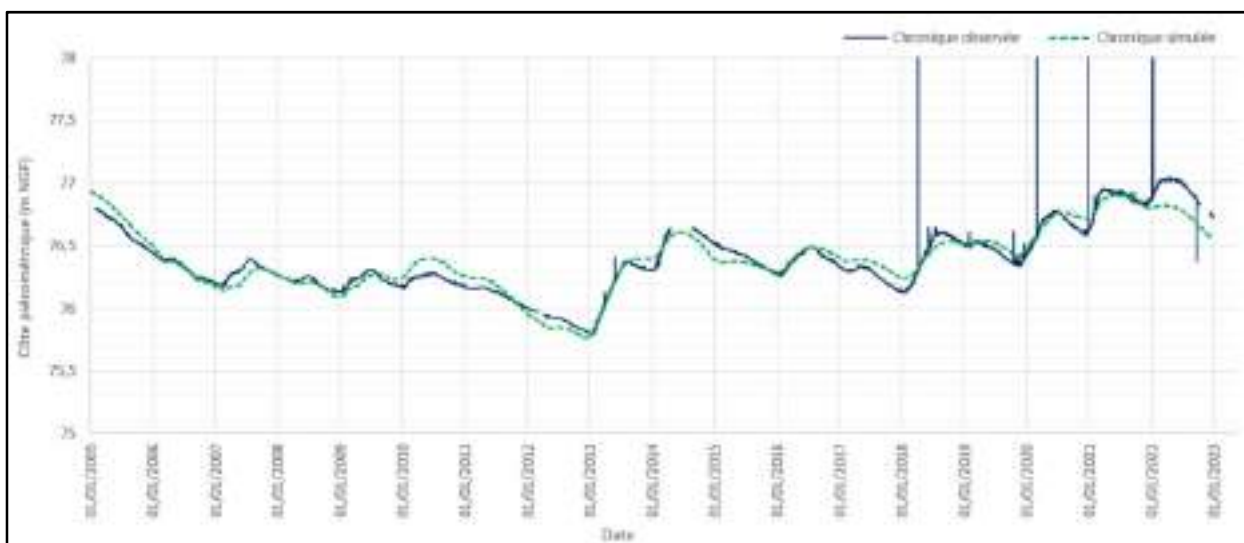


Illustration 33 - Calage pluie-niveau à Pomiès (BSS002CZMA) sur la période 2005-2022

#### 5.4.8. BSS002KGEL - Saint-Elix

La chronique piézométrique de Saint-Elix a été calée sur la période 1996-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain, influencé par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (6.0%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.7818. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 229 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 34.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 1.578 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 37.5 %, ce qui est relativement faible dans ce contexte de nappe alluviale, mais compréhensible de par la forte part d'écoulement rapide et la possible infiltration d'eau pluviale enregistrée sur la chronique et perturbant la chronique piézométrique.

Illustration 34 – Paramètres assurant le calage optimal à Saint-Elix (BSS002KGEL) sur la période 1996-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emménagement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
65.505	<b>1.17</b>	<b>0.00328</b>	<b>3.366</b>	<b>1.578</b>	N.A.	<b>0.3884</b>	<b>0.00328</b>	<b>3.523</b>	<b>37.49</b>	<b>0.7818</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 35). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. On notera simplement des étiages sur-estimés en 2011, 2019, 2021 et 2022 et des hautes-eaux sous-estimées en 2022.



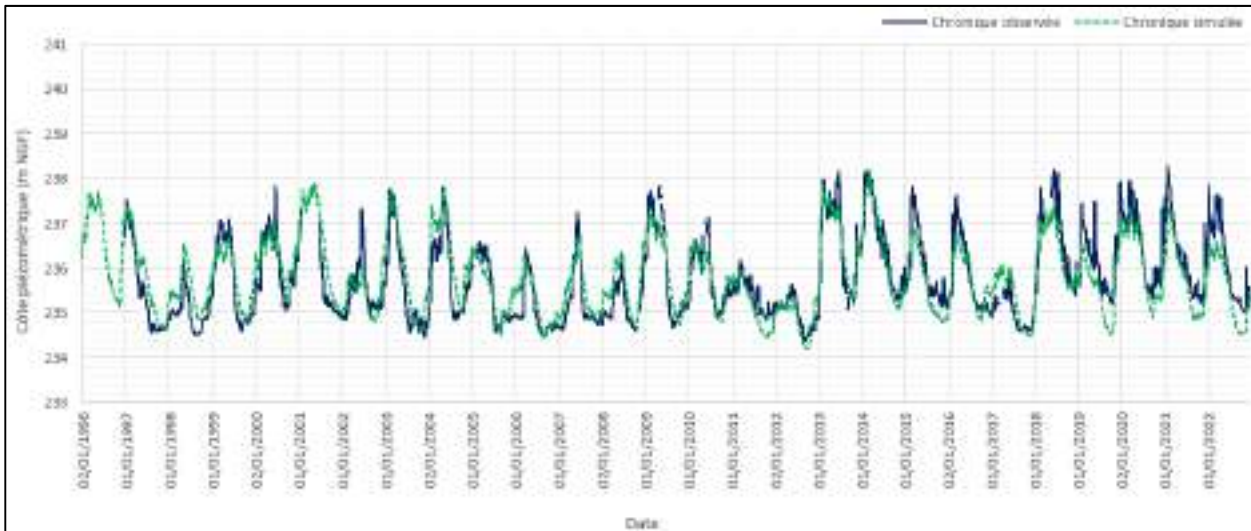


Illustration 35 - Calage pluie-niveau à Saint-Elix (BSS002KGEL) sur la période 1996-2022

#### 5.4.9. BSS002LPFG – Verniolle

La chronique piézométrique de Verniolle a été calée sur la période 1996-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain double, influencé par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre (10% ; 40% ; 40% ; 10%).

Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (7.7%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1 et 2, le seuil d'écoulement souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emménagement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8788. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 217 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans le Illustration 36.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 3.46 %, ce qui est dans la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 80.33 %, ce qui est dans l'ordre de grandeur des valeurs attendues dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 36 – Paramètres assurant le calage optimal à Verniolle (BSS002LPFG) sur la période 1996-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
153.45	<b>67.63</b>	<b>0.3241</b>	<b>0.6095</b>	<b>3.46</b>	<b>2.693</b>	<b>0.3855</b>	<b>2.151</b>	<b>2.219</b>	<b>80.33</b>	<b>0.8788</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 37). Les recharges et vidanges annuelles sont bien retranscrites. On notera simplement des périodes de hautes eaux un peu sous-estimées certaines années récentes (2013, 2014, 2015, 2018, 2019, 2021, 2022) ainsi que des périodes d'étiage parfois sous-estimées (1998, 2000, 2002, 2014, 2015, 2016).

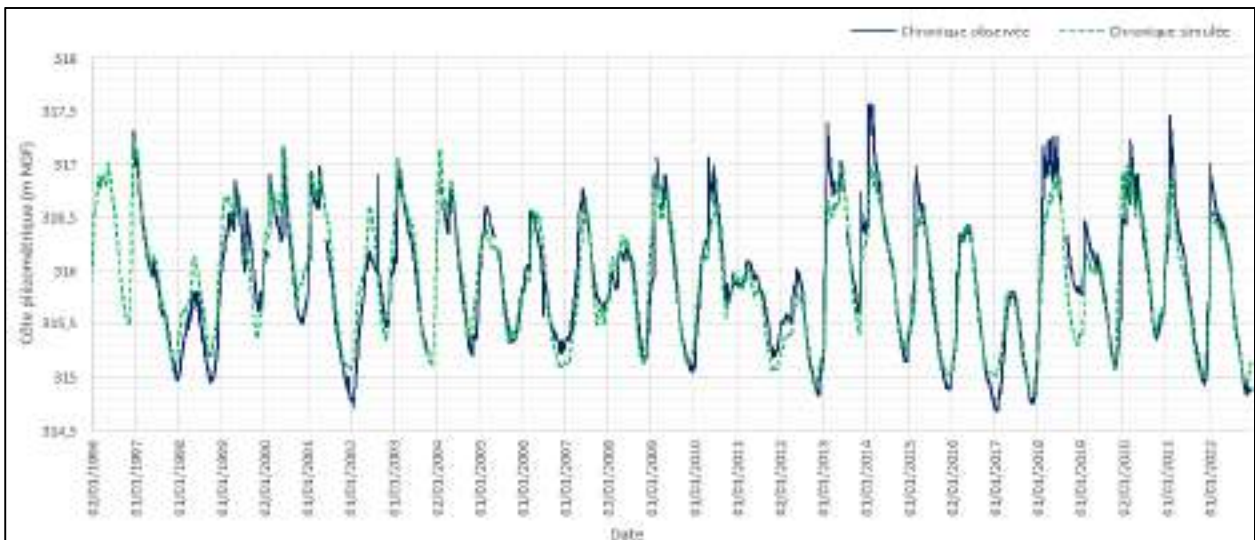


Illustration 37 - Calage pluie-niveau à Verniolle (BSS002LPFG) sur la période 1996-2022

#### 5.4.10. BSS002FMPK – Tarsac

La chronique piézométrique de Tarsac a été calée sur la période 1996-2022. A partir des données climatiques disponible depuis 1959, une période d'initialisation de 20 années a été retenue.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain, influencé par des pompages. Ces pompages sont répliqués chaque année, répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre (10% ; 40% ; 40% ; 10%) de 1959 à 1991 et depuis 2013. Ils sont doublés sur la période 1992 à 2012.



Les précipitations ont été affectées d'un coefficient correcteur (10.2%). Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la correction globale de l'ETP, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, le déficit initial du réservoir sol progressif et le coefficient d'emmagasinement de la nappe. A ces paramètres s'ajoutent les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.8236. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1959-2022 est de 312 mm. Cette valeur est plus élevée que les valeurs obtenues sur les autres piézomètres modélisés mais est cohérente avec le contexte climatique de cette zone et avec les résultats du projet RECHARGE (Le Cointe et al., 2019). Les paramètres permettant le calage optimal sont repris dans l'illustration 38.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 0.045 %, ce qui est faible par rapport à la gamme de valeur attendue sur ce type de formation. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 7.56 %, ce qui est relativement faible dans ce contexte de nappe alluviale.

Illustration 38 – Paramètres assurant le calage optimal à Tarsac (BSS002FMPK) sur la période 1996-2022

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
176.281	<b>1.107</b>	<b>2.865</b>	<b>0.07991</b>	<b>0.04519</b>	N.A.	<b>0.3615</b>	<b>0.003279</b>	<b>9.932</b>	<b>7.561</b>	<b>0.8236</b>

La chronique piézométrique simulée reconstitue très bien les grandes tendances observées (Illustration 39). Les recharges et vidanges annuelles sont très bien retranscrites.

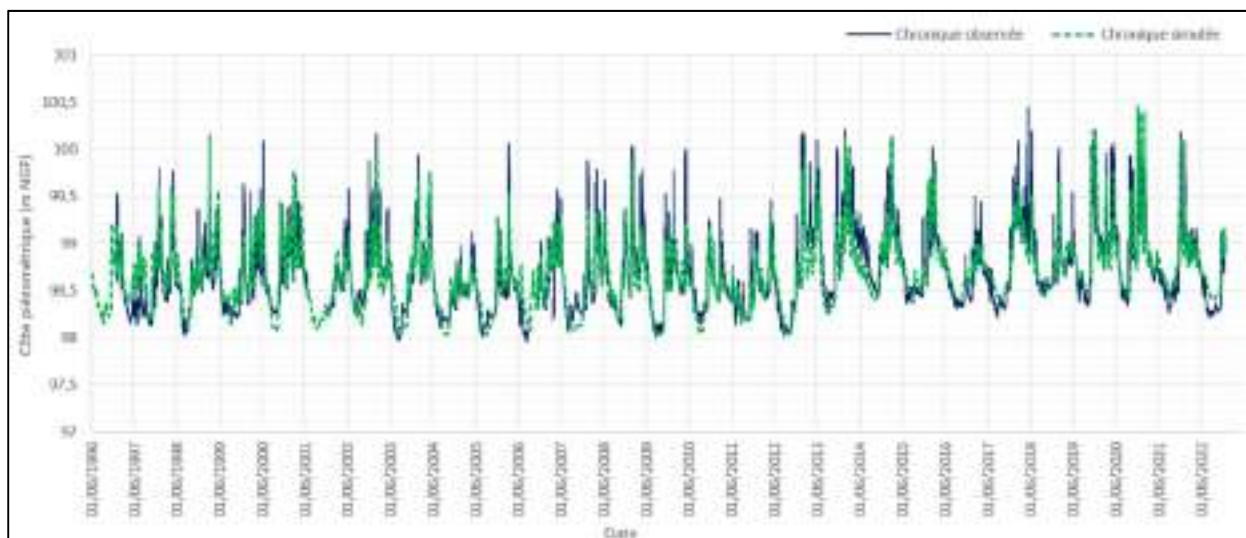


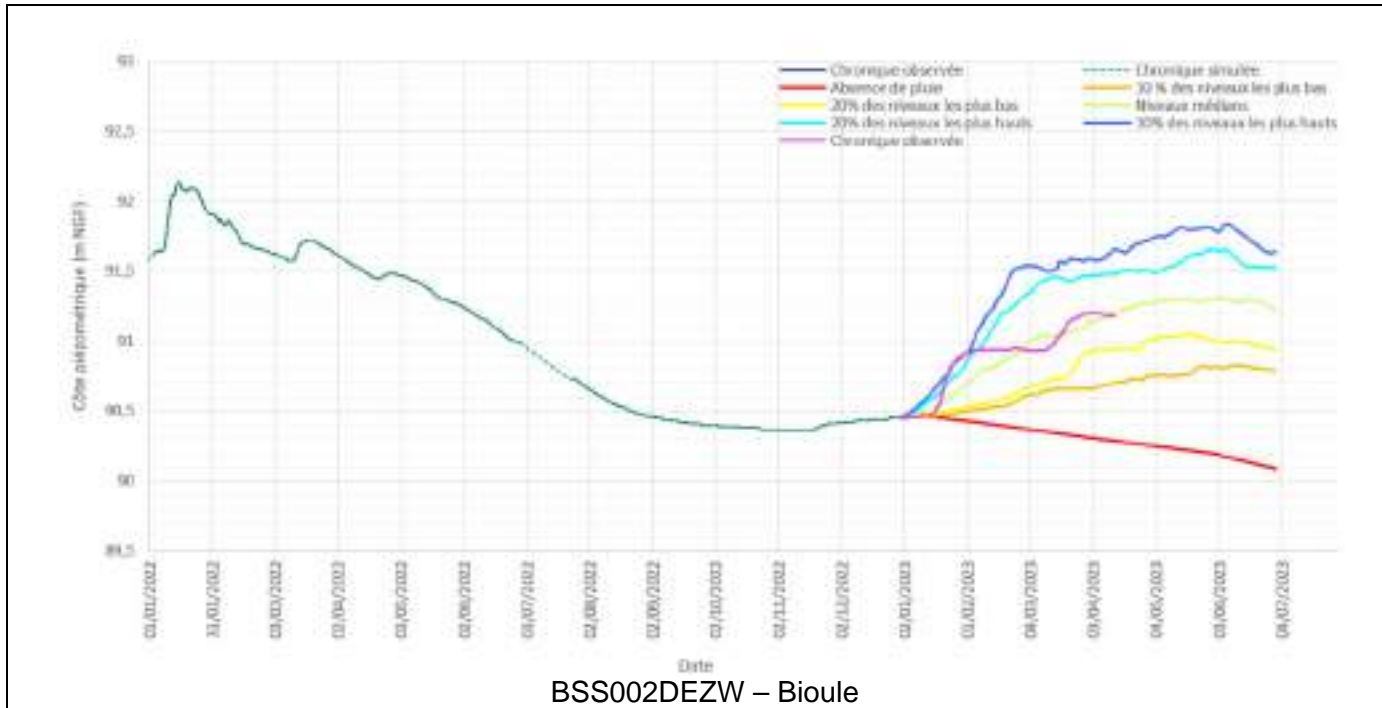
Illustration 39 - Calage pluie-niveau à Tarsac (BSS002FMPK) sur la période 1996-2022

## 5.5. PREVISIONS DU NIVEAU DE LA NAPPE

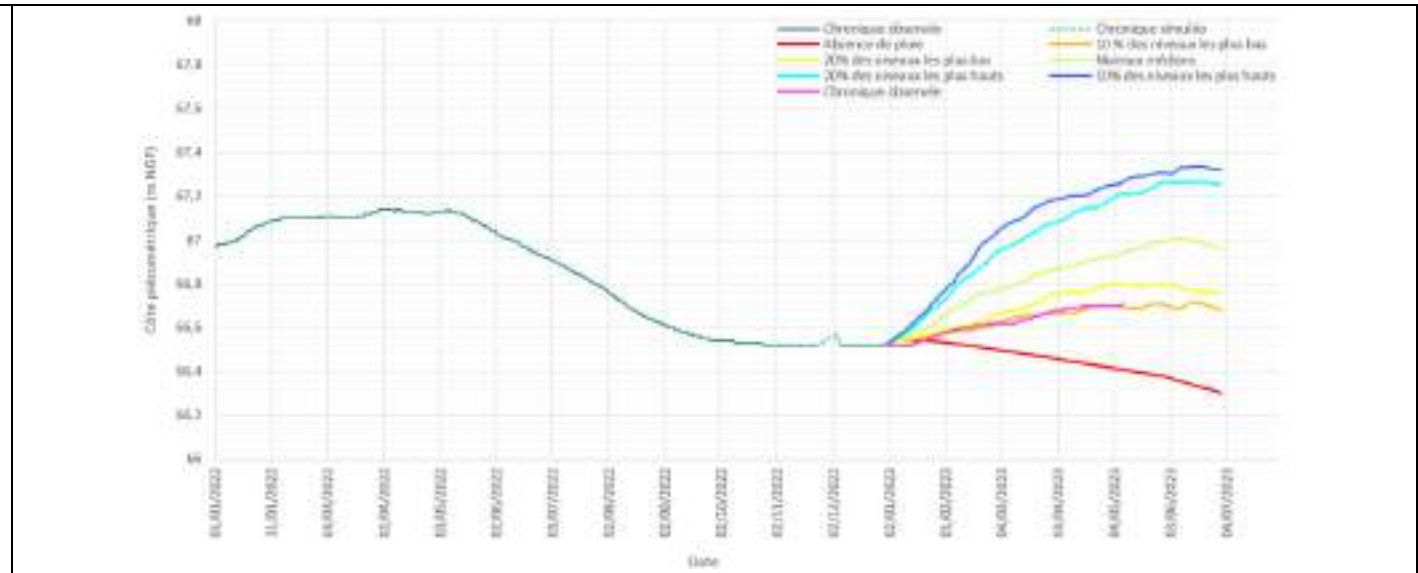
Lorsque les modèles ont été calibrés (cf. paragraphe 5.4), ils peuvent être utilisés pour prévoir l'évolution des niveaux des dix sites étudiés. La prévision a été réalisée au 1<sup>er</sup> janvier 2023, pour une durée de 6 mois, au pas de temps journalier, après avoir ajustée la chronique simulée à la chronique observée.

Les résultats obtenus sont repris sur l'illustration 40. Pour information, la chronique effectivement enregistrée début 2023 a été ajoutée à chaque prévision pour comparaison. Elle apparaît en rose sur les graphiques de l'illustration 40.

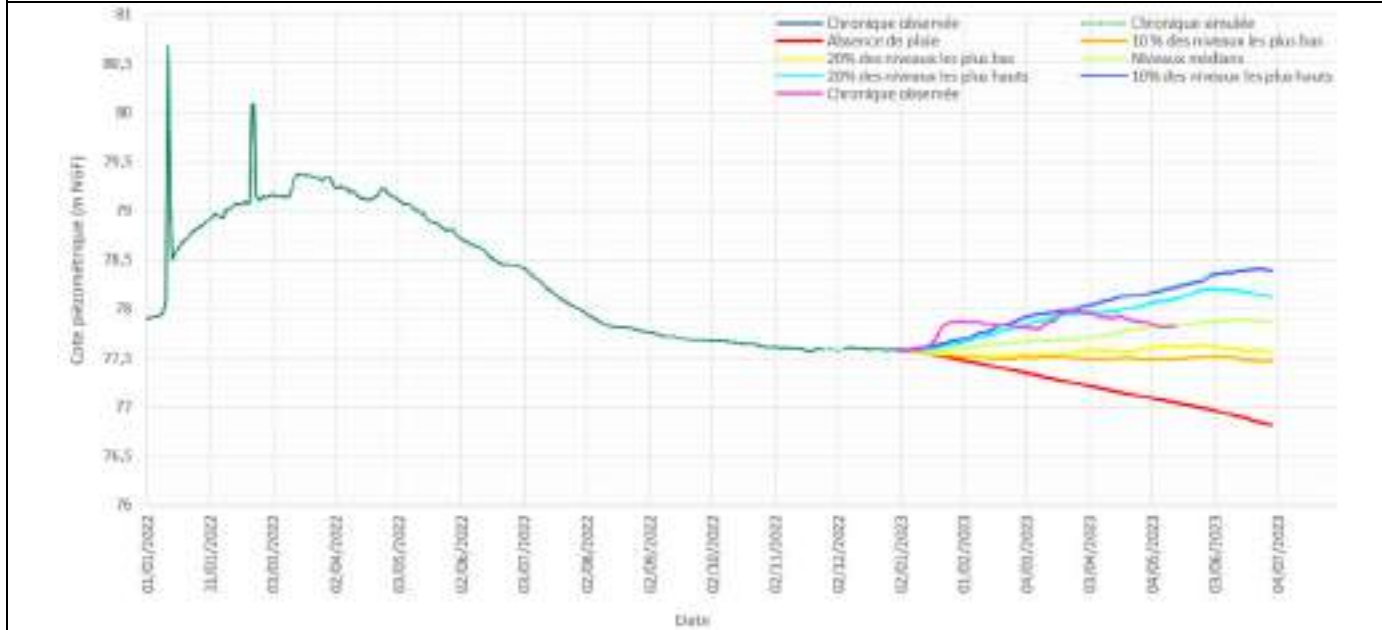




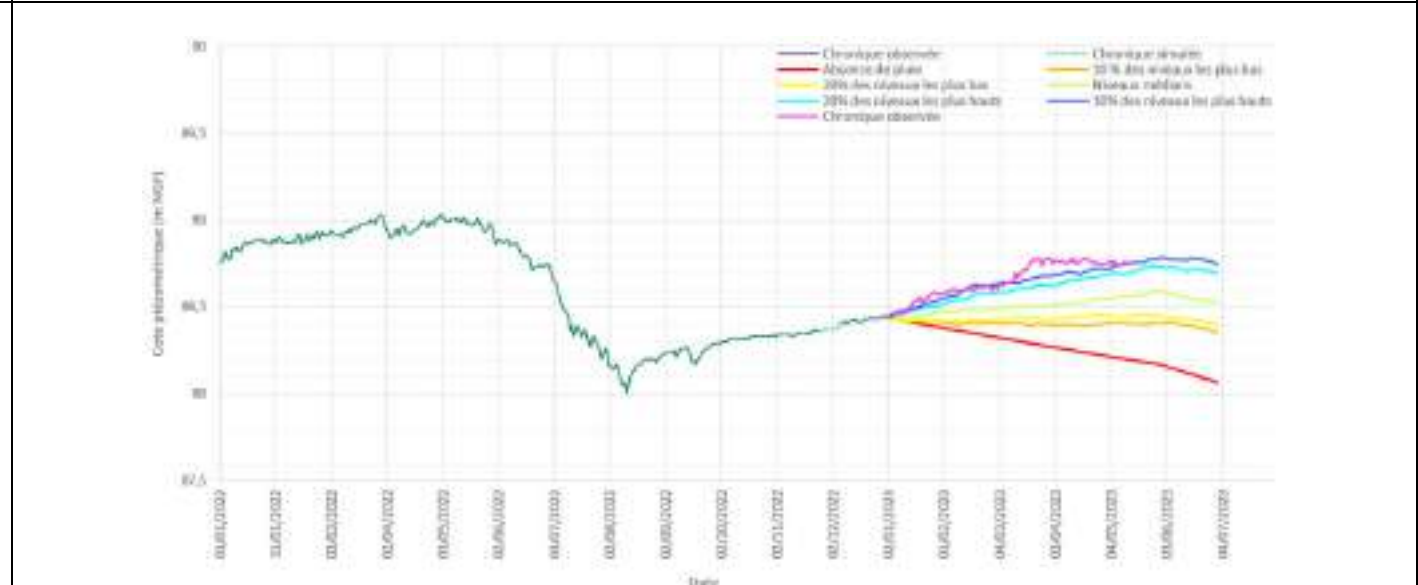
BSS002DEZW – Bioule



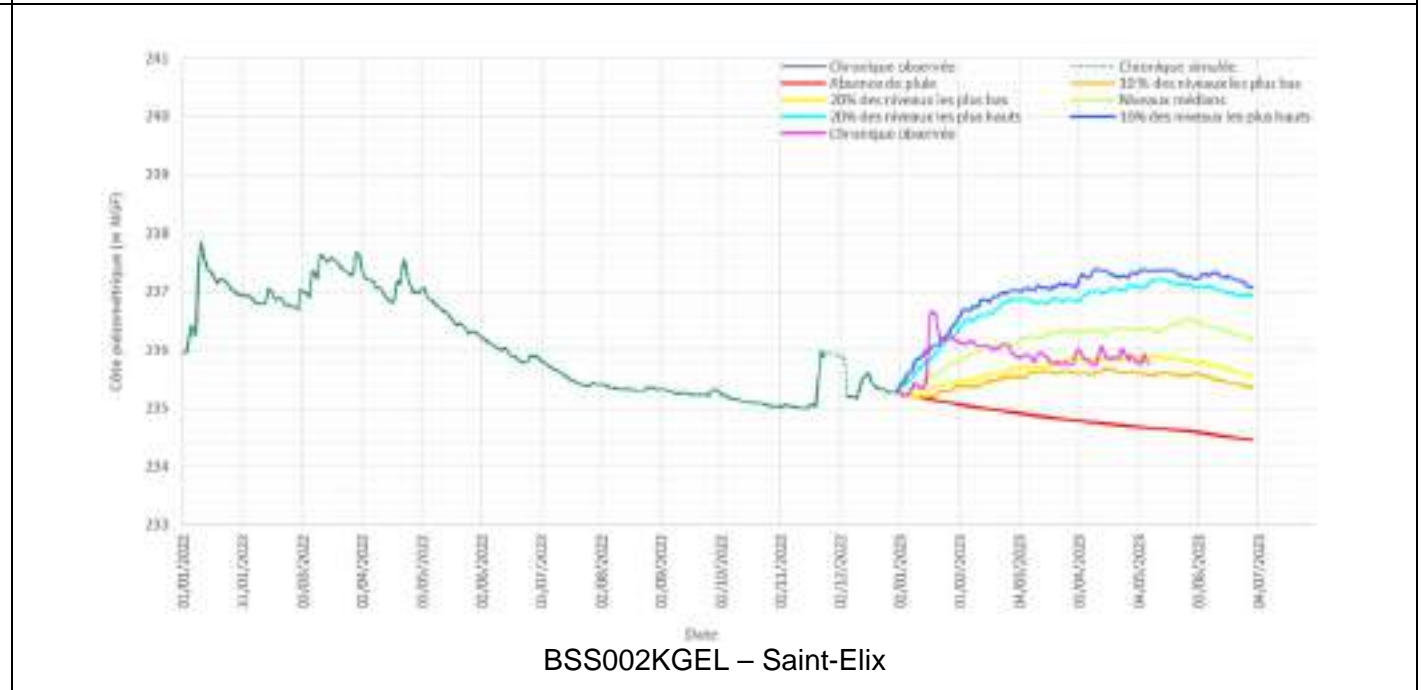
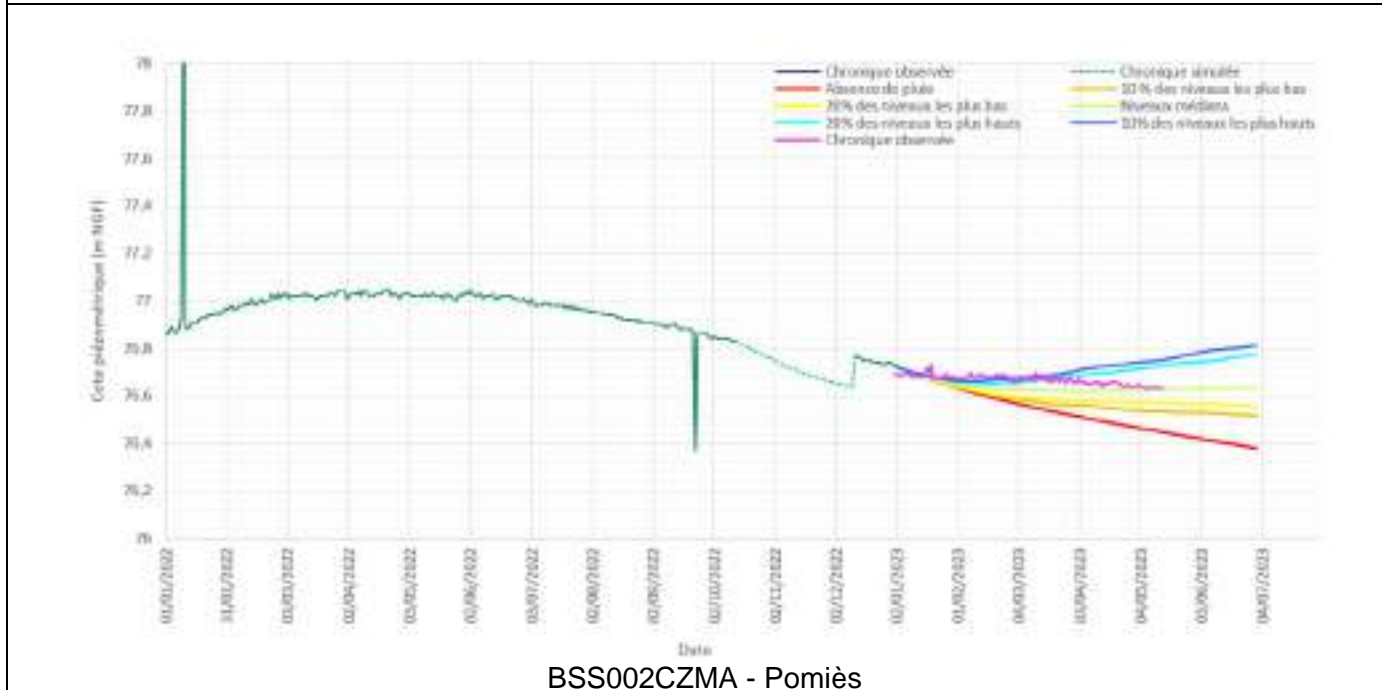
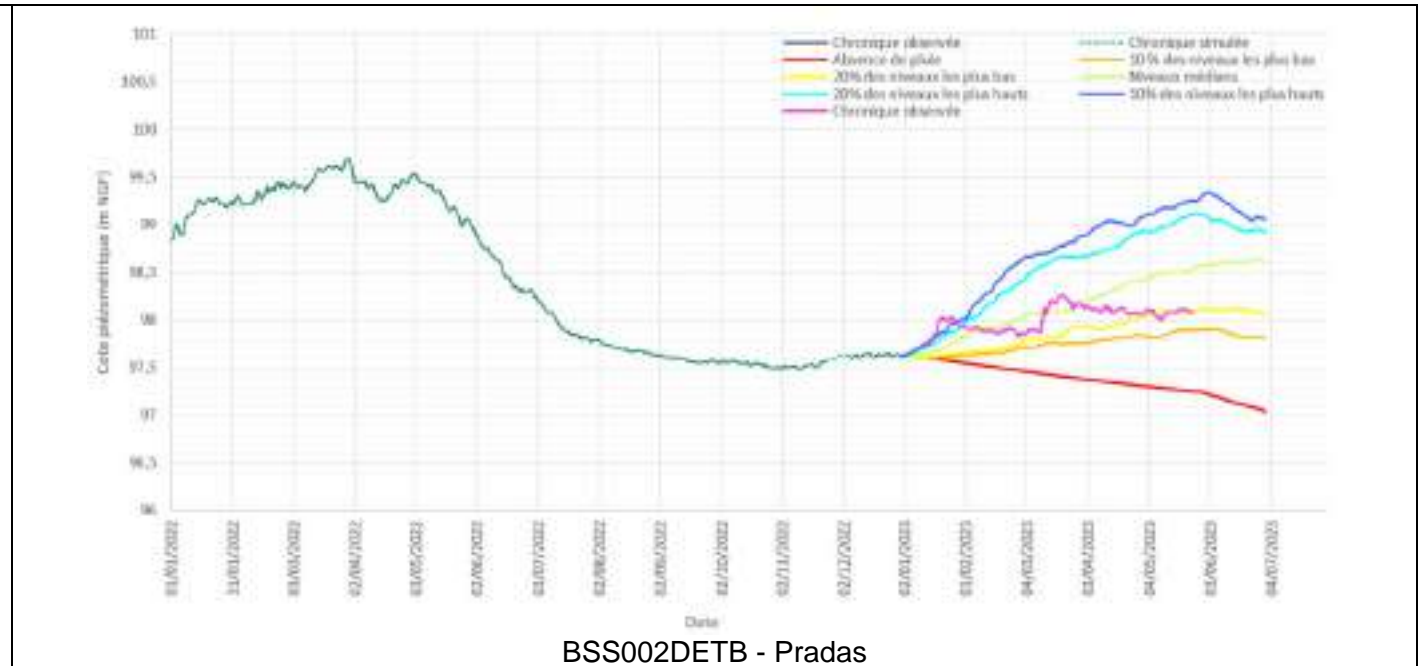
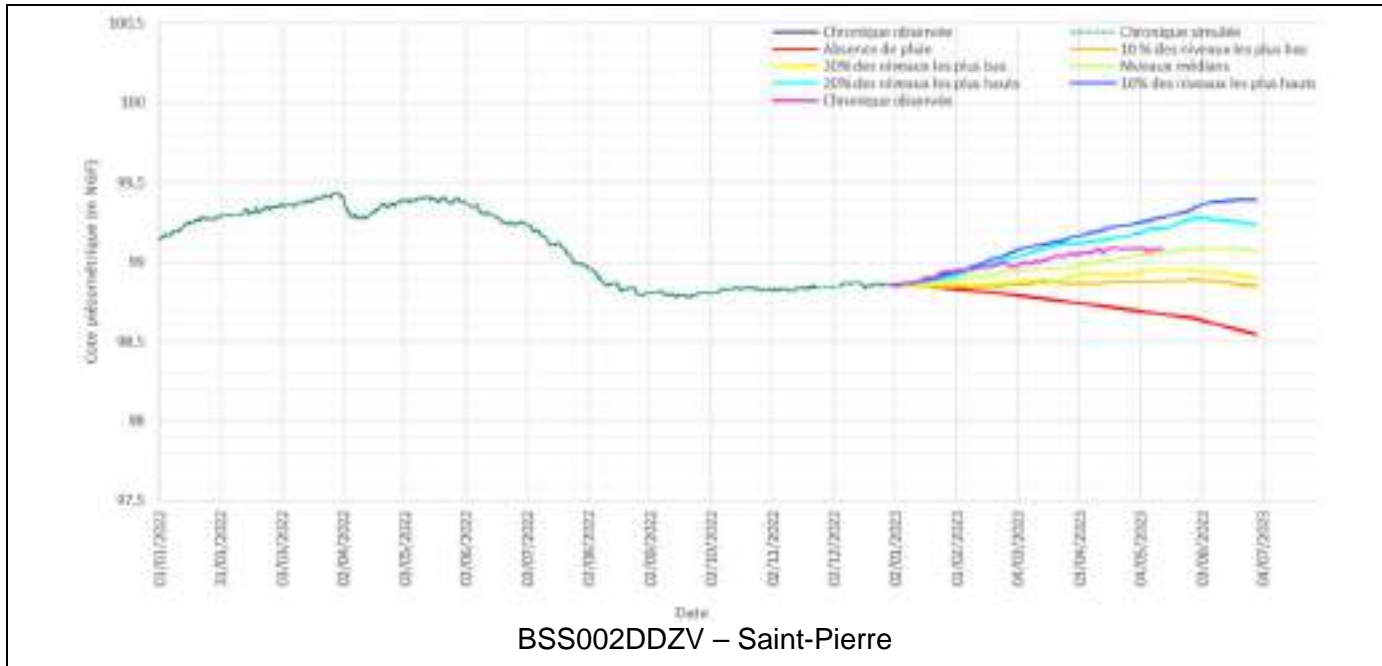
BSS002CZWH – Les Barthes



BSS002DDAH – Saint-Porquier



BSS002DAWQ - Pédeloup





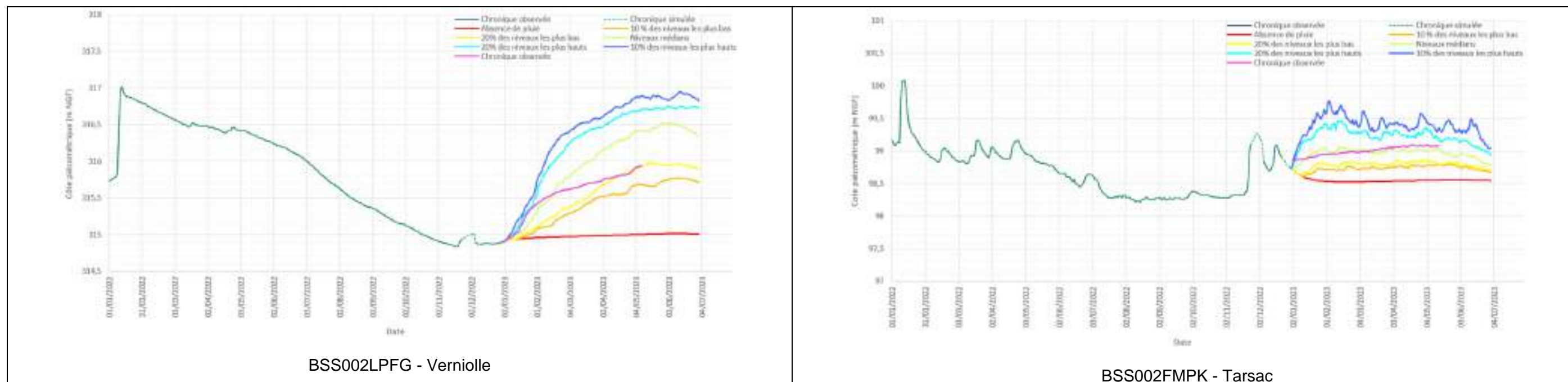


Illustration 40 – Prévision du niveau de la nappe au 1<sup>er</sup> semestre 2023 sur les sites étudiés (France)









## 6. Application au delta du Llobregat (Espagne)

Le couple de cas d'application pour la vallée du delta du Llobregat en Espagne est constitué du piézomètre « P » et « SV ». Ces cas d'application utilisent des modalités de modélisation avec la prise en compte de débits d'exploitation qui impactent la piézométrie.

### 6.1. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée sont les précipitations, l'ETP et les prélèvements.

Les données journalières de précipitation et d'ETP ont été fournies par le partenaire du projet, CUADLL, au pas de temps journalier. Ces données sont disponibles sur la période de temps mai 1993 à décembre 2020, elles sont issues d'une station météo située à Viladecans.

Les données relatives aux prélèvements correspondent à des débits prélevés au pas de temps mensuels, pour treize sites de pompage et d'injection dans la vallée. Les données de prélèvements sont fournies pour la période de temps de janvier 1966 à décembre 2020.

### 6.2. DONNEES DE CALAGE

Les données de piézométrie pour deux sites (« P » et « SV ») fournies par le partenaire du projet CUADLL s'étendent d'octobre 1967 à juillet 2020. Ces données sont au pas de temps mensuel et elles comportent des lacunes.

Les valeurs de piézométrie au piézomètre « P » sont associées à une situation « amont » aux différents points de captage et d'injection situés plus à l'aval. La situation du piézomètre SV est relativement proche des sites d'exploitation, à l'aval.

Les données utilisées pour le calage correspondent à la série complète (pluie, ETP, piézométrie, pompages) entre 1993 et 2020. L'initialisation du modèle est décrit ci-dessous.

Les chroniques piézométriques sont représentées sur l'illustration 41 en représentant les précipitations différemment selon qu'elles ont eu lieu entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 31 mai ou entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 octobre. Ce choix a été fait pour distinguer les précipitations ayant eu lieu durant la période associée à la recharge des nappes (étendue pour effectuer le même traitement sur tous les sites d'étude).

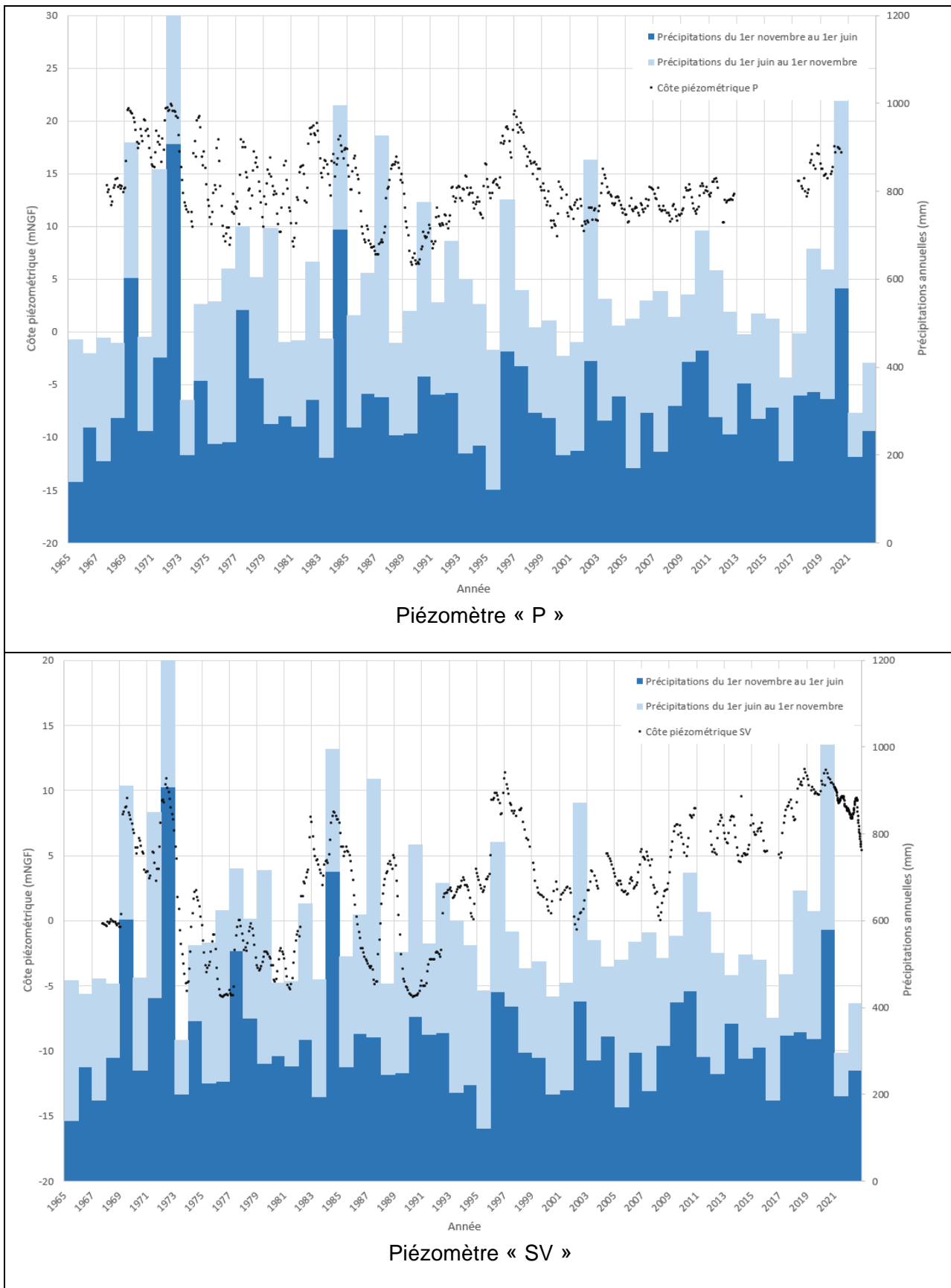


Illustration 41 - Chroniques piézométriques et pluviométriques (Llobregat, Espagne)

### 6.3. PARAMETRES INITIAUX DU CALAGE

Les valeurs initiales des paramètres sont définies par défaut. Les capacités du réservoir sol progressif et la hauteur de percolation sont initialisées à 1mm. Les temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement de la nappe et de transfert vers le compartiment souterrain sont initialisées à 1 mois. Le coefficient d'emmagasinement de la nappe est initialisé 0.01 %. Les coefficients d'influence de  $\frac{1}{2}$  montée et de  $\frac{1}{2}$  stabilisation en lien avec l'influence des pompages sont respectivement initialisés à 0.0001 (-), 0.05 mois et 0.1 mois.

Une période de chauffe d'une année répétée 2 fois, est utilisée avant la calibration de manière à éviter un biais d'optimisation lié aux valeurs initiales.

### 6.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES MODELISATIONS

Une étude exploratoire a été réalisée afin d'étudier les dépendances entre les débits exploités et la piézométrie et l'impact de ces données dans la modélisation. Cette étude met en évidence des relations moyennes entre les débits exploités ou injectés dans la nappe et les piézomètres P et SV (p. ex.: les plus intenses sont  $\tau = -0.48$  entre VB6 et le piézomètre P ; et  $\tau = -0.56$  entre le VB8 et le piézomètre SV).

Une étape de calcul exploratoire est réalisée sans et avec les valeurs des trois sites présentant les plus fortes corrélations a été réalisée. Les résultats exploratoires ont montré que la prise en compte des débits de pompages au site « VB 8 » dans la calibration permet d'améliorer significativement les performances de calibration, pour les deux piézomètres P et SV.

#### 6.4.1. Piézomètre « P »

Les calculs sont réalisés sur la période de concomitance des variables pluie – piézométrie, à savoir de mai 1993 à décembre 2020.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain avec la prise en compte des débits pompés au puits VB 8. Les paramètres du modèle conceptuel laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, et le coefficient d'emmagasinement de la nappe. Les paramètres relatifs à l'influence des pompages sont le coefficient d'influence, le temps de  $\frac{1}{2}$  montée et le temps de  $\frac{1}{2}$  stabilisation. Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient de Nash pour l'ajustement final est de 0.64 et le coefficient de corrélation est de 0.80. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1994-2020 est 71.9 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 46.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 0.97.



Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps 1/2 tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de 1/2 réaction de la nappe	Temps de 1/2 stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
566	<b>5.98</b>	<b>0.09</b>	<b>7.32</b>	<b>0.97</b>	<b>N.A.</b>	<b>0.00025</b>	<b>13.04</b>	<b>0.97</b>	<b>63.9</b>	<b>0.64</b>

Illustration 42 – Paramètres assurant le calage optimal au piézomètre P dans la vallée du Llobregat sur la période 1993-2020.

La chronique de piézométrie calculée est présentée sur Illustration 48. La série calculée reproduit les variations de fortes amplitudes, environ 8 m, rencontrées sur les premières années (1995-2000), la période aux fluctuations plus restreintes entre 2001 et 2016 ainsi que la hausse progressive constatée depuis 2018. Le modèle rend compte des fluctuations pluriannuelles et infra-annuelles de manière satisfaisante. La piézométrie minimale calculée est légèrement surestimée sur l'ensemble de la chronique. Enfin le modèle calibré reproduit de manière satisfaisante les pics de piézométrie, avec une légère sous-estimation pour la période de 2006 à 2009.

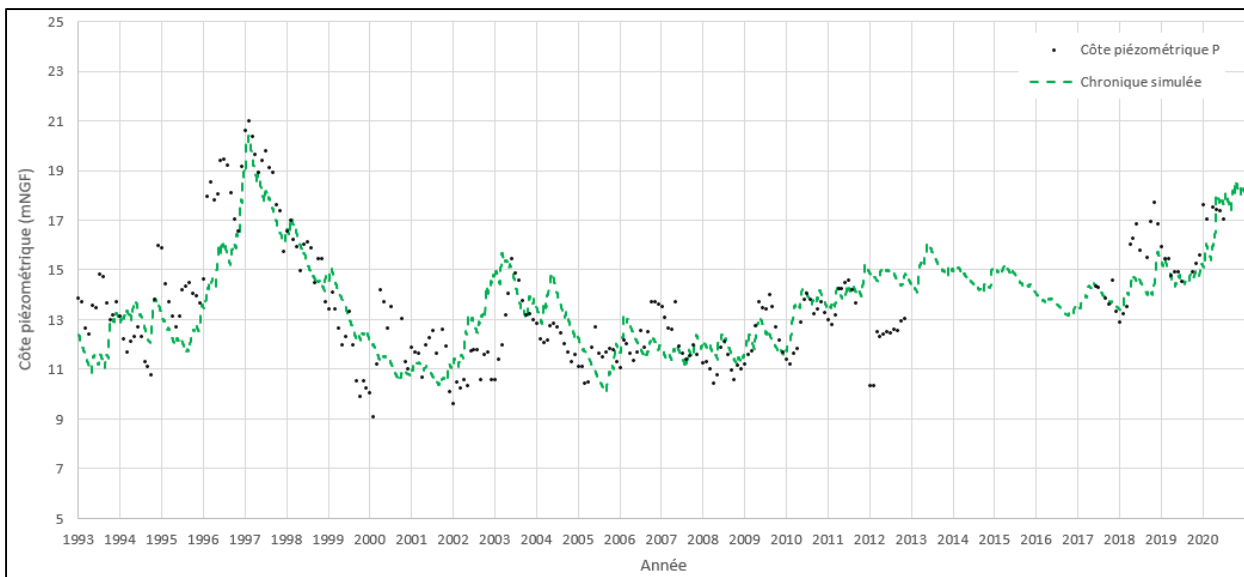


Illustration 43 - Calage pluie-niveau sur le piézomètre « P » (Llobregat - Espagne) sur la période 1993-2020

### 6.4.2. Piézomètre « SV »

Les simulations sont réalisées sur la période de concomitance des variables pluie – piézométrie, à savoir de mai 1993 à décembre 2020.

Le schéma conceptuel permettant d'obtenir les meilleurs résultats de modélisation est constitué d'un réservoir souterrain, influencé par le pompage BV8 (cf. paragraphe 6.1).

Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont identiques à ceux accordés pour le piézomètre P : d'une part, le niveau de base local de la nappe, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, et le coefficient d'emménagement de la nappe ; d'autre part les paramètres associés aux pompages : le coefficient d'influence du pompage, les temps de demi-montée et stabilisation de pompage.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.67 et le coefficient de corrélation est de 0.8. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 1994-2020 est 220.2mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 44.

Le coefficient d'emménagement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 0.51 %.

Illustration 44 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre (BSS002KGEL) sur la période xxx

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emménagement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
44.12	<b>0.55</b>	<b>0.016</b>	<b>8.55</b>	<b>0.5</b>	<b>N.A.</b>	<b>0.0116</b>	<b>0.07</b>	<b>21.6</b>	<b>15.54</b>	<b>0.67</b>

Les résultats d'une calibration tenant compte du pompage BV 8, dont le rythme de pompage est relativement corrélé à la piézométrie mesurée dans le piézomètre SV, sont présentés sur l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La calibration obtenue est bonne (Nash = 0.67 et coefficient de corrélation = 0.8), ce qui constitue une progression au regard d'une calibration sans prise en compte de l'influence des pompages sur la piézométrie (N=0.25 et R2=0.5). Pour ce couple « puits pompé / piézomètre », la prise en compte de pompage individualisé permet d'améliorer la calibration sur les points suivants :

- la piézométrie maximale en 1997,
- la surestimation de calibration sur la période 2000-2006 et,
- la sous-estimation sur la période 2017-2020.

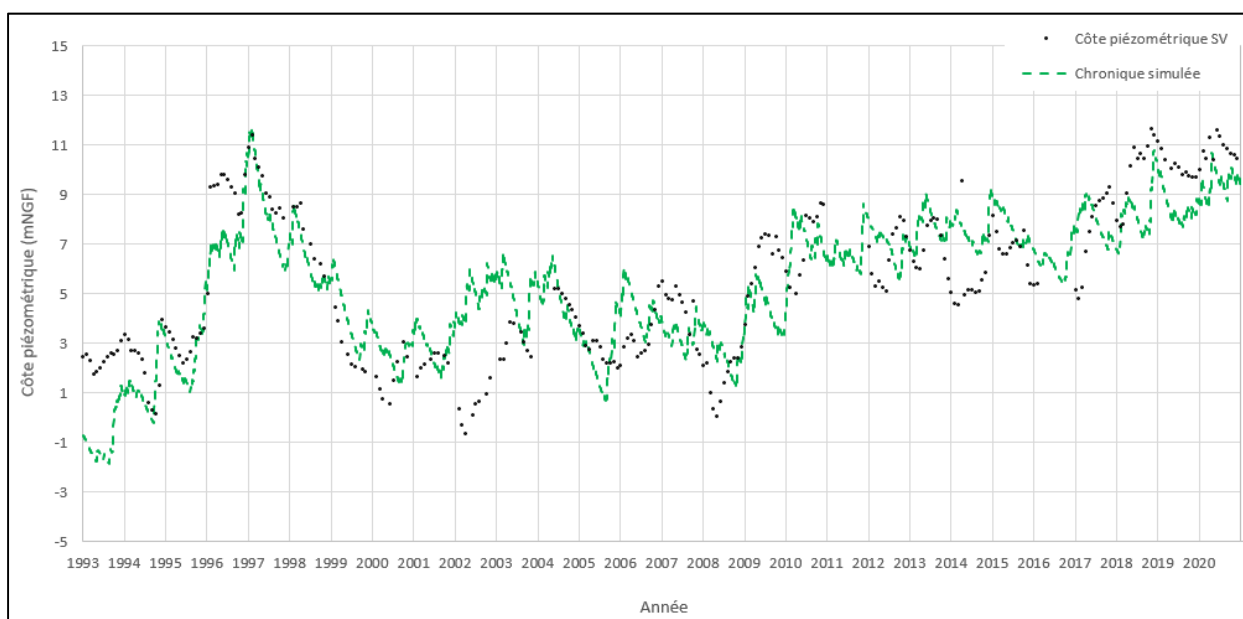


Illustration 45 - Comparaison entre valeurs de piézométrie calibrées (vert) et observées (noir) pour le piézomètre SV du site de Vall Baixa (Llobregat - Espagne) sur la période 1994-2020

## 6.5. PREVISIONS DU NIVEAU DE LA NAPPE

L'intérêt principal de la modélisation en mode prévisionnel réside dans la mise à disposition des résultats de ces modélisations sur le site MétéEAU'Nappes (cf. paragraphe 6) et la mise à jour régulière, mensuelle si possible, de ces prévisions afin de pouvoir anticiper au mieux des scénarios de basses eaux ou hautes eaux exceptionnels. Ceci nécessite d'une part de bons résultats de calibration, et d'autre part un accès à des interfaces de programmation d'application (API) permettant de mettre à jour automatiquement la piézométrie et les données météorologiques. A défaut, un opérateur doit mettre à jour ces informations à un pas de temps pré-défini de façon à mettre à jour les prévisions.

Dans le cas du Llobregat, la phase de calibration des modèles conduit à des résultats pouvant être améliorés par une étude plus fine de l'influence des prélèvements sur la piézométrie. De plus, les chroniques de prélèvements sont à étudier de façon à définir des chroniques prévisionnelles. Enfin, si les côtes piézométriques sont collectées grâce à des capteurs numériques, les données ne sont pas mises à disposition sur une plateforme permettant une connexion par API. Aussi, la mise à jour de MétéEAU'Nappes nécessiterait l'intervention d'un opérateur. Le projet SUDOE AQUIFER dans lequel a été réalisé ce travail arrivant à échéance prochainement, aucun temps opérateur n'a été provisionné à l'issue du projet pour permettre cette bancarisation régulière. Aussi, il a été décidé, en collaboration avec le partenaire local, CUADLL, de ne pas procéder à la mise en ligne des résultats.

## 7. Application au Campo de Cartagena (Espagne)

### 7.1. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée sont la pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les prélèvements.

Les données journalières de précipitation et d'ETP ont été fournies par le partenaire du projet, l'IGME au pas de temps journalier sur la période novembre 2008 – mai 2021. Les stations météorologiques associées aux piézomètres locaux ont été sélectionnées au regard de leur proximité au cas étudié.

Les données associées aux prélèvements ne sont pas connues et n'ont par conséquent pas pu être insérées dans la modélisation.

## 7.2. DONNEES DE CALAGE

Les données de piézométrie fournies par le partenaire du projet (IGME) sont au pas de temps mensuel, elles portent sur la période de temps entre novembre 2008 et mai 2021. Ces données comportent des lacunes.

La chronique piézométrique est représentée sur l'illustration 46 en représentant les précipitations différemment selon qu'elles ont eu lieu entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 31 mai ou entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 octobre. Ce choix a été fait pour distinguer les précipitations ayant eu lieu durant la période associée à la recharge des nappes (étendue pour effectuer le même traitement sur tous les sites d'étude).

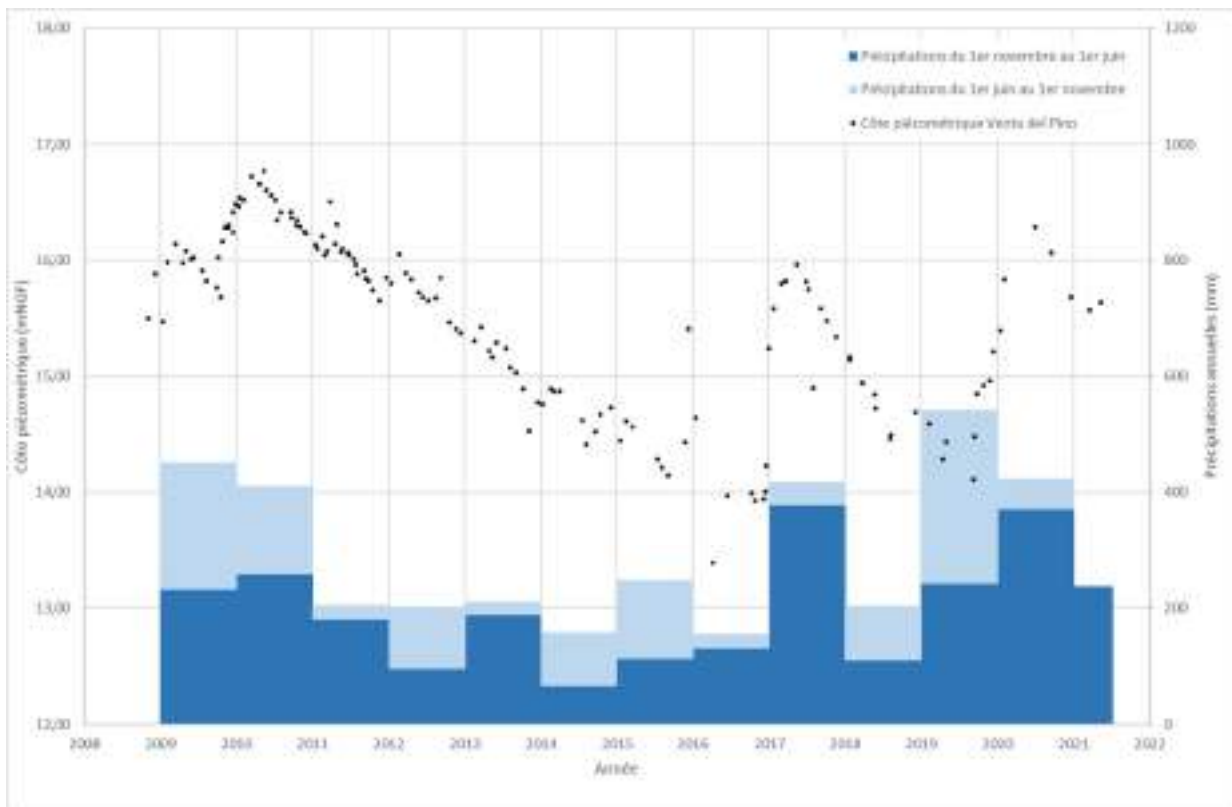


Illustration 46 – Chroniques piézométrique (283810010) et pluviométrique (Cartagena, Espagne)

## 7.3. PARAMETRES INITIAUX DU CALAGE

Les valeurs initiales des paramètres sont définies par défaut. Les capacités du réservoir sol progressif et la hauteur de percolation sont respectivement initialisées à 0 et 1mm. Les temps de ½ tarissement de la nappe

et de transfert vers le compartiment souterrain sont initialisées à 1 mois. Le coefficient d'emmagasinement de la nappe est initialisé 0.01 %. Une période d'initialisation d'une année répétée 2 fois, est utilisée avant la calibration de manière à éviter un biais d'optimisation lié aux valeurs initiales (p. ex. réservoirs vides).

#### **7.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES MODELISATIONS**

Les simulations sont réalisées sur la période de concomitance des variables pluie – piézométrie (11/2008-05/2021).

Le schéma conceptuel considéré pour la modélisation comporte un réservoir souterrain, sans influence de pompage (absence de données relatives aux pompages). La modélisation réalisée est de type « pluie – piézométrie ». Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, et le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier. La comparaison entre valeurs observée et simulée pour la piézométrie est réalisée pour chaque pas de temps disposant d'un couple complet. La stratégie de calibration pour les valeurs de piézométrie au piézomètre 283810010 consiste à utiliser l'intégralité des séries temporelles disponibles pour l'estimation des paramètres. Ceci revient à ne privilégier aucune période temporelle associée à des situations de hautes ou basses eaux.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.87 et le coefficient de corrélation est de 0.93. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 2009-2021 est de 23.9 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 44.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 0.015 %, ce qui est relativement faible. Le pourcentage d'écoulement souterrain est évalué à 99%, ce qui dénote d'une prédominance des écoulements dans le compartiment souterrain, plausible dans le contexte aride de l'hydrosystème de Carthagène.

*Illustration 47 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre (283810010) sur la période 2009-2021*

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps 1/2 tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de 1/2 réaction de la nappe	Temps de 1/2 stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
391.8	19539.3	48.1	0.15	0.015	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	99	0.87

Les résultats de calibration du modèle GARDENIA au pas de temps journalier sont satisfaisants. L'illustration 48 montre l'ajustement après calibration de la série de piézométrie. Le modèle employé n'a pas permis de reproduire certains pics saisonniers comme celui de 2012 (faible amplitude <0.5m) ou celui de 2017 (grande amplitude >2m). En revanche, le modèle permet de reproduire fidèlement la dynamique interannuelle de la piézométrie entre 2009 et 2021 en reproduisant les amplitudes et dynamiques des basses et hautes eaux de manière très satisfaisante. Une étude plus fine de l'impact de mesures règlementaires sur les niveaux d'eau serait nécessaire afin d'améliorer les résultats de cette phase de calibration.

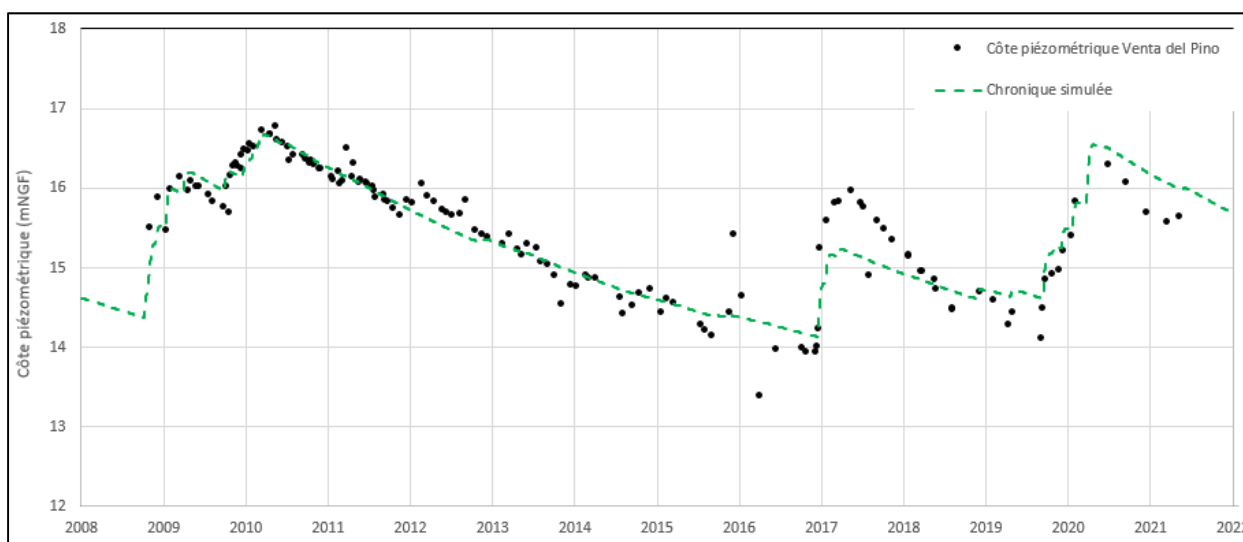


Illustration 48 - Comparaison entre valeurs de piézométrie simulées (vert) et observées (rouge) pour le piézomètre 283810010 du site de Cartagena (Espagne) sur la période 2009-2021



## 7.5. PREVISIONS DU NIVEAU DE LA NAPPE

Dans le cas du Campo de Cartagena, les données de piézométrie et météorologiques ne sont pas mises à disposition sur une plateforme permettant une connexion par API. Aussi, la mise à jour de MétéEAU'Nappes (cf. paragraphe 9) nécessiterait l'intervention d'un opérateur. Le projet SUDOE AQUIFER dans lequel a été réalisé ce travail arrivant à échéance prochainement, aucun temps opérateur n'a été provisionné à l'issue du projet pour permettre cette bancarisation régulière. Aussi, il a été décidé, en collaboration avec le partenaire local, IGME, de ne pas procéder à la mise en ligne des résultats.

## 8. Application à la vallée du Tage (Portugal)

Le couple de cas d'application pour la vallée du Tage au Portugal est constitué d'un piézomètre à Salvaterra de Magos et d'un autre à Escaroupim.

### 8.1. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Pour ces sites, les données associées aux prélèvements ne sont pas disponibles et n'ont par conséquent pas pu être prises en compte dans les scénarios de modélisation.

Les données journalières de précipitation et d'ETP ont été fournies par le partenaire du projet, Agua de Ribatejo.

Le puits de Salvaterra est associé à une chronique météorologique de la station de Magos qui dispose d'une chronique de précipitations et d'évapotranspiration.

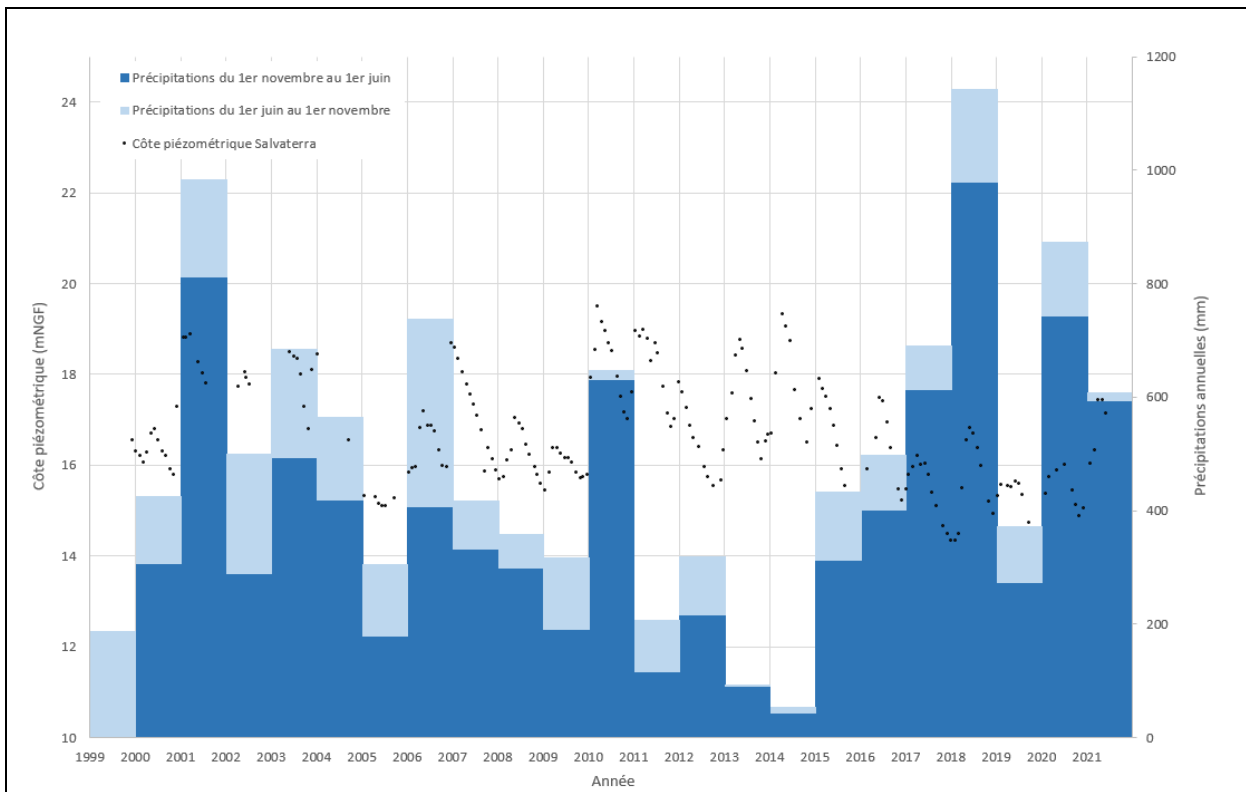
L'absence de valeurs d'évapotranspiration pour le puits d'Escaroupim nous a amené à rechercher des valeurs sur le site de mise à disposition des données portugais (<https://snirh.apambiente.pt/>), afin d'obtenir une valeur pour une station météorologique proche. Les valeurs d'ETP de la station météorologique de Vila Franca de Xira (20D/01C) ont été utilisées sur la période 2001 - 2021.

Pour toutes les stations, les valeurs d'ETP enregistrées présentaient des lacunes qui ont été complétées par la valeur moyenne journalière calculée sur la série de valeurs disponibles.

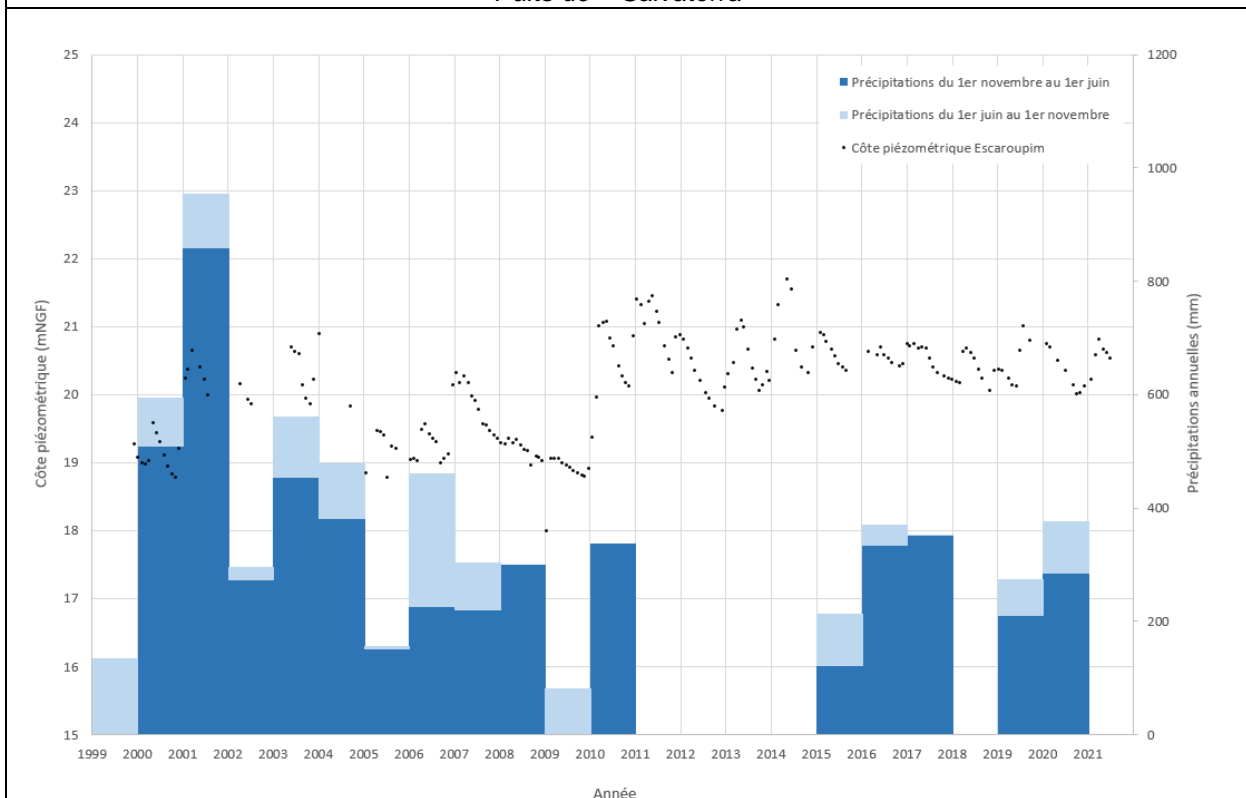
### 8.2. DONNEES DE CALAGE

Les données piézométriques ont été fournies à des pas de temps irréguliers (de l'ordre de mensuel à bi-mensuel) pour les deux sites. Toutes les données sont prises en compte au cours de la recherche de paramètre optimaux dans la phase de calibration.

Les chroniques piézométriques sont représentées sur l'illustration 49Illustration 46 en représentant les précipitations différemment selon qu'elles ont eu lieu entre le 1<sup>er</sup> novembre et le 31 mai ou entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 octobre. Ce choix a été fait pour distinguer les précipitations ayant eu lieu durant la période associée à la recharge des nappes (étendue pour effectuer le même traitement sur tous les sites d'étude).



*Puits de « Salvaterra »*



*Puits d' « Escaroupim »*

*Illustration 49 - Chroniques piézométriques et pluviométriques (Portugal)*

### **8.3. PARAMETRES INITIAUX DU CALAGE**

Les valeurs initiales des paramètres sont définies par défaut. Les capacités du réservoir sol progressif et la hauteur de percolation sont respectivement initialisées à 0 et 1mm. Les temps de  $\frac{1}{2}$  tarissement de la nappe et de transfert vers le compartiment souterrain sont initialisées à 1 mois. Le coefficient d'emmagasinement de la nappe est initialisé 0.01 %. Une période d'initialisation d'une année répétée 2 fois, est utilisée avant la calibration de manière à éviter un biais d'optimisation lié aux valeurs initiales (p. ex. réservoirs vides).

### **8.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES MODELISATIONS**

#### **8.4.1. Salvaterra de Magos**

Les simulations sont réalisées sur la période de concomitance des variables pluie – piézométrie (2001-2021). L'intégralité des séries temporelles disponibles a été utilisée pour l'optimisation des paramètres. Le schéma conceptuel considéré pour la modélisation comporte un réservoir souterrain, sans influence de pompage (absence de données relative aux pompages). La modélisation réalisée est de type « pluie – piézométrie ». Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, et le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.2 et le coefficient de corrélation est de 0.45 pour une calibration effectuée avec des données d'ETP manquantes. Dans le cas où la calibration est réalisée avec des valeurs d'ETP complétées (moyenne journalière), les coefficients sont respectivement de 0.1 et 0.32. Sur la base du premier calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 2001-2021 est de 234.8mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 50.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 0.92%.

Illustration 50 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre de Salvaterra sur la période 2001 - 2021

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
15.4	<b>0.1</b>	<b>0.003</b>	<b>5.9</b>	<b>0.92</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>6.6</b>	<b>0.2</b>

Les résultats de calibration obtenus pour la chronique les variations de niveaux piézométriques à Salvaterra de Magos montrent que la qualité du calcul est imparfaite (Illustration 51). L'approche de modélisation avec 1 réservoir permet une reproduction des fluctuations des niveaux d'eau mais des processus non précisés dans ce travail (p. ex. pompages, recharge via les cours d'eau) affectent ces fluctuations. Une meilleure connaissance du système et des informations complémentaires permettraient d'améliorer significativement les résultats de la modélisation.

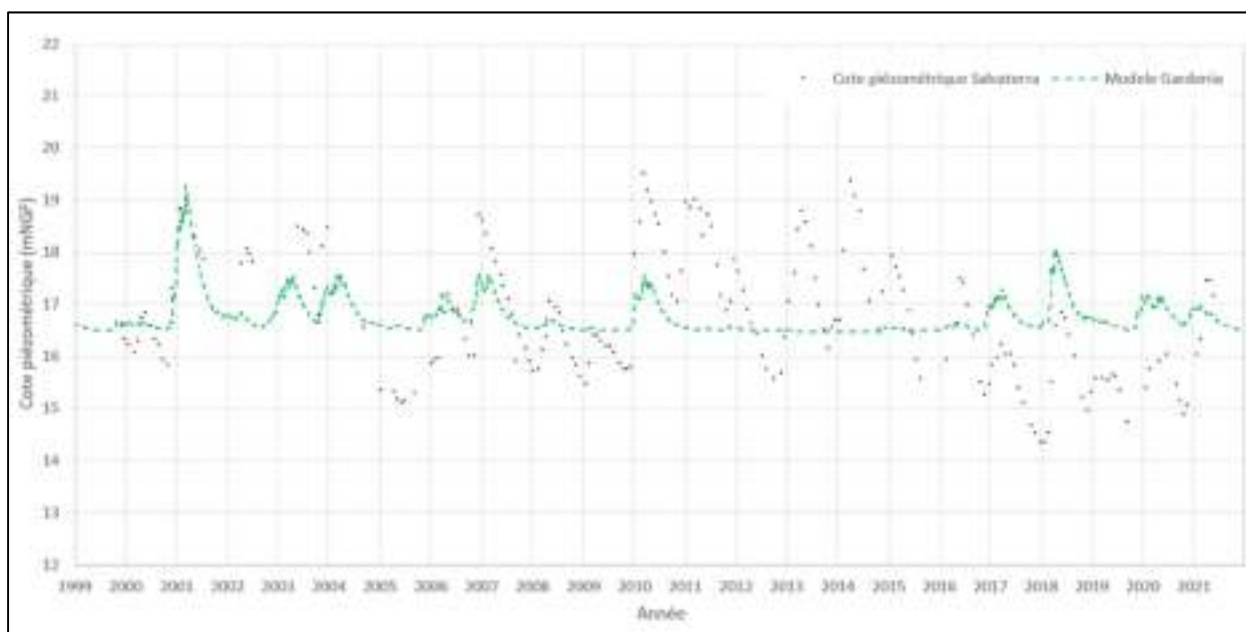


Illustration 51 - Comparaison des séries observée et simulée avec le modèle « pluie – piézométrie » développé pour le piézomètre de Salvaterra de Magos (Portugal) sur la période 2000-2021.

## 8.4.2. Escaroupim

La calibration a été réalisée sur la période de temps sur laquelle les chroniques de pluviométrie, d'ETP et de piézométrie comportaient le moins de lacunes possible afin d'être le plus robuste possible (01/01/2000-31/12/2006). Les calculs d'évolution de piézométrie sont néanmoins réalisés sur la période Janvier 2000 – Janvier 2022, pour lesquelles les chroniques de pluviométrie présentent des lacunes (2007-2022).

Le schéma conceptuel considéré pour la modélisation comporte un réservoir souterrain, sans influence de pompage (absence de données relative aux pompages). La modélisation réalisée est de type « pluie – piézométrie ». Les paramètres laissés libres à l'optimisation sont le niveau de base local de la nappe, la capacité du réservoir sol progressif, la hauteur de répartition Ruissellement – Percolation, le temps de demi-percolation vers la nappe, le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain 1, et le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

Le calage a été réalisé au pas de temps journalier.

Le coefficient d'ajustement final obtenu est de 0.74 et le coefficient de corrélation est de 0.86 sur la période 2000-2006. Sur la base de ce calage, la pluie efficace annuelle moyenne calculée par le modèle sur la période 2000-2006 est de 119 mm. Les paramètres permettant ce calage optimal sont repris dans l'illustration 52.

Le coefficient d'emmagasinement a été laissé libre à l'optimisation. Sa valeur a été estimée à 11 %.

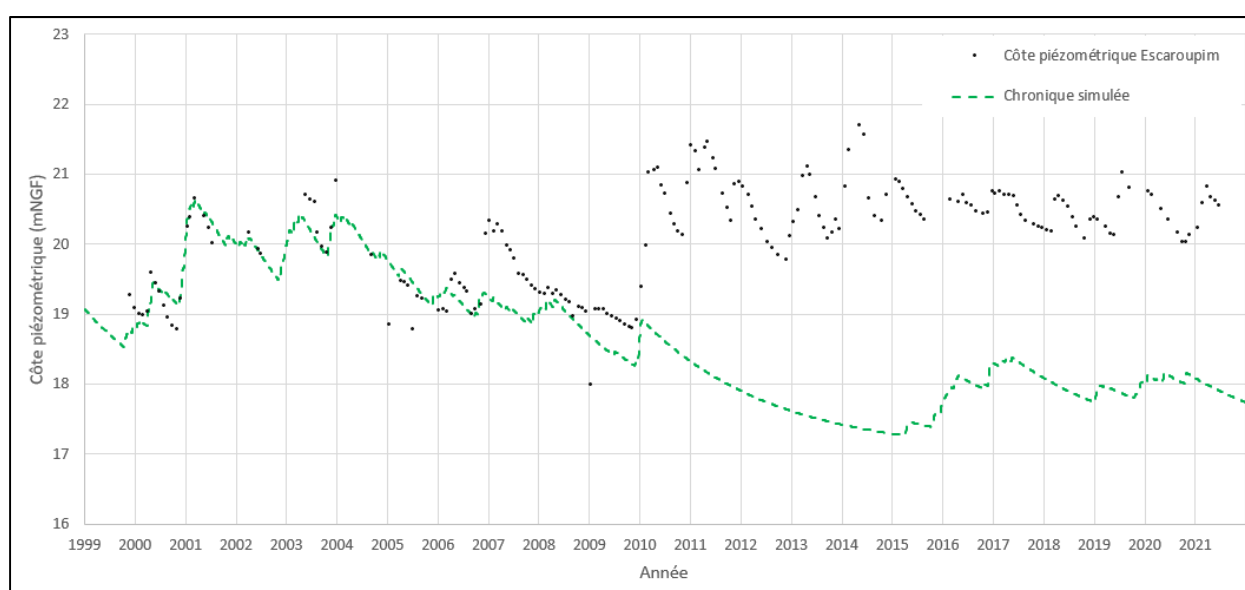
Illustration 52 – Paramètres assurant le calage optimal sur le piézomètre d'Escouparim sur la période 2000 - 2006

Paramètres de base à optimiser						Paramètres associés aux pompages			Qualification du calage	
Capacité du réservoir sol progressif	Hauteur équi-répartition Ruissellement-Percolation	Temps 1/2 Percolation	Temps 1/2 tarissement	Coefficient emmagasinement	Temps ½ tarissement du réservoir 2 (mois)	Coefficient d'influence	Temps de ½ réaction de la nappe	Temps de ½ stabilisation de la nappe	% écoulement souterrain	Coefficient de Nash
mm	mm	mois	mois	%	mois	-	mois	mois	%	-
7.2	<b>8.6</b>	<b>0.056</b>	<b>21.3</b>	<b>11.3</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>N.A.</b>	<b>56.9</b>	<b>0.74</b>

Les valeurs de piézométrie observées et les résultats de calibration et de validation sur une période future (2007-2021), pour laquelle les données sont incomplètes (à partir de 2008) sont reprises sur l'illustration 53. Les résultats de calibration obtenus pour la chronique les variations de niveaux piézométriques à Escaroupim montrent que la qualité du calcul au niveau du calage est bonne sur la période 2000-2006 : les amplitudes et la dynamique des variations de piézométrie sont bien reproduites sur la période de calibration et sur l'année suivante (2007). Au-delà de cette période, les valeurs simulées sont sous-estimées avec un décalage qui semble constant. Ce phénomène est associé à l'absence de données de pluviométrie dans la chronique qui a été fournie, phénomène qui n'est certainement pas celui qui a été observé sur la période 2011-2015.

Passé cette période, la dynamique de la côte piézométrique est relativement respectée, associée à une chronique pluviométrique plus réaliste (2015-2017).

La diminution continue du niveau piézométrique entre 2010 et 2015 contraste avec la hausse et un palier concernant les niveaux observés sur le terrain. Pour la simulation, cette diminution continue est le résultat de l'absence de donnée de pluviométrie en entrée de modèle, favorisant le réservoir lent (associé à la piézométrie) à se vidanger, sans recharge. Le palier des valeurs observées requiert plus d'informations sur des modifications relatives au terrain et non connues actuellement. Cette hausse pourrait être associée par exemple à : une part plus importante de recharge et/ou, une diminution des prélèvements. Les résultats de calibration montrent que l'approche de modélisation avec un réservoir permet une reproduction des fluctuations des niveaux d'eau mais que des processus non précisés dans ce travail peuvent affecter sur le long terme les simulations.



*Illustration 53 - Comparaison entre observations et résultats de calibration de la piézométrie au piézomètre d'Escaroupim (Portugal). La période considérée pour la calibration s'étend de 2000 à 2006, les données de cumuls de pluie entre 2010 et 2015 impactent la vidange du modèle.*

## 8.5. PREVISIONS DU NIVEAU DE LA NAPPE

Dans le cas du Portugal, une meilleure compréhension du fonctionnement des nappes en présence et des données météorologiques plus complètes sont nécessaires afin d'améliorer la phase de calibration avant d'envisager de passer le modèle dans une phase de prévisions.

Comme pour les sites espagnols, la réalisation de modèles en mode prévisionnel nécessite de disposer de données piézométriques mises à disposition via une API permettant une mise à jour automatique des données sur la plateforme MétéEAU'Nappes (cf. paragraphe 9). De plus, les chroniques météorologiques mises à disposition doivent être suffisamment longues (si possible supérieures à 30 ans) pour permettre l'usage de ces données pour la définition de scénarios climatiques. Enfin, ces données doivent être chargées ou mises à disposition à pas de temps régulier (mensuel ou bimestriel) pour une mise à jour régulière des modèles de prévisions.

## 9. La plateforme internet MétéEAU’Nappes

Les travaux de prévision du niveau des nappes réalisés en France (cf. paragraphe 5) ont été intégrés à la plateforme web MétéEAU Nappes (<https://meteeanappes.brgm.fr>) développée par le BRGM. Cette application est un outil de communication capable d’assembler des données de différentes sources (météorologie, débit des rivières, piézométrie) pour définir en temps presque réel l’état quantitatif de la ressource. Elle permet de :

- Prévoir l’évolution des niveaux piézométriques et permettre un accès public aux données en temps quasi-réel (cartes et graphiques)
- Valoriser les connaissances techniques et scientifiques, de la mise à disposition de la donnée à la création d’information
- Offrir un service à haute valeur ajoutée, résultant d’un travail de modélisation
- Contribuer, participer, aider à une meilleure gestion de la ressource dans les territoires

Cet outil est basé sur la télétransmission des niveaux piézométriques.

Ce site est composé d’un site vitrine et d’un système d’information basé sur deux composants fonctionnels : un backoffice permettant d’intégrer les données d’entrée, les seuils de gestion et un modèle d’exécution, et un front-office permettant de valoriser les données, sous la forme d’un service web, cartes et graphiques.

Le site vitrine et du fron-office sont présentés dans les paragraphes suivants.

### 9.1. LE SITE VITRINE

Le site vitrine (Illustration 54) offre une page d’accueil dans le site institutionnel qui décrit l’application, fournit les références bibliographiques, permet de découvrir les actualités et contient le bouton « Accéder à l’application » qui redirige vers l’application MétéEAU’Nappes qui dispose de sa propre URL.



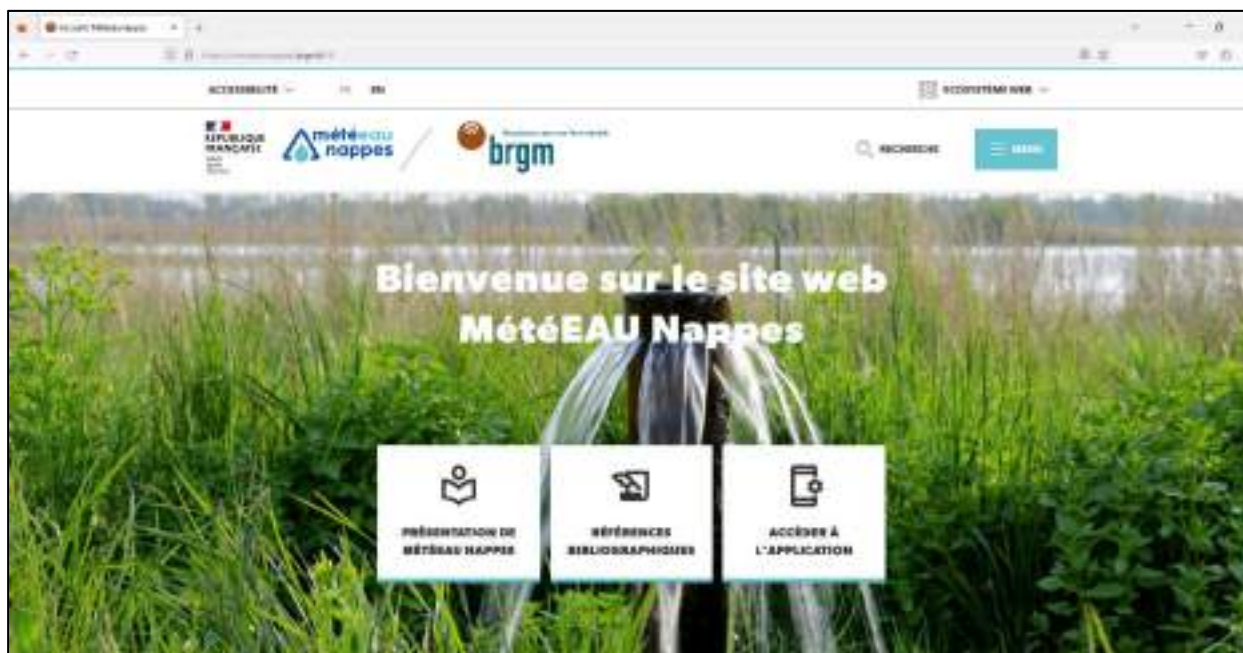


Illustration 54 – Site Vitrine MétéEAU’Nappes

## 9.2. L’APPLICATION MÉTÉEAU’NAPPES :

Pour accéder à l’application, chaque utilisateur doit créer un compte avec un e-mail et un mot de passe.

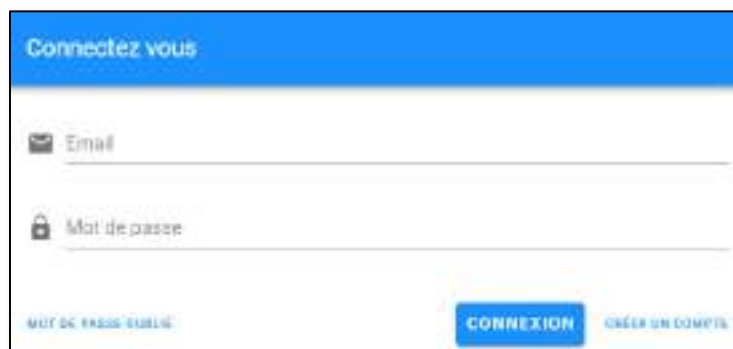


Illustration 55 – Page de connexion à l’application MétéEAU’Nappes

En fonction des utilisateurs (public, expert ou contributeur), différents droits sont définis.

Une fois connecté, l’utilisateur accède à la partie cartographique de l’outil, reprise sur l’Illustration 56. Cette page permet de visualiser l’ensemble des piézomètres modélisés à l’échelle de la France. Elle fournit la légende de la symbologie utilisée (Illustration 57) et permet de rechercher un point de suivi particulier, en utilisant sa commune ou son code BSS. L’utilisateur peut choisir d’accéder à la version française ou anglaise du site, il peut afficher l’état de la ressource dans le passé ou le futur en choisissant la date qu’il souhaite en bas à droite de l’écran, et, si projection dans le futur, le scénario climatique envisagé. Enfin, différentes fonctions d’affichage sont possibles en accédant à la partie droite de l’écran.

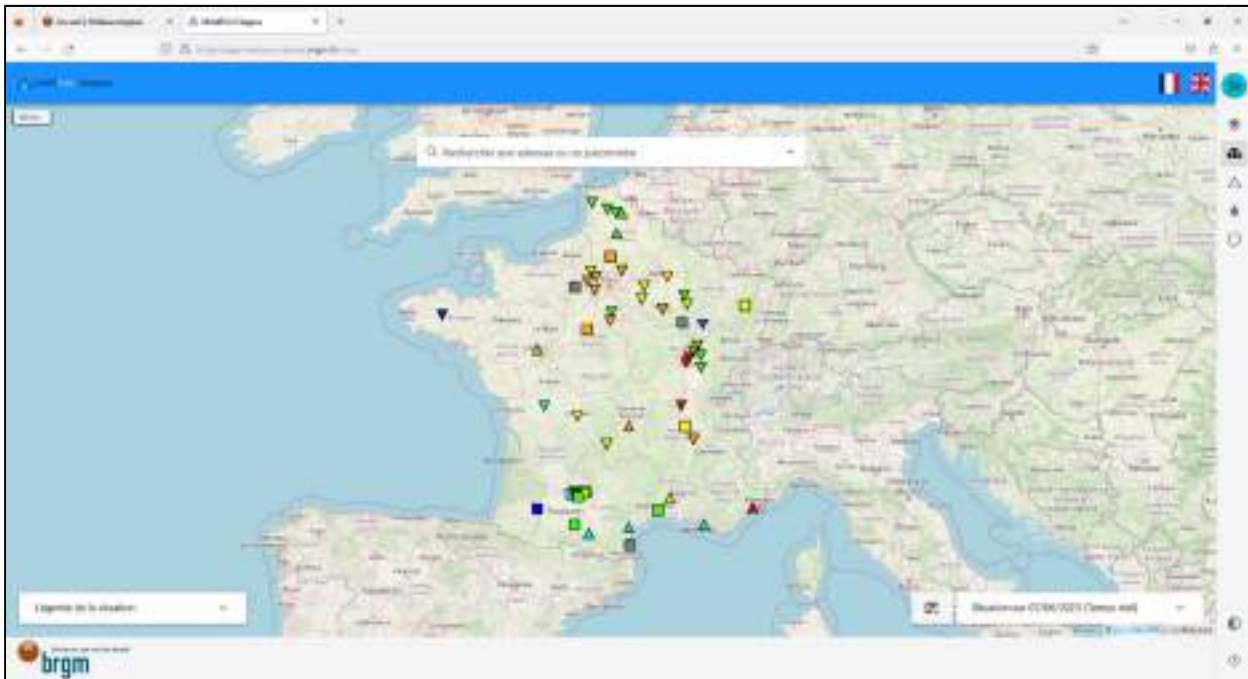


Illustration 56 – MétéEAU'Nappes – Partie cartographique



Illustration 57 – MétéEAU'Nappes - Symbologie

En cliquant sur un piézomètre, une fenêtre d'information apparaît sur la partie gauche de l'écran (Illustration 58), ce qui permet d'accéder à la fiche relative au piézomètre sélectionné (Illustration 59).

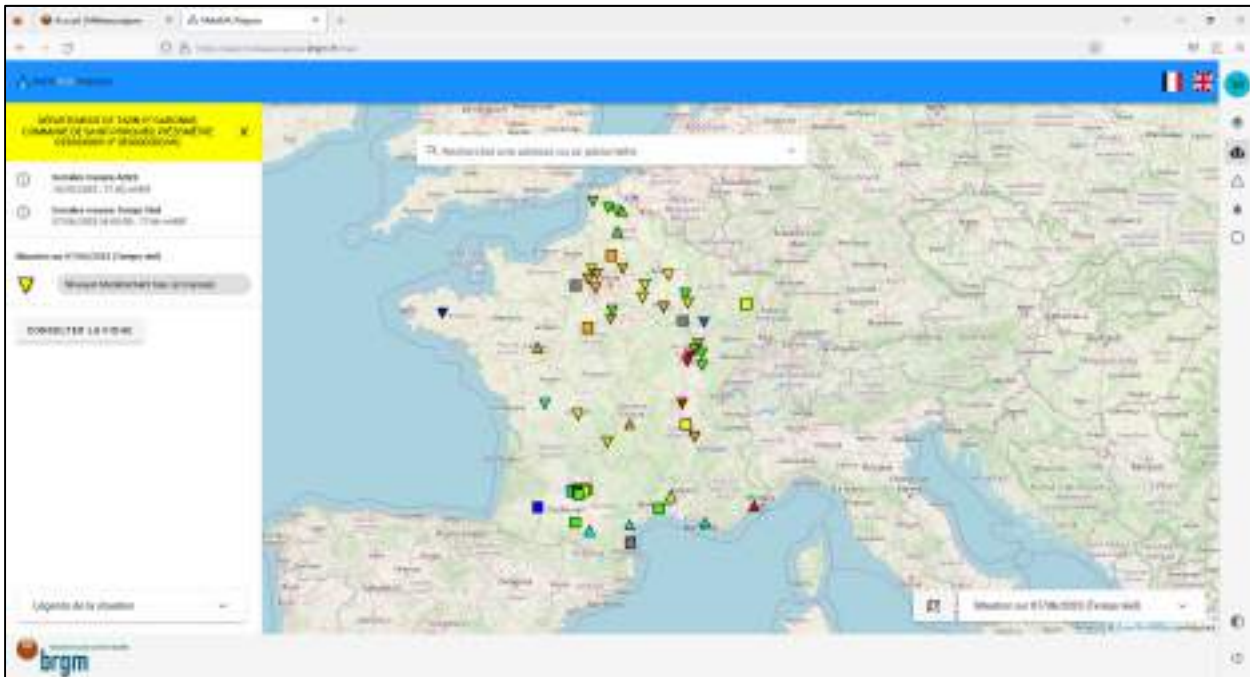


Illustration 58 – MétéEAU'Nappes – Accès à la partie graphique

La fiche piézomètre permet de :

- Localiser le point de suivi, la station météorologique associée et la station hydrométrique représentative la plus proche, dans la partie en haut à gauche de la fiche,
- Fournir la cote piézométrique validée (courbe bleu foncé), la cote piézométrique acquise en temps réel (courbe verte), le débit en rivière de la station hydrologique associée (courbe orange) et les pluies enregistrées à la stations météorologique SYNOP la plus proche (histogramme bleu turquoise), dans la partie en haut à droite de la fiche,
- Fournir la cote piézométrique, les seuils de gestion et les prévisions du niveau de la nappe sur les prochains mois dans sa partie intermédiaire, avec possibilité de zoomer sur le graphique, d'afficher l'IPS (Illustration 60), permettant de comparer les prévisions aux niveaux historiquement enregistrés, d'exporter les données au format .csv, ou de télécharger le graphique. L'utilisateur peut également revenir sur les prévisions précédentes et choisir le scénario de prélèvements qu'il souhaite, si ce point de suivi est influencé par des prélèvements,
- Afficher le graphique des pluies de la stations météorologique SYNOP la plus proche et les débits enregistrés à la station hydrométrique représentative la plus proche dans la partie basse de la fiche. L'utilisateur peut cliquer sur le lien qui renvoie vers la page web source de ces données.

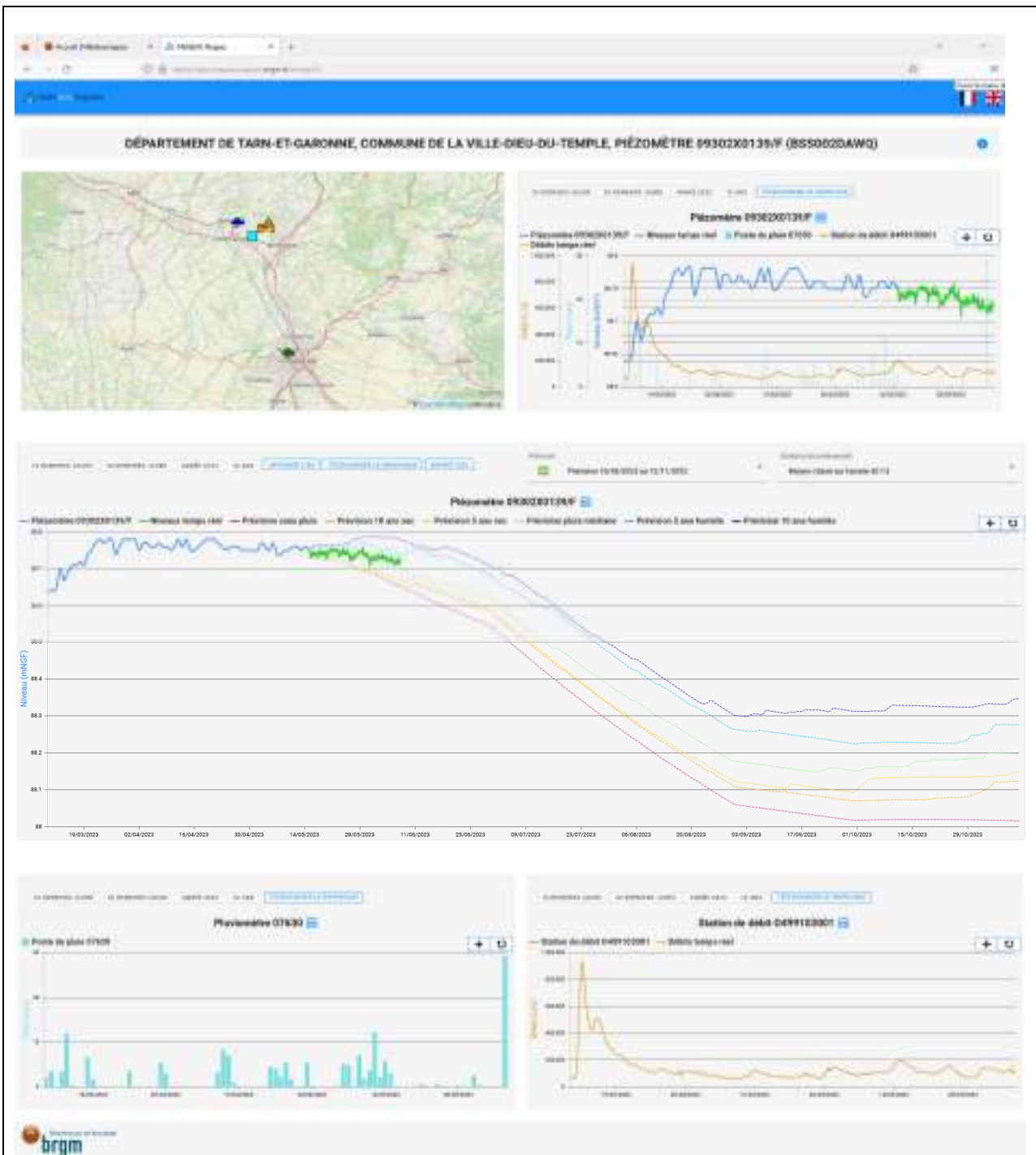


Illustration 59 – MétéEAU'Nappes – Fiche piézomètre



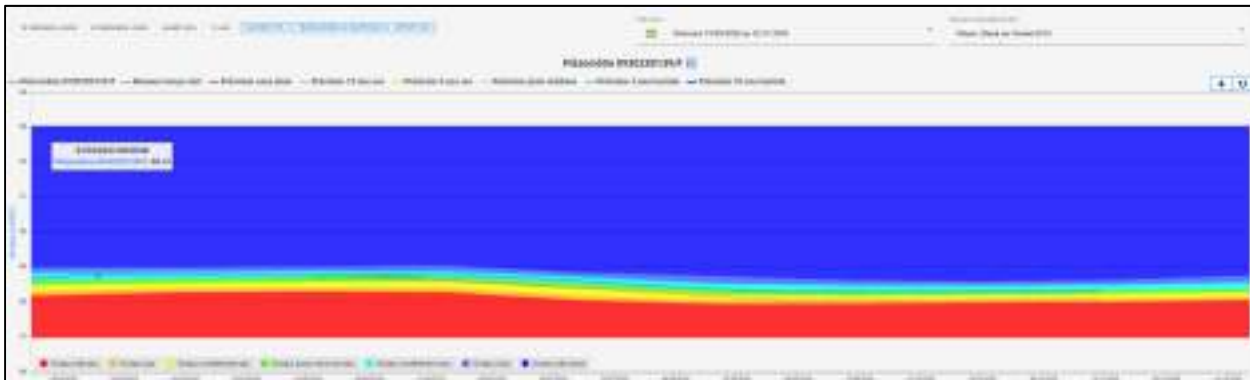


Illustration 60 – MétéEAU'Nappes – Fiche piézomètre : IPS superposé aux prévisions

Les points modélisés dans le cadre du projet AQUIFER sont localisés dans le bassin Adour-Garonne, dans le Sud-Ouest de la France (Illustration 61). Un zoom du secteur est présenté sur l'illustration 62.



Illustration 61 – MétéEAU'Nappes – Points modélisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER

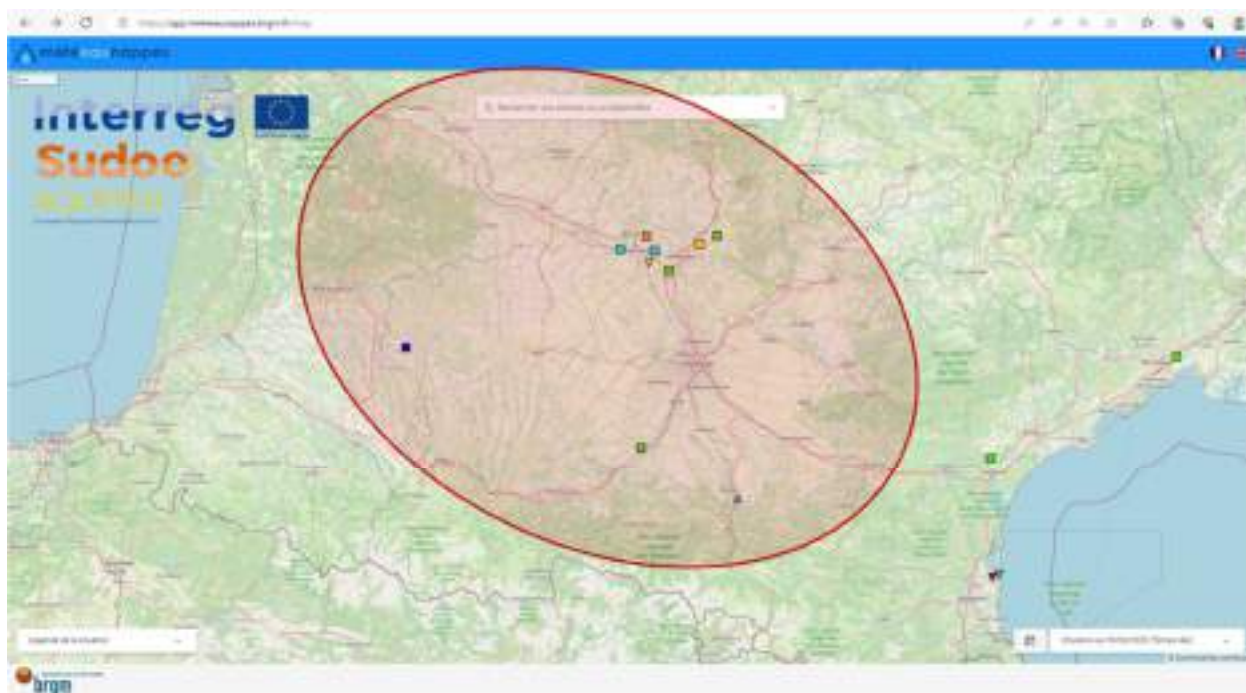


Illustration 62 – MétéEAU’Nappes – Points modélisés dans le cadre du projet SUDOE AQUIFER – Zoom sur le Sud-Ouest de la France

## 10. Conclusion

Le modèle hydrogéologique simplifié pluie-niveau GARDENIA, développé par le BRGM, est utilisé pour reproduire une chronique piézométrique historique grâce aux données météorologiques, à l’ajustement de paramètres et, dans certains cas, aux données de prélèvements. Cette phase de calibration du modèle est réalisée sur 10 points de suivi en eau souterraine localisés sur le bassin Adour-Garonne, 3 en Espagne et 2 au Portugal. Lorsque les résultats de cette phase sont satisfaisants, la prévision des niveaux piézométriques des mois suivants peut être émise en fonction de différents scénarios climatiques, basés sur les données météorologiques historiques. Ce travail est mis disposition sur le site internet MétéEAU Nappes, hébergé par le BRGM (<https://meteeanappes.brgm.fr/fr>). Les prévisions sont actualisées au pas de temps mensuel, et peuvent être comparées à des niveaux piézométriques de référence (période de retour, seuils sécheresse issus des arrêtés préfectoraux de restriction d’usage de l’eau en cours, seuil associé à un volume prélevable...), permettant ainsi aux gestionnaires de l’eau d’anticiper de potentielles restrictions d’usage.

L’ensemble des piézomètres localisés en France sont ainsi consultables. Les points modélisés en Espagne (3) et au Portugal (2) n’ont cependant pas pu être ajoutés, les données collectées nécessitant d’être, d’une part complétées sur certains sites et, d’autre part, disponibles pour chargement automatique sur la plateforme via des API. Si ce verrou vient à être levé dans le cadre de futurs travaux, les modélisations réalisées pourront être mises à jour et chargées de façon à obtenir les mêmes résultats que sur les points de suivi localisés en France.

L’outil MétéEAU Nappes représente une étape importante dans l’intégration des aquifères dans la gestion des ressources en eau et dans l’anticipation des conditions estivales dans un contexte de raréfaction de la ressource.

## 11. Bibliographie

Le Cointe, Pierre ; Arnaud, Luc ; Béranger, Sandra ; Caballero, Yvan ; Lanini, Sandra ; Bertin, Clotilde ; Pinson, Stéphanie ; Thinon-Larminach, Murielle ; Tilloloy, Franck (2019) - Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin AdouR-GaronNE (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 155 p., 7 ann. dont 6 pl. HT.

Mougin B., Nicolas J., Bessière H., Vigier Y., Loigerot S. (2018). Vers une prévision en temps réel du niveau des nappes françaises ? L'outil d'aide à la décision « MétéEau des nappes ». Revue Géologues n°195 de décembre 2017, pages 16 à 21.

Mougin B., Nicolas J., Vigier Y., Bessière H., Loigerot S. (2020). « MétéEAU Nappes » : un site Internet contenant des services utiles à la gestion des étiages. La Houille Blanche, numéro 5, p. 28-36. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020045>

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

Saplaïroles M., Béranger S., Gandolfi J.M., Bonner M.E, Thinon-Larminach M. (2015) – Estimation des Ressources en Eaux Souterraines renouvelables et évaluation de la Sensibilité à la Sécheresse des Aquifères en Région Midi-Pyrénées (ERESSAR), Rapport Final, BRGM/RP-64075-FR, 198 p., 166 fig,17 Ann.

Surdyk N., Thiéry D., Nicolas J., Gutierrez A., Vigier Y., Mougin B. (2022). MétéEAU Nappes: a real-time water-resource-management tool and its application to a sandy aquifer in a high-demand irrigation context. Hydrogeology Journal. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02509-1>

Thiéry, D. (2003) - Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 ann.

Thiéry D. (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR, 137 p., 65 fig., 2 ann.





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Occitanie, Site de Toulouse**

3, rue Marie Curie – 31520 Ramonville-Saint-Agne

Tél. : 05-62-24-14-50

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**