

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

LIVRABLE DU PROJET:

E3.1.1 “Prédiction des volumes exploitables : un service innovant de gestion des eaux souterraines”

Date: 30/04/2023



Sommaire

Synthèse	3
Sommaire	5
1. Contexte et objectifs.....	9
2. Territoire d'étude	9
2.1 La problématique de l'eau dans le Tarn-et-Garonne	9
2.1.1 <i>Contexte climatique</i>	10
2.1.2 <i>Contexte géologique et hydrogéologique</i>	11
2.1.3 <i>Usages des eaux superficielles et souterraines</i>	12
2.1.4 <i>Bilan hydrologique du secteur d'étude</i>	13
2.2 La gestion des prélèvements en eau	17
2.2.1 <i>Les acteurs de la gestion de l'eau</i>	17
2.2.2 <i>Les usages prioritaires</i>	18
2.3 Le modèle hydrodynamique de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron	18
3. Méthodologie utilisée	23
3.1 Calcul des niveaux objectifs de basses eaux	24
3.1.1 <i>Approche</i>	24
3.1.2 <i>Données considérées</i>	25
3.1.3 <i>Nettoyage manuel des chroniques</i>	25
3.1.4 <i>Lissage et interpolation partielle de la chronique, dit « réglissage »</i>	27
3.1.5 <i>Analyse spectrale des « cyclicités » dominant le signal</i>	29
3.1.6 <i>Extraction des Hautes Eaux et Basses Eaux</i>	30
3.1.7 <i>Calcul des termes nécessaires au calcul des niveaux objectifs de basses eaux</i> .	33
3.1.8 <i>Résultats</i>	33
4. Service d'aide à la décision : la plateforme internet VigiNappe	41
4.1 Le site vitrine	41
4.2 L'application VigiNappe	42
4.2.1 <i>Schéma général de l'application VigiNappe</i>	42
4.2.2 <i>Accès grand public (piézométrie)</i>	42
4.2.3 <i>Accès authentifié (prévision des volumes prélevables)</i>	47
5. Conclusions.....	49
6. Bibliographie	51

Liste des illustrations

Illustration 1. Positionnement et topographie du département de Tarn-et-Garonne	10
Illustration 2. Cumuls annuels (du 01/10 au 30/09) de précipitations à la station de Montauban	11
Illustration 3. Coupe schématique du système de terrasses étagées	11

Illustration 4. Répartition géographique et par usage des prélèvements en eau souterraine dans les nappes alluviales de Tarn-et-Garonne en 2015.	13
Illustration 5. Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en millions de m ³)	14
Illustration 6. Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en %)	15
Illustration 7. Histogramme de l'évolution du stockage de la zone modélisée (en millions de m ³)	16
Illustration 8. Schéma de synthèse du bilan hydrologique sur la période 1995-2015.....	17
Illustration 9 – L'histoire du modèle hydrodynamique maillé de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron.....	18
Illustration 10 – Les données d'entrée et de sortie du modèle hydrodynamique maillé.....	19
Illustration 11 – Résultats de la phase de calibration.....	20
Illustration 12 – Les unités de gestion.....	21
Illustration 13 – Ecran d'accueil de l'outil de gestion développé sous Excel 2000	22
Illustration 14 – Pluie effective cumulée d'Octobre à Mai (en mm).....	22
Illustration 15 – Carte des restrictions prévisibles en matière de prélèvements en se basant sur des prélèvements comparables à ceux de la période 2006-2012	23
Illustration 16 : Chronique brute de Pomiès et ses 124 données 'artefacts' marquées à exclure	26
Illustration 17 : Chronique brute de St-Pierre et ses 357 données 'artefacts' marquées à exclure	26
Illustration 18 : Comparaison des chroniques de St-Pierre et de Pédeloup (ajustée).....	27
Illustration 19 : Régulissage de la chronique piézométrique de Pradas	28
Illustration 20 : Régulissage de la chronique piézométrique de Pédeloup	29
Illustration 21 : Périodogrammes et cyclicités principales composant les 6 signaux piézométriques	30
Illustration 22 : Hautes Eaux et Basses Eaux repérées dans les chroniques prétraitées.....	32
Illustration 23 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Bioule.....	35
Illustration 24 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pédeloup	36
Illustration 25 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pomiès....	37
Illustration 26 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pradas	38
Illustration 27 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de St-Pierre .	39
Illustration 28 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de St-Porquier	40
Illustration 29 – Site Vitrine VigiNappe.....	41
Illustration 30 – Page d'accueil VigiNappe – Niveau de zoom maximal	43
ILLUSTRATION 31 – PAGE D'ACCUEIL VIGINAPPE – NIVEAU DE ZOOM INTERMEDIAIRE	44

ILLUSTRATION 32 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – VUE DE L’ENSEMBLE DES POINTS DE SUIVI QUANTITATIF DES EAUX SOUTERRAINES LIBRES DU BASSIN ADOUR-GARONNE DISPOSANT DE PLUS DE 15 ANS DE DONNEES	44
ILLUSTRATION 33 – LEGENDE DE REPRESENTATION D’UN POINT DE SUIVI EN EAU SOUTERRAINE	45
ILLUSTRATION 34 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – BLOC « GRAPHIQUE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES PASSEES ET PREVISIONNELLES »	46
ILLUSTRATION 35 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – BLOC « INFORMATIONS D’UN PIEZOMETRE »	46
Illustration 36 – Page d’authentification.....	48
Illustration 37 – Page du site authentifié	48
Illustration 38 – Graphique des volumes prélevables.....	49
Illustration 39 – Graphique des volumes prélevables et du piézomètre de référence associé au casier.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1. Volumes prélevés en eau superficielle et souterraine dans la plaine de Tarn-et-Garonne, par usage (en milliers de m ³ par an). Moyenne des prélèvements de 2006 à 2012 (Source : Bardeau et al, 2016)	12
Tableau 2 : Définition des trois niveaux objectifs de basses eaux	24
Tableau 3 : Piézomètres considérés et étendue de la chronique brute disponible	25
Tableau 4 : Nombre de données nettoyées dans les chroniques piézométriques brutes	26
Tableau 5 : Niveaux objectifs de basses eaux calculés pour les 6 piézomètres et termes utilisés	34

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 3.1 : E3.1.1 - "Prédiction des niveaux des volumes exploitables : un service innovant de gestion des eaux souterraines"**.

La tâche 3.1 du projet SUDOE AQUIFER avait pour objectif de déterminer, avant le début de la période d'étiage, la quantité d'eau qui peut être exploitée sans mettre en danger la capacité de la nappe à se renouveler au cours de la période de recharge suivante.

Le territoire choisi pour mettre en oeuvre cette méthode innovante est la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron, dans le département de Tarn-et-Garonne. Cette nappe dispose d'un modèle hydrodynamique 3D, développé sous MARTHE¹ (BRGM). En combinant ce modèle avec le modèle simplifié GARDENIA² permettant de prévoir l'évolution des chroniques piézométriques selon différents scénarios climatiques, un outil d'aide à la décision destiné aux gestionnaires de l'eau a été créé. Il est nommé VigiNappe et est disponible sous : <https://viginappe.brgm.fr>.

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 (BRGM).

2. Territoire d'étude

2.1 LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU DANS LE TARN-ET-GARONNE

La plaine alluviale du département de Tarn-et-Garonne couvre une surface de près de 1 000 km², représentant 30 % de la superficie du département. Elle se situe à la confluence de trois grands

¹ Modélisation d'Aquifères avec un maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/marthe-logiciel-modelisation-ecoulements-souterrains>

² 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>

cours d'eau : la Garonne, le Tarn et l'Aveyron. L'altitude de ce territoire varie entre 50 et 210 m. La plaine est encadrée par les coteaux molassiques de Lomagne et du Quercy Blanc et, à l'est, par les plateaux karstiques du causse de Caylus, faisant partie des causses du Quercy (Illustration 1).

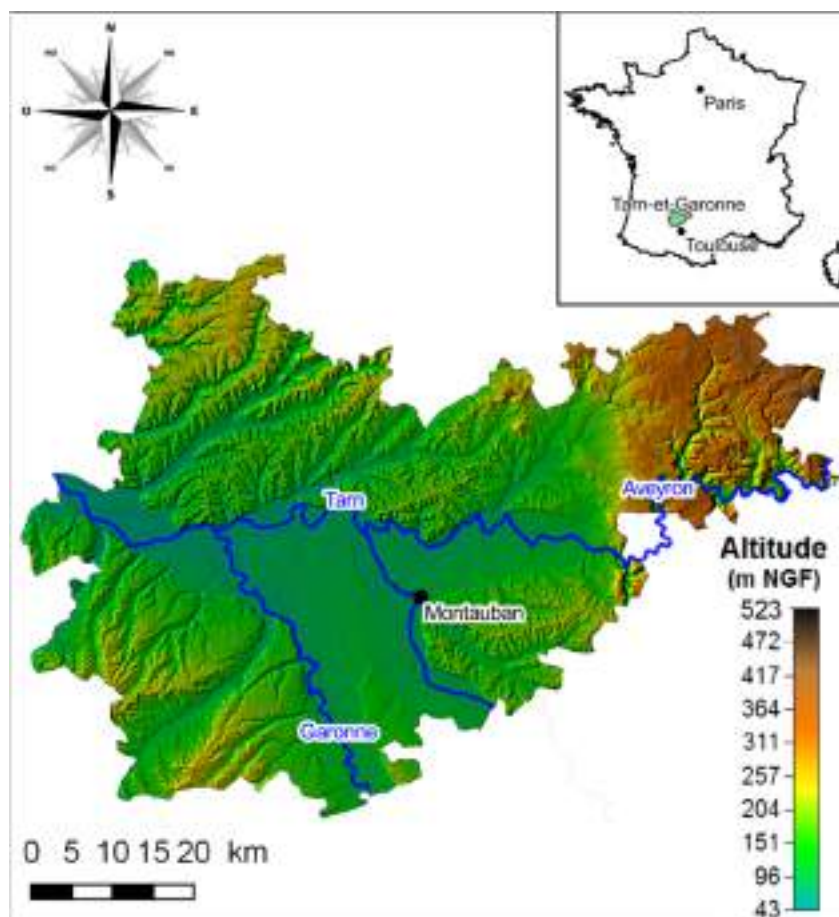


Illustration 1. Positionnement et topographie du département de Tarn-et-Garonne

Il s'agit d'un territoire agricole, où l'irrigation des cultures représente le principal usage de l'eau, et notamment de l'eau souterraine. La connaissance du cycle hydrologique de la zone d'étude est la clé pour exploiter durablement les ressources hydriques disponibles et garantir les différents usages et services de l'eau sur ce territoire (alimentation en eau potable, services écologiques, irrigation, industrie).

2.1.1 Contexte climatique

Le climat de Tarn-et-Garonne est influencé par le climat montagnard du Massif Central et le climat plus doux et tempéré de la Gascogne. Il bénéficie également de la double influence des masses d'air issues de l'Atlantique et de la Méditerranée, ce qui lui confère un climat de type océanique dégradé. Les hivers y sont doux et humides et les étés chauds et généralement secs. Les pluies, essentiellement apportées par les vents d'ouest sont de l'ordre de 700 mm/an. Leur variabilité spatiale est limitée sur l'emprise de la plaine alluviale, avec une influence de la topographie : de 850 mm/an au nord-est à 630 mm/an au sud-ouest, avec des précipitations plus importantes sur

les coteaux. Elles sont par contre caractérisées par une variabilité interannuelle importante : de 426 mm en 1967 à 1007 mm en 1959, à la station de Montauban (Illustration 2).

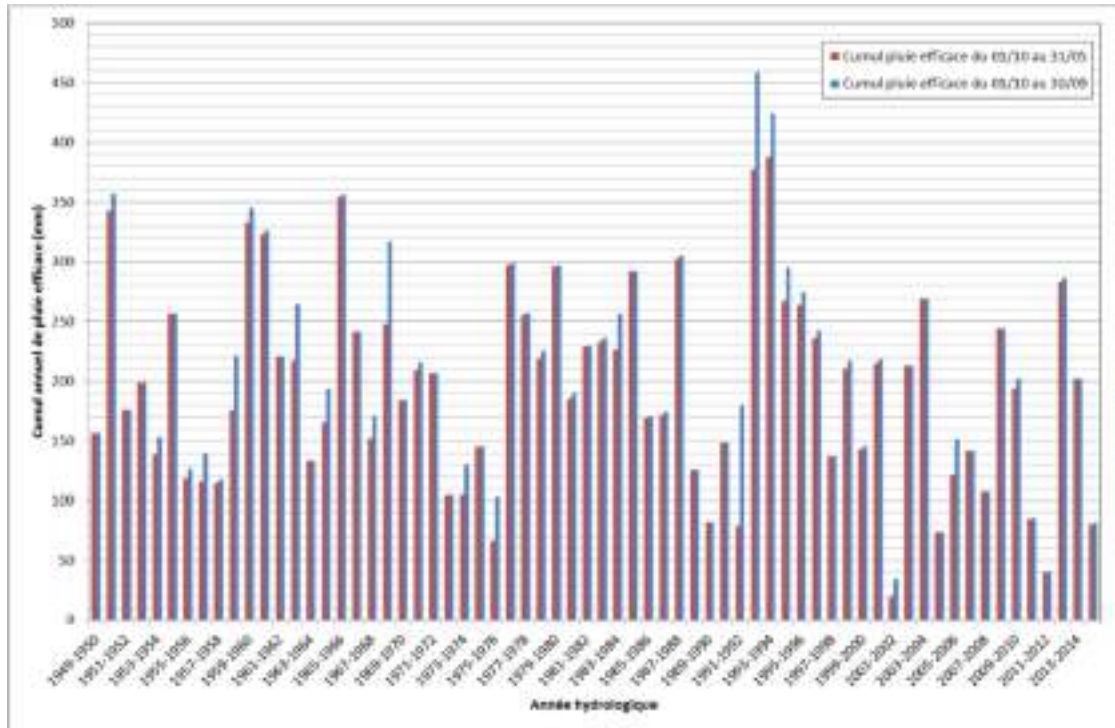


Illustration 2. Cumuls annuels (du 01/10 au 30/09) de précipitations à la station de Montauban

2.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique

La confluence de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron a constitué un ensemble de dépôts alluviaux quaternaires sablo-graveleux de grande extension, qui repose sur des formations molassiques tertiaires argilo-calcaires considérées comme peu perméables (Bouroullec, 2013). Le système alluvial est organisé en terrasses étagées créés par une succession de phases glaciaires et interglaciaires. Le plus souvent, sous l'influence de l'érosion, ces terrasses sont séparées par des affleurements de talus molassiques, provoquant l'apparition de sources de déversement (Illustration 3).

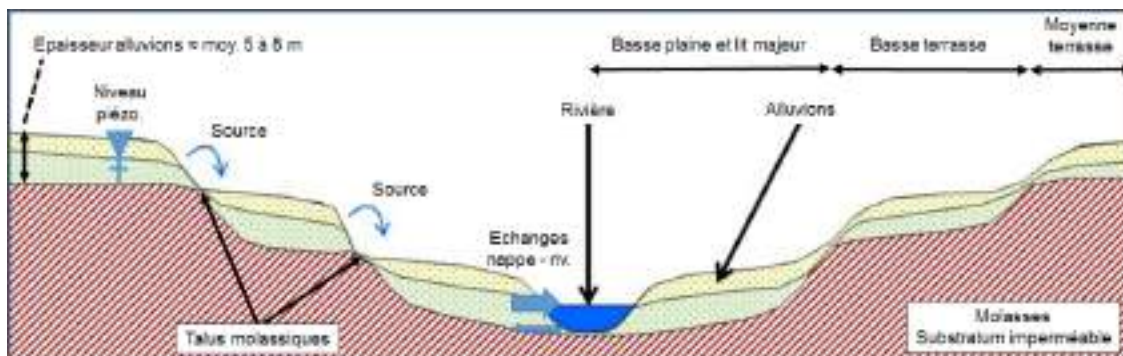


Illustration 3. Coupe schématique du système de terrasses étagées

Les alluvions de ces différents niveaux de terrasses, dont l'épaisseur moyenne est comprise entre 5 et 8 m, contiennent des nappes d'eau souterraine libres. Ces nappes sont alimentées essentiellement par l'infiltration des apports pluviométriques et contribuent à la réalimentation des cours d'eau. La nappe alluviale dans le département de Tarn-et-Garonne contribue ainsi en moyenne à 3 % du débit total des cours d'eau, un apport qui monte à 8 % en période d'étiage.

2.1.3 Usages des eaux superficielles et souterraines

Le Tarn et la Garonne représentent des ressources en eau superficielle relativement abondantes pour le département. Entre 2003 et 2012, 84 % des besoins moyens en eau du territoire (soit 87 millions de m³, hors prélèvement pour le refroidissement de la centrale nucléaire de Golfech) ont été satisfaits par les eaux superficielles tandis que les eaux souterraines répondaient à 16 % des besoins (16 millions de m³). L'usage des eaux souterraines a fortement décru depuis la fin des années 1990 où la somme des prélèvements s'élevait alors à 35 millions de m³ par an.

Les nappes alluviales sont principalement utilisées par l'agriculture pour l'irrigation des cultures (71 % des prélèvements), pour l'alimentation en eau potable (26 %) et par quelques industries (3 %) (Tableau 1 et Illustration 4).

L'agriculture représente une activité importante pour l'économie de Tarn-et-Garonne. Le secteur de la production fruitière, principalement localisé dans la plaine alluviale, représente 11 % de la surface agricole du département mais génère 33 % de la production agricole en valeur. Les cultures fruitières sont systématiquement irriguées, principalement à partir des grands cours d'eau (Garonne, Tarn et Aveyron) ou à partir des eaux souterraines dans les secteurs sans accès aux eaux de surface. L'eau est utilisée en été pour l'irrigation mais également au printemps pour la lutte contre le gel (aspersion des arbres en période de gel au stade floral).

Tableau 1. Volumes prélevés en eau superficielle et souterraine dans la plaine de Tarn-et-Garonne, par usage (en milliers de m³ par an). Moyenne des prélèvements de 2006 à 2012 (Source : Bardeau et al, 2016)

Secteur	Eau souterraine	Eau superficielle
Eau potable	4 370	10 968
Industrie	1 016	550
Agriculture (irrigation)	10 848	36 289
Total	16 235	87 465

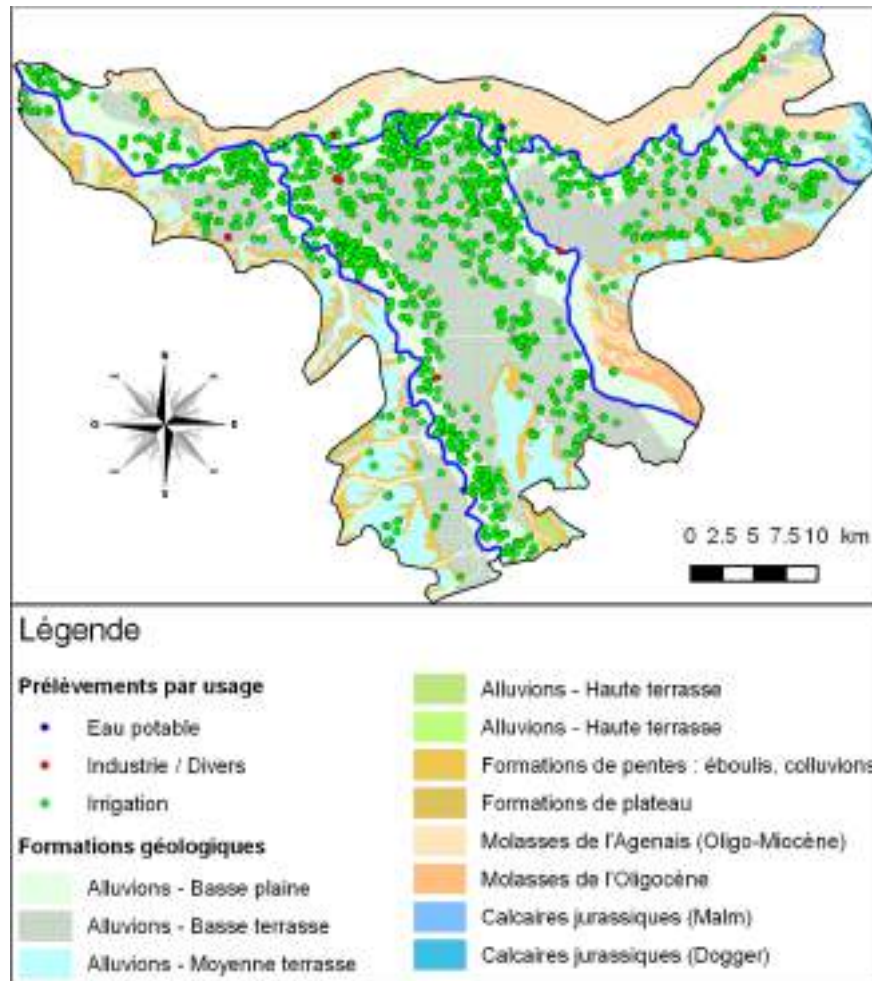


Illustration 4. Répartition géographique et par usage des prélèvements en eau souterraine dans les nappes alluviales de Tarn-et-Garonne en 2015.

Les exploitations spécialisées en grandes cultures (céréales, maïs) représentent 40 % des exploitations agricoles du département mais ne produisent que 22 % de la production en valeur. L'irrigation des grandes cultures est très développée, bien que la culture en sec soit encore pratiquée. L'irrigation concerne principalement la culture du maïs mais aussi des céréales (une ou deux irrigations au printemps pour la levée des semis), du tournesol et du soja. La culture sans irrigation des céréales et du maïs reste possible sur les sols caractérisés par une bonne réserve utile.

Comme dans la plupart des régions françaises, les exploitations restent des entreprises familiales, y compris pour les plus grandes qui peuvent représenter plus de 350 ha de vergers. Les moyennes et grandes exploitations occupent 86 % du territoire agricole utilisé et réalisent 95 % de la production en valeur du département.

2.1.4 Bilan hydrologique du secteur d'étude

Pour contribuer à la bonne gestion de l'aquifère alluvial et des prélèvements en eau souterraine, un modèle hydrodynamique a été développé par le BRGM dès les années 1990 et a été amélioré et mis à jour plusieurs fois depuis. Il a permis de dresser un bilan hydrologique du secteur d'étude

(Illustration 5. Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en millions de m³) Illustration 5 et Illustration 6).

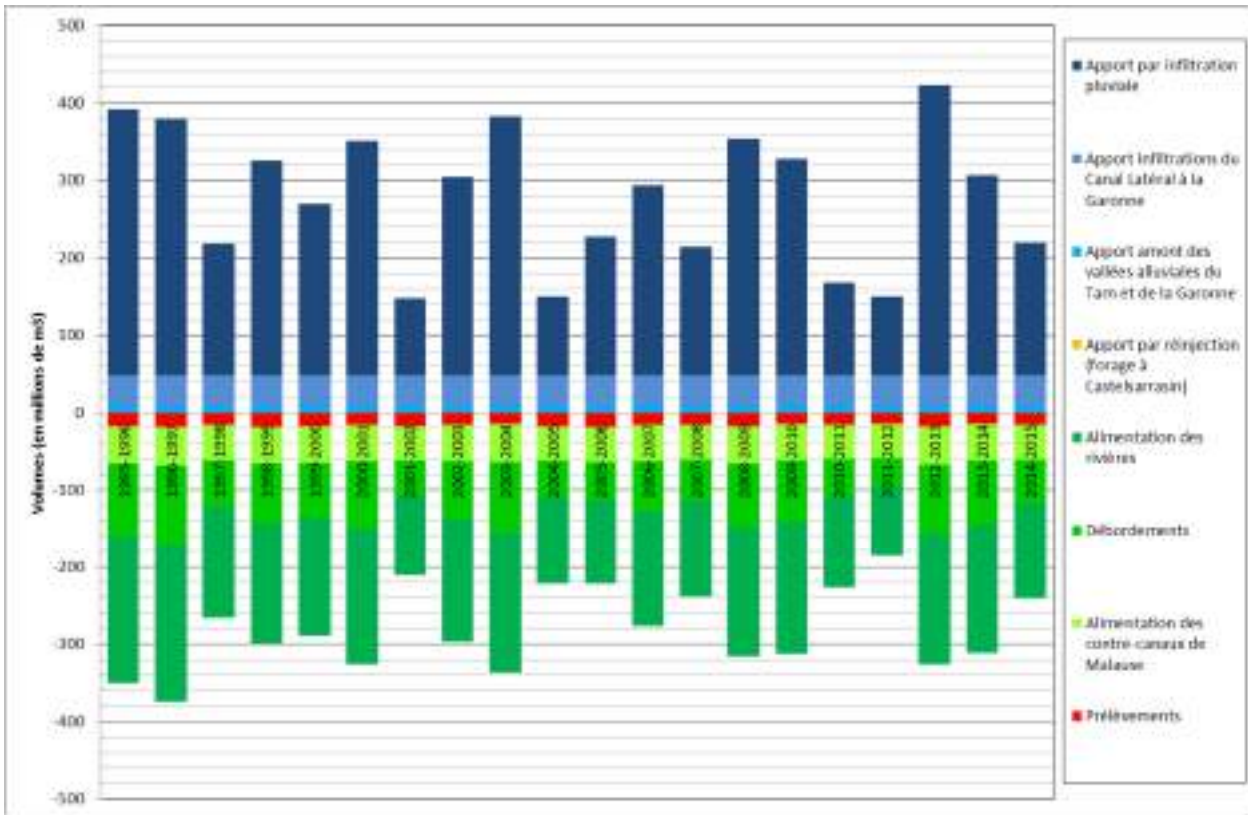


Illustration 5. Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en millions de m³)

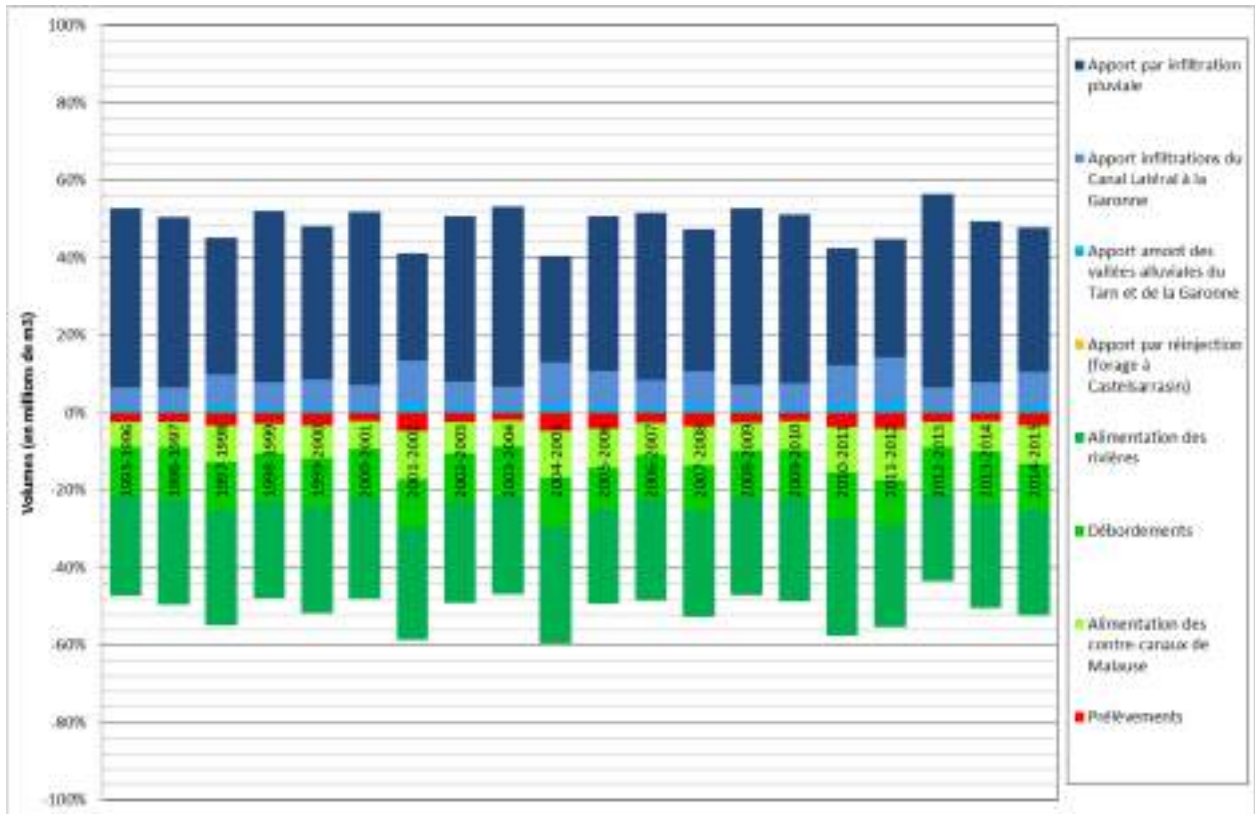


Illustration 6. Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en %)

Dans le bilan hydrologique, les éléments positifs correspondent aux volumes d'eau entrant dans le système (aquifère alluvial modélisé). Il s'agit de :

- L'apport par infiltration de la pluie (recharge de la nappe) ;
- L'apport par la continuité de la nappe alluviale aux limites amont de la zone modélisée (alluvions du Tarn et de la Garonne) ;
- L'apport par les infiltrations dues aux fuites du canal latéral à la Garonne ;
- L'apport lié à la réinjection d'eau dans un forage à usage industriel à Castelsarrasin (volume plus anecdotique).

Les éléments négatifs correspondent aux volumes d'eau sortant du système. Il s'agit :

- Des débordements de la nappe donnant naissance aux cours d'eau autochtones, intégrés explicitement dans le réseau hydrographique ou non ;
- Du drainage de la nappe par les rivières et les contre-canaux construits autour de la retenue de Malause ;
- Des prélèvements dans la nappe pour les différents usages (AEP, industrie, irrigation).

La principale contribution positive au bilan est la recharge de la nappe par l'infiltration des eaux pluviales tandis que les prélèvements restent très minoritaires devant la contribution des nappes aux écoulements de surface (alimentation des rivières, débordements générant des sources au pied des terrasses, alimentation des contre-canaux de l'aménagement hydro-électrique de Malause-Golfech).

Sur la période 1995-2015, le stock d'eau dans la nappe alluviale, bien que fluctuant fortement d'une année sur l'autre, est resté globalement constant (Illustration 7).

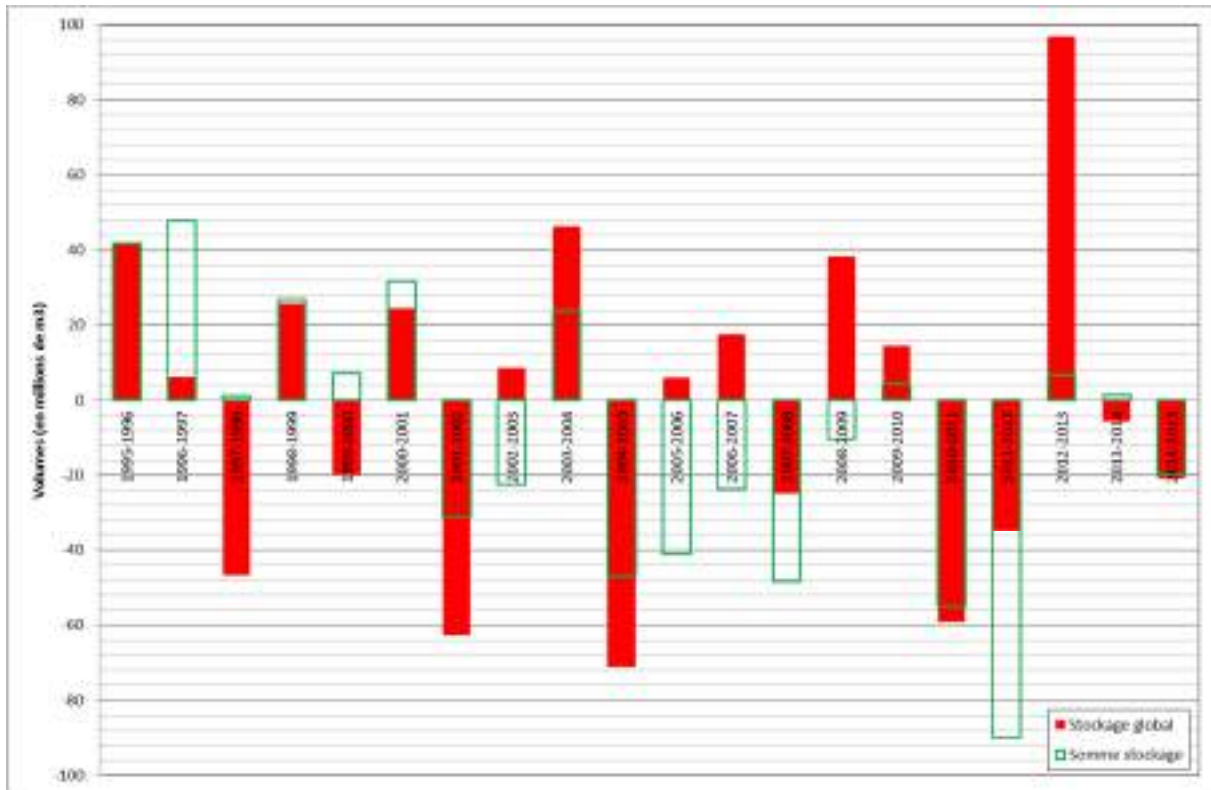


Illustration 7. Histogramme de l'évolution du stockage de la zone modélisée (en millions de m³)

La Illustration 8 schématise le cycle hydrologique dans la zone d'étude du point de vue de l'aquifère alluvial sur la période 1995-2015.

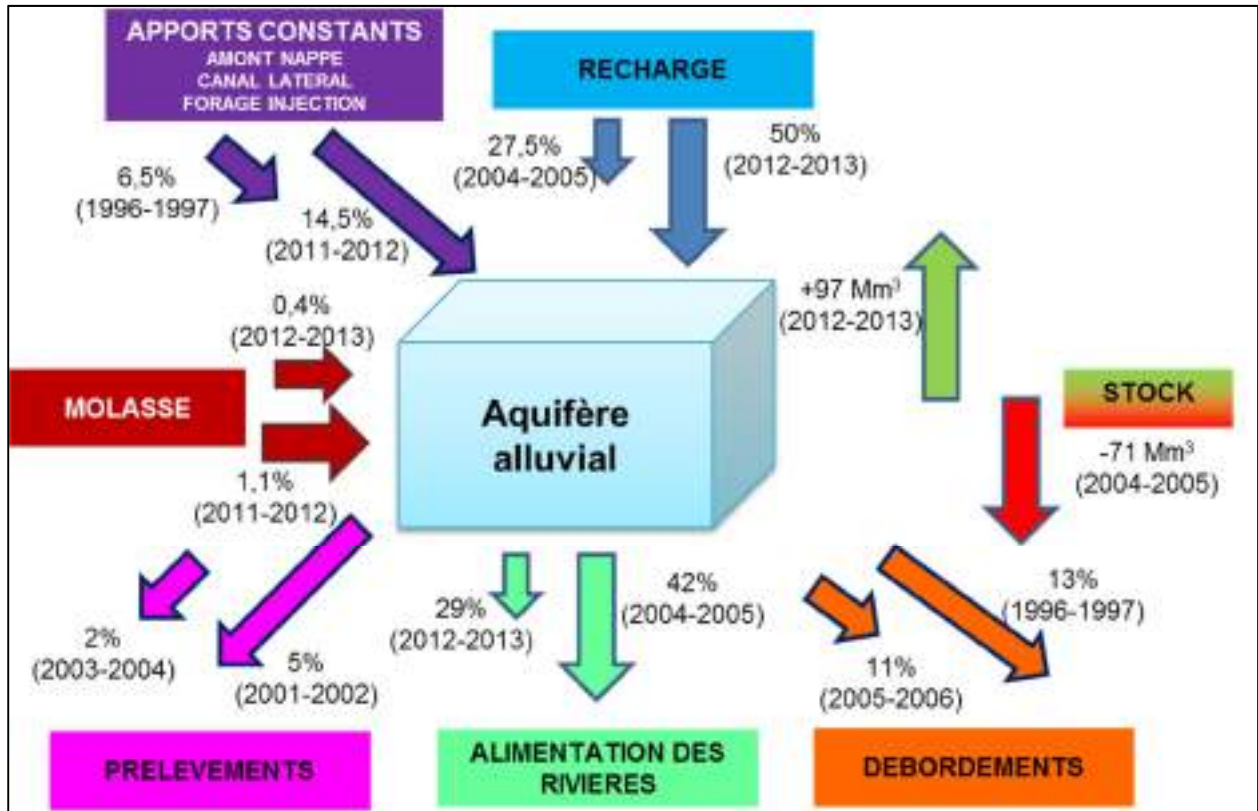


Illustration 8. Schéma de synthèse du bilan hydrologique sur la période 1995-2015

2.2 LA GESTION DES PRELEVEMENTS EN EAU

2.2.1 Les acteurs de la gestion de l'eau

Les services déconcentrés de l'Etat (Direction Départementale des Territoires, DDT) jouent un rôle important dans la gestion de l'eau : en lien avec la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), ils définissent les volumes prélevables en eau souterraine et eau de surface. La Mission Inter-Services de l'Eau (MISE) est la structure qui encadre ce travail.

Les Organismes Uniques de Gestion Collective de l'eau (OUGC) sont des associations d'usagers agricoles créés en application de la Loi sur l'Eau de 2006. Ils sont chargés de la gestion et la répartition des volumes d'eau prélevés à **usage agricole** pour l'ensemble des irrigants d'un bassin, quelle que soit la ressource prélevée : eau superficielle ou nappe. Dans le Tarn-et-Garonne, ce sont les Chambres d'Agriculture qui remplissent ce rôle.

Les Agences de l'Eau collectent quant à elles les données des plus gros préleveurs (prélèvements supérieurs à un million de m³), ainsi que les redevances associées à ces prélèvements.

Le BRGM peut être consulté pour un avis technique sur l'état ou la gestion de la ressource en eau souterraine.

2.2.2 Les usages prioritaires

En temps ordinaire, la DDT gère la répartition des volumes d'eau prélevés entre les différents usages, avec une priorité donnée à l'alimentation en eau potable et à l'industrie. Les OUGC sont ensuite chargées de répartir les volumes d'eau prélevés pour l'usage agricole.

En cas de crise, l'usage eau potable est privilégié aux autres usages sur lesquels des restrictions peuvent être imposées. Les irrigants sont donc les premiers acteurs subissant les restrictions, après les mesures de bon sens demandés aux usages domestiques de l'eau (exemple : interdiction de lavage de voitures, de remplissage de piscines individuelles en dehors de certaines périodes, limitation ou interdiction de l'arrosage de jardins individuels, etc.).

A l'heure actuelle, il n'existe pas de gestion dynamique des volumes prélevés entre les eaux superficielle et souterraine : les réseaux actuels ne permettent pas un changement d'origine de l'eau, que ce soit pour les usages d'alimentation en eau potable, en irrigation ou industriel.

En revanche, les OUGC définissent chaque année des volumes prélevables en eau souterraine. Dans le département de Tarn-et-Garonne, cette définition repose sur le modèle hydrodynamique développé par le BRGM (Bardeau et al., 2016).

2.3 LE MODELE HYDRODYNAMIQUE DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE, DU TARN ET DE L'AVEYRON

Le développement du modèle hydrodynamique maillé de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron a débuté dans les années 1990. La dernière mise à jour a été réalisée en 2016. Les principaux besoins et avancements jusqu'au projet AQUIFER sont listés sur l'illustration 9.

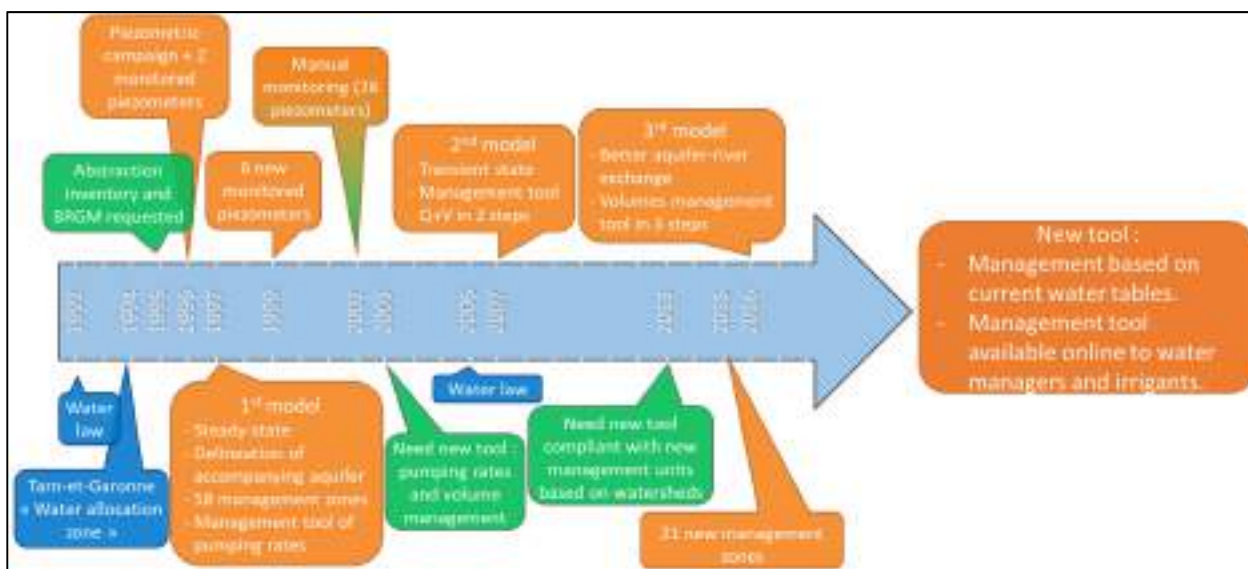


Illustration 9 – L’histoire du modèle hydrodynamique maillé de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l’Aveyron

Ce modèle a été développé en utilisant le logiciel MARTHE, développé par le BRGM, avec une grille de 250 x 250 m. Il prend en compte la géologie, le réseau hydrographique, les conditions hydroclimatiques, les prélèvements et l'hydrogéologie. En sortie, sont disponibles les niveaux et débits d'eau au pas de temps journalier sur la période du 1^{er} août 1958 à aujourd'hui. Ces données d'entrée et sortie sont présentées sur l'illustration 10.

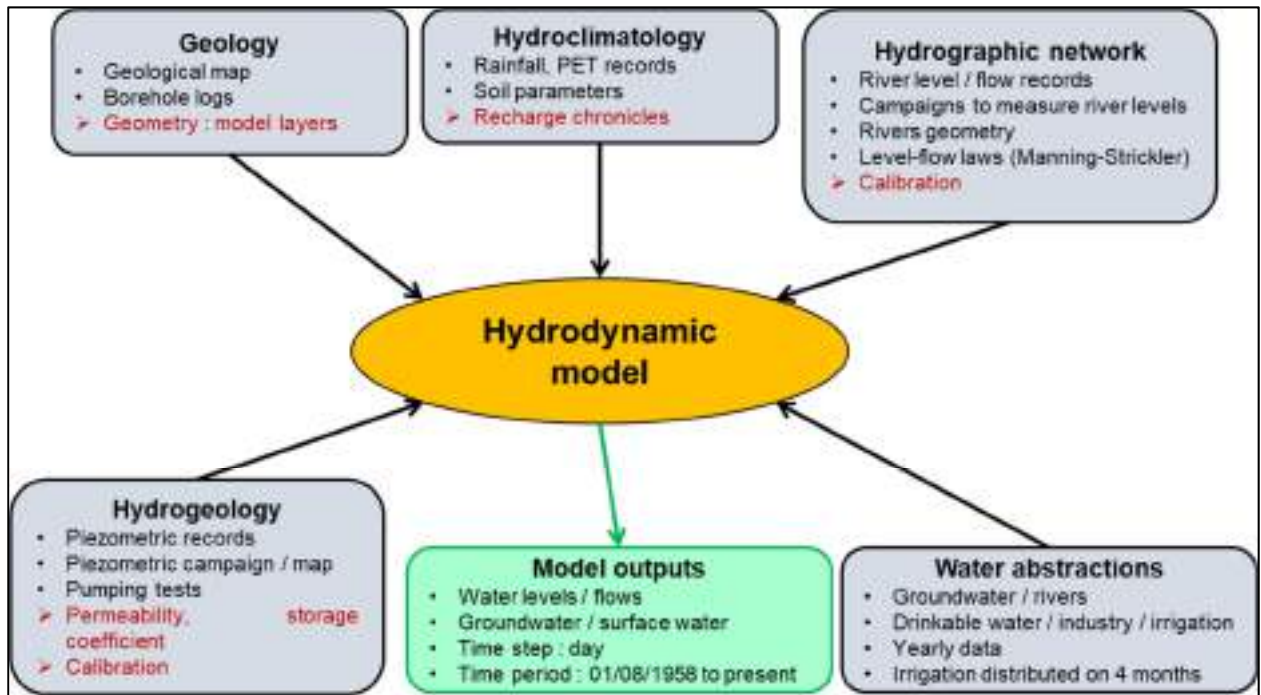


Illustration 10 – Les données d'entrée et de sortie du modèle hydrodynamique maillé

Ce modèle a été calibré de façon à reproduire de façon satisfaisante les niveaux d'eau enregistrés sur les différents points de suivi. Une illustration de ces résultats est présentée sur l'illustration 11. L'ensemble des résultats de cette phase est disponible sur le rapport BRGM/RP-65583-FR (Bardeau et al., 2016).

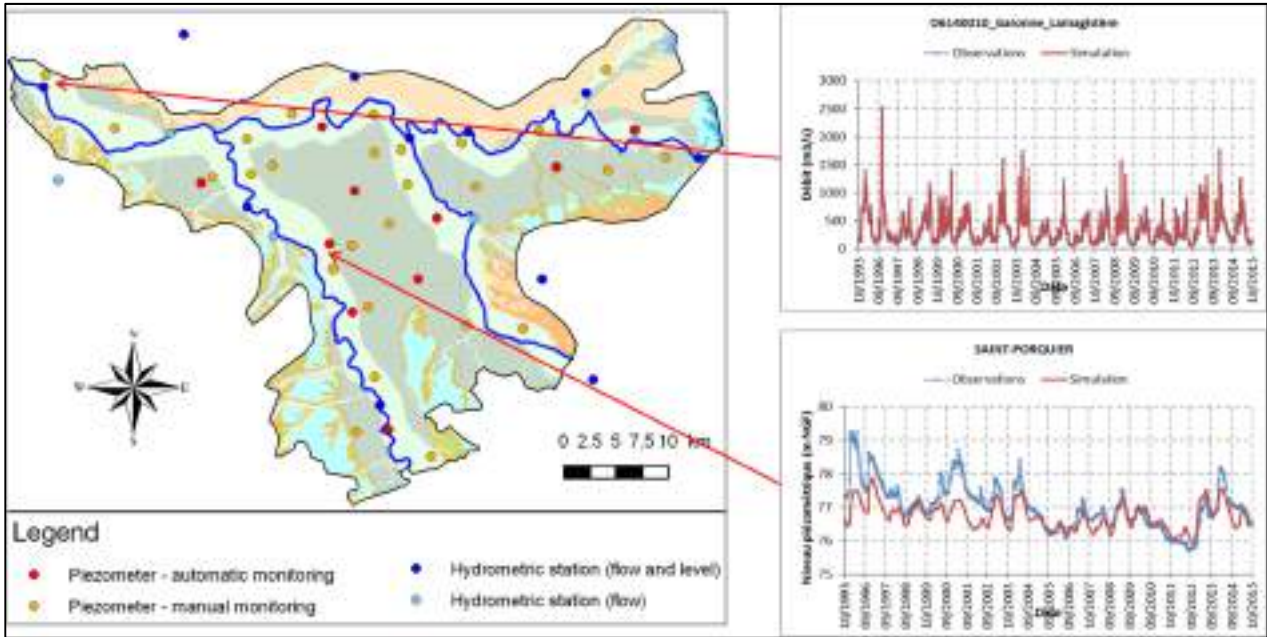


Illustration 11 – Résultats de la phase de calibration

A l'issue de cette phase, des unités de gestion homogènes d'un point de vue hydrogéologique et administratif (i.e. respectant les divisions en périmètres élémentaires des Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC) ont été définies en collaboration avec les gestionnaires de l'eau. Ces 21 unités de gestion sont représentées sur l'illustration 12.

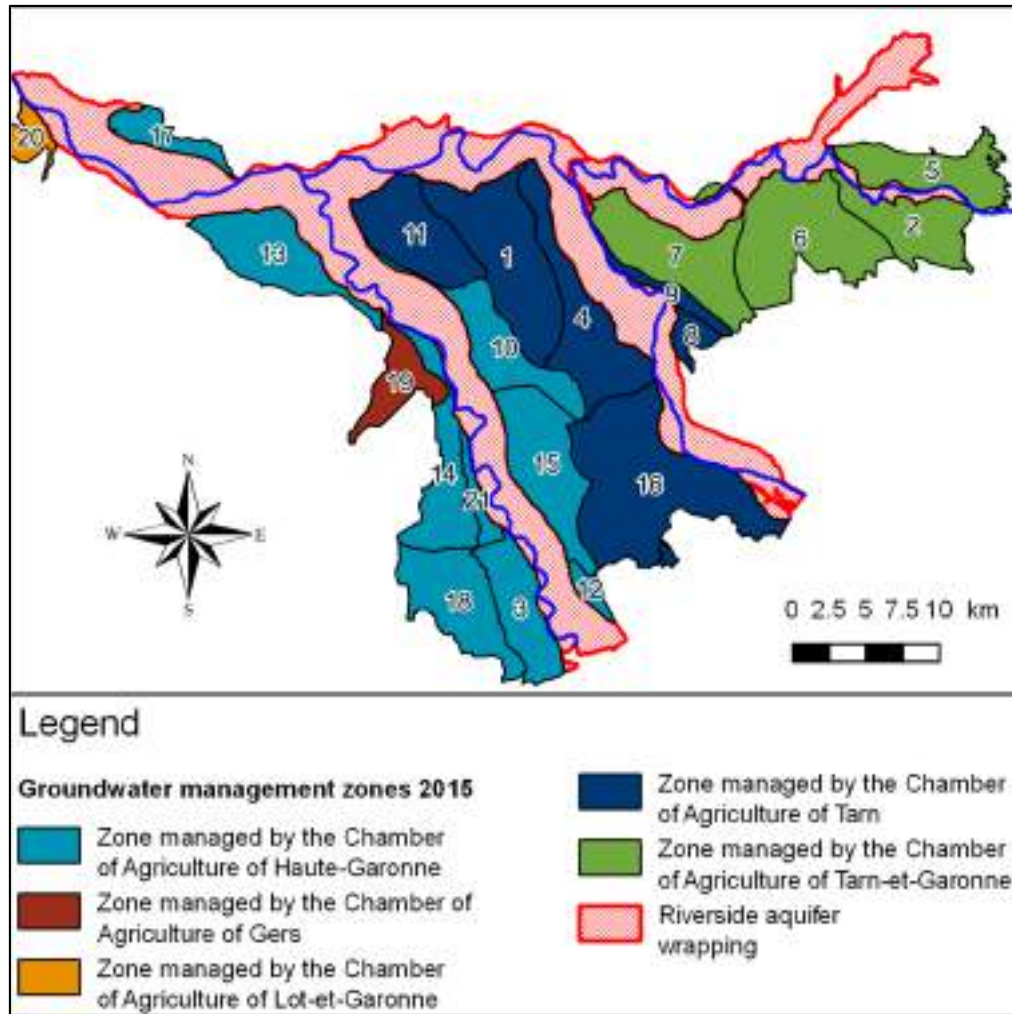


Illustration 12 – Les unités de gestion

Pour chacune de ces unités de gestion, un volume exploitable en eau souterraine a été défini en fonction des niveaux d'eau observables. Ces résultats ont été assemblés dans un outil développé au format Excel 2000 (Illustration 13) et sur lequel les gestionnaires de l'eau s'appuyaient pour définir les volumes prélevables en eau souterraine sur la base des simulations passées et des pluies de l'année en cours. Huit scénarios climatiques (Illustration 14) étaient envisagés et permettaient d'identifier les unités de gestion pour lesquelles des restrictions en matière de prélèvements seraient susceptibles d'intervenir au cours de l'été à venir (Illustration 15).



Illustration 13 – Ecran d'accueil de l'outil de gestion développé sous Excel 2000

Période de retour	Scenarion VPA	Min	Max (inclus)
Mini	1	0	60
Vingtennale sèche	2	60	80
Décennale sèche	3	80	115
Quinquennale sèche	4	115	190
Moyenne	5	190	260
Quinquennale humide	6	260	296
Décennale humide	7	296	370
Maxi	8	370	500

Illustration 14 – Pluie effective cumulée d'Octobre à Mai (en mm)

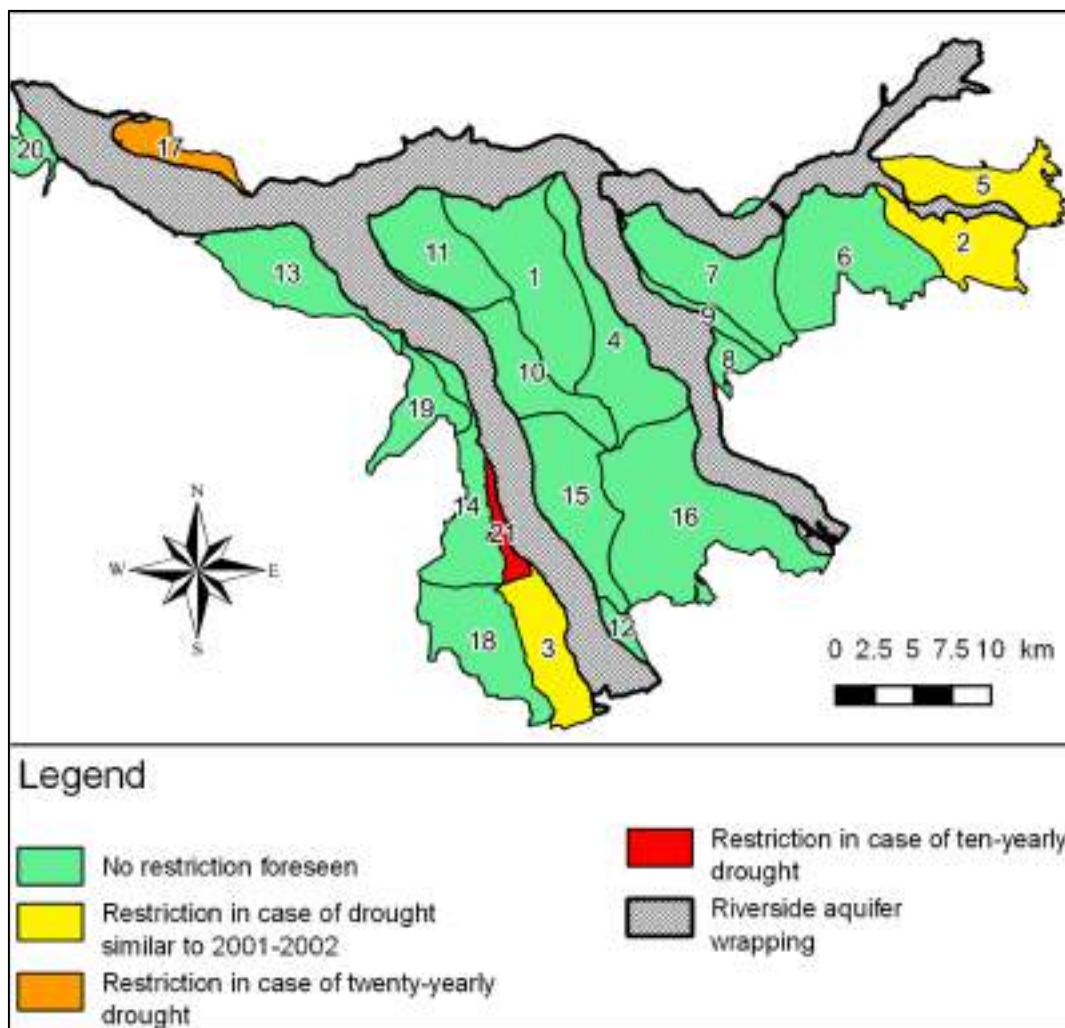


Illustration 15 – Carte des restrictions prévisibles en matière de prélèvements en se basant sur des prélèvements comparables à ceux de la période 2006-2012

L'évolution des outils et de nouveaux développements permettent d'améliorer la prévision des volumes utilisables en eau souterraine sur lesquels les gestionnaires de l'eau peuvent s'appuyer pour définir les volumes prélevables par rapport à ce qui avait été développé historiquement. Ceci s'appuie notamment sur la prévision des niveaux de la nappe à plusieurs mois et le développement des outils web qui permettent une utilisation plus aisée des informations disponibles.

3. Méthodologie utilisée

Les chroniques historiquement collectées sur les points de suivi localisés dans l'emprise du hydrodynamique en 3 D disponible sur la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne ont été exploitée de façon à définir des niveaux objectifs de basses eaux. Trois niveaux objectifs ont ainsi été définis : niveaux objectifs de sauvegarde, d'équilibre et critique. Ils correspondent à des niveaux de nappe de plus en plus bas, et donc à une capacité de la nappe à revenir à un niveau d'eau convenable à l'issue de la période de

recharge suivante amoindrie au fur et à mesure qu'on se rapproche du niveau critique. La méthode de calcul de ces niveaux objectifs est exposé dans le paragraphe suivant.

A partir de niveaux d'eau observables au 1^{er} juin (niveau glissant sur 10 jours), le modèle hydrodynamique a tourné par itérations de façon à évaluer les volumes qui pouvaient être extraits de la nappe pour atteindre les niveaux objectifs en fin de période d'étiage. Ces volumes ont été appelés « volumes utilisables de sauvegarde, d'équilibre et critique », correspondant au niveau de basses eaux de même nom. Ils sont définis pour chaque classe d'IPS du point de suivi de référence associé à l'unité de gestion.

Les unités de gestion du modèle hydrodynamique sont des polygones ayant des propriétés hydrodynamiques homogènes et un gestionnaire associé.

En fonction des niveaux d'eau observés au 1^{er} juin ou qui pourraient être observés au 1^{er} juin (selon les prévisions de l'évolution des niveaux de la nappe sur les 6 prochains mois disponible et mises à jour dans la plateforme MétéEAU Nappes (Livrable E.2.2 du projet SUDOE AQUIFER)) sur le point de suivi de référence, les volumes utilisables en eau souterraine sont définis.

L'outil d'aide à la décision VigiNappe a été créé de façon à mettre en ligne ces informations pour que les gestionnaires de l'eau puissent les consulter et s'appuyer dessus pour la définition des volumes prélevables en eau souterraine. Cet outil est décrit dans le dernier chapitre du présent rapport et consultable à l'adresse : <https://app.viginappe.brgm-rec.fr/>.

3.1 CALCUL DES NIVEAUX OBJECTIFS DE BASSES EAUX

Cette partie de l'étude vise à déterminer des niveaux objectifs de basses eaux pour 6 piézomètres sélectionnés, tous installés dans des alluvions. Trois « niveaux objectifs de basses eaux » sont définis, en utilisant la médiane des hautes eaux annuelles (HEmed) comme niveau de référence et « objectif » ciblé en termes de maintien d'un certain niveau d'eau dans la nappe (Tableau 2).

Ainsi, l'objectif « de sauvegarde » correspond au niveau seuil bas depuis lequel une recharge relativement faible (observée 1 année sur 5 en moyenne) devrait suffire pour atteindre le niveau de référence HEmed. L'objectif « d'équilibre » correspond au niveau seuil bas à partir duquel une recharge médiane (attendue 1 année sur 2 en moyenne) devrait permettre à la piézométrie de remonter jusqu'à HEmed. Enfin, l'objectif « critique » correspond au niveau seuil bas à partir duquel seule une recharge relativement forte (observée 1 année sur 5 en moyenne) peut parvenir à faire remonter le niveau de la nappe jusqu'à HEmed.

Tableau 2 : Définition des trois niveaux objectifs de basses eaux

Niveau objectif de basses eaux	Définition (formule de calcul)
• objectif de sauvegarde (le plus élevé)	= HEmed – recharge quinquennale sèche
• objectif d'équilibre (intermédiaire)	= HEmed – recharge médiane
• objectif critique (le plus bas)	= HEmed – recharge quinquennale humide

Une méthodologie a donc été mise en œuvre afin de traiter les chroniques piézométriques jusqu'à pouvoir calculer, pour chaque piézomètre, tous les termes des formules du Tableau 2 ci-contre.

3.1.1 Approche

L'approche choisie pour calculer ces termes statistiques consiste à analyser chaque chronique piézométrique avec un algorithme spécialisé dans la détection des maxima et minima annuels,

et donc des Hautes Eaux et Basses Eaux, en considérant non pas un découpage rigide par année civile mais plutôt une analyse adaptative par années hydrologiques souples.

La médiane des niveaux de Hautes Eaux extraits peut ensuite être calculée directement, tandis qu'un indicateur annuel de « Recharge apparente » est calculé pour chaque année hydrologique en faisant la différence Hautes Eaux de l'année – Basses Eaux de l'année précédente. La série annuelle de Recharge apparentes peut ensuite faire l'objet d'une analyse fréquentielle pour en tirer les valeurs de recharge \pm rares requises pour calculer les niveaux objectifs définis plus haut.

Mais préalablement à cela, les données piézométriques doivent être extraites, puis prétraitées.

3.1.2 Données considérées

Les chroniques piézométriques des 6 ouvrages de suivi listés dans le Tableau 3 ci-dessous ont été extraites depuis la base nationale ADES, via le service web Hub'Eau. Le Tableau 3 indique l'étendue des chroniques brutes, c.-à-d. avant prétraitements. On constate que les chroniques brutes ont toutes une assez bonne durée (≥ 18 ans, jusqu'à 40 ans dans un cas) a priori propice à l'estimation de périodes de retour par analyse fréquentielle.

Tableau 3 : Piézomètres considérés et étendue de la chronique brute disponible

Dénomination de l'ouvrage	Code national BSS (ancien)	Nombre de mesures	Date min. (historique)	Date max. (extraction)	Durée (ans)
Pomiès	09294X0256/F	6335	04/02/2005	02/02/2023	18.0
Pédeloup	09302X0139/F	7934	05/07/1999	02/02/2023	23.6
St-Porquier	09306X0091/F	14643	26/06/1982	10/02/2023	40.6
St-Pierre	09307X0146/F	8599	06/10/1998	02/02/2023	24.3
Pradas	09311X0093/F	8137	23/06/1999	02/02/2023	23.6
Bioule	09312X0063/F	9541	18/04/1996	02/02/2023	26.8

3.1.3 Nettoyage manuel des chroniques

Dès le premier coup d'œil, il a été constaté que toutes les chroniques brutes ont un certain nombre de données indésirables (valeurs aberrantes, pics de crue très brefs, bruit dans le signal, valeurs en décalage suspect, autres anomalies...) dans le cadre de cette analyse. En effet, la détection des Hautes Eaux et Basses Eaux est sensible aux pics et autres artefacts dans le signal. Pour y remédier, chaque chronique a fait l'objet d'une inspection visuelle attentive, en utilisant un outil R expressément conçu pour permettre de zoomer librement sur n'importe quelle portion de la série temporelle. Les artefacts, flagrants comme subtils, ont ainsi pu être repérés. Et les intervalles de dates de ces données, marquées à exclusion, saisies manuellement, dans un fichier de paramètres.

Les figures ci-dessous présentent deux exemples de chroniques brutes avec mise en évidence des données marquées à exclusion. Dans la chronique de Pomiès (Illustration 16) plusieurs pics de différentes amplitudes sont nettoyés afin de se concentrer sur le signal principal, à forte inertie. La piézométrie ne semble pas perturbée par des pompages. Dans la chronique de St-Pierre, au contraire, les niveaux mesurés avant 2005 sont fréquemment et profondément influencés par des pompages, qui se manifestent par d'importants rabattements suivis de remontées presque aussi rapides (Illustration 17). Ces « creux piézométriques » sont nettoyés afin de se concentrer là aussi sur les fluctuations principales de la piézométrie environnante. Quelques autres points sont

exclus afin de faciliter le lissage du signal (fait à l'étape de prétraitement suivante, présentée plus bas).

Nettoyage de la série piézo & Mise en évidence des 124 points retirés
Code BSS = '09294X0256/F' (POMIES)

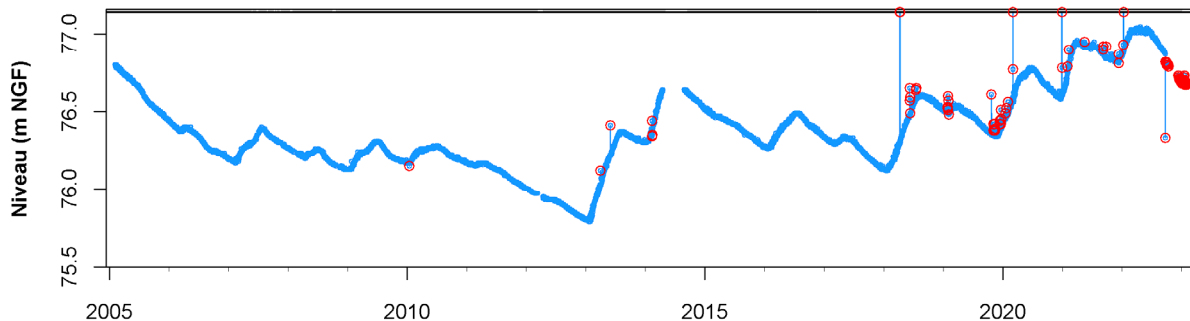


Illustration 16 : Chronique brute de Pomies et ses 124 données 'artefacts' marquées à exclure

Nettoyage de la série piézo & Mise en évidence des 357 points retirés
Code BSS = '09307X0146/F' (ST-PIERRE)

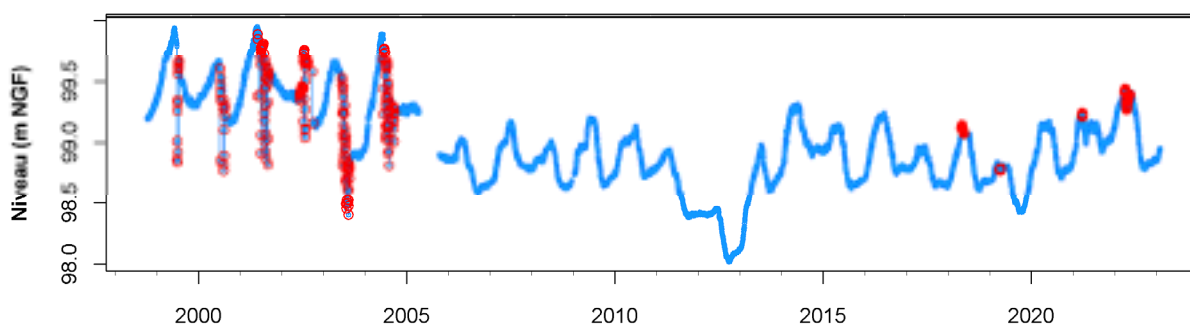


Illustration 17 : Chronique brute de St-Pierre et ses 357 données 'artefacts' marquées à exclure

Le Tableau 4 ci-dessous relate le nombre de données exclues (nettoyées) dans chaque chronique piézométrique, sur la base du repérage et marquage manuel des 'artefacts' du signal.

Tableau 4 : Nombre de données nettoyées dans les chroniques piézométriques brutes

Dénomination de l'ouvrage	Code national BSS (ancien)	Nombre de mesures	Nb mesures à exclure	% mesures à exclure
Pomies	09294X0256/F	6335	182	2.9
Pédeloup	09302X0139/F	7934	924	11.6
St-Porquier	09306X0091/F	14643	113	0.8
St-Pierre	09307X0146/F	8599	357	4.2
Pradas	09311X0093/F	8137	563	6.9
Bioule	09312X0063/F	9541	217	2.3

En complément d'information, noter que le décalage à première vue suspect dans la chronique de St-Pierre (avant versus après 2005) n'est finalement pas un défaut mais très probablement

les niveaux réellement observés avant 2005. En effet, une comparaison avec la chronique de Pédeloup³ révèle une bonne superposition des 2 signaux (une fois leurs fluctuations mises à une échelle commune) comme le montre le graphique suivant (Illustration 18). La [comparaison brute proposée par le site web ADES](#), sans superposition (ajustement), permet elle aussi de constater la forte similarité des fluctuations mesurées par les deux piézomètres. Par conséquent, la portion d'avant 2005 dans la chronique de St-Pierre est conservée.

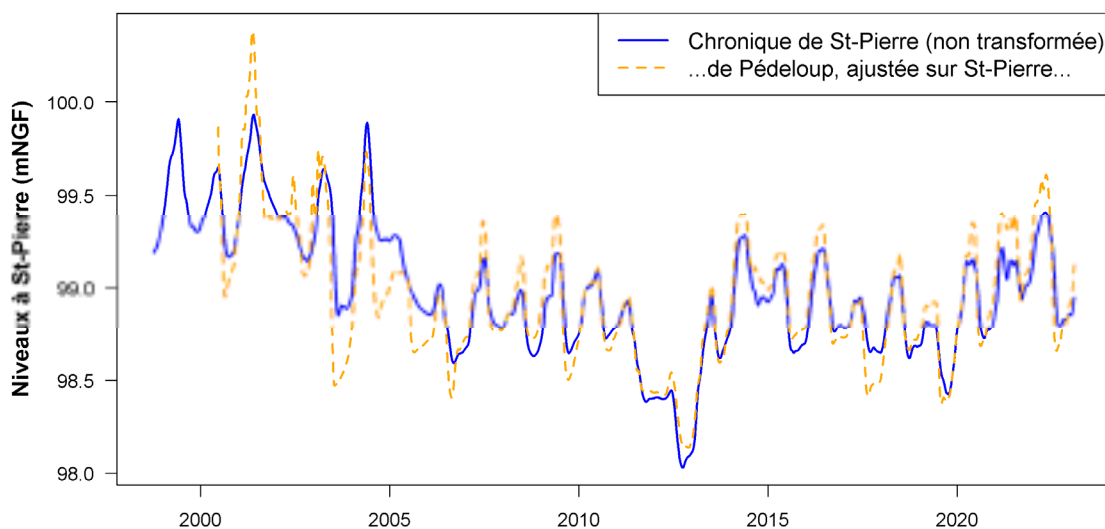


Illustration 18 : Comparaison des chroniques de St-Pierre et de Pédeloup (ajustée)

3.1.4 Lissage et interpolation partielle de la chronique, dit « régulissage »

La seconde étape de prétraitement consiste principalement à lisser le signal de la chronique brute nettoyée en appliquant un **algorithme de « régulissage »** développé récemment au BRGM, qui permet non seulement d'extraire le signal principal (plus lisse) mais aussi d'interpoler (de prolonger, déduire) le signal à l'intérieur des courtes périodes sans donnée (Laurencelle et al., 2021). Cet algorithme met en œuvre des « splines de lissage » ('*smooth splines*' en anglais) qui sont ajustées aux données à l'intérieur d'une fenêtre glissante qui se déplace le long de la série selon des positions temporelles (et non par indices). Un des paramètres clés de l'algorithme de régulissage est 'dfparmois' (pour '*degrees of freedom...*') qui contrôle le nombre de degrés de liberté de la spline et donc son degré de complexité : plus ce paramètre est élevé, moins la série produite par l'algorithme est lisse, et vice versa.

L'interpolation est paramétrée différemment selon la chronique, en fonction de la rapidité des fluctuations observées dans le signal principal. Car il serait imprudent, à titre d'exemple, de déduire (interpoler) les niveaux sur 50 jours si on constate par ailleurs que le niveau peut varier de manière significative en moins de 30 jours. Ainsi, seules les périodes lacunaires de durée inférieure à une durée seuil (établie entre 40 et 90 jours selon la chronique) sont **complées** par

³ Remarque : Cette comparaison graphique a été réalisée à partir des chroniques prétraitées, d'où le nature plus lisse, propre et continue des deux signaux comparés.

l'algorithme de « réglissage », tandis que les lacunes plus longues persistent. Noter que cette procédure d'interpolation n'extrapole en aucun cas au-delà de l'étendue initiale de la chronique.

La Illustration 19, à titre d'exemple, présente le résultat du réglissage de la chronique de Pradas. La chronique lisse est tracée en bleu. En arrière-plan, la chronique brute est rappelée, en gris clair. Les données exclues sont mises en évidence par des cercles rouges. Enfin, les portions interpolées par l'algorithme de réglissage sont indiquées par des cercles verts. Cet exemple montre qu'une fois les artefacts adéquatement repérés, marqués et exclus, l'algorithme est en mesure de reconstituer le signal principal le plus plausible pour une majorité des portions nettoyées. En particulier, le fait d'avoir pu ici reconstituer les niveaux durant plusieurs étiages (1999, 2001 à 2004, 2007 à 2009) va améliorer d'autant les statistiques évaluées plus tard par analyse fréquentielle de la série des Basses Eaux annuelles.

Dans le cas de la chronique de Pédeloup (Illustration 20), le bénéfice apporté par le réglissage est encore plus saillant. En effet, celui-ci, à la suite du nettoyage de nombreux artefacts, complète ou corrige de nombreuses portions durant lesquelles on retrouve les Hautes ou Basses Eaux.

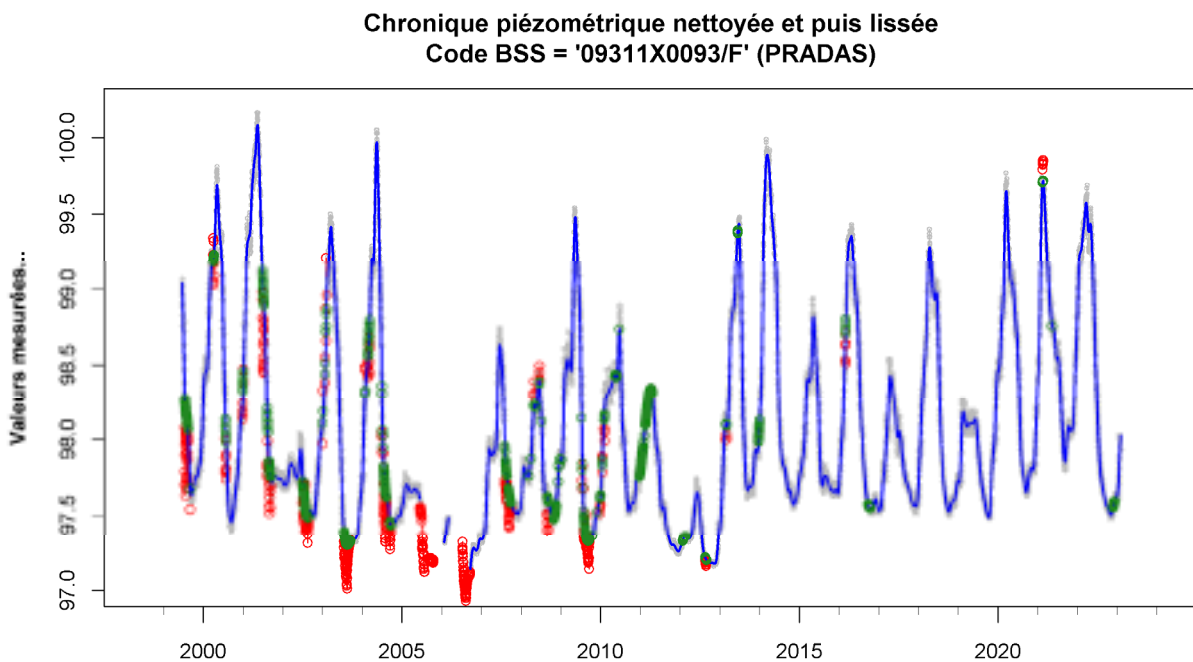


Illustration 19 : Réglissage de la chronique piézométrique de Pradas

Chronique piézométrique nettoyée et puis lissée
Code BSS = '09302X0139/F' (PEDELOUP)

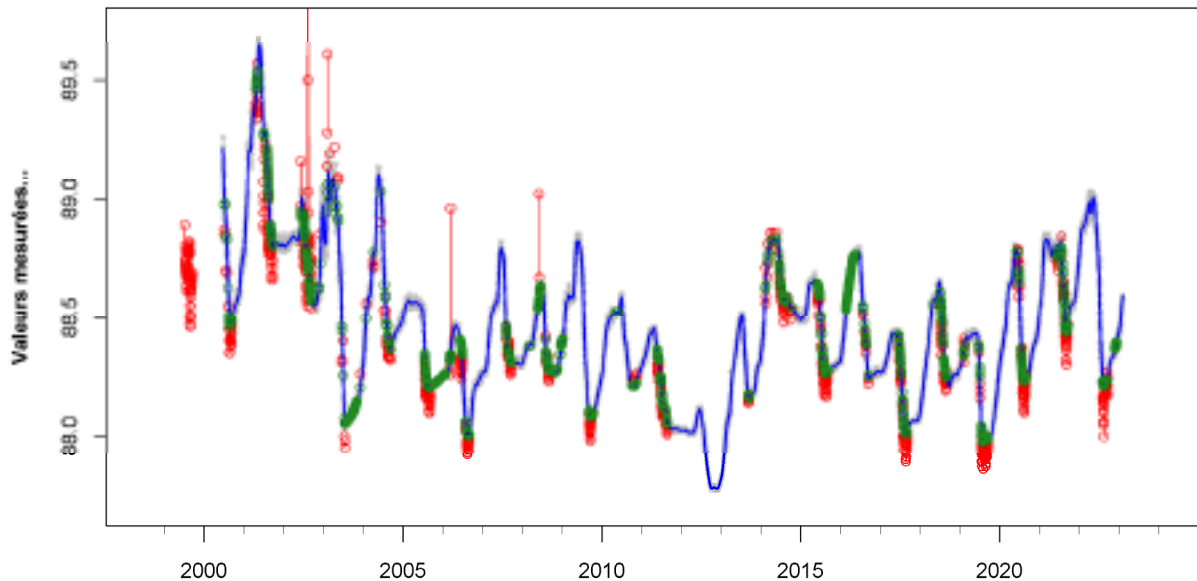
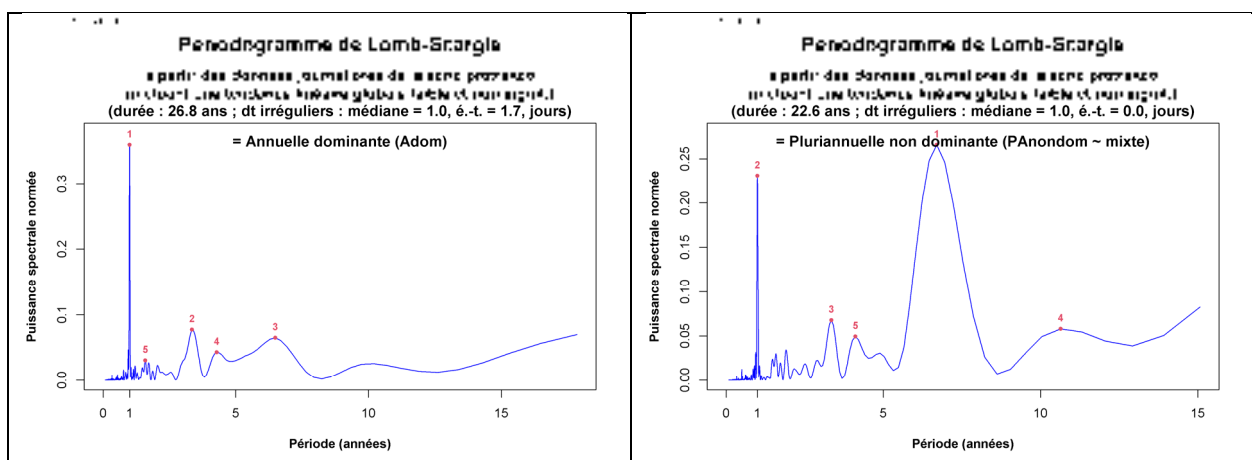


Illustration 20 : Régulissage de la chronique piézométrique de Pédeloup

3.1.5 Analyse spectrale des « cyclicités » dominant le signal

Bien que non essentielle pour le calcul des niveaux objectifs de basses eaux, une analyse spectrale complémentaire est effectuée à partir des chroniques « régulissées » afin de mettre en évidence les « **périodes** » ou « **cycles** » les plus « puissants » dans le signal. Cette analyse génère un **périodogramme de Lomb-Scargle** (Ruf, 1999 ; Laurencelle et al., 2020). Une interprétation des résultats de l'analyse spectrale en tant que **classe de cyclicité**, ex. « = Annuelle dominante (Adom) », est proposée en sous-titre de chaque périodogramme (Illustration 21).



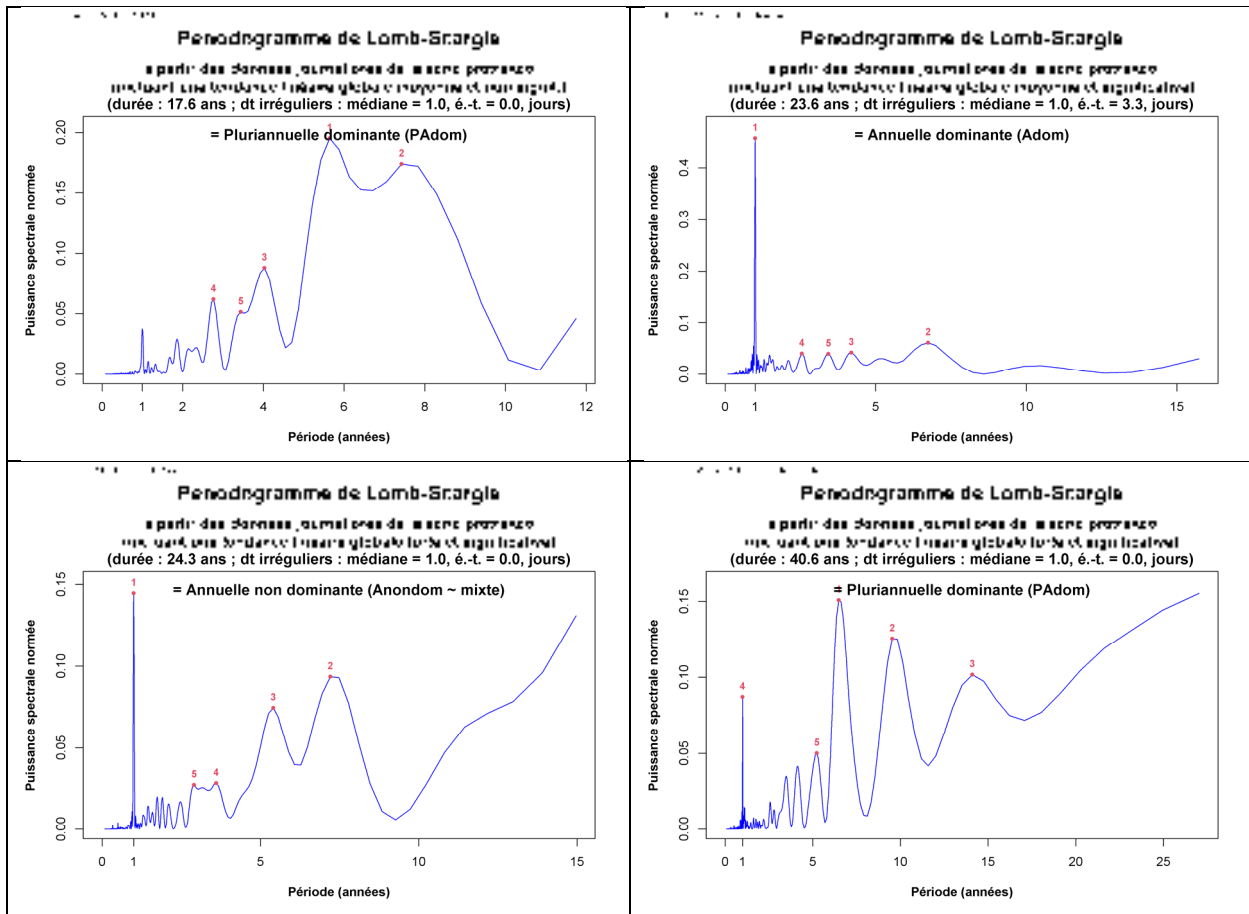


Illustration 21 : Périodogrammes et cyclicités principales composant les 6 signaux piézométriques

Une composante annuelle (de période \approx 12 mois) est presque toujours détectée, mais celle-ci ne domine le signal que pour 2 des 6 piézomètres (Bioule et Pradas). En effet, des cycles plus lents (fluctuations sur plusieurs années) sont souvent mis en évidence, lesquels dominent parfois même le signal (Pomiès et St-Porquier). De même, dans le périodogramme de St-Pierre, l'augmentation de la puissance spectrale pour les plus longues périodes >10 années, suggère une possible cyclicité pluriannuelle dominante, de période non quantifiable en raison de la durée limitée de la chronique. Dans l'ensemble, les chroniques analysées montrent une diversité de profils fréquentiels et donc, de comportements \pm réactifs / inertiels.

3.1.6 Extraction des Hautes Eaux et Basses Eaux

Un module codé en langage R permet ensuite d'extraire d'une manière prudente les **pics / creux annuels de hautes eaux / basses eaux** à partir de la chronique piézométrique « régulisée ». L'algorithme est dit « prudent » car il explore la chronique de différentes manières afin de ne retenir que les « vrais » minima ou maxima. Les résultats n'incluent ainsi aucun niveau « en transition » (observé par exemple en fin d'année civile au cours d'une période de baisse, dans le cas d'une recherche d'étiage) ni aucun minimum ou maximum apparent en bout de courbe (juste avant une période lacunaire par exemple).

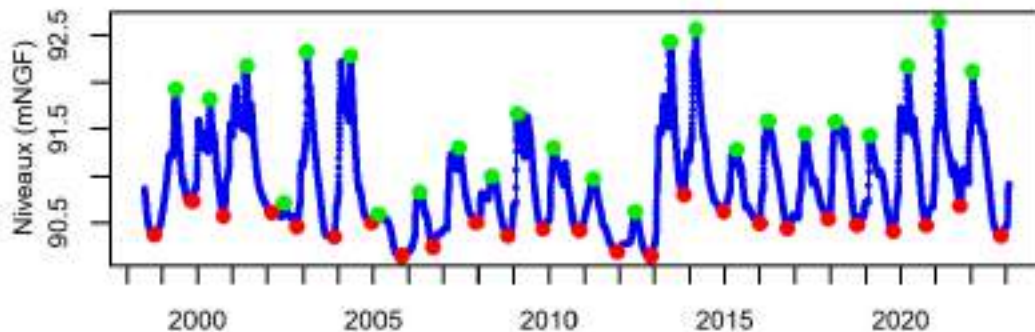
Noter que plusieurs indicateurs sont ensuite calculés à partir de la liste des coordonnées (date, niveau) des Hautes Eaux (HE) et Basses Eaux (BE), pour la plupart. Voici les définitions des indicateurs présentés dans les fiches, avec 'a' l'année hydrologique :

- Recharge apparente = $HE[a] - BE[a-1]$,
- Niveaux hauts annuels = $HE[a]$,
- Durée de la phase de vidange = date de $BE[a]$ – date de $HE[a-1]$,
- **Niveaux bas annuels** = $BE[a]$,
- Niveaux moyens annuels = ... (calcul indépendant des HE et BE), et enfin,
- **Mois des hautes et basses eaux** = conversion en mois décimal des dates de HE et BE.

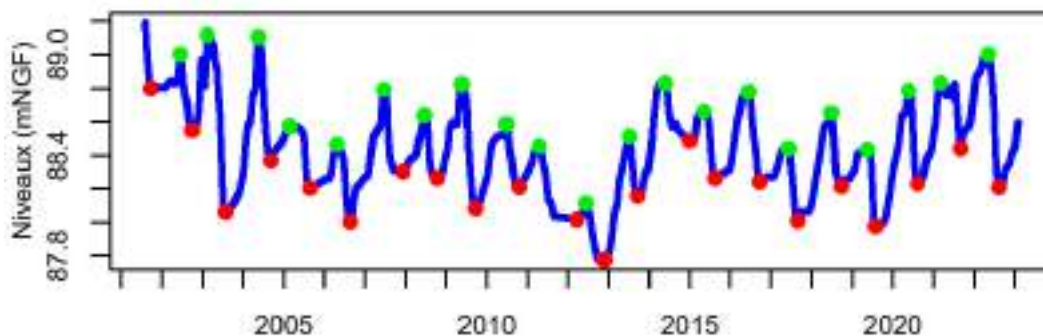
Toutefois, seuls les graphiques exposant les résultats essentiels au calcul des niveaux objectifs de basses eaux, à savoir le repérage des HE et BE, sont présentés ci-après. Les fiches complètes de résultats graphiques générées par ce module, néanmoins fournies en annexe, présentent l'ensemble de ces indicateurs, incluant une version standardisée (~cote Z) de chacun d'eux facilitant le repérage des années particulièrement sèches ou humides selon différents critères (recharge, niveaux hauts / bas, durée de vidange, ...).

La Illustration 22 expose ainsi les HE et BE détectées dans chaque chronique prétraitée. Un examen visuel rapide de ses graphiques permet de confirmer que la détection des HE et BE est efficace et satisfaisante. Dans les cas de dynamiques pluriannuelles, on remarque quelques années sans recharge apparente (ex. Pomiès en 2011–2012 ou 2014–2015). On observe aussi plusieurs années durant lesquelles la recharge est très limitée (ex. Bioule en 2005–2006).

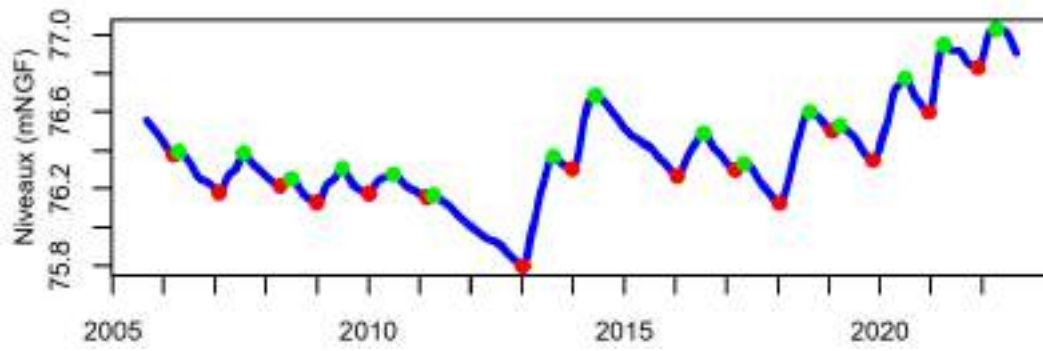
Les coordonnées (date et niveau) de ces points de HE et BE sont rassemblées dans un tableau de résultats numériques exporté en parallèle dans un fichier texte par le module R. C'est ce tableau qui est exploité à l'étape suivante pour calculer tous les termes nécessaires au calcul des niveaux objectifs de basses eaux.



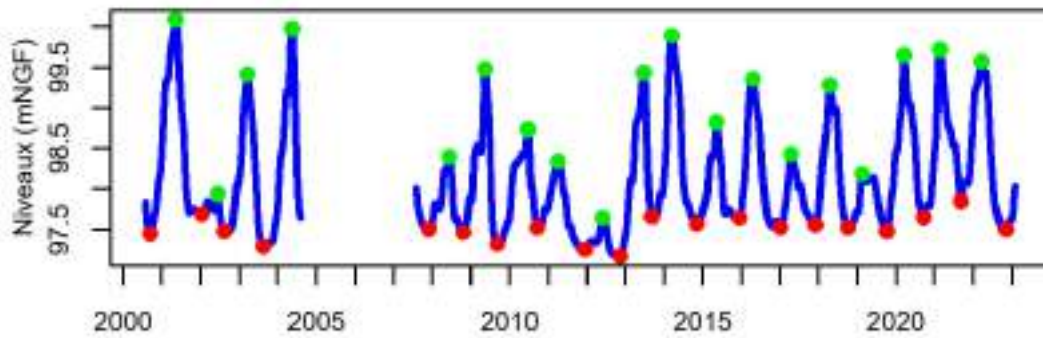
a) Bioule



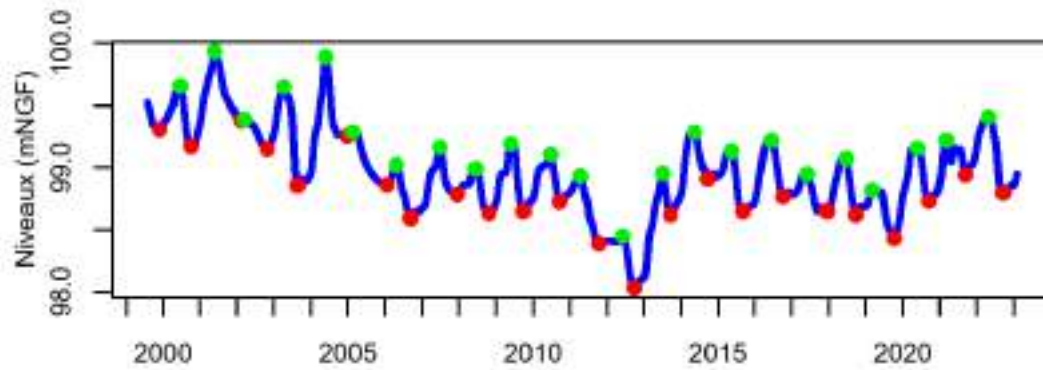
b) Pédeloup



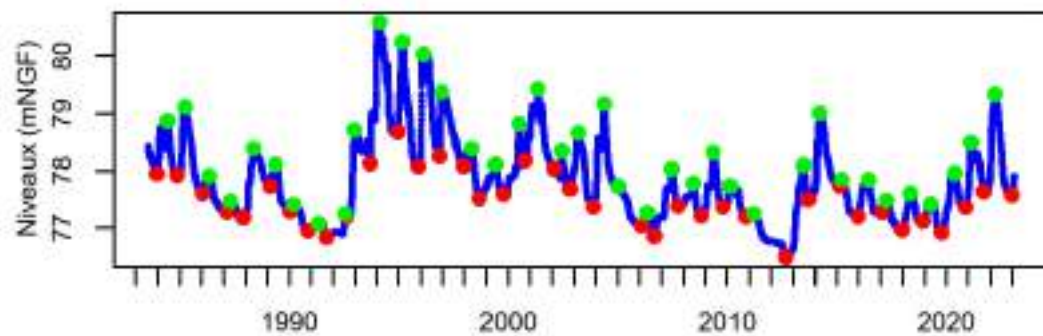
c) Pomès



d) Pradas



e) St-Pierre



f) St-Porquier

Illustration 22 : Hautes Eaux et Basses Eaux repérées dans les chroniques prétraitées

3.1.7 Calcul des termes nécessaires au calcul des niveaux objectifs de basses eaux

Le premier terme requis est la médiane des hautes eaux annuelles (HEmed). Son calcul, réalisé pour chaque piézomètre, est tout simple à réaliser, une fois que le tableau de HE et BE est prêt :

HEmed = la *médiane* de tous les niveaux de Hautes Eaux : résultat en m NGF

Le second terme requis, quant à lui, varie selon le niveau objectif de basses eaux. Il est obtenu par le calcul d'un quantile des Recharges Apparentes, pour une fréquence empirique (F_{emp}) donnée. Ces fréquences correspondent en quelque sorte à des périodes de retour. Une approche empirique a été sélectionnée parce que des tests ont révélé qu'une majorité des séries annuelles de Recharge Apparente ont une distribution statistique qui ne se prête pas à une analyse probabiliste⁴. Les fréquences empiriques retenues sont :

- $F_{emp} = 1/5 = 0.2$ (\approx recharge quinquennale sèche),
- $F_{emp} = 1/2 = 0.5$ (\approx recharge médiane) et
- $F_{emp} = 1 - 1/5 = 4/5 = 0.8$ (\approx recharge quinquennale humide).

Le calcul du terme de **recharge** se fait en calculant le quantile (empirique) de la série annuelle de Recharges Apparentes correspondant à une fréquence de non dépassement = F_{emp} .

Enfin, les trois **niveaux objectifs de basses eaux** sont calculés en soustrayant à HEmed chacun des termes de recharge (en appliquant les formules exposées plus tôt dans le Tableau 2).

3.1.8 Résultats

Le Tableau 5 ci-dessous rassemble les termes requis et les niveaux objectifs de basses eaux calculés à partir de ceux-ci.

Ensuite, en complément, les niveaux objectifs de basses eaux calculés sont illustrés par piézomètre, dans un graphique qui présente à la fois la chronique (prétraitée) et les niveaux objectifs calculés, ce qui permet de traduire l'impact de ces derniers en termes de nombre de jours concernés par année (périodes durant lesquelles le niveau de la nappe est passé sous un ou plusieurs de ces niveaux objectifs).

Noter qu'aucune « période de référence » n'a été imposée que ce soit lors du prétraitement des chroniques, de l'extraction des Hautes Eaux et Basses Eaux annuelles ou du calcul des niveaux objectifs de basses eaux. Ces analyses de l'impact des niveaux objectifs couvrent ainsi l'entièreté de l'historique disponible pour chaque piézomètre.

⁴ ...en raison d'un non-respect de certaines conditions d'application telles que la stationnarité de la série, ou parce que les ajustements tentés avec diverses lois de probabilité (ex. loi normale) ont été infructueux.

Tableau 5 : Niveaux objectifs de basses eaux calculés pour les 6 piézomètres et termes utilisés

Dénomination de l'ouvrage	Code national BSS (ancien)	HEmed (m)	Femp (-)	Q R.A. (m)	Niveau objectif de basses eaux (de)... (m NGF)	
Bioule	09312X0063/F	91.582	0.2	0.550	sauvegarde	91.032
			0.5	1.075	équilibre	90.508
			0.8	1.759	critique	89.823
Pédeloup	09302X0139/F	88.663	0.2	0.207	sauvegarde	88.455
			0.5	0.516	équilibre	88.147
			0.8	0.710	critique	87.952
Pomiès	09294X0256/F	76.393	0.2	0.011	sauvegarde	76.382
			0.5	0.176	équilibre	76.217
			0.8	0.398	critique	75.995
Pradas	09311X0093/F	99.355	0.2	0.813	sauvegarde	98.543
			0.5	1.719	équilibre	97.637
			0.8	2.222	critique	97.134
St-Pierre	09307X0146/F	99.160	0.2	0.181	sauvegarde	98.979
			0.5	0.457	équilibre	98.703
			0.8	0.677	critique	98.483
St-Porquier	09306X0091/F	78.108	0.2	0.203	sauvegarde	77.905
			0.5	0.643	équilibre	77.465
			0.8	1.497	critique	76.611

HEmed : médiane des Hautes Eaux annuelles ; Femp : fréquence empirique (valeur entre 0 et 1) ; Q R.A. : quantile calculé à partir des Recharges Apparentes pour une fréquence de non dépassement = Femp.

CLE DE LECTURE DES RESULTATS GRAPHIQUES QUI SUIVENT

Partie supérieure (graphique) :

La chronique piézométrique (prétraitée) est tracée en noir. Les 3 niveaux objectifs de basses eaux sont indiqués par des droites horizontales pointillées ayant chacune une couleur spécifique. Dans certains cas, le niveau objectif « critique » n'est pas visible, lorsqu'il se situe en-dessous de la borne inférieure de l'axe vertical du graphique (et donc aussi des niveaux historiquement observés dans l'ouvrage). De plus, le niveau de référence HEmed est indiqué.

Rappel : Les niveaux piézométriques sont tous en mètres NGF, y compris dans ces graphiques où l'unité mentionnée dans l'axe vertical est le mètre (m).

Partie inférieure (tableau de comptages avec couleurs) :

La grille du tableau est structurée par année (horizontalement) et par niveau objectif de basses eaux (verticalement). Ainsi, une case non vide du tableau (avec un nombre $N > 0$) indique que ce niveau objectif a été atteint ou franchi (vers des niveaux encore plus bas) durant N jours de cette année-là. Une case vide, à l'opposé, indique que ce niveau objectif n'a jamais été atteint au cours de l'année. La rangée inférieure du tableau compte le nombre de jours sans donnée disponible après prétraitements. Cette rangée « (Lacunes) » permet ainsi d'identifier les années pour lesquelles l'analyse risque d'être moins fiable en raison de la discontinuité du suivi.

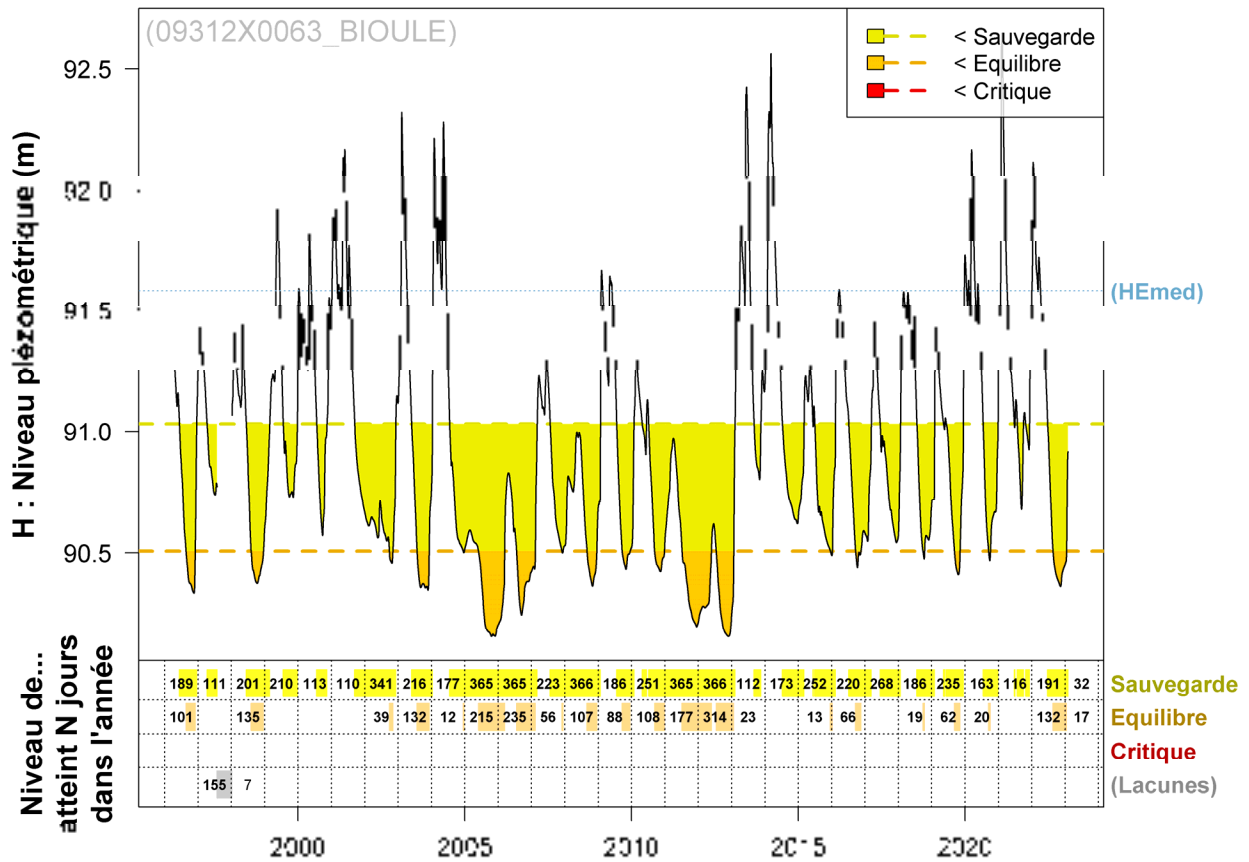


Illustration 23 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Bioule

Bioule :

On remarque dans la Illustration 23 que le niveau objectif « critique » n'a jamais été atteint par le passé dans le cas du piézomètre de Bioule. Cela est lié aux faits combinés que : les recharges apparentes annuelles sont assez souvent importantes dans cet ouvrage, relativement à l'amplitude totale de la piézométrie ; et que cette dernière montre une cyclicité annuelle dominante, avec des composantes pluriannuelles d'amplitudes relativement faibles par rapport au cycle saisonnier de recharge-vidange.

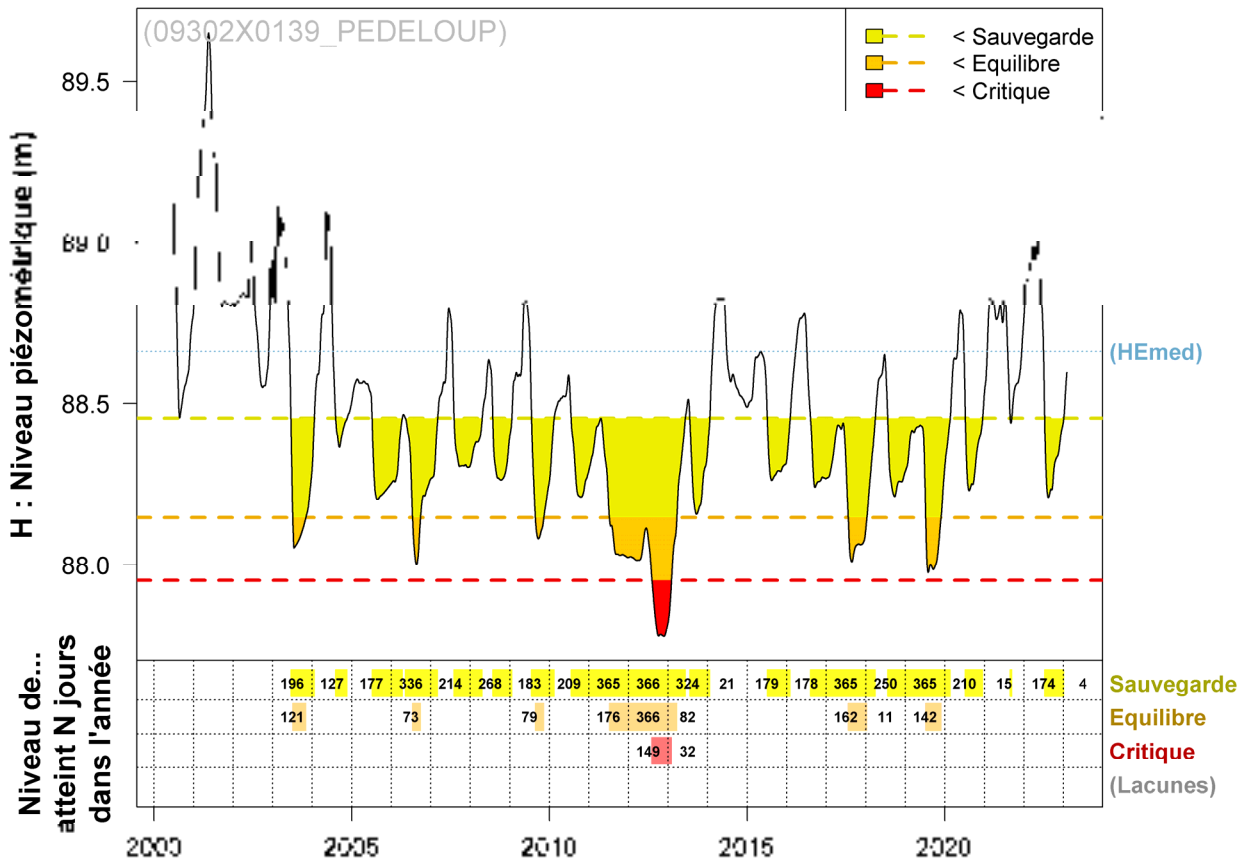


Illustration 24 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pédeloup

Pédeloup :

On décèle dans le signal piézométrique de Pédeloup une fluctuation pluriannuelle non dominante mais qui pourrait correspondre à un long cycle hydro-climatique s'étendant sur plusieurs dizaines d'années, puisque l'historique disponible ne présente qu'un demi-cycle avec, approximativement, une décroissance de 2000 à 2012 suivie d'une croissance toujours en cours. L'atteinte du niveau objectif « critique » en 2012–2013 (durant 181 jours) ne devrait donc pas se produire à nouveau au cours des prochaines années, sauf événement asséchant exceptionnel.

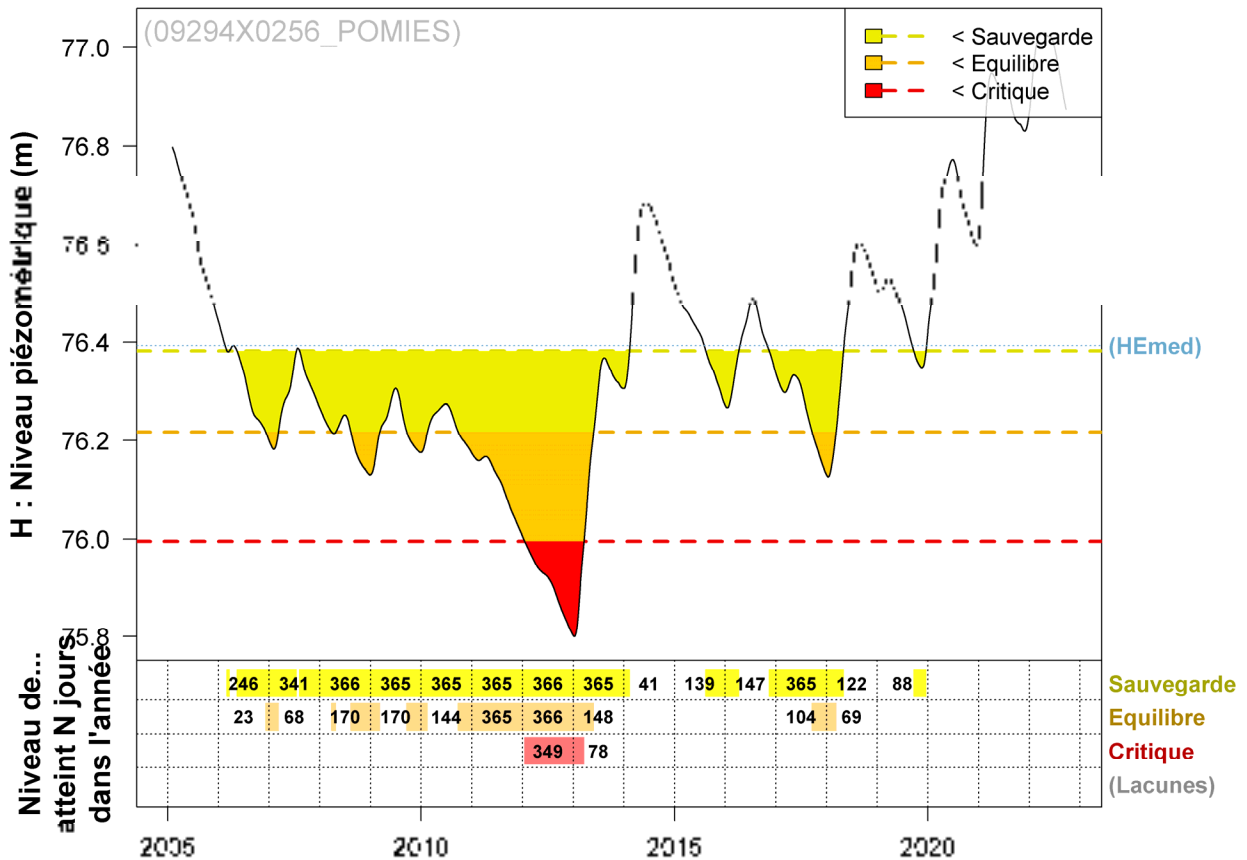


Illustration 25 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pomiès

Pomiès :

On note ici la nature très inertielle des fluctuations de la nappe mesurées dans le piézomètre de Pomiès. L'année 2012 semble correspondre là aussi au creux d'un long cycle pluriannuel dont la période paraît s'étendre bien au-delà de l'historique disponible (>20 ans). Tout comme pour le piézomètre de Pédeloup, l'atteinte du niveau objectif « critique » en 2012–2013 (ici durant 427 jours) ne devrait pas se reproduire au cours des prochaines années. En effet, la nappe apparaît assez clairement engagée dans une hausse pluriannuelle de son niveau moyen, jusqu'à 2030 environ. En outre, on remarque que le niveau objectif de « sauvegarde » est très proche du niveau de référence HEmed (médiane des Hautes Eaux annuelles). Ceci est lié au fait que la recharge apparente est nulle ou très faible (<1,3 cm) pour 4 années hydrologiques (2006, 2011, 2012 et 2015) sur 17 années hydrologiques disponibles au total, ce qui constitue déjà plus de 20 % de la série des valeurs de recharge apparente analysées statistiquement pour calculer le terme de recharge qui est soustrait à HEmed pour obtenir ce niveau objectif de sauvegarde.

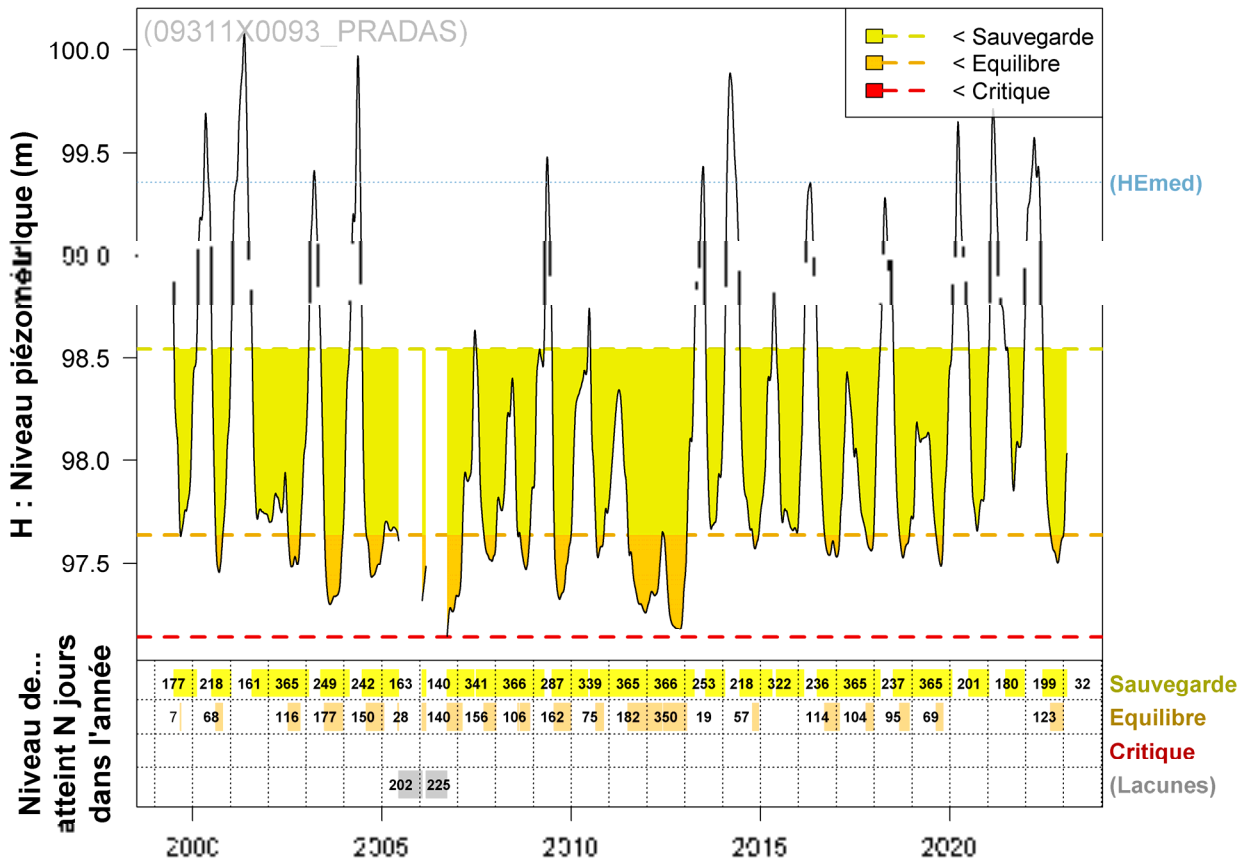


Illustration 26 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de Pradas

Pradas :

Comme dans le cas du piézomètre de Bioule, le niveau objectif « critique » n’a jamais été atteint par le passé dans le piézomètre de Pradas. Néanmoins, le niveau mesuré s’en est **dangereusement** rapproché en 2005–2006 (?) puis en 2011–2012.

Par ailleurs, on remarque deux périodes lacunaires (sans données disponibles) en 2005 et 2006, qui n’ont pas été comblées par l’algorithme de réglissage car de durées trop longues.

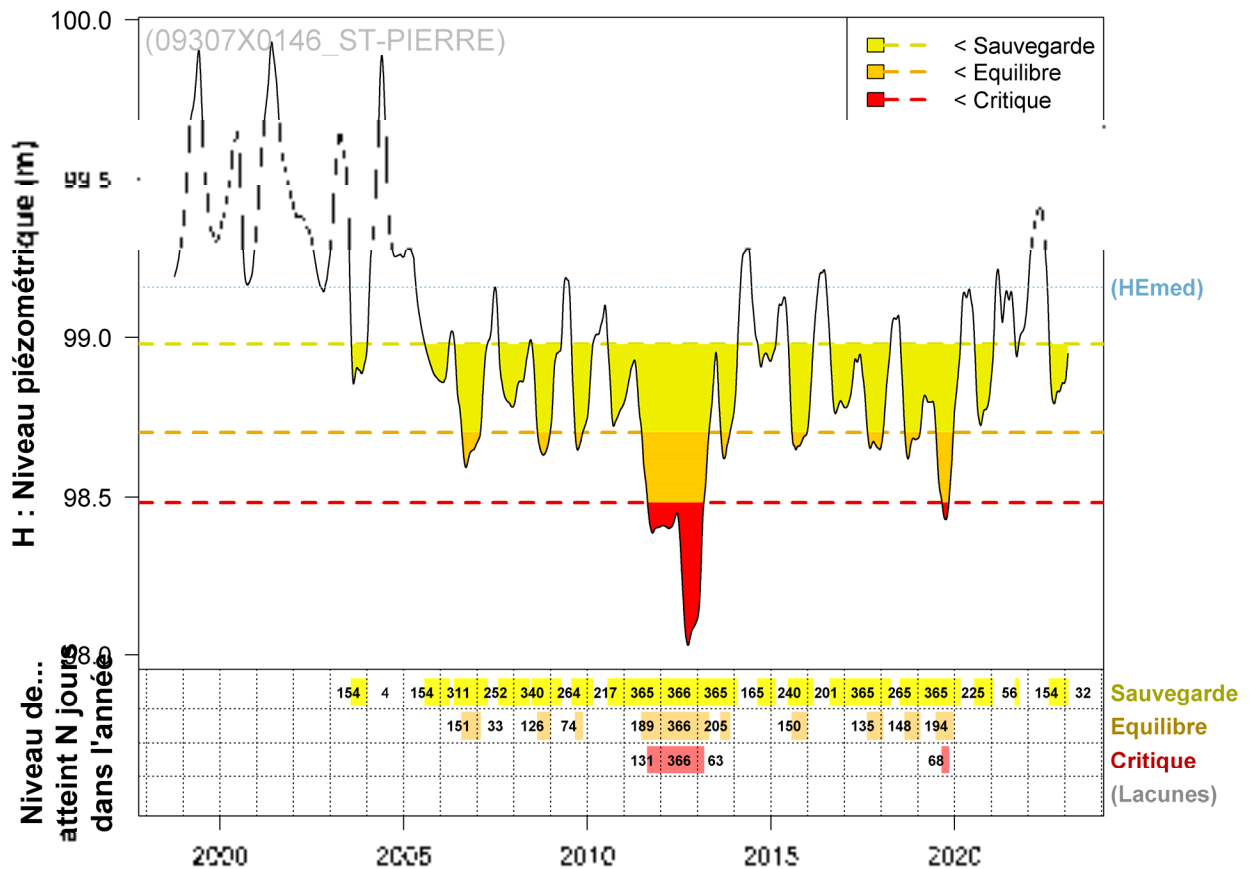


Illustration 27 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de St-Pierre

St-Pierre :

On note à nouveau une composante pluriannuelle de période >25 ans dans la piézométrie de l'ouvrage dénommé St-Pierre (Illustration 27). L'année la plus critique de l'historique de St-Pierre est, là encore, 2012 ; mais le niveau objectif « critique » a été dépassé ici sur une plus longue durée (totalisant 560 jours) que dans les autres piézomètres.

Remarque (rappel) : L'apparente surélévation des niveaux avant 2005 a été investiguée au préalable (cf. Illustration 18) et s'avère tout à fait vraisemblable puisqu'en bonne adéquation avec les niveaux observés ces mêmes années dans un autre piézomètre (Pédeloup).

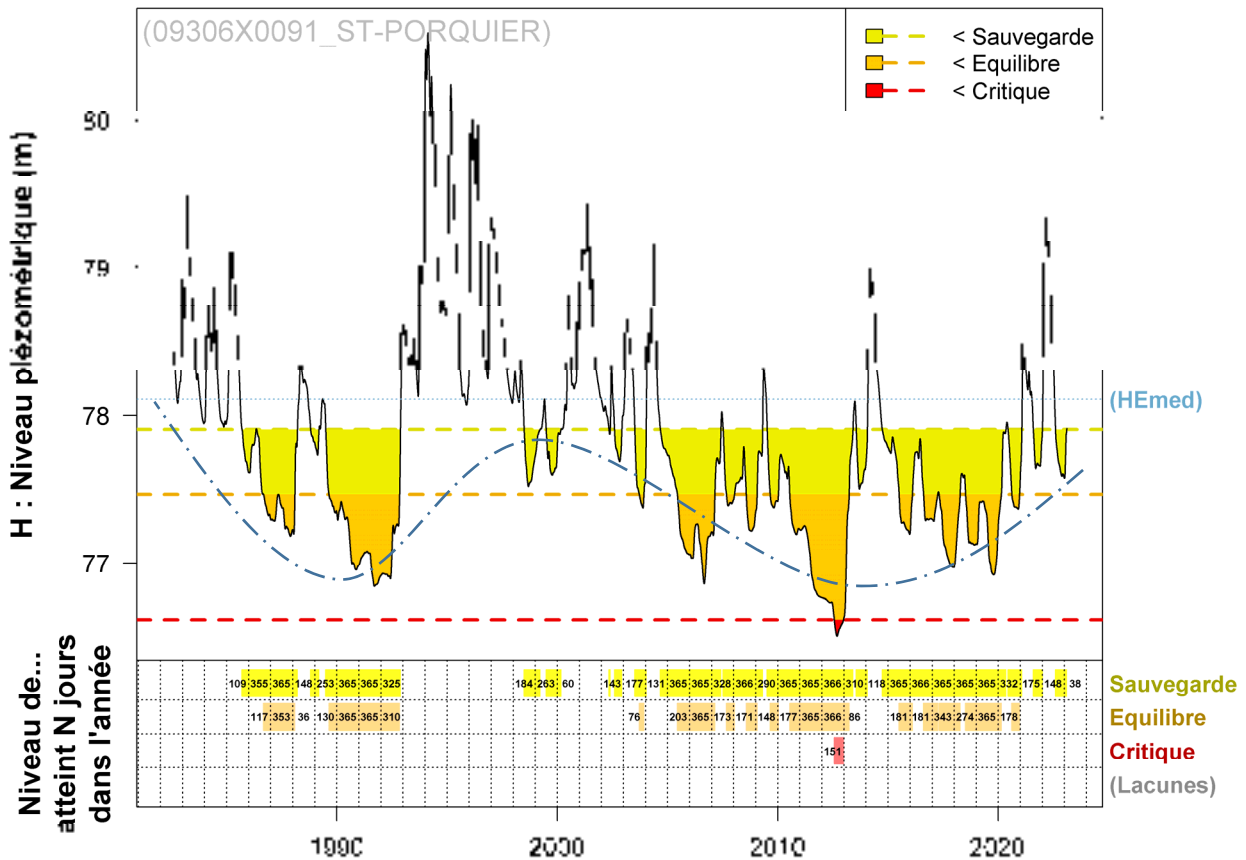


Illustration 28 : Impact des niveaux objectifs de basses eaux pour le piézomètre de St-Porquier

St-Porquier :

Enfin, dans le cas du piézomètre de St-Porquier, la nappe est passée sous le niveau objectif « critique » en 2012 (comme dans trois autres piézomètres) mais pendant une durée plus courte (151 jours). Le plus long historique disponible ici permet de mieux discerner l'étendue des cycles pluriannuels dominant ici le signal. En particulier, on entrevoit une composante très lente (esquissée par une courbe pointillée bleu foncé dans la Illustration 28) qui semble décrire approximativement un cycle s'étendant sur une période de 20-30 ans environ. Il pourrait être intéressant, dans des travaux futurs, d'étudier plus en détails jusqu'où et avec quelle importance relative cette composante pluriannuelle se retrouve dans les chroniques des piézomètres environnants, et peut-être aussi dans certaines chroniques hydrométriques.

4. Service d'aide à la décision : la plateforme internet VigiNappe

Ce chapitre détaille les fonctionnalités du site : le site vitrine et l'application VigiNappe qui comprend une partie en accès libre ("grand public") et une partie à accès réservé, authentifié. Les travaux menés pour renseigner les informations mise à disposition sur cette plateforme internet sont détaillés dans les chapitres précédents.

4.1 LE SITE VITRINE

Le site vitrine (Illustration 29) offre une page d'accueil dans le site institutionnel qui décrit l'application et contient le bouton « Accéder à l'application » qui redirige vers l'application VigiNappe qui dispose de sa propre URL.



Illustration 29 – Site Vitrine VigiNappe

4.2 L'APPLICATION VIGINAPPE

4.2.1 Schéma général de l'application VigiNappe

L'application VigiNappe dispose de 2 blocs :

- Une page d'accueil « grand public » orientée chroniques piézométriques et présentant l'Indicateur Piézométrique Standardisé⁵ (IPS) sur les points de suivi quantitatif des eaux souterraines libres du bassin Adour-Garonne disposant de plus de 15 ans de suivi, quel que soit le producteur de la donnée et permettant une visualisation de la chronique piézométrique ;
- Un accès après connexion, orienté « volumes prélevables » et permettant de visualiser les volumes prélevés et une évaluation des volumes prélevables pour la période d'irrigation estivale à venir sur les 21 casiers de gestion de la ressource associés au modèle hydrodynamique 3D de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne.

Ces deux aspects sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.2.2 Accès grand public (piézométrie)

A l'accueil sur l'application, la carte est zoomée à l'échelle de la France (Illustration 30).

Le fond de carte est un plan IGN, avec, en superposition :

- Fond de carte : Carte lithologique simplifiée au 1/1 000 000 ;
- Couche sur la carte : altimétrie en estompage.

Les points de suivi en eaux souterraines libres sont agglomérés à cette échelle. Le nombre de points sous chaque point d'agglomération est indiqué par le nombre présent dans les symboles. Le choix du symbole affiché résulte d'un calcul de la valeur de l'IPS représentative des points qui se « cachent » sous cet indice global. Au fur et à mesure que l'utilisateur zoome sur la carte, les points de suivi apparaissent (à partir du niveau de zoom repris sur l'ILLUSTRATION 32).

Les points de suivi sont représentés par leur IPS du mois - année sélectionné dans le bloc « Naviguer dans le temps » par l'utilisateur. Par défaut, le mois en cours est affiché. La légende utilisée est reprise sur l'ILLUSTRATION 33 et dans la partie droite de l'écran, dans le bloc « Légende ». Si le calcul de l'IPS sur le point de suivi n'est pas possible, le piézomètre est représenté par un disque grisé.

Au clic sur un piézomètre, le bloc « Graphique des chroniques piézométriques passées et prévisionnelles et informations d'un piézomètre » s'affiche dans une fenêtre pop-up (ILLUSTRATION 34). L'en-tête de cette fenêtre correspond au code BSS⁶ et à la désignation du point de suivi. Par défaut, la chronique piézométrique de l'année passée s'affiche sur cette fenêtre pop-up, avec les niveaux piézométriques prévisionnels pour les 6 prochains mois si le piézomètre dispose d'une modélisation permettant une prévision de ses niveaux piézométriques sur les 6 prochains mois (travaux mis à disposition sur la plateforme MétéEAU Nappes). L'utilisateur peut aussi choisir d'afficher la chronique piézométrique sur les 7 derniers jours, le dernier mois, les

⁵ <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/indicateur-piezometrique-standardise-ips-gestion-ressource-eau>

⁶ Banque du Sous-Sol : <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>

derniers 3 mois ou la chronique piézométrique dans son entièreté (historique complet). L'utilisateur peut aussi avec des informations sur le point de suivi, à savoir sa commune, le gestionnaire du point et l'entité BDLISA⁷ à laquelle le point de suivi est rattaché (avec un lien dynamique vers la page BDLISA associée à cette entité). Ceci est illustré sur l'ILLUSTRATION 35 pour un point de suivi.

Le changement de mois et année dans le bloc « Naviguer dans le temps » impacte la coloration des piézomètres (forme et couleur), puisque ce dernier est représenté par son IPS qui change en fonction de la date.



Illustration 30 – Page d'accueil VigiNappe – Niveau de zoom maximal

⁷ Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères : <https://bdlisa.eaufrance.fr/>



ILLUSTRATION 31 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – NIVEAU DE ZOOM INTERMEDIAIRE

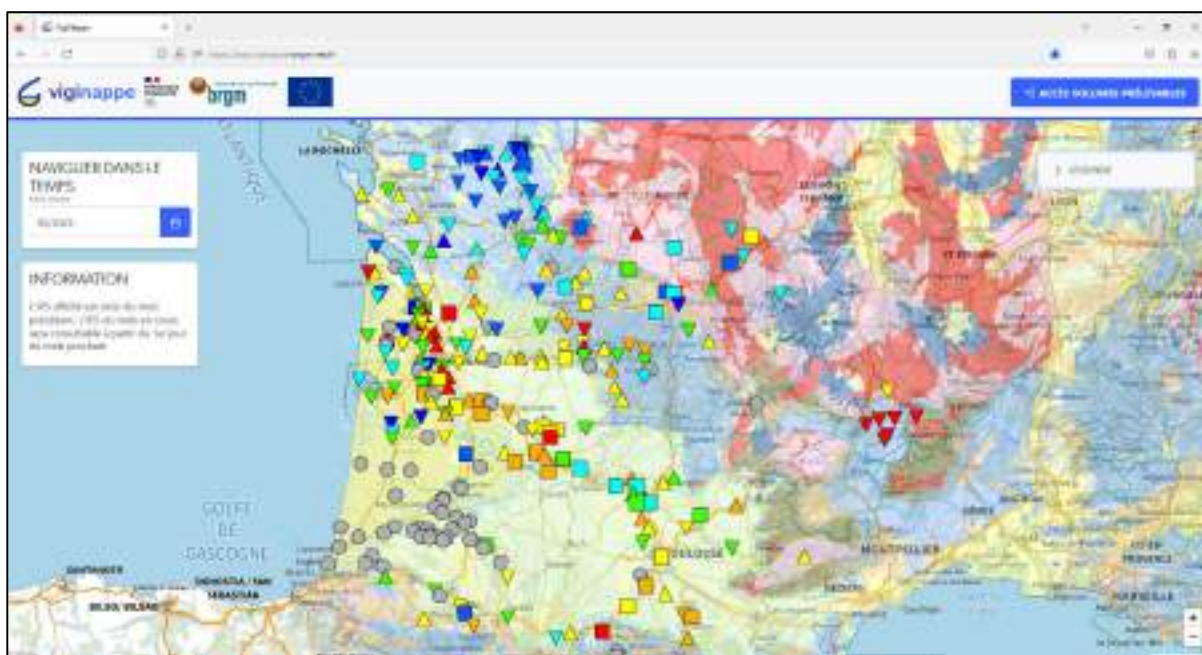


ILLUSTRATION 32 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – VUE DE L’ENSEMBLE DES POINTS DE SUIVI QUANTITATIF DES EAUX SOUTERRAINES LIBRES DU BASSIN ADOUR-GARONNE DISPOSANT DE PLUS DE 15 ANS DE DONNEES



ILLUSTRATION 33 – LEGENDE DE REPRESENTATION D'UN POINT DE SUIVI EN EAU SOUTERRAINE

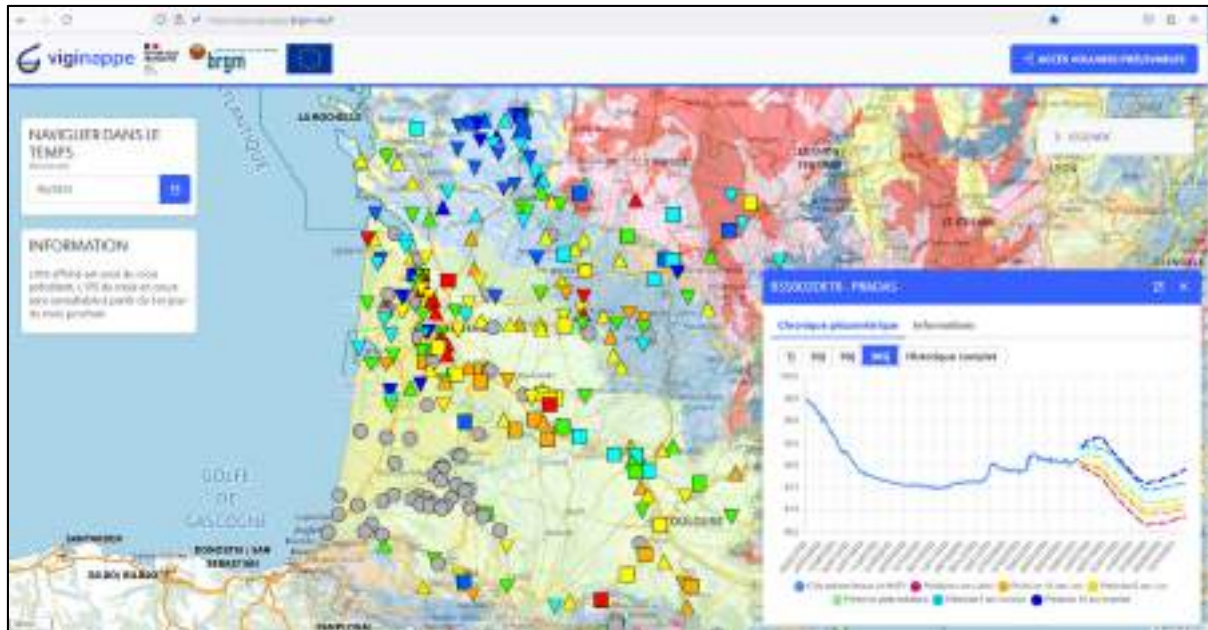


ILLUSTRATION 34 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – BLOC « GRAPHIQUE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES PASSES ET PREVISIONNELLES »

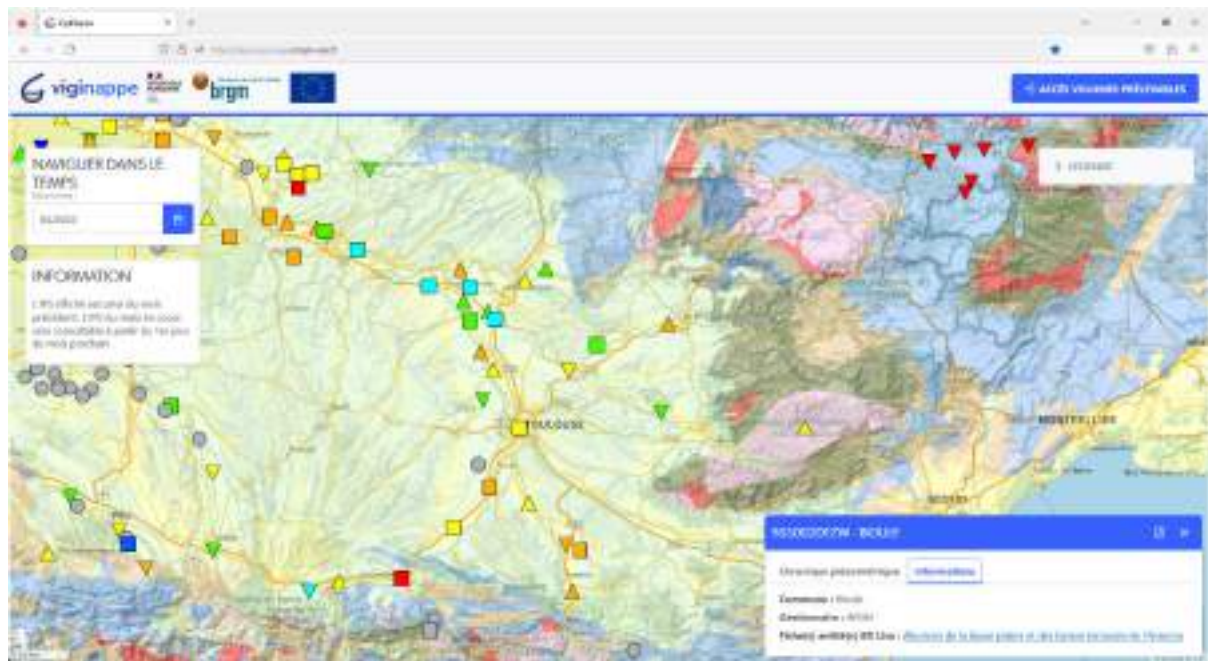


ILLUSTRATION 35 – PAGE D’ACCUEIL VIGI NAPPE – BLOC « INFORMATIONS D’UN PIEZOMETRE »

4.2.3 Accès authentifié (prévision des volumes prélevables)

Après connexion (Illustration 36), l'utilisateur accède à la partie authentifiée du site reprise sur l'illustration 37. La carte est zoomée sur l'emprise géographique correspondant à la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron, dans le département de Tarn-et-Garonne. Cette emprise correspond à l'emprise du modèle hydrodynamique en 3D, développé sous MARTHE (logiciel BRGM), pour modéliser le comportement de cette masse d'eau.

Le fond de carte utilisé est le même que sur la partie « grand public », mais avec ici des polygones, correspondant aux casiers de gestion de la nappe alluviale définis dans le modèle hydrodynamique, en collaboration avec les gestionnaires de cette ressource.

Les points de suivi de la nappe alluviale sont représentés avec la même symbologie que dans la vue « grand public », i.e. l'IPS des points suivis est affiché pour le mois – année sélectionnée par l'utilisateur dans le bloc « Naviguer dans le temps ».

Les casiers de gestion sont colorés par la classe d'IPS de leur piézomètre de référence pour le mois – année sélectionné. Au clic sur un casier, un graphique et un tableau représentant les volumes prélevables s'affichent. Trois volumes prélevables sont définis : volume prélevable de sauvegarde, d'équilibre et critique. Ils sont définis à partir de la cote piézométrique prévue ou observée sur 10 jours glissants autour du 1^{er} juin. Avant le 1^{er} juin, l'utilisateur peut choisir le scénario de prévision à utiliser. Les volumes prélevables de l'année courante sont affichés dans le graphique et le tableau en fonction de ce choix. Par défaut, les volumes prélevables associés au scénario sans pluie sont affichés. Les scénarios climatiques disponibles sont :

- Prévision sans pluie ;
- Prévision 10 ans sec ;
- Prévision 5 ans sec ;
- Prévision pluie médiane ;
- Prévision 5 ans humide ;
- Prévision 10 ans humide.

Après le 1^{er} juin, la cote piézométrique du piézomètre de référence du casier sert à définir les volumes prélevables pour l'année en cours.

Si le point de suivi du casier de gestion ne dispose pas d'une chronique suffisamment longue (inférieure à 15 ans), le casier est rattaché à un piézomètre de référence ayant un historique de suivi supérieur à 15 ans et la cote piézométrique de ce point est utilisée pour la définition du volume prélevable de l'année en cours.

En cliquant sur un casier de gestion, une fenêtre pop-up apparaît. Son titre informe du numéro du casier sélectionné et le nom qui lui a été associé. Le graphique présenté rappelle les volumes prélevables autorisés ou déclarés historiquement (en nuances de bleu) et les volumes de sauvegarde, d'équilibre et critique pour l'année en cours. L'utilisateur peut choisir plusieurs niveaux de zoom temporel : 2, 5, 7, 10 ans ou historique complet. Il peut également choisir d'afficher ces informations sous forme de tableau et peut, dans ce cas, télécharger les données. Enfin, il peut afficher la chronique piézométrique du piézomètre de référence associé au casier en cliquant sur le bouton dédié. Une seconde fenêtre pop-up apparaît alors, presque identique à celle présentée sur l'ILLUSTRATION 34. La différence réside dans l'affichage des 3 niveaux objectifs : de sauvegarde, d'équilibre et critique, niveaux qui ont été utilisés pour la définition des volumes prélevables de même nom. Cette configuration est reprise sur l'illustration 39.

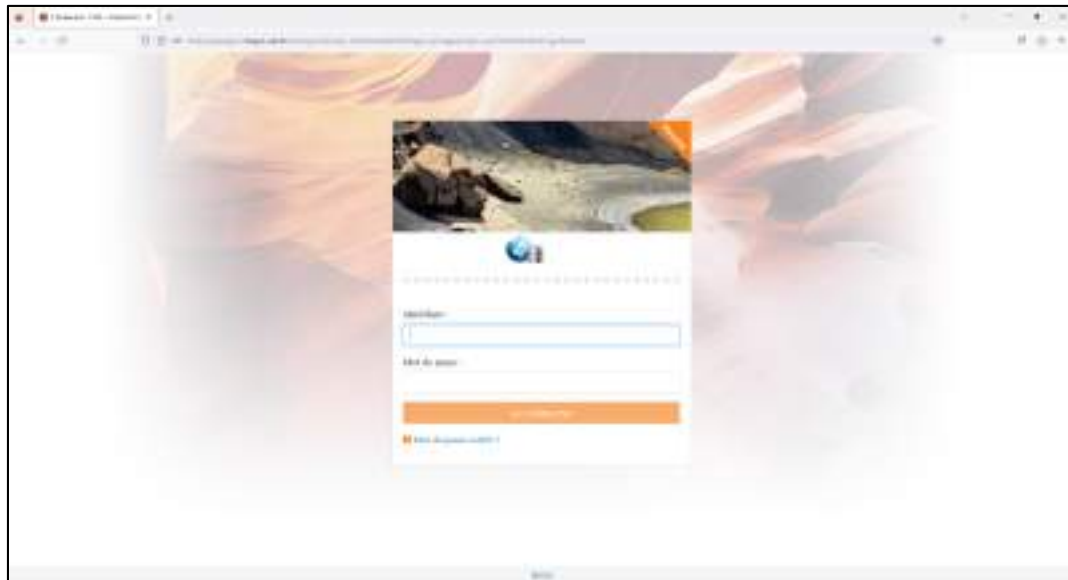


Illustration 36 – Page d'authentification

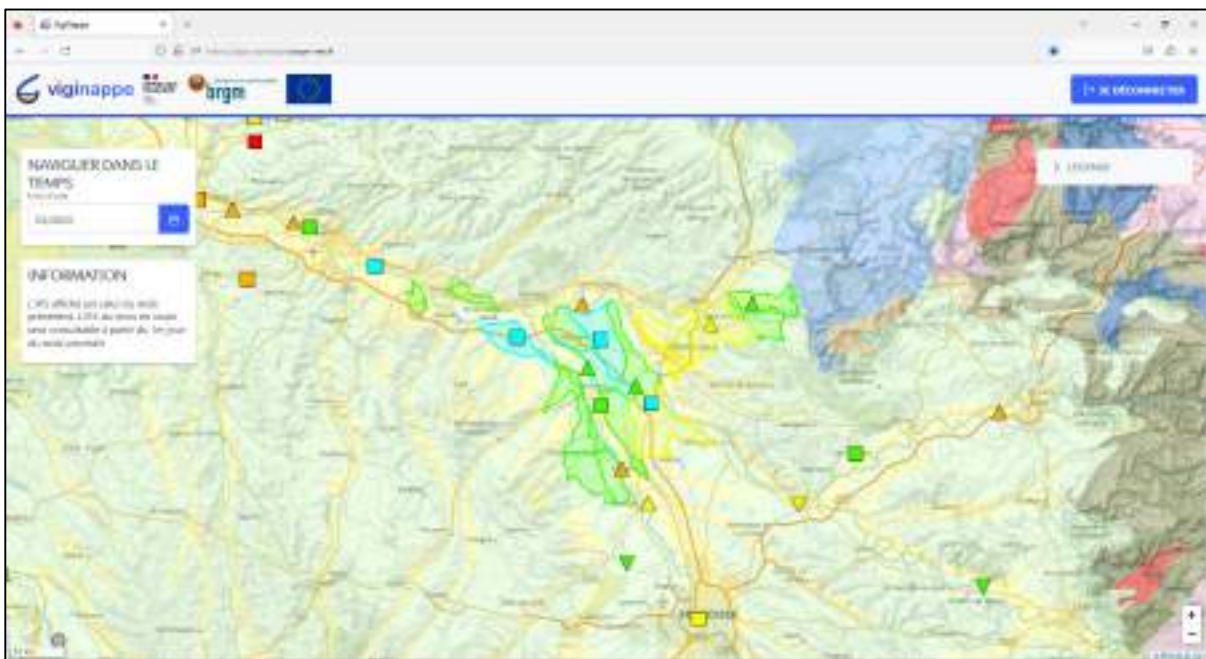


Illustration 37 – Page du site authentifié

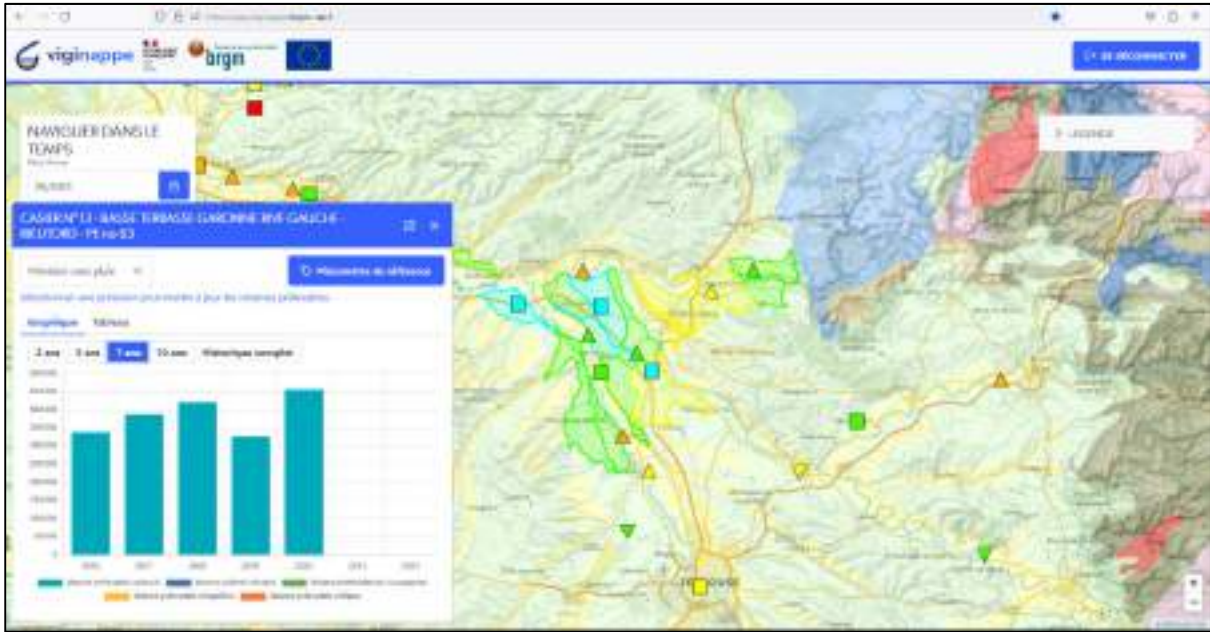


Illustration 38 – Graphique des volumes prélevables

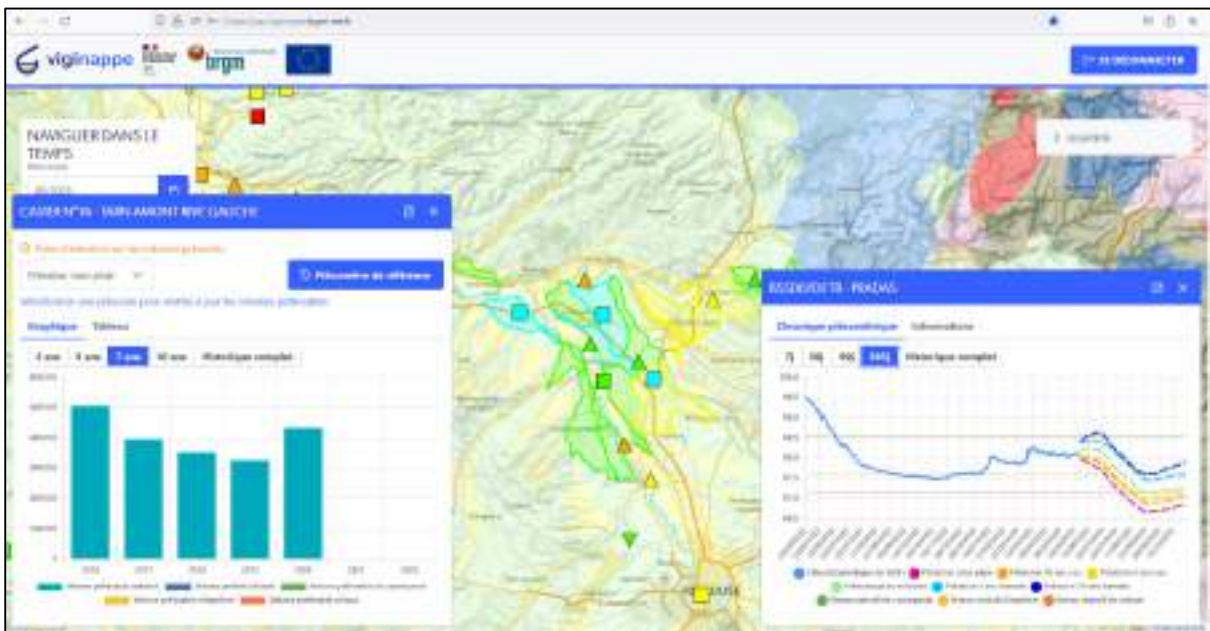


Illustration 39 – Graphique des volumes prélevables et du piézomètre de référence associé au casier

5. Conclusions

L'évaluation des volumes utilisables à partir des niveaux observables ou observés sur 10 jours glissants autour du 1^{er} juin permet aux gestionnaires de l'eau de disposer de données utilisables pour la définition des volumes prélevables et ainsi d'anticiper et si possible éviter des restrictions

d'usage en cours de période d'irrigation. Cette anticipation peut s'avérer également bénéfique lors de la définition des plans d'assolement pour l'année à venir.

L'application VigiNappe a été développée d'une part de visualiser l'état de la ressource en eau souterraine libre sur les points de suivi disposant d'un historique supérieur à 15 ans grâce à l'affichage de l'IPS du mois en cours ou d'un mois passé choisi par l'utilisateur. L'utilisateur peut également visualiser les prévisions d'évolution de la cote piézométrique sur les 6 prochains mois sur les piézomètres disponibles sur l'application MétéEAU Nappes.

Cette application permet d'autre part, moyennant une connexion, de visualiser les volumes prélevables sur l'année en cours. Ces volumes prélevables sont définis à partir de l'analyse des chroniques piézométriques sur les piézomètres de référence, de la prévision de la cote piézométrique sur la période d'étiage et du comportement de la nappe alluviale grâce au modèle hydrodynamique en 3 dimensions disponible sur la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne.

Cette plateforme a vocation à être étendue sur son emprise géographique, tant en accès « grand public » qu'en accès authentifié, mais aussi dans ses fonctionnalités. Ces évolutions sont soumises à l'obtention de financements complémentaires qui permettront ces améliorations.

6. Bibliographie

Bardeau, M. ; Le Cointe, P. (2016) - Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne. Rapport final. BRGM/RP-65583-FR, 358 p., 26 ann.

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

Laurencelle M., Givodan E., Aunay B. (2021) – Développement de l'outil numérique « APSIR - Analyse des Séries Piézométriques Influencées à La Réunion » - Approche exploratoire, méthodologie et notice de l'outil. Rapport final. BRGM/RP-71097-FR, 121 p., 3 annexes. URL : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-71097-FR> .

Ruf T. (1999) - The Lomb-Scargle Periodogram in Biological Rhythm Research: Analysis of Incomplete and Unequally Spaced Time-Series. Biological Rhythm Research, 30, 178-201.



**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



Géosciences pour une Terre durable

brgm