

Document à accès immédiat

# Caractérisation de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines en région Nouvelle-Aquitaine

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020  
Module 3.3 - Année 3

Rapport final

**BRGM/RP-71478-FR**

5 décembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Manceau JC., Wulleumier A., Compère F. avec la collaboration de Branellec M., Caperan F., Kerkouche AN. et Thinon-Larminach M.

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : D. Allier	Nom : N. Pedron
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur régional du BRGM Nouvelle-Aquitaine
Date : 20/01/2022	Date : 27/06/2022
Signature : 	Signature :  Le Directeur Régional du BRGM Nouvelle-Aquitaine Nicolas PEDRON

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

Ce rapport a été réalisé en partenariat avec :

**Mots clés :** Hydrogéologie, Changement climatique, Nouvelle-Aquitaine, Analyse de séries temporelles, Jaugeages, Suivi de sources.

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

**Manceau JC., Wulleumier A., Compère F. avec la collaboration de Branellec M., Caperan F., Kerkouche AN. et Thinon-Larminach M. (2022)** - Caractérisation de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines en région Nouvelle-Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-71478-FR, 90 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines 2015-2020, signée entre la Région Nouvelle-Aquitaine, l'Etat et le BRGM, avec le concours financier des Départements des Pyrénées-Atlantiques et des Landes, de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB). Ce rapport concerne plus particulièrement l'année 3 du module 3.3 de la Convention, intitulée « caractérisation de l'impact du Changement Climatique sur les eaux souterraines ».

Depuis les premiers travaux effectués dans le cadre du module, la démarche adoptée est d'évaluer les modifications observées sur les eaux souterraines depuis le début des historiques disponibles, ces modifications pouvant être dues à une variabilité climatique temporaire ou bien à des changements (climatiques ou plus globaux), ayant cours sur un temps plus long. Ainsi, lors de la première année de ce module, l'analyse des données des bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron a montré l'existence d'une modification très nette et importante de l'hydrologie. Au cours de la deuxième année du module, le suivi des bassins versants des gaves a été poursuivi et une analyse sur un nouveau territoire, présentant des tensions quantitatives avérées (le Midour), a été menée : une évolution des pluies efficaces à la baisse, au cours des 60 dernières années, a été mise en évidence.

Le premier objectif de la troisième année du module est d'élargir les analyses des séries temporelles, en lien avec les eaux souterraines, à différents bassins versants de la région Nouvelle-Aquitaine, aux caractéristiques géographiques, géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et climatiques différentes. Au final, 15 bassins versants ont été analysés avec le même objectif d'identification d'éventuels changements hydrogéologiques à partir des historiques disponibles :

1. le bassin versant du Chambon (Deux-Sèvres, 79)
2. le bassin versant du Clain à Vivonne (Charente, 16 ; Deux-Sèvres, 79 ; Vienne, 86)
3. le bassin versant du Lambon (Deux-Sèvres, 79)
4. le bassin versant de la Benaize à Jouac (Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
5. le bassin versant de la Vige (Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
6. le bassin versant de la Briance à Condat sur Vienne (Haute-Vienne, 87)
7. le bassin versant de la Vienne à Eymoutiers (Corrèze, 19 ; Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
8. le bassin versant de la Lizonne (Charente, 16 ; Dordogne, 24)
9. le bassin versant de l'Engranne (Gironde, 33)
10. le bassin versant de la Lemance (Dordogne, 24 ; Lot-et-Garonne, 47)
11. le bassin versant de la Petite Leyre (Gironde, 33 ; Landes, 40)
12. le bassin versant du Midour (Landes, 40 ; Gers, 32)
13. le bassin versant du Gave de Pau (Pyrénées-Atlantiques, 64 ; Hautes-Pyrénées, 65)
14. le bassin versant du Gave d'Oloron, partie amont (Pyrénées-Atlantiques, 64)
15. le bassin versant du Gave d'Oloron, partie aval (Pyrénées-Atlantiques, 64)

L'historique piézométrique étant souvent limité en durée et sujet, parfois, à des problèmes de représentativité, l'analyse de l'historique de variables additionnelles, participant au cycle de l'eau et apportant une information complémentaire sur les eaux souterraines, est alors indispensable. Ainsi les données climatiques et hydrologiques ont également été étudiées et des bilans

hydroclimatiques réalisés pour chacun des bassins (méthode de l'écoulement de base et modélisation globale) ont été interprétés sous l'angle de l'évolution au cours du temps de la contribution des eaux souterraines aux débits des cours d'eau et de la recharge des nappes d'eau souterraine.

Une approche homogène a été construite de sorte 1) à produire des résultats comparables entre bassins versants et 2) à pouvoir être ré-appliquée soit à d'autres bassins soit, dans le futur, à un nouvel historique. Au final, les changements observés depuis le début des différents historiques ont été détaillés pour chacun des bassins ciblés, puis une synthèse à l'échelle régionale a permis de mettre en évidence des homogénéités ou des hétérogénéités de comportement. Ainsi, les principales observations faites à l'échelle de la région sont les suivantes :

1. La disparité de la durée des historiques associés aux différentes variables au sein d'un bassin versant et pour une même variable entre bassins versants est une limite importante à l'exercice. Des inversions de tendance peuvent même être observées (tendance à la hausse détectée sur une période courte, alors que sur une période plus longue, la tendance est à la baisse).
2. Les évolutions des précipitations efficaces cumulées annuelles entre 1959 et 2020 sont toutes à la baisse, pour l'historique disponible, et on observe une sur-représentation des événements extrêmes bas avec un cumul annuel très déficitaire (3 à 4 événements à fréquence de 10 %) et une sous-représentation des événements extrêmes hauts au cours de la période 2000-2020. À noter que ces observations sont à nuancer pour les bassins des gaves de Pau et d'Oloron pour lesquels une certaine stabilité semble se produire.
3. Si on ne considère que les historiques les plus longs (avec enregistrement depuis 1970 au moins), tous les débits caractéristiques d'étiage (dont le QMNA) sont à la baisse ; une hétérogénéité spatiale semble se dessiner avec une baisse significative (au seuil de 5 %) des QMNA au sud de la région et moins significative au nord.
4. Peu d'information a pu être retirée de la comparaison des évolutions piézométriques de par l'historique court de la plupart des chroniques, associé aux influences anthropiques directes et à des caractéristiques locales (e.g. écrêtement par exemple). Ces observations justifient également le travail proposé dans le cadre du présent rapport, c'est-à-dire l'utilisation, en compléments des chroniques piézométriques, d'indicateurs certes indirects mais plus robustes (plus longs, moins soumis à des influences directes) pour juger de l'évolution passée des écoulements souterrains. Une remarque peut toutefois être faite globalement, pour la région Nouvelle-Aquitaine, à partir de l'ensemble des chroniques piézométriques : il ne semble pas y avoir de décalage dans le temps du mois de survenue de l'étiage.
5. Pour les chroniques de débits aux historiques antérieurs aux années 1970, on retrouve (comme pour les débits caractéristiques d'étiage ou pour les pluies efficaces) des tendances à la baisse de l'écoulement de base annuel. Elles sont très souvent significatives au seuil de 5 %.
6. Aucun changement net / clair du BFI (*Base Flow Index*), qui peut traduire le ratio "infiltration / ruissellement", n'est mis en évidence au cours de cette même période. Cela semble traduire une certaine stabilité du régime des infiltrations (et des pluies efficaces) à l'échelle de la région, malgré les différences de contextes et logiquement de valeur moyenne de BFI entre bassins.
7. Les chroniques de recharge estimée par modélisation globale montrent toutes une tendance à la baisse pour la période 1959-2020. Il se dégage même une homogénéité de comportement entre les bassins du sud de la région, hors bassins des gaves (Engranne, Lémance, Petite Leyre et Midour), pour lesquels la baisse est significative (au seuil de 5 %),

alors qu'ailleurs, plus au nord, une baisse semble se produire également mais elle est souvent non significative.

8. Pour les bassins des gaves, concernés par les précipitations neigeuses, les modélisations globales traduisent toutes une hausse de la fonte des neiges, associée à une baisse significative du stock de neige annuel, restant en fin d'année civile, pour la période 1959-2020.

Ainsi, ces travaux montrent, globalement, une évolution à la baisse des ressources en eau souterraine (baisse de la pluie efficace, du débit de base et de la recharge modélisée) dans les bassins versants étudiés et pour la période 1959-2020, quand l'historique était disponible, avec une significativité des tendances souvent plus importante pour les bassins situés au sud de la région (hors bassins de montagne). D'autres travaux, moins régionaux et plus locaux, pourraient permettre de quantifier plus précisément ces baisses (par exemple en étudiant localement les bilans Entrées/Sorties, en prenant en compte les prélèvements de manière précise) et d'étudier d'autres changements (par exemple le régime des précipitations, au pas de temps horaire).

Enfin, au cours de cette troisième année du module 3.3, l'objectif était également de poursuivre le suivi du débit et de la physico-chimie des sources, engagé depuis 2016, dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron, et de dresser un bilan des données acquises. Six campagnes de jaugeages ont été conduites entre février et décembre 2021, dans les 14 sources suivies. Malgré deux interruptions de suivi pendant la période 2016-2021, l'ensemble des mesures effectuées apporte des éléments de connaissance sur l'évolution des débits et de la physico-chimie de ces sources émergeant dans des environnements distincts du bassin versant des gaves de Pau et d'Oloron. L'aménagement et les équipements mis en place dans la source Riou, à Bilhères, ont été rétrocédés à la commune. La rétrocession des équipements de la source Gourgouch, à Louvie-Juzon, est en cours de discussion à la date de rédaction de ce rapport.



## Sommaire

1. Introduction .....	9
2. Analyse des séries temporelles - Présentation de l'étude .....	11
2.1. Approche suivie.....	11
2.2. Méthodes et fiches proposées.....	14
2.3. Liste des bassins versants étudiés .....	29
3. Analyse des séries temporelles - Résultats individuels par bassin versant .....	33
3.1. Bassin versant du Chambon, en amont du barrage de la Touche Poupard .....	34
3.2. Bassin versant du Clain à Vivonne .....	36
3.3. Bassin versant du Lambon .....	38
3.4. Bassin versant de la Benaize à Jouac .....	40
3.5. Bassin versant de la Vige à Saint-Martin-Sainte-Catherine .....	42
3.6. Bassin versant de la Briance à Condat-sur-Vienne .....	44
3.7. Bassin versant de la Vienne à Eymoutiers .....	46
3.8. Bassin versant de la Lizonne.....	48
3.9. Bassin versant de l'Engranne.....	51
3.10. Bassin versant de la Lémance .....	54
3.11. Bassin versant de la Petite Leyre.....	57
3.12. Bassin versant du Midour .....	60
3.13. Bassin versant du Gave de Pau.....	63
3.14. Bassin versant du Gave d'Oloron - partie amont.....	66
3.15. Bassin versant du Gave d'Oloron - station aval .....	69
4. Analyse des séries temporelles - Synthèse à l'échelle régionale .....	73
4.1. Objectif du chapitre .....	73
4.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement (période 1959-2020).....	73
4.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitimétrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau (périodes hétérogènes) .....	74
4.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine (périodes hétérogènes) .....	75
4.5. Principaux constats, à partir des historiques et des modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine.....	75
5. Campagnes de jaugeages dans les Pyrénées-Atlantiques - Suivi du débit des deux sources équipées et bilan des données déjà acquises .....	77

5.1. Campagnes de jaugeages de 2021 .....	77
5.2. Suivis en continu effectués par des exploitants.....	79
5.3. Suivi en continu des sources de Gourgouch, à Louvie-Jouzon, et de Riou, à Bilhères	81
5.4. Bilan des suivis de 2016 à 2021 .....	81
5.5. Rétrocession des équipements et aménagements.....	85
6. Conclusion .....	87
7. Bibliographie .....	89

## Liste des illustrations

Illustration 1 - Approche proposée.....	13
Illustration 2 - Évolution, sur le long terme, de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement (exemple de fiche 1, avec le bassin versant de la Lizonne) .....	17
Illustration 3 - Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des débits (exemple de fiche 2, avec le bassin versant de la Lizonne) .....	20
Illustration 4 - Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine (exemple de fiche 3, avec le bassin versant de la Lizonne) .....	23
Illustration 5 - Corrélation Pluie efficace / Niveaux piézométriques (exemple de fiche 3bis avec le bassin versant de la Lizonne).....	23
Illustration 6 - Décomposition d'hydrogramme : estimation d'un écoulement de base et du BFI - Base Flow Index (exemple de fiche 4a, avec le bassin versant de la Lizonne).....	26
Illustration 7 - Résultats des modélisations globales avec GARDENIA (exemple de fiche 4b, avec le bassin versant de la Lizonne) .....	28
Illustration 8 - Contextes géologique, hydrogéologique, topographique et pluviométrique des bassins versants étudiés (la légende de la carte géologique est fournie en Annexe 1, et celle de la carte hydrogéologique en Annexe 2) .....	31
Illustration 9 - Sources suivies dans le cadre des campagnes de jaugeages ou par des exploitants .....	77
Illustration 10 - Volumes journaliers (m <sup>3</sup> /jr) écoulés à la source de Miédougé à Aste-Béon (source : Suez) .....	80
Illustration 11 - Débit journalier moyen de la source Loustau (Mouscle) à Montaut (source : SEAPAN) ..	80
Illustration 12 - Statistiques descriptives des jaugeages disponibles.....	82
Illustration 13 - Statistiques descriptives des mesures de température réalisées lors des campagnes ....	84
Illustration 14 - Statistiques descriptives des mesures de pH réalisées lors des campagnes .....	84
Illustration 15 - Statistiques descriptives des mesures de conductivité électrique réalisées lors des campagnes.....	85

## Liste des annexes

Les annexes sont consignées dans un document joint à ce présent rapport.

# 1. Introduction

Ce rapport présente les résultats du module 3.3 du programme de recherche et de développement pour la gestion des eaux souterraines en Nouvelle-Aquitaine, intitulé « caractérisation de l'impact du Changement Climatique sur les eaux souterraines ». On rappelle que, dès le début des travaux effectués dans le cadre du module, la démarche adoptée est d'évaluer les modifications observées sur les eaux souterraines depuis le début des historiques disponibles, ces modifications pouvant être dues à une variabilité climatique temporaire ou bien à des changements (climatiques ou plus globaux) ayant cours sur un temps plus long.

Dans le cadre de la première année de ce module, l'étude a porté sur les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron. L'analyse des données de ces secteurs a montré l'existence d'une modification très nette et importante de l'hydrologie. Toutefois, la ressource en eau reste conséquente au regard des usages actuels. En concertation avec les membres du comité de suivi, il a ainsi été convenu de s'orienter vers un territoire présentant des tensions quantitatives avérées : c'est le bassin versant du Midour qui a été retenu. En conséquence, au cours de la période 2018-2019 (année 2 du module), le suivi des bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron a été poursuivi et une synthèse concernant le bassin du Midour a été réalisée. Dans le cadre du travail réalisé dans ce dernier bassin versant, les travaux ont mis en évidence une évolution des pluies efficaces à la baisse au cours des 60 dernières années.

Le premier objectif pour la 3<sup>ème</sup> année de ce module est d'étendre les analyses, déjà conduites les années précédentes (gaves de Pau et Oloron, Midour) sur les séries temporelles du cycle de l'eau, à d'autres territoires et contextes de la région Nouvelle-Aquitaine (socle du Limousin et des Deux-Sèvres ; calcaires plus ou moins karstifiés ou non de la Dordogne, des Charentes, des Deux-Sèvres et de la Vienne ; sables de la Gironde et des Landes, etc.) afin d'apporter, à cette échelle, un regard sur les évolutions hydrogéologiques enregistrées dans l'hydrodynamique des bassins versants. Le second objectif est la poursuite du suivi du débit et de la physico-chimie des sources, engagé depuis 2016, dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron et de dresser un bilan des données acquises.



## 2. Analyse des séries temporelles - Présentation de l'étude

### 2.1. APPROCHE SUIVIE

L'approche menée ici s'inspire du retour d'expérience des travaux déjà menés dans le cadre de ce module, avec le même objectif d'identification d'éventuels changements hydrogéologiques à partir des historiques disponibles. A cette fin, l'historique piézométrique peut sembler, à première vue, être la variable idéale : il est toutefois souvent limité en durée et la piézométrie peut, dans certains contextes (prélèvements directs, proximité trop importante du réseau hydrographique), ne pas être représentative de l'évolution générale que l'on cherche justement à caractériser ici. L'analyse de l'historique de variables additionnelles participant au cycle de l'eau et apportant une information complémentaire sur les eaux souterraines est alors indispensable.

Toutefois, l'approche suivie les années précédentes, spécifiques à des bassins versants donnés, doit désormais être appliquée à une quinzaine de bassins versants et ainsi permettre une synthèse à l'échelle régionale. Cette vaste application nécessite alors l'implémentation d'une nouvelle approche plus homogène.

Cette nouvelle approche est constituée de 2 étapes, présentées à l'illustration 1, avec au préalable la collecte de données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques qui, dans l'idéal, doivent être extraites des mêmes bases de données, pour assurer une homogénéité de traitement entre bassins. Ainsi :

- les **chroniques climatiques** sont issues de la base de données SAFRAN<sup>1</sup>, ce qui permet, quel que soit le secteur, de bénéficier des variables pluie / ETP (EvapoTranspiration Potentielle) / Température, tout au long d'une période commune du 01<sup>er</sup>/08/1958 au 31/03/2020. Les données des stations, issues de la bibliothèque de MétéoFrance, peuvent également être utilisées ;
- les **chroniques hydrologiques** sont extraites de l'HydroPortail : <http://www.hydro.eaufrance.fr/> ;
- les **chroniques piézométriques** sont extraites d'ADES : <https://ades.eaufrance.fr/>.

La **première étape** consiste à analyser, indépendamment, les différentes chroniques du cycle de l'eau et notamment à identifier d'éventuelles tendances ou autres changements, si les chroniques le permettent. Ces analyses porteront sur :

- les **chroniques climatiques** dans l'optique d'analyser l'évolution sur le long terme de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement.

---

<sup>1</sup> SAFRAN est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface du sol. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques, pour produire les paramètres horaires 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). Le système d'analyse Safran a été développé à l'origine par le Centre d'études de la neige (Durand et al., 1993) pour la prévision des risques d'avalanches. L'acronyme Safran signifie : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements A la Neige. Il a ensuite été étendu à l'ensemble de la France métropolitaine (Le Moigne, 2002 ; Vidal et al., 2010).

*NB.* L'objectif de cette étude est hydrogéologique et elle se veut donc focalisée sur les eaux souterraines. L'analyse complète des chroniques climatiques et des changements est donc hors de l'action de cette étude.

- les **chroniques hydrologiques**, avec notamment l'évaluation de l'évolution à long terme des valeurs moyennes et extrêmes. Des éléments sur une corrélation éventuelle Pluie efficace / Débits seront fournis.

*NB.* La corrélation entre débits et niveaux piézométriques n'est pas forcément informative puisqu'ils dépendent tous deux du forçage météorologique. Néanmoins les débits caractéristiques d'étiage (lorsque les précipitations efficaces sont nulles ou très faibles) peuvent informer sur les débits d'eaux souterraines, drainés par le cours d'eau, et ainsi constituer un indicateur d'état des eaux souterraines.

- les **chroniques piézométriques**, avec notamment l'analyse de l'inertie des niveaux piézométriques et de l'évolution à long terme de ces derniers (niveaux moyens et extrêmes). Une analyse sur les recharges apparentes annuelles sera également conduite. Des éléments sur la corrélation Pluie efficace / Niveaux seront fournis.

À noter que les analyses corrélatoires (Pluies efficace / Débit et Pluie efficace / Niveau) peuvent être menées avec différents buts. Ici, l'objectif principal est de voir si le « forçage principal » derrière les chroniques hydrologiques/hydrogéologiques est bien climatique ou bien si une influence anthropique importante peut être décelée et éventuellement expliquer les tendances/changements observés.

La **deuxième étape** consiste à réaliser un **bilan hydroclimatique avec comme objectif principal l'estimation de l'évolution de la recharge des nappes**, tant concernant l'évolution de la proportion des pluies efficaces qui s'infiltrent jusqu'à la nappe, que concernant l'évolution de la valeur estimée de cette infiltration. Les résultats de modèles globaux, avec le logiciel GARDENIA<sup>2</sup>, seront utilisés pour estimer ces bilans. Une méthode de décomposition d'hydrogramme est également utilisée pour estimer, à partir des chroniques de débit des cours d'eau, l'évolution de l'écoulement de base et du BFI, au cours du temps.

---

<sup>2</sup> <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>

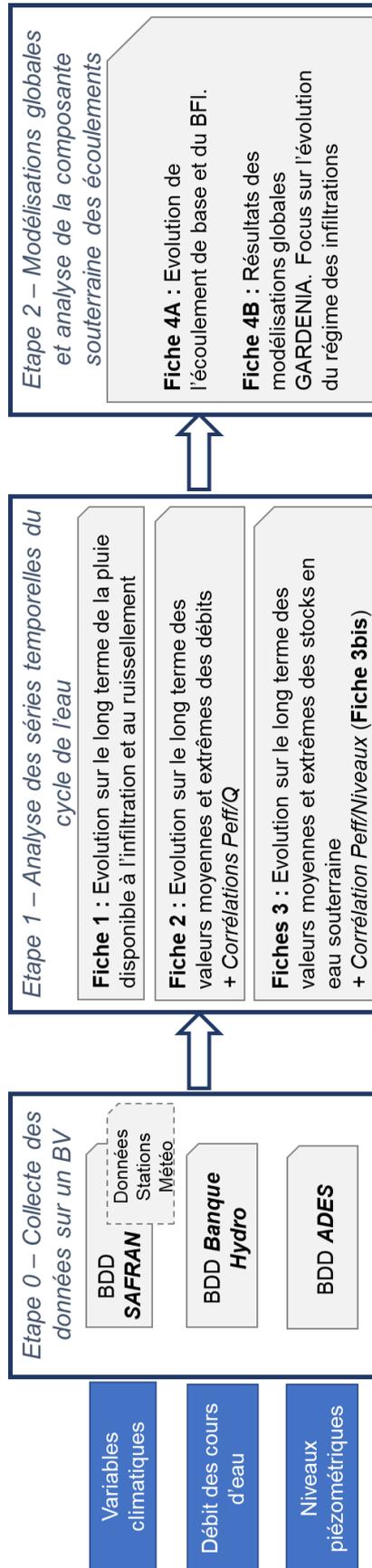


Illustration 1 - Approche proposée

## 2.2. METHODES ET FICHES PROPOSEES

Les résultats de la mise en œuvre de l'approche proposée sont fournis sous forme de fiches synthétiques, comme indiqué à l'illustration 1. Dans la suite de cette section, les fiches et les méthodes sont décrites.

### 2.2.1. Évaluation des changements significatifs au sein d'une chronique

L'objectif de l'étude étant une analyse des changements significatifs s'étant produits au cours de l'historique disponible, il est nécessaire d'explicitier comment identifier de tels changements. L'identification visuelle reste un élément indispensable de l'analyse, mais elle peut être combinée à la mise en œuvre de tests statistiques permettant d'objectiver l'impression visuelle.

Les deux tests statistiques proposés dans les fiches sont :

- le **test de Mann-Kendall** (Mann, 1945 ; Kendall, 1975). Il permet de tester la stationnarité d'une chronique (c'est-à-dire l'invariance temporelle), et donc de mettre en évidence une tendance à la hausse ou à la baisse d'une variable donnée. Ce test est sensible à l'autocorrélation et, en présence d'autocorrélation (par exemple pour les niveaux piézométriques d'une nappe inertielle), il est corrigé par la méthode dite d'Hamed et Rao (1998) (voir par exemple Renard (2006) pour plus d'information) ;
- le **test de Pettitt** (Pettitt, 1979). Il permet de tester l'existence d'une rupture dans la moyenne des observations d'une variable donnée (c'est-à-dire l'homogénéité). Ce test fournit également la date de la rupture détectée. Il est toutefois nécessaire de porter une attention particulière à la robustesse de ce test, en présence d'autocorrélation ou d'une tendance importante (voir par ex. Lubes-Niel et al., 1998).

Pour les différentes variables calculées dans les fiches décrites ci-dessous, si ces tests montrent un rejet de la stationnarité ou de l'homogénéité de la chronique au seuil de significativité de 5 %, alors les tendances (la droite de "tendance" est calculée par la méthode de Sen, 1968) ou bien les ruptures sont indiquées sur les chroniques en trait plein, respectivement de couleur rose et rouge. Si le test de Mann-Kendal n'est pas rejeté, la droite de Sen est quand même tracée, mais en pointillé.

Parfois les tendances ne peuvent être significatives au seuil arbitraire choisi ou bien revêtent un caractère non-linéaire qui rend difficile l'interprétation. En outre, l'analyse des tendances ne permet pas d'évaluer l'existence d'un changement de la variabilité du signal étudié. Pour aider à l'analyse, **les années extrêmes de l'historique disponible** sont indiquées dans les fiches. À noter que ces années extrêmes sont sélectionnées aux seuils de 10 % de dépassement pour les valeurs basses et 90 % de dépassement pour les valeurs hautes (i.e. seuils atteints 1 année sur 10, dans l'historique disponible).

**Enfin, il convient de veiller à l'importance de la période au cours de laquelle sont appliqués les tests statistiques ou bien sont mises en évidence les années extrêmes. Dans l'idéal, tous ces travaux devraient être effectués pour une seule et même période de référence, commune à toutes les variables et à tous les bassins versants.** Cependant, nous verrons dans la suite qu'une très grande hétérogénéité existe en matière d'historique disponible, rendant impossible ce choix d'une période de référence unique. Il s'agit donc d'être très vigilant, par la suite, lorsqu'une comparaison entre variables ou entre bassins sera menée.

Les différentes fiches de cette étude, éditées pour chaque bassin, sont présentées et annexées à ce rapport (Annexe 4). Le bassin versant de la Lizonne (Charente, 16 ; Dordogne, 24) a été arbitrairement choisi comme exemple dans la suite du rapport (de l'illustration 2 à l'illustration 7).

## 2.2.2. Fiche 1 : Évolution, sur le long terme, de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Cette fiche regroupe les éléments suivants :

- pour l'ETP :
  - la **chronique de l'ETP annuelle** ;
  - l'**évolution de la température moyenne annuelle** pour mettre en évidence un éventuel lien avec l'ETP ;
- pour les précipitations :
  - la **chronique des cumuls annuels de précipitations (année civile)** ;
  - l'**évolution du nombre de journées pluvieuses** (> 1 mm) par année et le **cumul des 10 journées les plus pluvieuses par année** utilisés comme indicateurs d'un éventuel changement dans le régime des pluies ;
- pour les précipitations efficaces (précipitations disponibles pour l'infiltration vers les eaux souterraines et le ruissellement vers les eaux de surface) :
  - la **chronique des précipitations efficaces annuelles** calculées à partir d'un bilan de type Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) : une valeur générique de 100 mm a été considérée pour la capacité de stockage maximale en eau du sol, l'idée n'étant pas forcément de caractériser précisément, en valeur absolue, la pluie efficace, mais plutôt les variations envisageables dans le temps ;
  - l'**évolution du nombre de journées contributives** en pluie efficace (> 1 mm) par année et le **cumul des 5 journées les plus contributives** utilisées comme indicateurs d'un éventuel changement dans le régime des pluies efficaces ;
  - l'**évolution saisonnière de la pluie efficace au cours du temps, selon 4 saisons prédéfinies** (1-janvier, février, mars ; 2-avril, mai, juin ; 3-juillet, août, septembre ; 4-octobre, novembre, décembre).

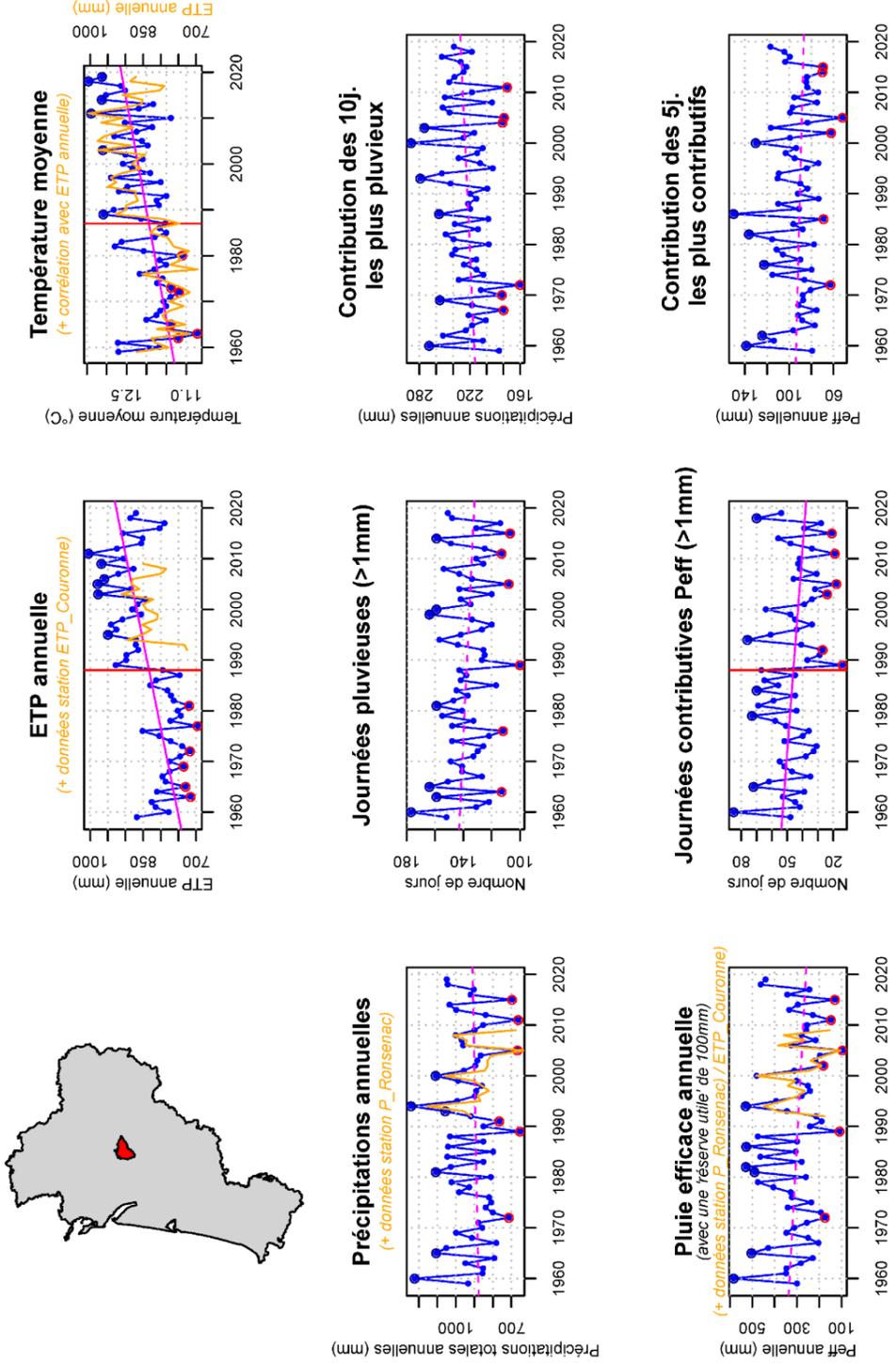
*NB1.* Tous ces éléments sont fournis à partir des données brutes SAFRAN : la moyenne des valeurs obtenues dans toutes les mailles SAFRAN, intersectées par le bassin versant d'intérêt, est calculée.

*NB2.* Il est possible de superposer des données des stations météorologiques sur les mêmes graphiques.

*NB3.* Au besoin, les précipitations liquides et neigeuses peuvent être distinguées pour évaluer leurs évolutions séparément.

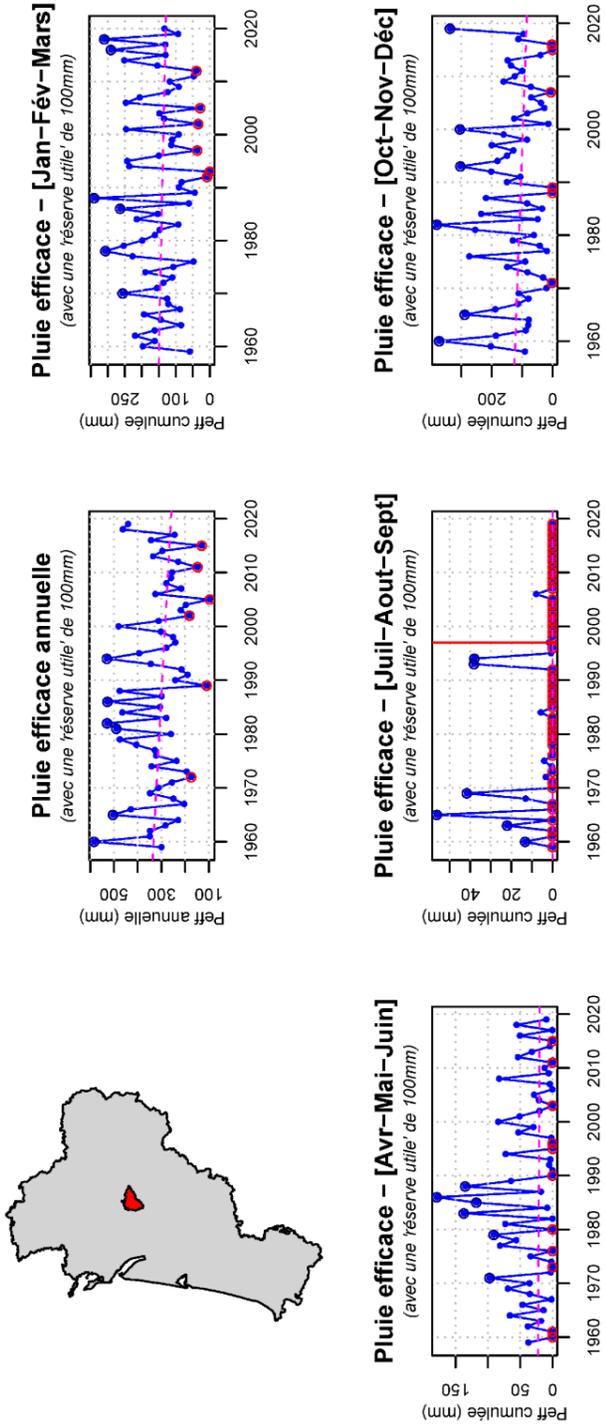


Analyse automatique des chroniques climatiques SAFRAN : BV de la Lizonne  
ETP, P, et Peff annuelles



NB. La droite de tendance de Sen est toujours affichée mais elle est en trait plein seulement si le test de Mann-Kendall (corrige ou non) est rejeté au seuil de 5%. Une droite verticale de rupture est affichée que si le test de Pettitt est rejeté au seuil de 5%. Les années extrêmes (fréquence de 10 et 90%) sont indiquées par des cercles rouges et bleus.

Analyse automatique des chroniques climatiques SAFRAN : BV de la Lizonne  
Evolution saisonnière de la pluie efficace



NB. La droite de tendance de Sen est toujours affichée mais elle est en trait plein seulement si le test de Mann-Kendall (corrige ou non) est rejeté au seuil de 5%. Une droite verticale de rupture est affichée que si le test de Pettitt est rejeté au seuil de 5%. Les années extrêmes (fréquence de 10 et 90%) sont indiquées par des cercles rouges et bleus.

Illustration 2 - Évolution, sur le long terme, de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement (exemple de fiche 1, avec le bassin versant de la Lizonne)



### 2.2.3. Fiche 2 : Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des débits

Cette fiche regroupe les éléments suivants :

- la **chronique brute des débits journaliers** ;
- la **chronique des débits moyens annuels** ;
- les **indicateurs de débits à l'étiage** :
  - o la chronique des **QMNA** (débit mensuel minimal sur une année civile) ;
  - o les chroniques des **VCN3**, **VCN10** et **VCN 30** (débit moyen minimal annuel calculé sur n [3, 10 et 30] jours consécutifs) ;
- les indicateurs de débits en période de crue : les chroniques des **VCX3**, **VCX10** et **VCN 30** (débit moyen maximal annuel calculé sur n [3, 10 et 30] jours consécutifs) ;
- les **corrélations Pluie efficace / Débit** :
  - o **à partir des valeurs annuelles** des chroniques ;
  - o **après moyenne mobile sur 5 années** : ce second graphique peut permettre de visualiser des corrélations éventuelles lorsqu'il existe une inertie des débits (cette inertie pouvant être liée à l'inertie de l'aquifère associé et à la taille du bassin versant).

*NB.* L'analyse de la corrélation est seulement visuelle. Pour des raisons de simplicité et de compréhension des fiches, le corrélogramme n'y est pas affiché.

*NB1.* Cette fiche peut théoriquement être produite pour toutes les chroniques débitométriques disponibles pour le bassin versant d'intérêt. Toutefois, étant donné le nombre de chroniques analysées par ailleurs pour chaque bassin versant et le nombre de bassins versants analysés, il a été décidé de se consacrer sur un, voire deux points de référence, dans le bassin versant (par exemple : chroniques longues, d'intérêt pour les problématiques du territoire, représentatives du bassin versant).

*NB2.* Les indicateurs de débit à l'étiage sont tous recalculés et ne proviennent pas de l'HydroPortail.

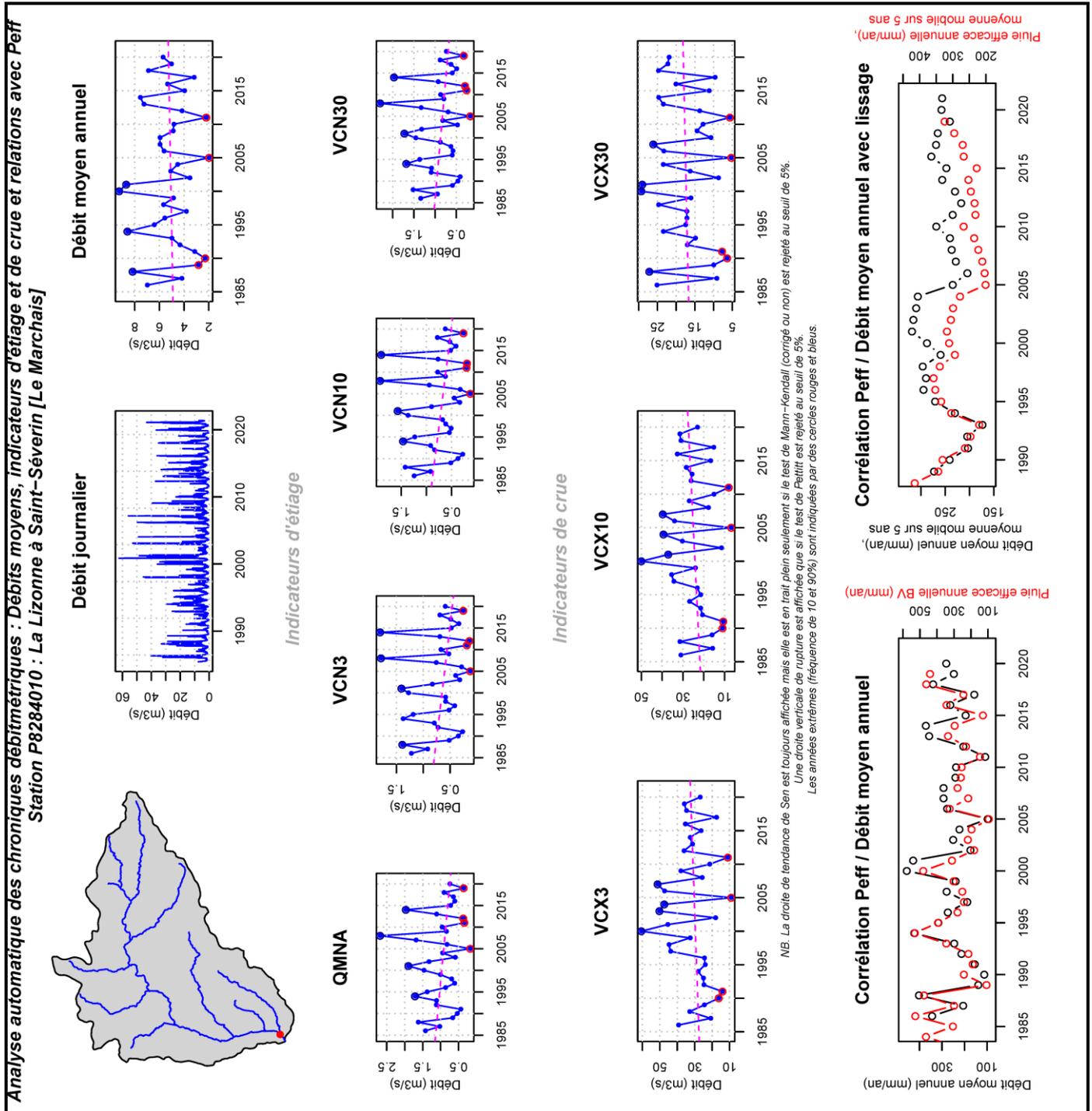


Illustration 3 - Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des débits (exemple de fiche 2, avec le bassin versant de la Lizonne)

#### 2.2.4. Fiche 3 : Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine

Cette fiche regroupe les indicateurs suivants permettant de caractériser la variation du stock en eau souterraine lors d'une année hydrologique :

- la **variation du stock lors de la phase dite de recharge des eaux souterraines** (hausse des niveaux observés entre le début et la fin de la recharge - recharge « apparente ») ;
- les **niveaux hauts** atteints après cette phase de recharge ;
- la durée de la **phase dite de vidange des eaux souterraines** ;

*NB.* Cette variable décrit en effet plus fidèlement la période d'absence d'apports que pourrait le faire la variation de stock elle-même puisque cette dernière dépend souvent des niveaux hauts atteints à la fin de la recharge précédente ;

- les **niveaux bas** atteints après cette phase de vidange ;
- les **niveaux moyens** observés durant l'année hydrologique.

Outre ces indicateurs, d'autres informations issues de l'analyse descriptive sont également fournies : le périodogramme, indiquant les cyclicités moyennes principales caractérisant le signal piézométrique sur la période d'observation, ainsi que les mois des hautes (points verts) et basses eaux (points rouges) pour chaque année hydrologique.

*NB1.* Ces cinq indicateurs sont tous reliés à une année hydrologique « réelle », qui peut être différente pour chaque piézomètre. Ce terme d'année hydrologique « réelle » est utilisé ici en regard de la dynamique des eaux souterraines (année hydrogéologique en est donc un synonyme). L'année hydrologique réelle commence une fois les basses eaux atteintes ; elle est considérée comme constituée d'une phase de recharge permettant l'atteinte d'un niveau piézométrique maximum, associée à cette année hydrologique, puis d'une phase de vidange, permettant l'atteinte d'un niveau piézométrique minimum associé à cette année hydrologique.

*NB2.* Cette fiche peut théoriquement être produite pour toutes les chroniques piézométriques disponibles dans le bassin versant d'intérêt. Toutefois, étant donné le nombre de chroniques analysées par ailleurs pour chaque bassin versant et le nombre de bassins versants analysés, il a été décidé de se consacrer sur un voire deux points de référence dans le bassin versant (par exemple : chroniques longues, d'intérêt pour les problématiques du territoire, représentative du fonctionnement des eaux souterraines du bassin versant et ne montrant pas d'influence directe des prélèvements). En particulier, dans la situation où plusieurs systèmes aquifères participent à l'hydrosystème associé au bassin versant d'intérêt, l'analyse de points de référence associés à ces différents systèmes sont nécessaires : les fiches descriptives mentionnent l'entité (ou les entités) BDLISA<sup>3</sup> associé(es) aux points d'eau. Cette fiche n'a pas pu être produite pour le bassin versant du Chambon, au sein duquel aucun suivi piézométrique n'est disponible.

*NB3.* Les fiches sont produites automatiquement à partir des données ADES. Il est néanmoins possible de modifier ces chroniques si des mesures sont jugées invalides par l'utilisateur.

---

<sup>3</sup> La BDLISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) est un référentiel cartographique du Système d'Information sur l'Eau. Cette base de donnée classe le sous-sol en entités hydrogéologiques qui sont décrites selon différentes propriétés : aquifère ou imperméable, écoulements libres ou captifs, milieu poreux, fracturé, karstique... (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>)

### 2.2.5. Fiche 3bis : Corrélation Pluie efficace / Niveaux piézométriques

La réponse piézométrique au forçage météorologique est un élément important pour mieux comprendre quel serait l'impact d'un changement dans les chroniques climatiques sur les eaux souterraines. Toutefois, la superposition voire la corrélation des chroniques pluviométrique et piézométrique présente quelques difficultés de mise en œuvre car :

- seule la partie infiltrée de la pluie peut être corrélée avec l'élévation du niveau de la nappe ;
- les effets de la recharge sur les niveaux piézométriques au droit d'un ouvrage donné seront très différents selon le type de nappe considéré (réaction importante ou sensibilité faible, réaction rapide ou tamponnée...).

Pour pallier ces difficultés sans recourir à une modélisation (globale ou autre) pluies-niveaux, un Indice de Sensibilité des eaux souterraines aux Pluies (ISP) est en cours de développement. Il a été initié par le BRGM dans le cadre d'une étude sur les indicateurs "sécheresse" dans le Grand Est (Manceau et al., 2020).

Cet indice simple est construit à partir de l'analyse croisée des chroniques de pluie efficace (la pluie infiltrée n'étant pas connue, la pluie efficace est utilisée par défaut) et des niveaux piézométriques. L'idée sous-jacente est la suivante : à « une intensité de pluie efficace moyenne » correspond un équilibre de niveau de la nappe. Une pluie supérieure à cette pluie moyenne entraînera une hausse des niveaux et inversement. L'ISP est donc le cumul des écarts à la « pluie moyenne ». Cette « intensité de pluie efficace moyenne » est calculée sur une « période de régulation » plus ou moins longue qu'il s'agit d'optimiser : la période de régulation la plus adaptée à la dynamique d'une nappe donnée sera celle permettant d'aboutir aux meilleures corrélations.

**La fiche proposée montre donc l'ISP aboutissant à la meilleure corrélation possible en utilisant la pluie efficace moyenne du bassin versant** (attention, c'est une hypothèse forte, la spatialisation de la recharge de nappe n'est généralement pas bien connue).

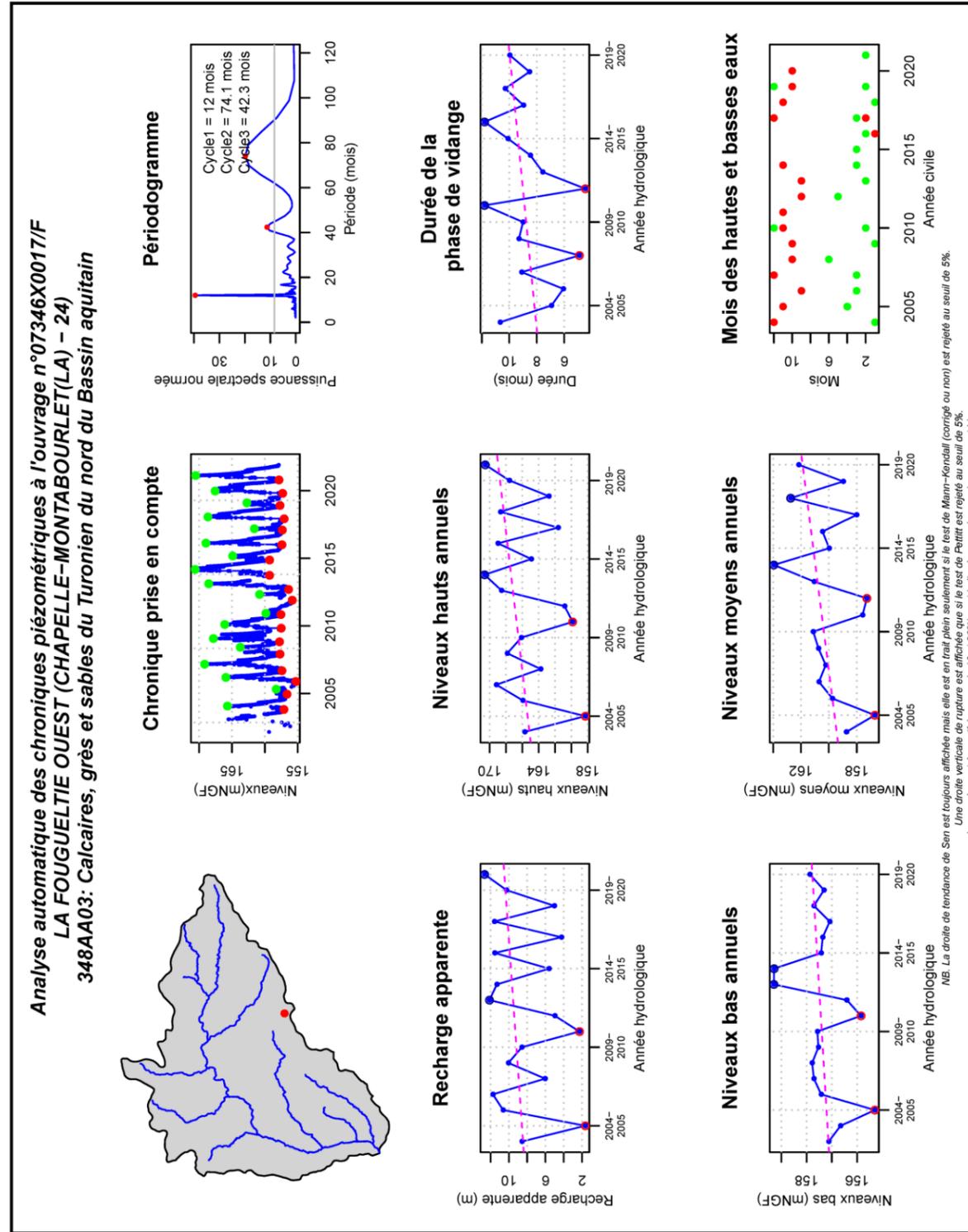


Illustration 4 - Évolution, sur le long terme, des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine (exemple de fiche 3, avec le bassin versant de la Lizonne)

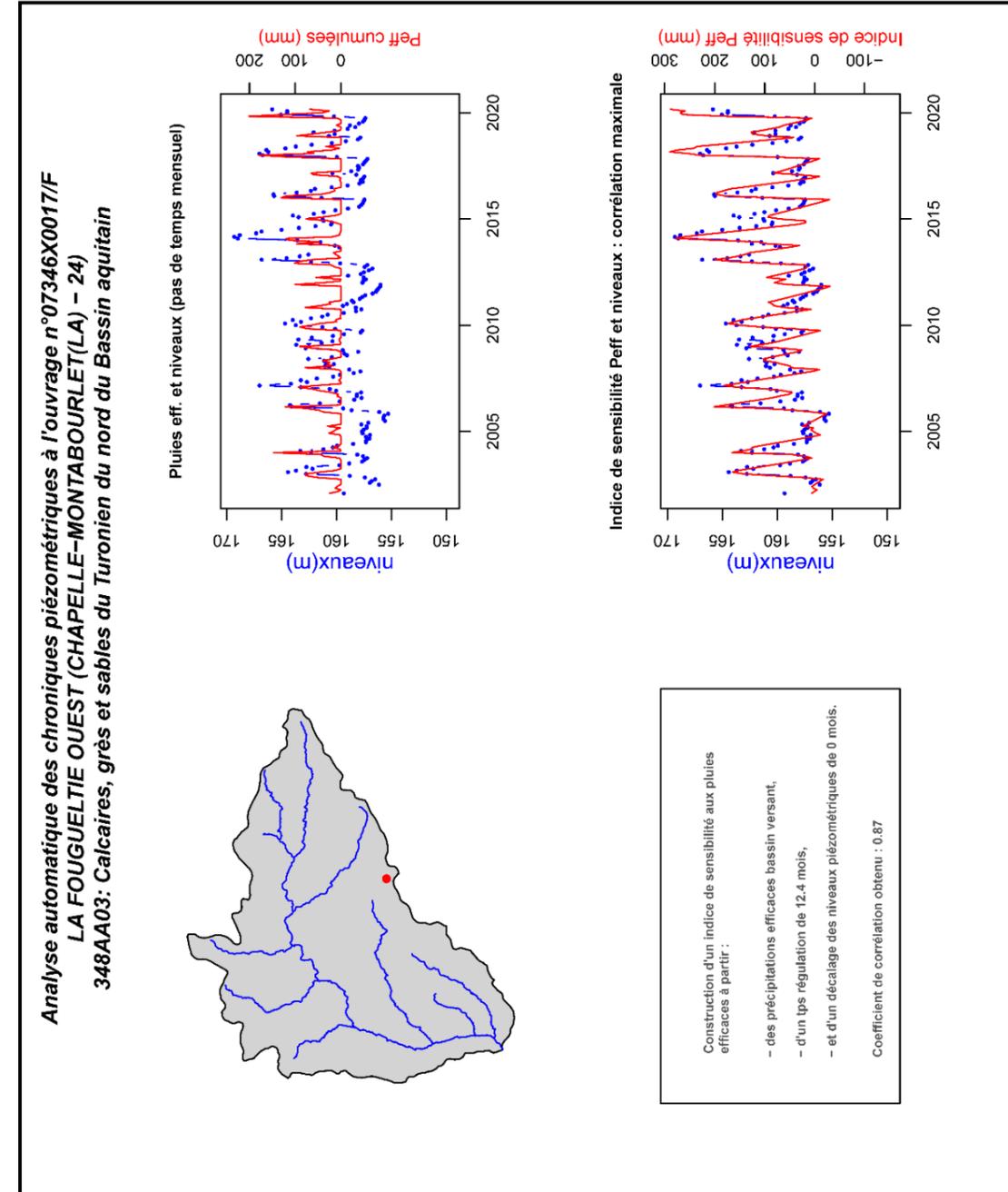


Illustration 5 - Corrélation Pluie efficace / Niveaux piézométriques (exemple de fiche 3bis avec le bassin versant de la Lizonne)



## 2.2.6. Fiches 4 : Bilan hydroclimatique avec un ciblage sur l'évolution de la recharge des nappes

Ces fiches renseignent sur les résultats obtenus à partir de différents outils disponibles permettant de réaliser, de façon plus ou moins sophistiquée, un bilan hydroclimatique permettant une estimation, sous hypothèse, de la recharge des eaux souterraines.

### a) Fiche 4a - Décomposition d'hydrogramme : estimation d'un écoulement de base et du BFI

La première approche utilisée consiste à estimer, à partir de la seule chronique de débits, la proportion du débit provenant de la nappe d'eau souterraine connectée au cours d'eau (c'est l'écoulement de base, ou *base flow*). Le *Base Flow Index* (BFI) est le rapport entre le débit de base d'un cours d'eau et le débit total.

L'écoulement de base est assimilable à la recharge sous certaines conditions :

- Les lignes de crêtes coïncident avec celle d'un bassin versant de surface ;
- Il n'y a pas de relation avec des nappes sous-jacentes ;
- La nappe est connectée avec un cours d'eau uniquement drainant ;
- La nappe n'est pas sollicitée par l'évapotranspiration ;
- Les prélèvements sont négligeables ;
- On considère une période assez longue de sorte que la variation de stock soit négligeable.

A noter qu'il n'est pas rare que ces conditions ne soient pas respectées : les résultats de cette approche doivent donc être pris avec précaution.

Si l'écoulement de base peut être assimilable à la recharge sous ces conditions, le BFI peut être un indicateur du ratio d'infiltration de la pluie efficace. Une évolution de ce paramètre pourrait être le signe d'un changement des conditions d'infiltration et de ruissellement au cours du temps (dû par exemple à un éventuel changement du régime des précipitations efficaces, de modifications de la capacité d'infiltration des sols, etc.).

Concernant le dernier point, les fiches présentent les écoulements de base et BFI calculés sur 10 années, en plus de leurs calculs annuels, pour se rapprocher au plus près d'une situation où la variation de stock serait faible dans les bilans.

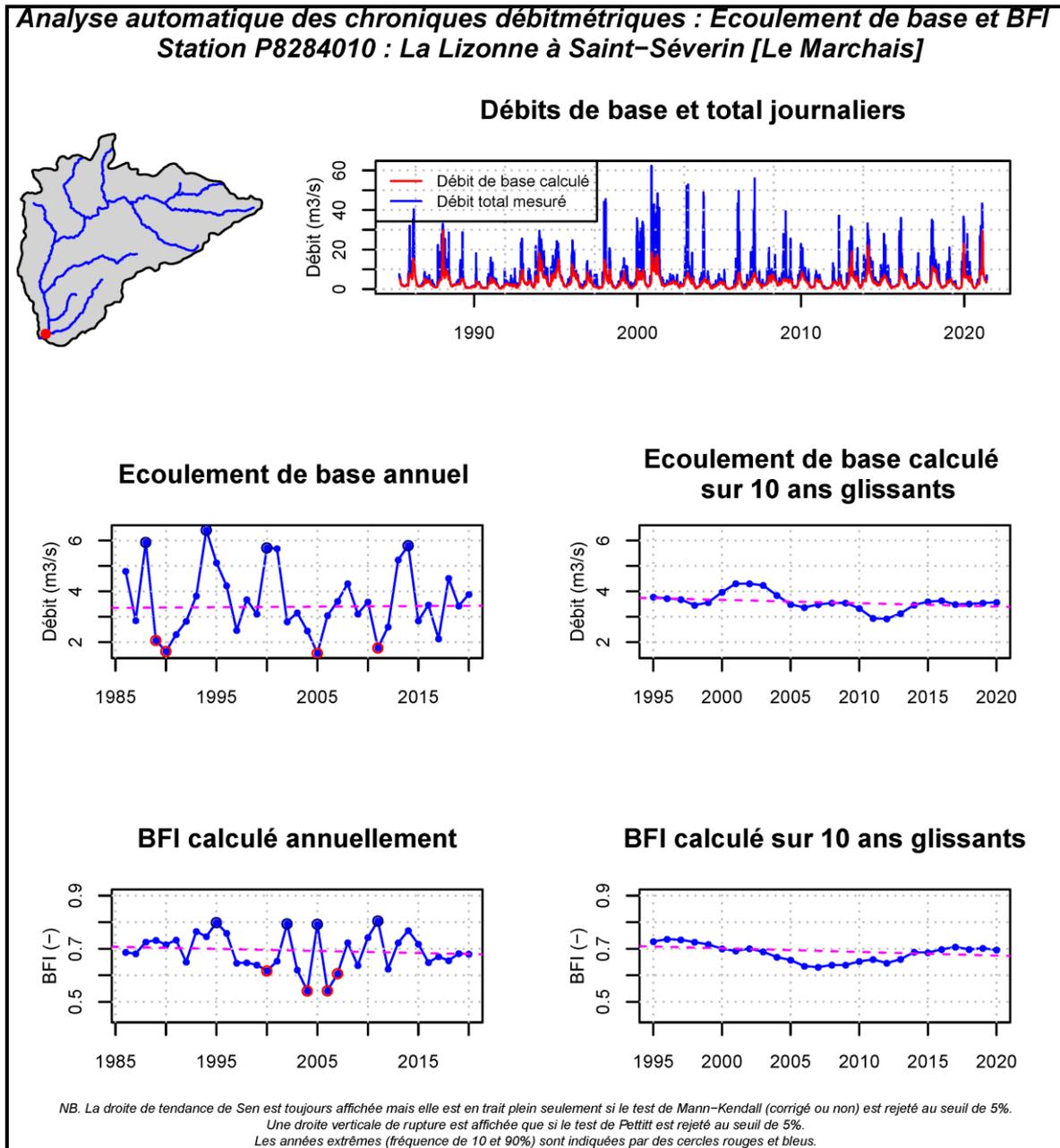


Illustration 6 - Décomposition d'hydrogramme : estimation d'un écoulement de base et du BFI - Base Flow Index (exemple de fiche 4a, avec le bassin versant de la Lizonne)

*b) Fiche 4b - Résultats des modélisations globales avec GARDENIA*

Ces fiches récapitulent les résultats obtenus lors d'une modélisation globale (Pluie/Débits, voire Pluie/Niveaux/Débits) qui permettent d'apporter des éléments à propos de l'évolution du régime des infiltrations, au cours du temps.

Ainsi ces fiches regroupent les éléments suivants :

- les **chroniques de débits observées et simulées** ;
- la **chronique de pluie efficace estimée** par le modèle global ;
- la **chronique recharge annuelle estimée** par le modèle global ;
- la **chronique du ratio "recharge annuelle / pluie efficace annuelle"** : ce ratio est souvent différent du BFI en valeur absolue, dans la mesure où il est calculé par une méthode et à l'aide de données différentes. Son évolution est toutefois évaluée dans cette étude pour la même raison que le BFI, i.e. pour identifier un changement éventuel dans le régime des infiltrations au cours du temps.

Les principaux paramètres décrivant les modèles GARDENIA utilisés sont affichés (type de modèle, nombre de réservoirs souterrains utilisés, facteurs de correction des pluies et de l'ETP, prise en compte de pompages et de débit extérieur). En outre, lorsque la fonte de la neige est prise en compte dans certains modèles, les fiches sont complétées par les évolutions des termes du bilan, associés à cette fonte (fonte des neiges annuelle estimée, stock annuel de neige estimé, ratio "fonte / débit total").

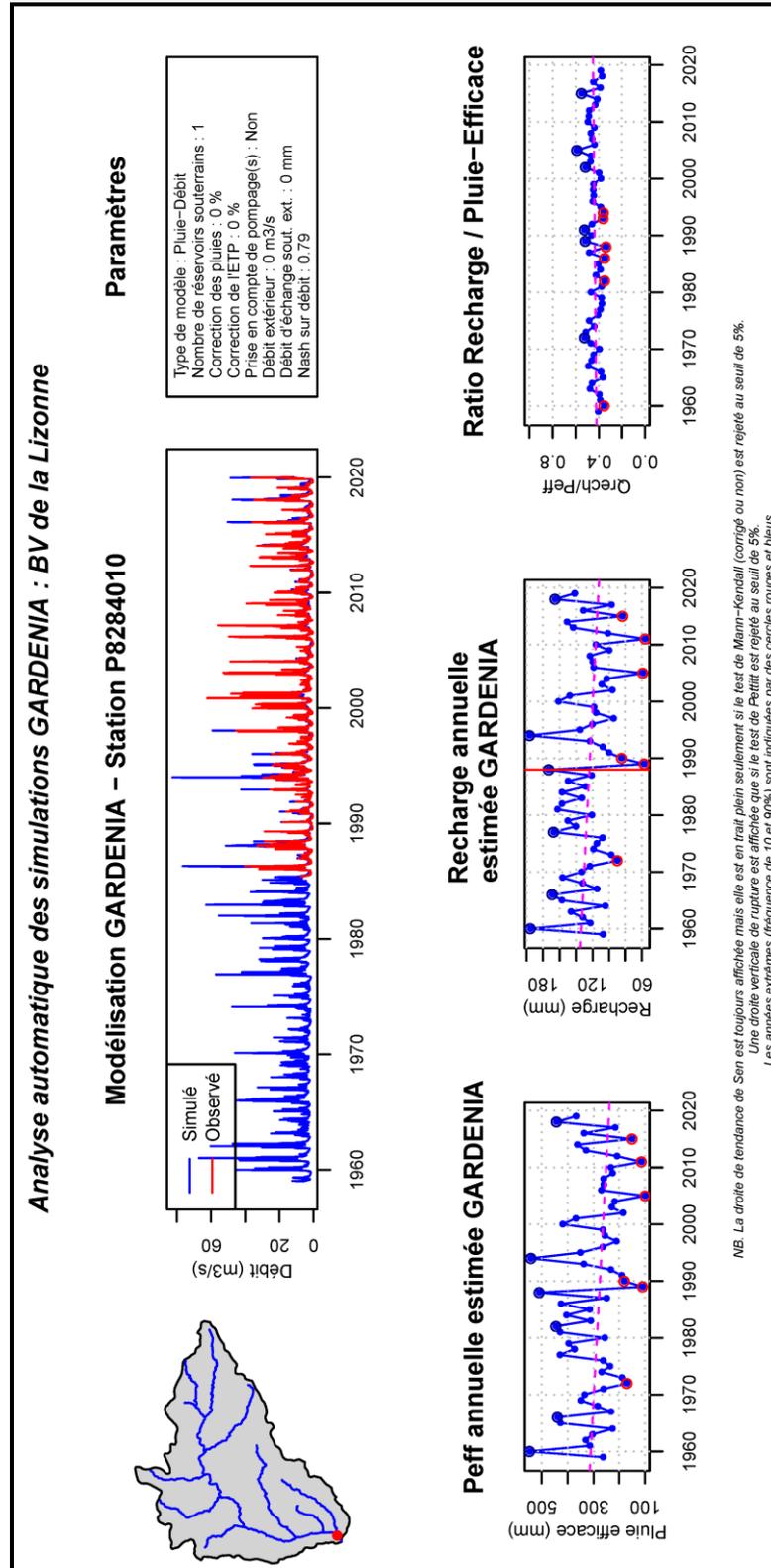


Illustration 7 - Résultats des modélisations globales avec GARDENIA (exemple de fiche 4b, avec le bassin versant de la Lizonne)

### 2.3. LISTE DES BASSINS VERSANTS ETUDIÉS

Les 15 bassins versants étudiés ont été choisis de sorte à balayer les différents contextes géographiques, géologiques, hydrogéologiques, topographiques et météorologiques, ainsi que de pouvoir mener une analyse rendant compte de l'hétérogénéité régionale en matière d'eau souterraine (Illustration 8). C'est pourquoi, du nord au sud de la région Nouvelle-Aquitaine, l'étude a porté sur :

1. le bassin versant du **Chambon** (Deux-Sèvres, 79)
2. le bassin versant du **Clain** à Vivonne (Charente, 16 ; Deux-Sèvres, 79 ; Vienne, 86)
3. le bassin versant du **Lambon** (Deux-Sèvres, 79)
4. le bassin versant de la **Benaize** à Jouac (Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
5. le bassin versant de la **Vige** (Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
6. le bassin versant de la **Briance** à Condat sur Vienne (Haute-Vienne, 87)
7. le bassin versant de la **Vienne** à Eymoutiers (Corrèze, 19 ; Creuse, 23 ; Haute-Vienne, 87)
8. le bassin versant de la **Lizonne** (Charente, 16 ; Dordogne, 24)
9. le bassin versant de l'**Engranne** (Gironde, 33)
10. le bassin versant de la **Lemance** (Dordogne, 24 ; Lot-et-Garonne, 47)
11. le bassin versant de la **Petite Leyre** (Gironde, 33 ; Landes, 40)
12. le bassin versant du **Midour** (Landes, 40 ; Gers, 32)
13. le bassin versant du **Gave de Pau** (Pyrénées-Atlantiques, 64 ; Hautes-Pyrénées, 65)
14. le bassin versant du **Gave d'Oloron, partie amont** (Pyrénées-Atlantiques, 64)
15. le bassin versant du **Gave d'Oloron, partie aval** (Pyrénées-Atlantiques, 64).



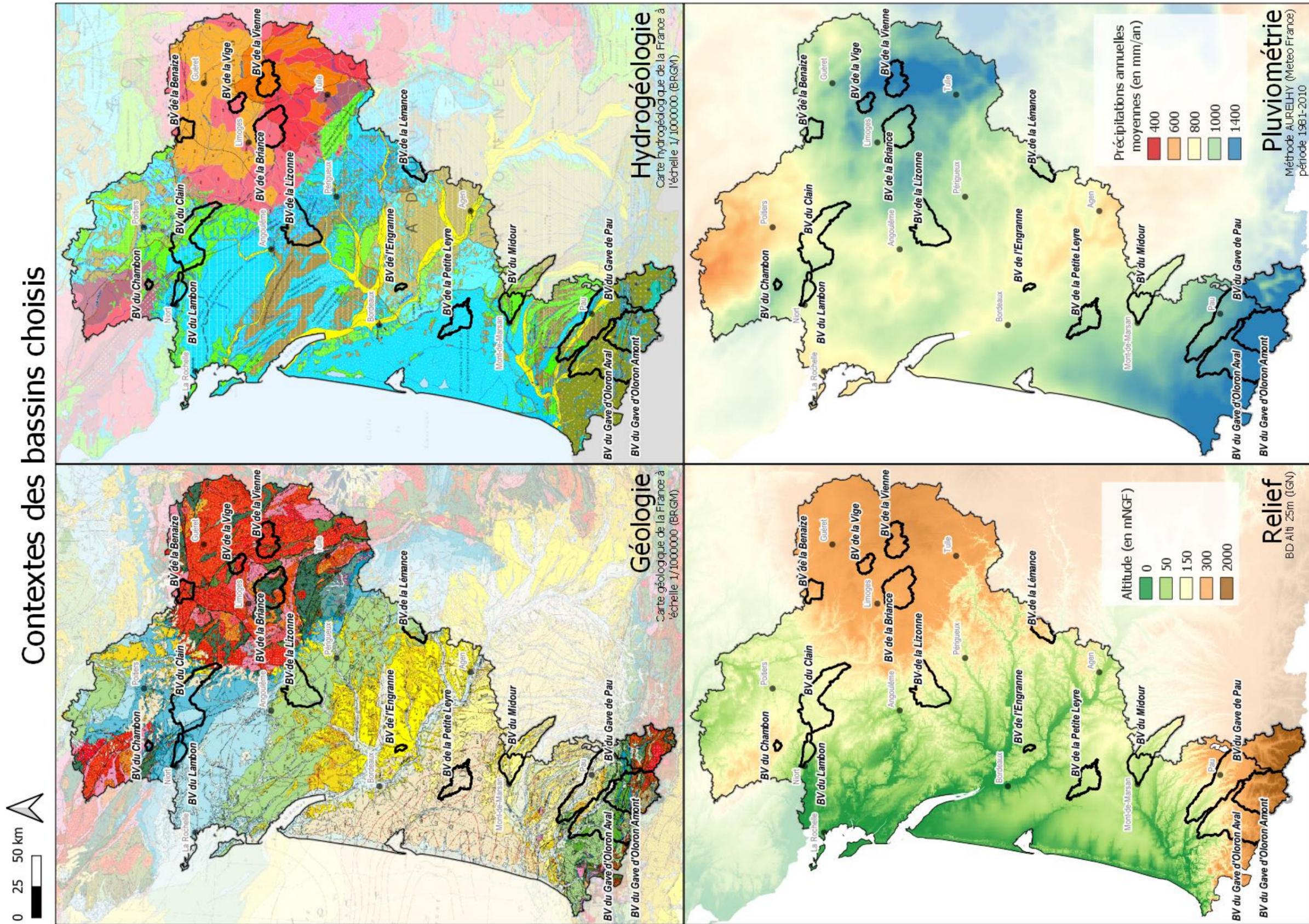


Illustration 8 - Contextes géologique, hydrogéologique, topographique et pluviométrique des bassins versants étudiés (la légende de la carte géologique est fournie en Annexe 1, et celle de la carte hydrogéologique en Annexe 2)



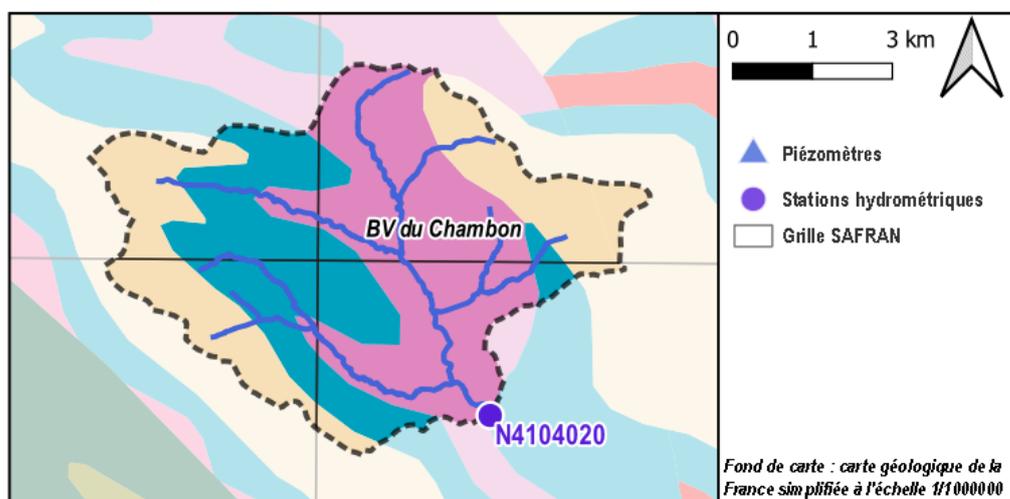
### 3. Analyse des séries temporelles - Résultats individuels par bassin versant

Dans cette section, une synthèse individuelle reprenant les principaux résultats issus de l'analyse des 4 types de fiches éditées est proposée. Cette synthèse reprend les éléments suivants :

- rappel du **contexte géographique géologique et hydrogéologique** du bassin versant étudié ;
- principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, sur l'**évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement** ;
- principaux constats, à partir de l'historique débitimétrique disponible, sur l'**évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau** ;
- principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, sur l'**évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine** ;
- principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, sur l'**évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**.

Les fiches éditées pour chacun des territoires sont disponibles en Annexe 4.

### 3.1. BASSIN VERSANT DU CHAMBON, EN AMONT DU BARRAGE DE LA TOUCHE POUPARD



#### 3.1.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Chambon est situé au centre du département des Deux-Sèvres. Il est implanté en tête du bassin versant topographique de la Sèvre Niortaise, du Chambon au ruisseau du Lambon. Le sous-bassin versant à l'étude correspond au bassin versant hydrologique associé à la station de débit du Chambon, à Saint-Georges-de-Noisné (station N4104020), qui présente une superficie d'environ 31 km<sup>2</sup>. La station, située en amont du barrage de la Touche-Poupard, dispose d'une chronique d'enregistrement du débit du Chambon, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1991. Le bassin ne dispose d'aucun point de suivi en continu du niveau des eaux souterraines. Les eaux transitant par le bassin alimentent un grand barrage, destiné à la production d'eau potable, au soutien d'étiage et à l'irrigation.

Sur la plus grande partie de son cours, le Chambon s'écoule sur des formations de socle, avec une partie du bassin présentant des formations peu épaisses du Jurassique inférieur (formations de l'Infra-Toarcien recouvertes des marnes du Toarcien). Ce contexte favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration. La surface des plans d'eau (31,8 ha) représente 1 % de la surface totale du bassin.

Il s'agit d'un bassin très peu influencé, dont l'écoulement est proche d'un état naturel.

#### 3.1.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant : ni pour les précipitations annuelles, ni pour les indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Pendant la période 1959-2020, l'ETP annuelle enregistre une évolution plus notable, avec une tendance à la hausse globale. La hausse n'est pas linéaire et l'ETP connaît une forte augmentation à compter du début des années 2000. Pour la période 2000-2020, la hausse semble continue. Une évolution similaire est constatée pour les températures moyennes, avec toutefois une augmentation enregistrée à la fin de la décennie 1980-1990.

L'augmentation d'ETP au cours de la période 2000-2020 s'accompagne d'une légère tendance à la baisse des pluies efficaces annuelles. Concernant les pluies efficaces annuelles et le nombre de journées contributives, la plupart des années déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) sont enregistrées après l'an 2000. En période estivale (juillet à septembre), alors que des précipitations efficaces ont pu être enregistrées au cours de la période précédant l'an 2000, ces dernières sont inexistantes pour la période 2000-2020.

### **3.1.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Si l'ensemble des indicateurs relatifs au débit présentent une pente à la baisse (significative pour les paramètres VCN3, VCX3 et VCX30), il convient de prendre en compte l'incertitude pesant sur les valeurs extrêmes des débits mesurés. En effet, le Service de Prévision des Crues ne juge les données fiables, à la station de débit de Saint-Georges-de-Noisné, que sur une gamme comprise entre 0,05 m<sup>3</sup>/s et 0,5 m<sup>3</sup>/s.

La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est très bonne, et la très légère baisse observée dans ces débits est en adéquation avec celle observée pour les pluies efficaces.

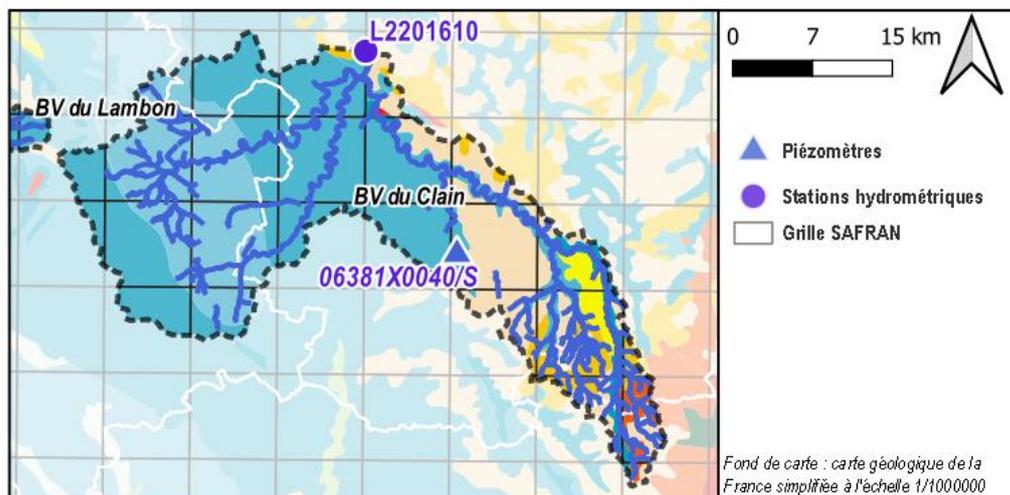
### **3.1.4. Principaux constats, à partir des historiques et des modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station du Chambon de Saint-Georges-de-Noisné (N4104020), ont été mises en œuvre.

L'écoulement de base apparaît relativement constant dans l'historique du suivi, avec une tendance à la baisse lorsque ce critère est lissé sur 10 ans glissants. Les valeurs de BFI présentent peu d'évolution sur l'intégralité du suivi, avec des valeurs proches de 0,3, caractéristiques d'un contexte géologique favorisant le ruissellement (ce qui confirme les faibles valeurs du ratio "recharge / pluie efficace" du bilan GARDENIA).

Les évolutions de la pluie efficace annuelle et de la recharge annuelle, estimées par GARDENIA, présentent une très légère tendance à la baisse (peu significative), en cohérence avec l'approche faite en simulant un bilan hydrique simplifié avec une réserve utile fixée à 100 mm.

### 3.2. BASSIN VERSANT DU CLAIN A VIVONNE



#### 3.2.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Clain à Vivonne s'étend sur les départements de la Vienne, des Deux-Sèvres et de la Charente. Le sous-bassin versant à l'étude correspond au bassin versant hydrologique associé à la station de débit du Clain, à Vivonne, au lieu-dit le Petit Allier (station L2201610), qui présente une superficie d'environ 948 km<sup>2</sup>. La station dispose d'une chronique d'enregistrement du débit du Clain, de mai 1990 à décembre 2013.

Sur la plus grande partie de son cours, le Clain et ses affluents s'écoulent sur les formations sédimentaires du Jurassique moyen (Dogger) et du Jurassique supérieur (pour la Dive du sud). Le piézomètre de Saint-Romain (06381X0040/S) suit la nappe contenue dans les calcaires fissurés du Jurassique moyen.

#### 3.2.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle, qui pour la période 1959-2020, est globalement à la hausse. Cette hausse n'est pas linéaire : hausse importante entre 1980 et 1990 et relative stabilité depuis ; alors que la température moyenne connaît une augmentation moyenne continue.

Les pluies efficaces (annuelles ou liées aux 5 jours les plus contributifs) ainsi que le nombre de journées contributives ne présentent pas de tendance significative, contrairement à l'ETP ; mais une légère pente à la baisse peut être notée.

### **3.2.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitimétrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Aucune tendance marquée n'est enregistrée au niveau du débit du Clain à Vivonne, qu'il s'agisse du débit moyen annuel ou des indicateurs d'étiage ou de crue. Ces observations sont en cohérence avec les constats établis à partir de l'historique climatique ; la corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels étant très bonne.

### **3.2.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Pendant la période 1995-2020, les niveaux moyens annuels piézométriques, au droit du piézomètre de Saint-Romain (06381X0040/S), ne présentent pas de tendances marquées. De même, recharge apparente et niveaux hauts annuels semblent peu évoluer.

À noter que depuis 2011, la durée de la phase de vidange conserve des valeurs relativement élevées, alors qu'avant cette date elle enregistrait des variations interannuelles fortes.

En outre, dans cet ouvrage, une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence, les niveaux les plus bas étant influencés par les prélèvements.

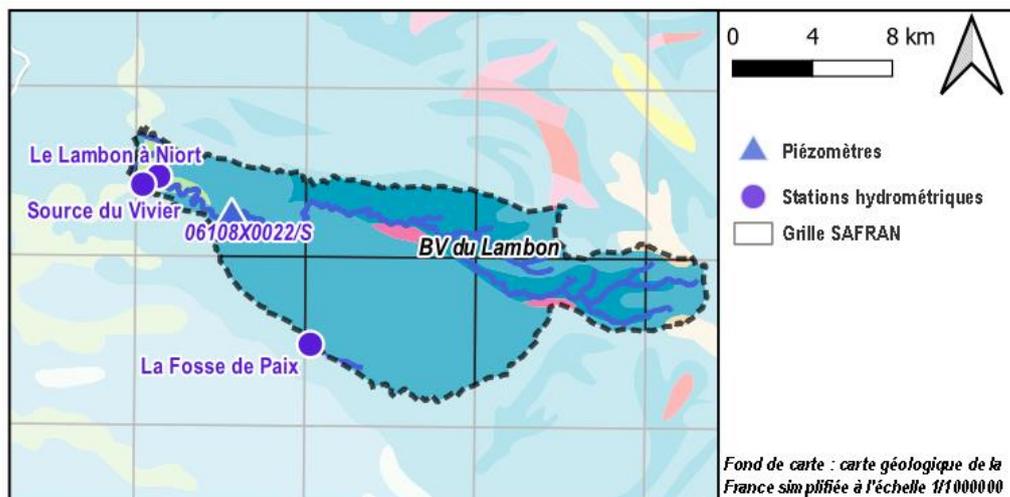
### **3.2.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit / Piézométrie, à la station du Clain, à Vivonne (L2201610), ont été mises en œuvre.

Pour la période 1991-2020, l'écoulement de base annuel et le BFI ne présentent pas d'évolution marquée. C'est un bassin globalement assez infiltrant (les valeurs du BFI et du ratio "recharge / pluie efficace" sont autour 70 %).

Si, pour l'ensemble de la période simulée avec GARDENIA (1959-2019), les évolutions de la pluie efficace annuelle et de la recharge annuelle calculées présentent une pente à la baisse (peu significative), elles semblent moins évoluer au cours des 15 dernières années. Les tendances observées sont proches de celles mises en évidence en simulant un bilan hydrique simplifié avec une réserve utile fixée à 100 mm.

### 3.3. BASSIN VERSANT DU LAMBON



#### 3.3.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Lambon, affluent en rive gauche de la Sèvre Niortaise, est localisé au sud du département des Deux-Sèvres. Le bassin à l'étude (superficie d'environ 161 km<sup>2</sup>) correspond à la limite du bassin d'alimentation hydrogéologique du captage du Vivier, intégrant une partie du bassin versant de la Guirande au sud, du fait de connexions karstiques.

Dans le bassin, le socle imperméable apparaît dans la vallée du Lambon. L'aquifère karstique peu épais du Lias (Jurassique inférieur) renferme une nappe importante, captée à Niort au Vivier ; en partie libre au nord du Lambon, il devient captif sous les marnes du Toarcien au sud. Au-dessus du Toarcien, le Dogger calcaire karstifié (Jurassique moyen) constitue un autre important aquifère du bassin. Les relations entre aquifères infra-toarcien et supra-toarcien sont complexes ; ces deux compartiments assurent l'alimentation des prélèvements en nappe et des prélèvements effectués au droit de résurgences karstiques (captage du Vivier).

L'aquifère de l'Infra-Toarcien fait l'objet d'un suivi, depuis mars 1993, au droit du piézomètre de Niort - la Grange (06108X0022/S), implanté en aval du bassin. Les principales sorties de l'hydrosystème sont constituées du Lambon (assecs sur une partie de son cours et une partie de l'année), des résurgences karstiques, en partie exploitées (débit de trop-plein de la source du Vivier et débit de la Fosse de Paix), et probablement d'écoulements souterrains vers le sud-ouest à travers la faille d'Aiffres (Compère et Thinon-Larminach, 2021).

L'utilisation pour l'eau potable constitue l'essentiel des prélèvements dans le bassin.

#### 3.3.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

L'ETP présente une évolution notable à la hausse, pendant la période 1959-2019, non linéaire, car une rupture est enregistrée à la fin de la décade 1980-1990 ; cette rupture s'observe également sur la chronique relative à la température.

Les pluies efficaces (annuelles ou liées aux 5 jours les plus contributifs) ainsi que le nombre de journées contributives ne présentent pas de tendance significative, contrairement à l'ETP ; mais une pente à la baisse peut être notée.

### **3.3.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La chronique des débits constituant les principales sorties de l'hydrosystème (débit du Lambon et résurgences karstiques) est trop incomplète pour envisager une description de tendances historiques. Toutefois, les données disponibles ont été utilisées comme élément de calage d'un modèle GARDENIA, afin de reconstituer par le calcul cette chronique de débits de sorties du bassin à l'étude.

### **3.3.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

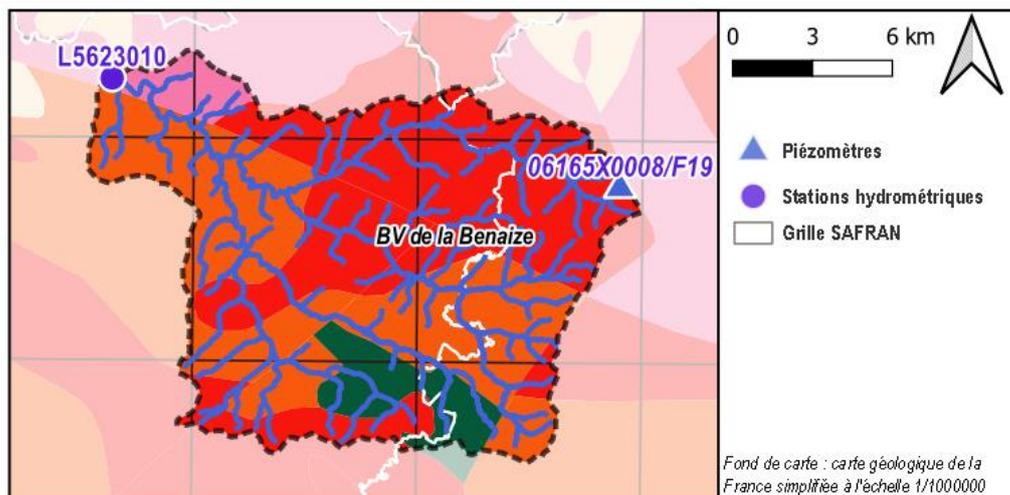
La chronique des niveaux d'eau enregistrés dans le piézomètre de Niort - la Grange ne montre aucune tendance significative, en cohérence avec les constats établis sur la base des chroniques climatiques, avec notamment une assez bonne adéquation avec l'évolution des pluies efficaces.

### **3.3.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, sur l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

Une modélisation GARDENIA de Pluie / Débit / Piézométrie a été mise en œuvre (tenant compte des prélèvements), permettant de reconstituer l'évolution de la somme des débits de sortie de l'hydrosystème du bassin du Lambon.

Sur l'ensemble de la période simulée avec GARDENIA (1959-2019), les évolutions de la pluie efficace annuelle et de la recharge annuelle calculées présentent des pentes légèrement à la baisse (peu significatives). Les tendances observées sont proches de celles mises en évidence en simulant un bilan hydrique simplifié avec une réserve utile fixée à 100 mm.

### 3.4. BASSIN VERSANT DE LA BENAIZE A JOUAC



#### 3.4.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Benaize, à Jouac, s'étend sur les départements de la Haute-Vienne (pour les deux tiers ouest du bassin) et de la Creuse (tiers est du bassin). Il correspond à la partie amont du bassin de la Benaize, affluent en rive gauche de l'Anglin.

Le bassin versant, associé à la station de débit de Jouac (station L5623010), présente une superficie d'environ 186 km<sup>2</sup>. La station dispose d'une chronique d'enregistrement du débit de la Benaize depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1979.

Dans l'intégralité du bassin versant, la Benaize s'écoule sur des formations de socle : monzogranites, granodiorites, leucogranites. Ce contexte favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Le piézomètre de Saint-Agnant-de-Versillat 1 (06165X0008/F19), implanté en position amont et à la pointe nord-est du bassin, mesure le niveau des eaux souterraines depuis décembre 2003. Il capte la nappe contenue dans des leucogranites fissurés, recouverts de 8 m d'altérites.

#### 3.4.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Pendant la période 1959-2020, l'ETP annuelle enregistre une tendance globale à la hausse. La hausse n'est pas linéaire et l'ETP connaît une forte augmentation à compter de la fin de la décennie 1980-1990. Entre les années 1990 et 2020, la hausse apparaît continue. Une évolution similaire de l'ETP est constatée pour les températures moyennes.

Les pluies efficaces (annuelles ou liées aux 5 jours les plus contributifs) ainsi que le nombre de journées contributives ne présentent pas de tendance significative, contrairement à l'ETP ; mais une pente à la baisse peut être notée. En période estivale (juillet à septembre), alors que des

précipitations efficaces ont pu être enregistrées au cours de la période précédant l'an 2000, ces dernières sont quasi inexistantes pendant la période 2000-2020.

### **3.4.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Les débits moyens annuels enregistrés dans la Benaize, à Jouac, montrent une baisse globale pendant la période 1979-2020, avec une rupture détectée à la fin des années 1980. Toutefois, les débits moyens annuels semblent plutôt se stabiliser pendant la période plus récente, de 1995 à 2020.

L'ensemble des indicateurs d'étiage ou de crue présente une pente à la baisse, la tendance ne s'avérant significative que pour l'indicateur de crue VCX3. La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est très bonne, et l'apparente stabilité des pluies efficaces, pendant la période de 1995 à 2020, est en adéquation avec l'évolution du débit moyen annuel.

### **3.4.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Le comportement du piézomètre de Saint-Agnant-de-Versillat 1, qui capte la nappe contenue dans des leucogranites fissurés, a été analysé.

La principale observation faite sur l'évolution des niveaux piézométriques, au droit de l'ouvrage, est une baisse significative des niveaux bas annuels tout au long de l'ensemble du suivi. Cette diminution est non linéaire, puisqu'une rupture est identifiée lors du cycle hydrologique 2013-2014, les niveaux bas annuels semblant enregistrer une relative stabilité après cette même rupture.

Enfin, dans cet ouvrage, une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence.

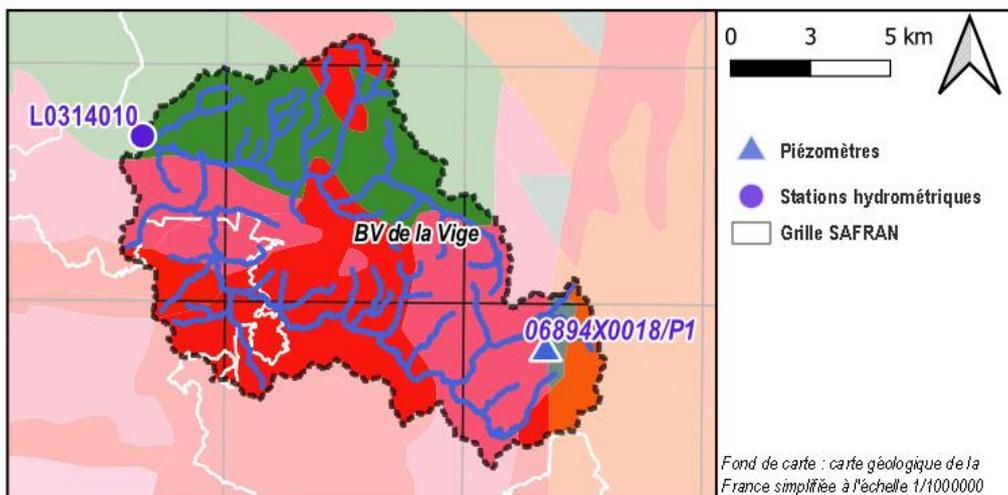
### **3.4.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit / Piézométrie, à la station de la Benaize à Jouac (L5623010), ont été mises en œuvre. Au cours de la période 1979-2020, l'écoulement de base annuel (pente à la baisse) et le BFI (pente à la hausse) ne présentent pas d'évolution significative.

Pour l'ensemble de la période simulée avec GARDENIA (1959-2019), les évolutions estimées de la pluie efficace annuelle et de la recharge annuelle ne sont pas significatives.

Le BFI et le ratio "recharge / pluie efficace" fluctuent entre 20 % (bassin versant majoritairement ruisselant) et 50 %.

### 3.5. BASSIN VERSANT DE LA VIGE A SAINT-MARTIN-SAINTE-CATHERINE



#### 3.5.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Vige, à Saint-Martin-Sainte-Catherine, s'étend sur les départements de la Creuse (pour l'essentiel) et de la Haute-Vienne. Il correspond à la quasi-globalité du bassin topographique de la Vige, affluent en rive gauche du Taurion.

Le bassin versant, associé à la station de débit de Saint-Martin-Sainte-Catherine (station L0314010), présente une superficie d'environ 131 km<sup>2</sup>. La station dispose d'une chronique d'enregistrement du débit de la Vige depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1958.

Sur l'intégralité du bassin versant, la Vige s'écoule sur des formations de socle : orthogneiss, monzogranites et micaschistes. Ce contexte favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Le piézomètre de Saint-Junien-la-Brégère (06894X0018/P1), implanté en position amont, mesure le niveau des eaux souterraines depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007. Il capte la nappe contenue dans des granites fissurés.

#### 3.5.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Au cours de la période 1959-2020, l'ETP annuelle enregistre une tendance globale à la hausse. La hausse n'est pas linéaire et l'ETP connaît une forte augmentation à compter du début de la décennie 1990-2000 (rupture mise en évidence en 1994). Entre les années 1990 et 2020, la hausse apparaît continue. Une évolution similaire à l'ETP est constatée pour les températures moyennes, avec toutefois une rupture identifiée plus tôt, à la fin de la décennie 1980-1990.

Les pluies efficaces annuelles ainsi que le nombre de journées contributives ne présentent pas de tendance significative, contrairement à l'ETP ; mais une légère pente à la baisse peut être notée. En période estivale (juillet à septembre), alors que des précipitations efficaces ont pu être

enregistrées pendant la période précédant l'année 2008, ces dernières sont quasi inexistantes pendant la période 2008-2020.

### **3.5.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Les débits moyens annuels enregistrés dans la Vige, à Saint-Martin-Sainte-Catherine, montrent une baisse globale au cours de la période 1979-2020, avec une rupture détectée au début des années 2000. Toutefois, les débits moyens annuels semblent plutôt se stabiliser pendant la période plus récente, de 2001 à 2020.

Du point de vue des indicateurs d'étiage ou de crue, qui présentent tous une pente à la baisse, seuls les indicateurs de crue VCX10 et VCX30 présentent une tendance significative à la baisse. Depuis 1998, on n'observe aucun débit de crue extrême (pour VCX10 et VCX30).

La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est bonne.

### **3.5.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Le comportement du piézomètre de Saint-Junien-la-Brégère, qui capte la nappe contenue dans des granites fissurés, a été analysé. Le suivi dans le piézomètre étant récent (début en 2007), la chronique disponible ne permet pas de caractériser de tendances sur le long terme.

La principale observation faite à propos de l'évolution des niveaux piézométriques au droit de l'ouvrage est une hausse significative de la recharge apparente. Cette augmentation est non linéaire, puisqu'une rupture est identifiée lors du cycle hydrologique 2014-2015.

Enfin, dans cet ouvrage, une relativement bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence.

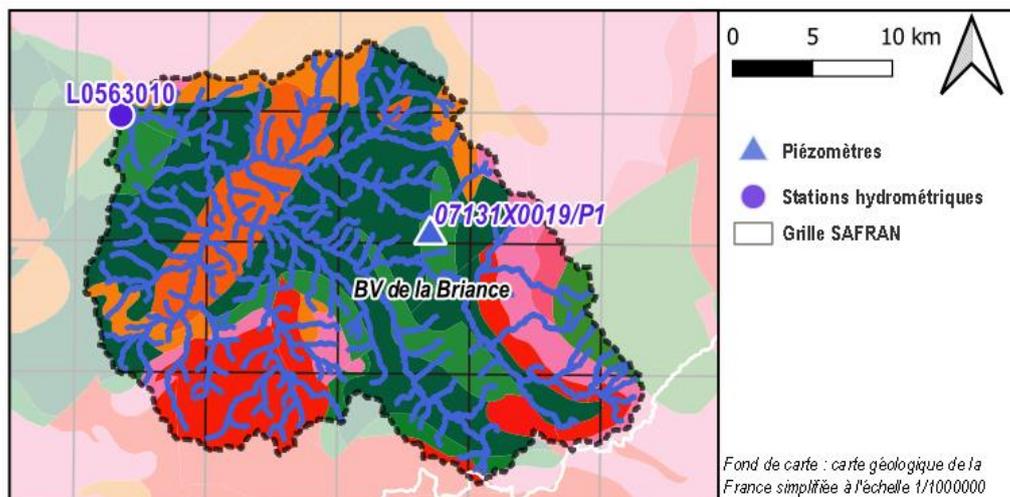
### **3.5.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit / Piézométrie, à la station la Vige à Saint-Martin-Sainte-Catherine (L0314010), ont été mises en œuvre.

Pendant la période 1979-2020, l'écoulement de base annuel et le BFI ne présentent pas d'évolution marquée. On note toutefois une rupture identifiée au début des années 2000, concernant l'évolution de l'écoulement de base annuel, qui semble présenter une relative stabilisation et une diminution de l'amplitude de ses variations depuis cette période.

Concernant la simulation avec GARDENIA, aucune tendance significative n'est enregistrée pour les évolutions de la pluie efficace annuelle ou la recharge annuelle.

### 3.6. BASSIN VERSANT DE LA BRIANCE A CONDAT-SUR-VIENNE



#### 3.6.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Briance, à Condat-sur-Vienne, s'étend dans le département de la Haute-Vienne. Il correspond à la quasi globalité du bassin topographique de la Briance, affluent en rive gauche de la Vienne.

Le bassin versant, associé à la station de débit de Condat-sur-Vienne (station L0563010), présente une superficie d'environ 603 km<sup>2</sup>. La station dispose d'une chronique d'enregistrement du débit de la Briance depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1966.

La Briance s'écoule sur des formations de socle, pour l'intégralité de son bassin versant, avec essentiellement : paragneiss, orthogneiss, leptynites, amphibolites, orthogneiss, monzogranites et micaschistes. Ce contexte favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Le piézomètre de Saint-Bonnet-Briance (07131X0019/P1), implanté en position amont, mesure le niveau des eaux souterraines depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007. Il capte une nappe semi-captive contenue dans des gneiss.

#### 3.6.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Pour la période 1959-2020, l'ETP annuelle enregistre une tendance globale à la hausse. La hausse n'est pas linéaire et l'ETP connaît une forte augmentation à compter de la fin de la décennie 1980-1990. Pour la période 1990-2020, la hausse apparaît continue. Une évolution similaire à l'ETP est constatée pour les températures moyennes.

Les pluies efficaces (annuelles ou liées aux 5 jours les plus contributifs) ainsi que le nombre de journées contributives ne présentent pas de tendance significative, contrairement à l'ETP ; mais une pente à la baisse peut être notée. En période estivale (juillet à septembre), alors que des

précipitations efficaces ont pu être enregistrées pendant la période précédant l'année 2008, ces dernières sont quasi inexistantes pour la période 2008-2020.

### **3.6.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Les débits moyens annuels enregistrés dans la Briance, à Condat-sur-Vienne, présentent une baisse globale au cours de l'historique 1966-2020, avec une rupture détectée au début des années 2000. Toutefois, les débits moyens annuels semblent plutôt se stabiliser pendant la période plus récente, de 2001 à 2020, avec notamment des variations moindres des amplitudes interannuelles et l'absence d'épisodes de crue extrême depuis 1998.

Aucun des indicateurs d'étiage ou de crue ne présente de tendance significative à la baisse.

La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est bonne.

### **3.6.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Le comportement du piézomètre de Saint-Bonnet-Briance, qui capte la nappe contenue dans des gneiss, a été analysé. Le suivi dans le piézomètre étant récent (début en 2007), la chronique disponible ne permet pas de caractériser de tendances sur le long terme.

Au vu de la durée de l'historique disponible, aucune évolution significative n'est mise en évidence pour l'ensemble des critères évalués.

Enfin, dans cet ouvrage, une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence.

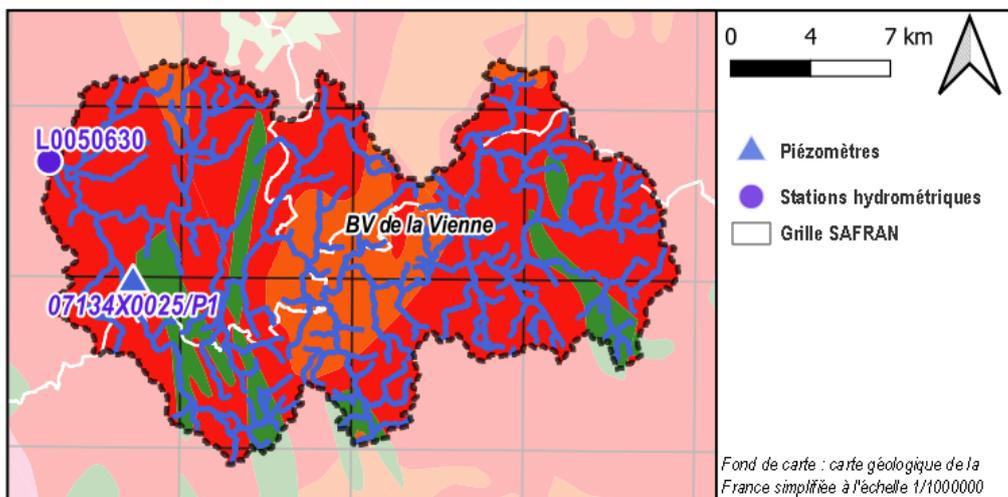
### **3.6.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station de la Briance à Condat-sur-Vienne (L0563010), ont été mises en œuvre.

Pour la période 1966-2020, l'écoulement de base annuel présente une diminution significative, avec une rupture au début des années 2000, période après laquelle les valeurs semblent se stabiliser. Le BFI montre lui une tendance à une légère augmentation.

Concernant la simulation avec GARDENIA, aucune tendance significative n'est enregistrée concernant les évolutions de la pluie efficace annuelle ou la recharge annuelle. La plus grande part des années déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) est située à partir de 1989.

### 3.7. BASSIN VERSANT DE LA VIENNE A EYMOUTIERS



#### 3.7.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Vienne, à Eymoutiers, s'étend sur les départements de la Corrèze, de la Haute-Vienne et de la Creuse. Il correspond à la partie amont du bassin de la Vienne, englobant sa source, jusqu'à environ 1 km en aval de la confluence en rive droite avec le ruisseau de Planchemouton.

Le bassin versant, associé à la station de débit à Eymoutiers (station L0050630), présente une superficie d'environ 359 km<sup>2</sup>. La station dispose d'une chronique d'enregistrement du débit de la Vienne depuis le 22 juin 1994.

La Vienne s'écoule sur des formations de socle sur l'intégralité de son bassin versant : leucogranites, monzogranites et micaschistes. Ce contexte favorise le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Le piézomètre de Nedde (07134X0025/P1), implanté en partie aval du bassin, mesure le niveau des eaux souterraines depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2007. Il capte une nappe semi-captive contenue dans des granites.

#### 3.7.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

L'historique des précipitations dans le bassin versant ne présente globalement pas d'évolution significative, qu'il s'agisse des précipitations annuelles ou des indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Pour la période 1959-2020, l'ETP annuelle enregistre une tendance globale à la hausse. La hausse n'est pas linéaire et l'ETP connaît une forte augmentation durant la décade 1990-2000, avec une hausse continue de 1993 à 2020. Une évolution similaire à l'ETP est constatée pour les températures moyennes, avec toutefois une rupture dans l'évolution, identifiée au début de la décade 1980-1990.

Le nombre annuel de journées significatives en termes de pluie efficace (supérieure à 1 mm) enregistre une tendance significative à la baisse ; et la pluie efficace annuelle, même si elle ne présente pas de tendance significative au seuil de 5%, enregistre également une pente à la baisse. En outre, les années enregistrant les plus basses valeurs (à fréquence 10 %) en matière de pluie efficace annuelle ou de journées contributives sont quasiment toutes notées dans la seconde moitié de l'historique disponible (et surreprésentées après les années 2000).

### **3.7.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

Au cours de la période 1995-2020, les débits moyens annuels enregistrés dans la Vienne, à Eymoutiers, ne présentent pas de tendance significative, qu'il s'agisse du débit moyen annuel ou des indicateurs d'étiage ou de crue.

### **3.7.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Le comportement du piézomètre de Nedde, qui capte la nappe contenue dans des granites, a été analysé. Le suivi dans le piézomètre étant récent (début en 2007), la chronique disponible ne permet pas de caractériser de tendances sur le long terme.

Au vu de la durée de l'historique disponible, aucune évolution significative n'est mise en évidence pour l'ensemble des critères évalués, hormis la recharge apparente qui présente une tendance à la hausse.

Enfin, dans cet ouvrage, une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence.

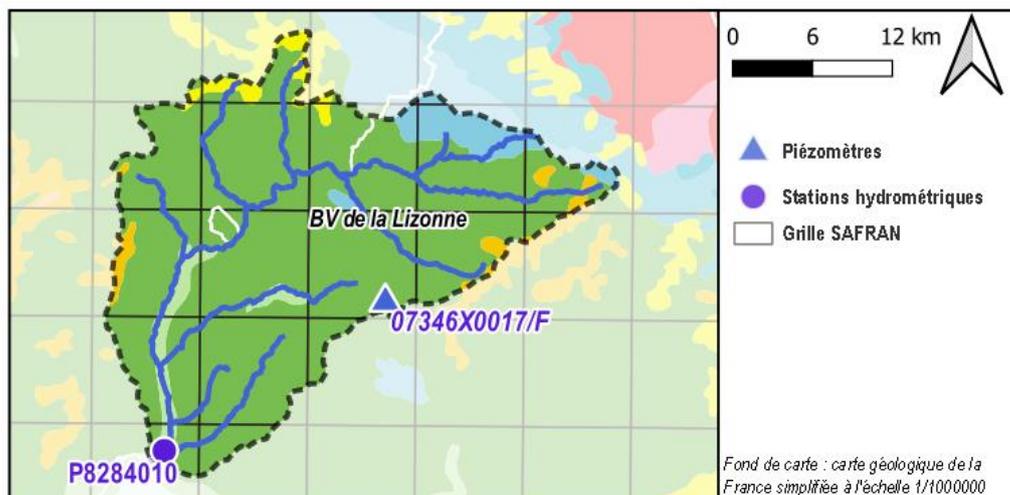
### **3.7.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station L0050630, ont été mises en œuvre.

Au cours de la période 1995-2020, l'écoulement de base annuel et le BFI ne présentent pas d'évolution significative. Le BFI montre lui une tendance à une légère augmentation.

Concernant la simulation avec GARDENIA, une tendance significative à la baisse est enregistrée dans les évolutions de la pluie efficace annuelle et de la recharge annuelle. Une rupture est identifiée en 2001, correspondant à une période au-delà de laquelle les deux paramètres semblent présenter une certaine stabilisation.

### 3.8. BASSIN VERSANT DE LA LIZONNE



#### 3.8.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Lizonne est situé au cœur de la région Nouvelle-Aquitaine, à cheval entre les départements de la Dordogne et de la Charente. Le relief du bassin, un peu plus escarpé en aval qu'en amont, est entaillé par de nombreux cours d'eau présents dans le secteur.

Géologiquement, ce bassin est situé à l'extrême nord-est du Bassin aquitain, à la limite du Massif Central, et le réseau hydrographique traverse des terrains allant du Jurassique au Crétacé supérieur.

Plusieurs formations aquifères sont reconnues au sein du bassin versant : les calcaires oolithiques du Kimméridgien et de l'Oxfordien, au sein de l'aquifère multicouche du Jurassique puis au sein du Crétacé supérieur ; les sables et calcaires gréseux du Cénomaniens ; les calcaires crayeux du Turonien ; les calcaires gréseux du Coniacien et l'aquifère détritique du Santonien (présent seulement en amont du bassin, à l'est de Mareuil). À noter l'importance de l'anticlinal de Mareuil, à cœur jurassique, induisant des affleurements locaux des calcaires du Cénomaniens. Les nappes du Crétacé supérieur sont les plus sollicitées dans le bassin, en particulier la nappe du Turonien-Coniacien, s'établissant au sein d'aquifères fissurées et souvent karstifiées. Cette nappe est drainée par la Lizonne, notamment en amont du bassin versant, puis devient captive dans la partie aval, avec des sources d'eau chaude, et en charge existant dans cette partie aval.

Pour plus de précisions, on pourra se reporter aux rapports BRGM/RP-57836-FR (Saltel et Willeumier, 2009) et 83-SGN-266-AQI (Bel, 1983).

#### 3.8.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution significative ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant : ni concernant les précipitations annuelles, ni les indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux). On peut quand même noter la fréquence plus importante des années les plus sèches lors de la seconde moitié de la chronique.

Les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle qui, au cours de la période 1959-2020, est globalement à la hausse. Cette hausse n'est pas linéaire : hausse importante entre 1980 et 1990 et relative stabilité depuis ; une rupture de comportement est d'ailleurs détectée en 1988. La même évolution (tendance et rupture significative en 1987) est constatée pour les températures moyennes.

En conséquence, les pluies efficaces annuelles sont globalement à la baisse, même si cette baisse n'est pas significative au seuil de 5 % (la p-valeur est de 11 %) ; en outre, la quasi-totalité des années les plus déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) est située dans la seconde moitié de la chronique. A l'inverse, les années les plus excédentaires en pluie efficace sont situées dans la première moitié de l'historique. La baisse globale de la pluie efficace semble être due à la baisse de contributions de tous les épisodes de pluie efficace, qu'ils soient très contributifs ou moins contributifs. À noter également qu'en été, il n'était pas rare d'observer des précipitations efficaces lors de la première moitié de la période d'observation, alors que cela est devenu exceptionnel au cours de la seconde moitié.

### **3.8.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitimétrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie est à l'aval du bassin versant (P8284010, La Lizonne à Saint-Séverin).

Une stabilité des débits moyens est observée au cours de la période de 1985 à 2021. Aucune tendance significative n'est détectée pour les débits caractéristiques d'étiage, mais tous ces indicateurs montrent une pente à la baisse et les événements les plus secs se produisent tous depuis 2005. Cela ne s'observe pas sur les débits caractéristiques de crue pour lesquels une certaine stabilité et homogénéité dans l'occurrence des événements extrêmes semblent se dégager.

### **3.8.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe des calcaires du Turonien-Coniacien a été analysée, par l'intermédiaire de l'ouvrage 073460017/F, bénéficiant d'un historique et d'une densité de mesures intéressants, et ne montrant pas d'influence directe des prélèvements (l'ouvrage 07345X0023/F aurait également pu être choisi et fournir des résultats comparables).

La période d'observation des niveaux piézométriques s'étend de 2003 à 2021. Au cours de cette période, aucun indicateur caractéristique de la piézométrie (niveaux moyens, hauts, bas, vidanges et recharge) ne montre de tendance significative, mais toutes les pentes associées sont à la hausse et certaines p-valeurs associées au test sont faibles (par exemple, elle est de 7 % pour les niveaux moyens). Les niveaux piézométriques semblent très bien corrélés aux pluies efficaces et logiquement une tendance à la hausse existe pour la pluie efficace, pendant cette même période d'observation (2003-2019).

### **3.8.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

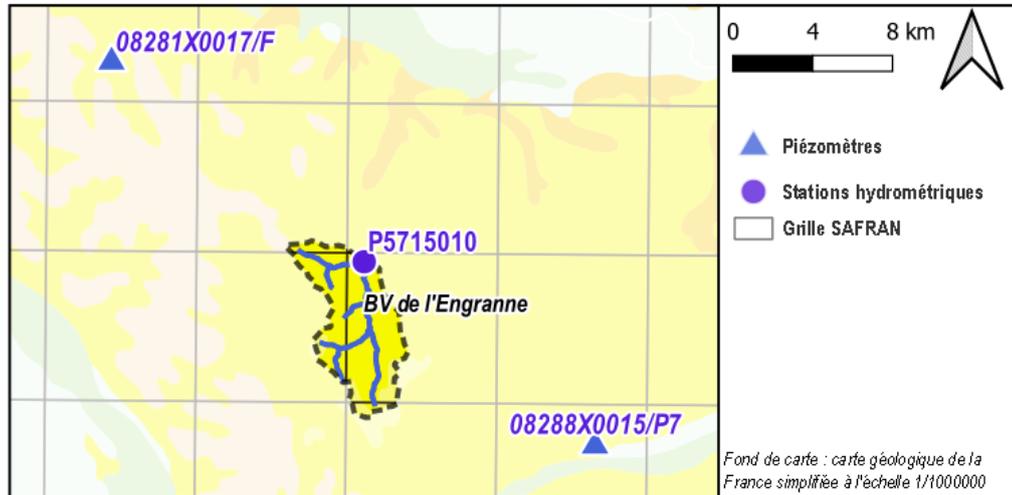
La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station de la Lizonne à Saint-Séverin (P8284010), ont été mises en œuvre.

Les deux méthodes ne peuvent être appliquées pour les mêmes périodes d'observation, puisque l'écoulement de base est calculable seulement avec l'historique des débits mesurés, quand les modèles avec GARDENIA ont été appliqués à tout l'historique météorologique disponible.

L'écoulement de base est quant à lui stable tout au long de la période 1986-2020, ce qui est cohérent avec la relative stabilité des pluies efficaces post 1990 (mentionnée en section 3.8.2). On note également une absence de détection de tendance significative pour le BFI, pendant cette période, en cohérence avec la stabilité du ratio "recharge / pluie efficace".

Pendant la période 1959-2020, le ratio "recharge / pluie efficace" est stable et logiquement les observations faites à propos de la pluie efficace (baisse non significative, en cohérence avec le bilan simple réalisé en section 3.8.2) peuvent être appliquées à la recharge estimée : une pente à la baisse de la recharge est observée sans que cette dernière soit significative au seuil de 5 % (mais elle l'est au seuil de 9 %), combinée à une occurrence plus fréquente des années déficitaires lors de la seconde moitié de l'historique.

### 3.9. BASSIN VERSANT DE L'ENGRANNE



#### 3.9.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de l'Engranne est situé dans l'est du département de la Gironde, dans la région de l'Entre-Deux-Mers. Prenant sa source dans les formations de l'Oligocène supérieur, l'Engranne s'écoule dans les calcaires à Astéries pour la majeure partie de son cours. Ceux-ci sont rencontrés à l'affleurement, au cœur du bassin versant, le plus souvent sous recouvrement colluvial mais aussi alluvial. Ils constituent une ressource en eau souterraine majeure, mais vulnérable dans le secteur de l'Entre-Deux-Mers. On retiendra en particulier le caractère fortement karstifié de ces calcaires.

Les molasses de l'Agenais sont présentes au-dessus des calcaires à Astéries et sont retrouvées sur les crêtes topographiques, parfois sous-recouvrement de lambeaux de formations du Miocène inférieur (calcaire de l'Agenais, marnes à ostrea, calcaires gréseux). Les molasses se caractérisent par un faciès argilo-gréseux-carbonaté, tant dans leur partie supérieure qu'inférieure. D'une épaisseur totale de 25 à 50 m environ, les deux complexes sont localement séparés par le calcaire de Monbazillac, épais de 0,5 à 2 m.

On pourra se reporter à la carte géologique de Podensac et à sa notice (Capdeville et al., 1996) pour plus de précisions, ainsi qu'au rapport RP-66335-FR (Cabaret et al., 2016).

#### 3.9.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant : ni concernant les précipitations annuelles, ni les indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux). Des tendances non significatives d'un point de vue statistique sont cependant relevées : les valeurs sont très légèrement à la hausse pour l'un (plus de jours de pluie) et à la baisse pour deux autres (des pluies annuelles en baisse et des épisodes pluvieux moins intenses).

Les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle qui, pendant la période 1959-2020, est globalement à la hausse. Cette hausse n'est pas linéaire et est particulièrement importante entre 1980 et 1990. La même évolution est constatée pour les températures moyennes, à

l'exception des années 2015 à 2020, pour lesquelles on observe une dé-corrélation entre ETP et températures moyennes de l'air.

Les pluies efficaces annuelles présentent une tendance à la baisse. Les deux-tiers des années les plus déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) sont situés après l'an 2000, alors que les années excédentaires sont toutes rencontrées entre 1960 et 2000. Le nombre de jours de pluie efficace dans l'année et les épisodes les plus contributifs apparaissent aussi en baisse au cours de la période considérée. Enfin, si aucune tendance significative n'apparaît sur les pluies efficaces trimestrielles, celles-ci sont en légère baisse et présentent, pour deux d'entre elles, une rupture autour des années 1990.

### **3.9.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitimétrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie se situe dans la partie supérieure du cours d'eau (P5715010, l'Engranne à Baigneaux), bien avant la confluence avec la Dordogne, à Saint-Jean-de-Blaignac.

Des tendances significatives à la baisse sont observées pour le débit moyen annuel et pour l'ensemble des indicateurs d'étiage, au cours de la période considérée (1967-2020). Les indicateurs de crues suivent une évolution à la baisse, non significative, notamment les VCX10 et VCX30.

Les tendances à la baisse s'accompagnent d'une rupture dans les séries temporelles correspondantes, toutes situées à la fin des années 1980, à l'exception du QMNA pour lequel la rupture intervient au tout début des années 2000.

La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est très bonne pour la période considérée.

### **3.9.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe des calcaires à Astéries de l'Oligocène est prise en compte pour cette analyse. Deux piézomètres, situés en dehors du bassin versant, ont été sélectionnés à cet effet. L'un d'entre eux cependant (08288X0015/P7) ne dispose pas actuellement de chronique de données suffisamment longue pour être exploitée statistiquement.

Le piézomètre 08281X0017/F montre une évolution à la hausse des niveaux bas, moyens et hauts, pendant la période 2008-2020, dont les deux dernières sont significatives statistiquement parlant. Il n'est pas observé de modification tendancielle du mois de survenue des basses et hautes eaux. Ces évolutions à la hausse sont en phase avec l'évolution de la pluie efficace pour la même période (on rappelle toutefois que pendant une période plus longue [1958-2020], on observe une tendance à la baisse des pluies efficaces).

On retiendra enfin une assez bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés dans le piézomètre 08288X0015/P7. Celle-ci est par contre moins bonne pour les données du piézomètre 08281X0017/F.

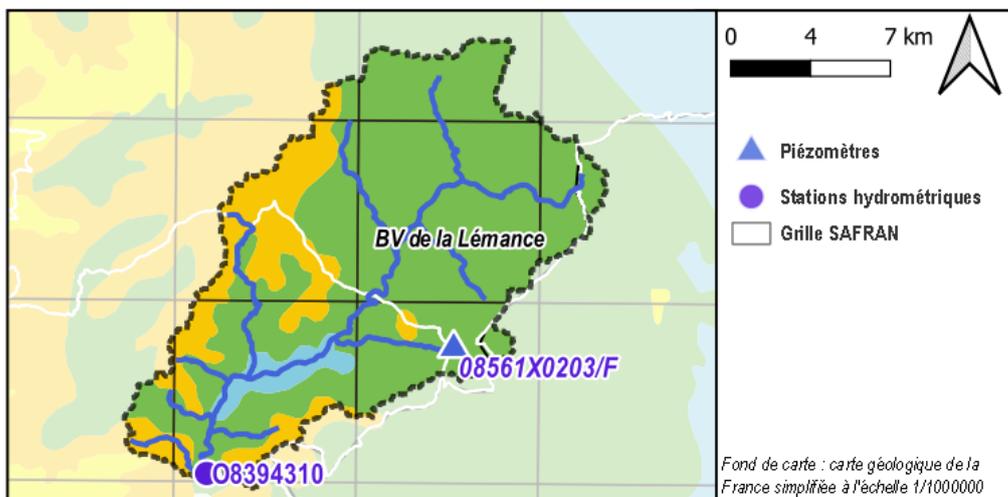
### **3.9.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station de l'Engranne à Baigneaux P5715010 (initialement développée dans Cabaret et al. (2016) et adaptée dans le cadre de la présente étude), ont été mises en œuvre. Le bassin versant étant karstique, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

La méthode du BFI met en évidence une tendance à la baisse de l'écoulement de base et une relative stabilité du BFI, tout au long de la période 1967-2020. Une rupture dans l'écoulement de base intervient en 1986. On relève par ailleurs une variabilité assez forte du BFI à partir des années 2000, celle-ci apparaissant notamment après une décennie 1990 durant laquelle la variabilité fut moindre.

Deux modèles GARDENIA ont été développés : leur seule différence résidant dans la prise en compte d'un débit d'échange souterrain. Les deux modèles présentent un calage de qualité modeste (Nash = 0,63 et 0,64) pour la période de simulation (1959-2020). Ils font apparaître une nette tendance à la baisse de la pluie efficace et de la recharge simulées, avec une rupture intervenant dans la seconde moitié des années 1980. Le ratio "recharge / pluie efficace" est en hausse dans les deux modèles et présente une tendance significative en l'absence d'échange souterrain. Il paraît intéressant de relever que la variabilité du ratio semble augmenter à partir des années 2000, notamment en l'absence d'échange souterrain.

### 3.10. BASSIN VERSANT DE LA LÉMANCE



#### 3.10.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Situé dans le Périgord, le bassin versant de la Lémance s'étend principalement sur les départements de la Dordogne (à l'amont) et du Lot-et-Garonne (à l'aval).

Prenant sa source dans les formations calcaires du Santonien, la Lémance s'écoule sur les calcaires marneux du Coniacien jusqu'à l'entrée de Sauveterre-sur-Lémance. Après une traversée rapide des calcaires crayeux du Turonien, sur le territoire de cette commune, la rivière poursuit son cours sur les marno-calcaires du Kimméridgien supérieur (Jurassique). Peu avant Cuzorn, la rivière sort des formations jurassiques pour retraverser en sens inverse la série stratigraphique : Turonien, puis Coniacien dont la présence à l'affleurement disparaît à hauteur de la station hydrométrique de Cuzorn. Elle traverse en cela la structure anticlinale de Saint-Front / Sauveterre-la-Lémance.

Hormis les formations du Secondaire et celles du Quaternaire (limons, colluvions et alluvions), on relève, à l'affleurement dans le bassin versant, quelques placages tertiaires présents principalement sur les reliefs, au nord-ouest, à l'ouest et au sud. Ce sont les formations sidérolithiques, constituées notamment par des sables à lentilles argileuses du Lutétien. On pourra se reporter aux cartes géologiques de Belvès, ainsi qu'à leur notice explicative (respectivement Dubreuilh et al., 1988, et Platel, 1983) pour plus de précisions.

D'un point de vue hydrogéologique, les formations carbonatées du Crétacé supérieur constituent la principale ressource en eaux souterraines présente à l'affleurement. Elle est habituellement scindée en deux ensembles, séparés par les formations marno-calcaires du Coniacien : un niveau supérieur daté du Santonien-Coniacien et un niveau inférieur correspondant au Turonien. On relève leur caractère karstifié.

### **3.10.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement**

Fait notable, si aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations annuelles dans le bassin versant ou du nombre de journées pluvieuses, la contribution des 10 jours les plus pluvieux de l'année présente une tendance à la baisse. On relève en complément, pour les deux premières variables citées, une baisse non significative des valeurs d'un point de vue statistique.

Comme ailleurs, les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle et la température moyenne annuelle de l'air qui, pour la période 1959-2020, sont globalement à la hausse. Ces hausses ne sont pas linéaires et sont particulièrement importantes entre 1980 et 1990. Les évolutions sont par ailleurs fortement corrélées, à l'exception des années 2015 à 2020.

Les pluies efficaces annuelles et le nombre de jours de pluie efficace dans l'année présentent une tendance à la baisse pour la période considérée. La contribution des 5 jours les plus contributifs est en baisse, mais de façon non significative statistiquement parlant. Ces baisses se retrouvent pour les pluies efficaces trimestrielles de l'hiver (non significatif), de l'été (avec une rupture en 2001) et de l'automne (tendance significative). Seules les pluies efficaces printanières semblent rester stables.

### **3.10.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie (O8394310, La Lémance à Cuzorn) est à l'amont du bassin versant.

Les débits moyens ainsi que l'ensemble des indicateurs d'étiage et de crues présentent une tendance à la baisse pendant la période considérée (1969-2020). La tendance est particulièrement marquée pour les indicateurs d'étiage. Des ruptures accompagnent ces tendances, en 1988 pour le débit moyen annuel, en 2001 pour les indicateurs d'étiage et en 1996 ou 2004 pour les indicateurs de crue.

La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est bonne, mais la baisse de pluie efficace ne semble pouvoir expliquer à elle seule la baisse observée sur les débits.

### **3.10.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe des calcaires du Coniacien-Santonien a été analysée, grâce aux données du piézomètre 08561X0203/F, situé à l'intérieur du bassin versant (Loubéjac).

Aucune tendance n'apparaît d'un point de vue statistique pour la période considérée (1999-2020). Néanmoins, les niveaux moyens, maximum et minimum annuels suivent une évolution à la baisse.

On retiendra par ailleurs une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés dans le piézomètre 08561X0203.

### **3.10.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit ont été mises en œuvre. Le bassin versant étant relativement hétérogène et karstifié, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

La méthode du BFI met en évidence une tendance à la baisse de l'écoulement de base et du BFI au cours de la période 1969-2020. Le BFI évolue de 0,8 dans les années 1970 à une valeur de l'ordre de 0,7 lors de la dernière décennie.

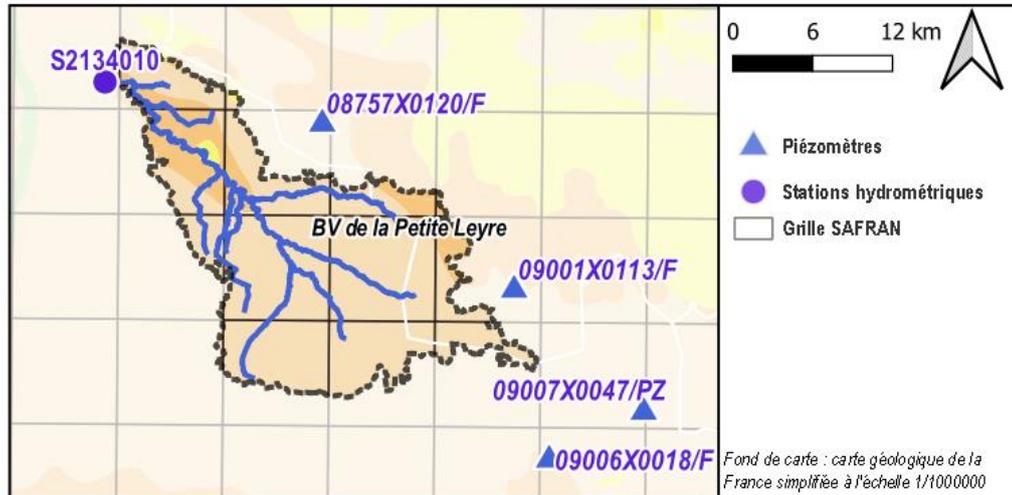
Trois modèles GARDENIA ont été développés, tous présentant un bon calage (Nash = 0,79 à 0,83) pour la période de simulation (1959-2020). Ils se différencient par :

- l'absence d'échange d'eau (surface ou souterrain) avec les bassins limitrophes ;
- la prise en compte d'un débit d'échange souterrain ;
- la prise en compte d'un débit d'échange superficiel.

Les trois modèles font apparaître une nette tendance à la baisse de la pluie efficace et de la recharge simulées.

Le ratio "recharge / pluie efficace" est en hausse pour la période 1958-2020, présentant, dans un des cas, une tendance au sens statistique du terme. Ce ratio s'établit à un niveau assez similaire d'un modèle à un autre (autour de 70 % lors des cinq dernières années), ce qui est du même ordre de grandeur que le BFI. Les résultats des tendances, apportés d'une part par la méthode BFI et d'autre part par la modélisation GARDENIA, peuvent sembler contradictoires, mais ce ne sont pas les mêmes périodes considérées : 1969-2020 pour le BFI (1978-2020 pour le BFI calculé sur 10 ans), 1959-2019 pour le modèle GARDENIA.

### 3.11. BASSIN VERSANT DE LA PETITE LEYRE



#### 3.11.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Petite Leyre est situé dans le triangle landais. Il s'étend principalement dans le département des Landes et, dans une bien plus faible mesure, dans le sud-est du département de la Gironde.

Les terrains présents à l'affleurement sont très majoritairement constitués par des sables du Plio-Quaternaire, dont notamment les sables d'Arengosse, d'Onesse, de Castets ou des Landes. On relève néanmoins très localement la présence de glaises bigarrées d'âge tortonien, sur le territoire de la commune de Sore, ainsi que des dépôts alluviaux dans le lit de la rivière.

Les formations sableuses du Plio-Quaternaire sont exploitées pour différents usages ; elles bénéficient d'une recharge assez abondante eu égard à leurs propriétés très infiltrantes, mais en contrepartie sont souvent très vulnérables aux pollutions anthropiques. Plus en profondeur, les aquifères calcaires du Miocène inférieur et de l'Oligocène (calcaires à Astéries) constituent des ressources exploitées à l'échelle départementale, voire régionale.

#### 3.11.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, ni concernant les précipitations annuelles, ni les indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux) pour lesquels on peut néanmoins relever des tendances non significatives d'un point de vue statistique : elles sont à la baisse pour le premier (moins de jours de pluie) et à la hausse pour le second (des épisodes pluvieux plus intenses).

Les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle qui, tout au long de la période 1959-2020, est globalement à la hausse. Cette hausse n'est pas linéaire et est particulièrement importante entre 1980 et 1990. La même évolution est constatée pour les températures moyennes, à l'exception des années 2015 à 2020, pour lesquelles on observe une dé-corrélation entre ETP et températures moyennes de l'air.

Si les pluies efficaces annuelles sont globalement à la baisse, elles ne le sont pas de manière significative. Pour autant, les deux-tiers des années les plus déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) sont situés après l'an 2000, ce qui n'empêche certaines années récentes d'être, à l'inverse, excédentaires - signe potentiellement d'une forte variabilité. Le nombre de jours de pluie efficace dans l'année apparaît par contre nettement en baisse au cours de la période considérée, contrairement aux épisodes les plus contributifs qui ne présentent pas de tendance significative à la baisse. Enfin, si aucune tendance significative n'apparaît pour les pluies efficaces trimestrielles, on peut observer une baisse relative de celles-ci durant l'été et l'automne.

### **3.11.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie est à l'aval du bassin versant de la Petite Leyre, peu avant la confluence avec la Grande Leyre, à Moustey (S2134010, la Petite Leyre à Belhade).

Aucune tendance, au sens statistique du terme, ne se dégage pour les débits moyens, d'étiage et de crues.

Toutefois, on peut relever que les débits moyens en aval du bassin versant semblent plutôt en hausse pour la période 1995-2020. La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est bonne, mais la hausse ne peut être expliquée par l'évolution temporelle de la pluie efficace pendant la période considérée.

Les débits caractéristiques à l'étiage sont plutôt en baisse, à l'exception notable du VCN3. Deux des trois valeurs les plus élevées de l'ensemble des indicateurs d'étiage sont pour autant rencontrées lors de la dernière décennie (2013 et 2018). Ici, l'impact des prélèvements estivaux pourraient jouer un rôle significatif, mais l'analyse des chroniques débitométriques seules ne permet pas de quantifier leur impact.

Enfin, les indicateurs de crue sont tous en baisse pour la période considérée.

### **3.11.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe des calcaires de l'Helvétien et celle du Plio-Quaternaire ont été prises en compte, en s'appuyant sur des piézomètres situés en dehors du bassin versant.

Concernant la nappe de l'Helvétien, le piézomètre 09006X0018, influencé par des prélèvements saisonniers, fait apparaître une tendance à la baisse des niveaux bas, moyens et hauts pour la période 2001-2020. Il n'est pas observé de modification tendancielle du mois de survenue des basses et hautes eaux. On retiendra avant tout le caractère fortement anthropisé de cette chronique piézométrique.

Les trois chroniques piézométriques du Plio-Quaternaire (09007X0047, 09001X0113 et 08757X0120) ne font apparaître aucune tendance, d'un point de vue statistique, lors des périodes étudiées (respectivement 2003-2020 et 2008-2020 pour les deux derniers piézomètres cités). Il semble se dessiner néanmoins, pour les trois piézomètres, une légère évolution à la hausse des niveaux moyens annuels et une évolution à la baisse de la durée de la décharge estivale. Aucune autre évolution n'apparaît de façon similaire pour les trois ouvrages.

On retiendra enfin une assez bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés dans le piézomètre 09007X0047. Les corrélations sont moins évidentes pour les autres ouvrages du Plio-Quaternaire et a fortiori pour celui de l'Helvétien.

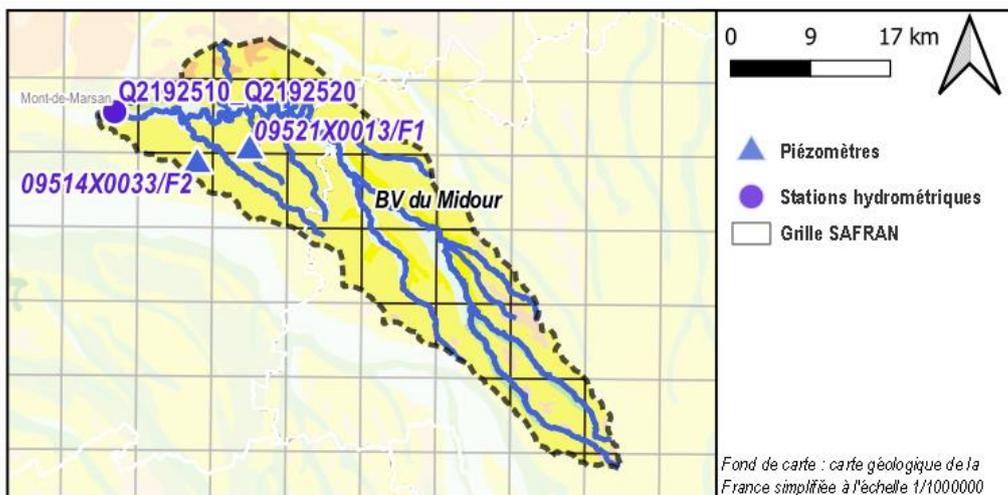
### **3.11.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station de la Petite Leyre à Belhade S2134010 (initialement développée dans le cadre de l'étude Saltel et al. (2016) et adaptée dans le cadre de la présente étude), ont été mises en œuvre. Le bassin versant étant relativement hétérogène, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

La méthode du BFI met en évidence une stabilité de l'écoulement de base et du BFI (autour de 80 %) pour la période 1995-2020.

Deux modèles GARDENIA ont été développés ; leur seule différence réside dans la prise en compte d'un débit d'échange souterrain. Les deux présentent un excellent calage (Nash = 0,89 et 0,9) pour la période de simulation (1959-2020). Les deux modèles font apparaître une nette tendance à la baisse de la recharge simulée. Le ratio "recharge / pluie efficace" demeure stable, à un niveau distinct selon l'hypothèse retenue pour la simulation (60 % sans échange souterrain, 40 % avec). Il paraît intéressant de relever que la variabilité du ratio semble augmenter dans les deux cas à partir des années 2000.

### 3.12. BASSIN VERSANT DU MIDOUR



#### 3.12.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Midour est situé en aval du piémont pyrénéen, à cheval entre les départements des Landes et du Gers. La majeure partie du bassin est située dans la région naturelle de l'Armagnac, qui est caractérisée par des paysages vallonnés et des vallées relativement étroites, tandis que l'aval du bassin versant présente un relief moins marqué. Sa superficie est de 785 km<sup>2</sup>.

Les terrains affleurants s'étagent du Miocène inférieur à l'Holocène : dans la partie landaise, les sables fauves (Serravalien) affleurent principalement, recouverts par intermittence des glaises bigarrées d'âge tortonien, voire de niveaux sableux (formations d'Arengosse et d'Onesse) ou de dépôts alluviaux. Dans la partie gersoise, on retrouve les sables fauves et les glaises bigarrées avec quelques affleurements locaux de dépôts calcaires de l'Helvétien, mais l'amont du bassin versant est principalement recouvert de molasses tertiaires.

La formation des calcaires de l'Helvétien est l'aquifère le plus exploité, notamment au droit du sous-bassin du Ludon (aval du bassin versant) où il est continu et doté de bonnes propriétés. Aucune autre ressource en eau souterraine, peu profonde et d'envergure, n'a été identifiée dans le bassin versant : aucune nappe ne s'établit dans les sables fauves lorsqu'ils sont en contact avec les calcaires de l'Helvétien, et en amont du bassin versant, là où ils sont en recouvrement des molasses, le stockage d'eau y est faible, mis à part quelques exceptions. Les calcaires de l'Aquitainien ne sont présents que dans une partie très aval du bassin versant. Enfin, concernant les terrains molassiques, seuls quelques bancs calcaires semblent héberger de petites nappes perchées.

#### 3.12.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations dans le bassin versant, ni concernant les précipitations annuelles, ni les indicateurs du régime des pluies (nombre de journées pluvieuses, contribution des 10 jours les plus pluvieux).

Les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle qui, pour la période 1959-2020, est globalement à la hausse. Cette hausse n'est pas linéaire : avec une hausse importante entre 1980 et 1990 et une relative stabilité depuis. La même évolution est constatée pour les températures moyennes.

En conséquence, les pluies efficaces annuelles sont globalement à la baisse. En particulier, la quasi-totalité des années les plus déficitaires de l'historique disponible (à fréquence 10 %) est située après l'an 2000. À noter que cela n'empêche pas certaines années récentes d'être, à l'inverse, excédentaires. La baisse globale de la pluie efficace semble être due à la baisse de contributions de tous les épisodes de pluie efficace, qu'ils soient très contributifs ou moins contributifs. À noter également qu'en été, il n'était pas rare d'observer des précipitations efficaces lors de la première moitié de la période d'observation, alors que cela est devenu exceptionnel pour la seconde moitié.

### **3.12.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitmétrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie est à l'aval du bassin versant (Q2192510, le Midour à Mont-de-Marsan, complétée par Q2192520 pour la période post-2009).

Les débits moyens en aval du bassin versant semblent globalement en baisse pour la période de 1967 à aujourd'hui, avec une rupture détectée au milieu des années 1980. La corrélation entre la pluie efficace et les débits moyens annuels est bonne, et la baisse observée dans ces débits est donc bien en adéquation avec la baisse observée dans les pluies efficaces (au moins en partie).

Les débits caractéristiques à l'étiage sont tous en très nette baisse. Cette baisse est particulièrement visible entre 1980 et 1990 (la rupture déjà détectée dans les débits moyens est d'ailleurs bien plus marquée). Ici, l'impact des prélèvements estivaux pourraient jouer un rôle significatif, mais l'analyse des seules chroniques débitmétriques ne permet pas de quantifier leur impact.

### **3.12.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe des calcaires de l'Helvétien, ressource en eau souterraine principale du bassin versant, a été analysée. Deux types de comportements ont été préalablement identifiés, et deux ouvrages représentatifs de ces comportements ont alors été choisis : 09514X0033/F2 (Pujo-le-Plan) et 09521X0013/F1 (Perquie).

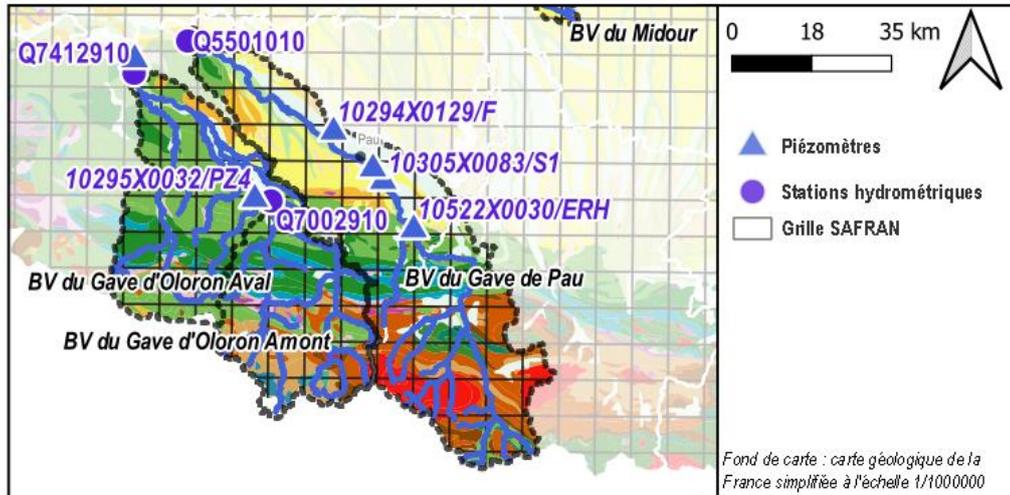
La principale observation faite concernant l'évolution des niveaux piézométriques au droit de l'ouvrage 09514X0033/F2 est une baisse marquée des niveaux piézométriques moyens, baisse non linéaire puisque depuis 2010 les niveaux moyens semblent stables, voire légèrement à la hausse. L'ouvrage 09521X0013/F1 ne bénéficie pas de mesures suffisamment nombreuses pour mettre en œuvre l'analyse détaillée des tendances, mais cette baisse des niveaux n'y est pas observée. En outre, dans cet ouvrage, une bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques est mise en évidence, alors qu'il n'existe pas de corrélation pour l'ouvrage 09514X0033/F2. On peut donc conjecturer que la baisse notable des niveaux piézométriques est au moins en partie liée aux prélèvements dans les 3 captages situés à proximité de cet ouvrage. À noter que pendant la période d'observation piézométrique (1990-2019), aucune tendance significative n'existe pour les pluies efficaces (cf. stabilité depuis 1990, évoquée en section 3.12.2).

### **3.12.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Débit, à la station du Midour (Q2192510) à Mont-de-Marsan, ont été mises en œuvre (Manceau et al., 2019 ; BRGM/RP-68816-FR). Le bassin versant étant hétérogène, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

Les deux méthodes donnent des résultats en cohérence avec notamment une baisse de l'écoulement de base et de la recharge estimée par modélisation globale, pour les périodes des historiques disponibles (1959-2019 pour GARDENIA et 1976-2020 pour le BFI). Pour la recharge, cela se traduit par des années déficitaires (à fréquence 10 %), toutes situées dans la seconde moitié de la période 1959-2020. En outre, les deux méthodes montrent respectivement une stabilité du BFI et du ratio "recharge / pluie efficace" autour de 40/50 %, ce qui est cohérent avec les observations faites sur les chroniques climatiques montrant une stabilité du « régime » des pluies efficaces.

### 3.13. BASSIN VERSANT DU GAVE DE PAU



#### 3.13.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Gave de Pau s'étend sur les départements des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées-Atlantiques. Il est constitué pour un tiers d'un relief de montagne culminant jusqu'à plus de 3000 m et pour les deux tiers d'un contexte de piedmont et de plaine alluviale.

Dans cette dernière, le cours d'eau s'écoule sur des alluvions récentes de fortes perméabilités. Dans le secteur de montagne, les formations hydrogéologiques traversées sont nombreuses, généralement organisées de façon perpendiculaire (est-ouest) à l'écoulement de surface (sud-nord). On relève parmi celles-ci (Wuilleumier et al., 2017) :

- les calcaires urgoniens présents par exemple à l'est de la vallée d'Ossau. Ces calcaires karstifiés contiennent une ressource en eaux souterraines conséquente et donnent naissance à de nombreuses sources ;
- les formations granitiques du massif de Néouvielle. L'ensemble du massif plutonique est parcouru par de nombreuses failles et est susceptible d'être altéré sous la forme d'arènes sableuses propices à l'infiltration de l'eau.

Enfin, le régime d'écoulement du Gave de Pau est de type pluvio-nival, avec un écoulement différé lié à la fonte des neiges et des glaciers. On relève aussi la présence de barrages hydroélectriques.

#### 3.13.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations annuelles dans le bassin versant (1959-2020), de même pour le nombre de journées pluvieuses et la contribution des 10 jours les plus pluvieux. On relève néanmoins, pour cette dernière variable, une hausse non significative des valeurs d'un point de vue statistique (+30 mm environ pour la période 1959-2020).

Dans ce bassin versant de montagne, une analyse des précipitations solides (neige) a été conduite. Si aucune évolution nette ne se dégage des séries de données étudiées, on relève que

le nombre de journées neigeuses sont en légère baisse, tandis que la contribution des 10 jours les plus neigeux est en hausse.

Comme ailleurs, les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle et la température moyenne annuelle de l'air qui, pour la période 1959-2020, sont globalement à la hausse. Ces hausses ne sont pas linéaires et sont particulièrement importantes entre 1980 et 1990. Les évolutions sont par ailleurs fortement corrélées, à l'exception des années 2015 à 2020.

### **3.13.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie (Q5501010 : Le Gave de Pau à Bérenx) est à l'aval du bassin versant.

Les débits moyens, ainsi que l'ensemble des indicateurs d'étiage et de crues, ne présentent pas de tendance pour la période considérée (1923-2020). Notons que ce résultat est conforme à celui qui avait été obtenu pour la période 1923-2016 pour quelques indicateurs, par Seguin et Wuilleumier (2017), alors que des tendances étaient observables pour des périodes différentes (Wuilleumier et Seguin, 2018).

Par ailleurs, si aucune tendance, au sens statistique du terme, n'est détectée, il apparaît une légère évolution à la baisse pour toutes les variables considérées (débit moyen annuel, indicateurs de crue et d'étiage) lors de la période 1923-2020.

### **3.13.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

Quatre piézomètres suivant la nappe alluviale du Gave de Pau ont été pris en compte : 10522X0030/ERH, 10305X0234/PZ, 10305X0083/S1 et 10294X0129/F.

Une seule tendance apparaît d'un point de vue statistique, pour les périodes considérées (début en 2002 ou 2003, fin entre 2013 et 2020 selon les séries temporelles) et pour les quatre piézomètres étudiés : elle porte sur une hausse des niveaux minima annuels dans le piézomètre 10305X0083/S1 (Assat). Notons que les niveaux moyens et hauts annuels dans ce même piézomètre sont aussi en hausse (période 2003-2020).

Des évolutions non significatives statistiquement parlant sont aussi observées ailleurs pour la même période : les niveaux hauts, bas et moyens annuels sont en hausse dans le piézomètre 10305X0234/PZ (Uzos), tout comme les niveaux hauts dans le piézomètre 10522X0030/ERH (Coarraze). Les mêmes variables sont en baisse dans le piézomètre de Lescar (10294X0129/F), mais pendant une période plus courte (2002-2013).

Notons que la pluie efficace présente une tendance à la hausse pendant la période 2003-2020.

On retiendra par ailleurs une adéquation moyenne à médiocre entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés dans les différents piézomètres. Ceci peut sans doute être mis en lien avec le régime pluvio-nival du Gave de Pau et la forte interaction entre la nappe alluviale et celui-ci (Corbier et Wuilleumier, 2010).

### **3.13.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

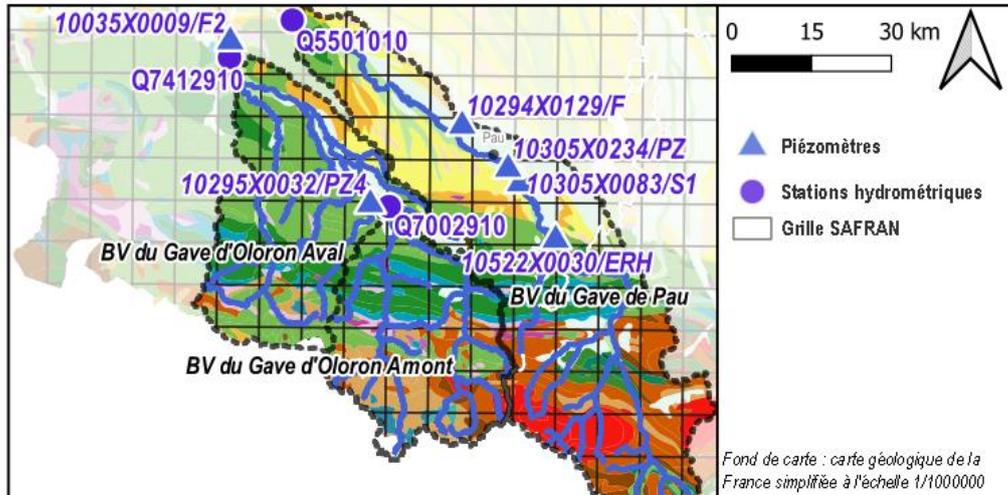
La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Température / Niveau / Débit, à la station, ont été mises en œuvre. Au regard du caractère éminemment complexe du bassin versant (notamment apports/pertes depuis/vers d'autres bassins versants), l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

La méthode du BFI ne met en évidence aucune évolution significative de l'écoulement de base ou du BFI, lors de la période 1923-2020. Néanmoins, une forte variabilité de l'écoulement de base apparaît notamment lorsque cette variable est moyennée sur 10 ans. Le BFI connaît une variabilité similaire, moins accentuée cependant. Ces résultats sont conformes à ceux présentés par Wuilleumier et Seguin (2018).

Le modèle GARDENIA présente un bon calage (Nash = 0,8) pour la période de simulation (1959-2020). Il fait apparaître une nette tendance à la baisse du stock annuel de neige modélisé et une nette tendance à la hausse du ratio "fonte / débit total". Notons que ce dernier ne peut demeurer élevé que sous réserve d'un stock de neige suffisant pour l'alimenter, ce qui ne peut qu'interroger sur la durabilité de ces tendances.

Pluie efficace, recharge et fonte des neiges simulées présentent toutes une évolution à la baisse, sans que celles-ci soient significatives statistiquement parlant.

### 3.14. BASSIN VERSANT DU GAVE D'OLORON - PARTIE AMONT



#### 3.14.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Gave d'Oloron s'étend dans le département des Pyrénées-Atlantiques. Dans sa partie amont, il est constitué, pour l'essentiel, d'un relief de montagne culminant jusqu'à un peu moins de 3000 m (Pic Palas). On relève deux axes hydrographiques principaux, d'orientation sud-nord : la vallée d'Ossau et la vallée d'Aspe.

Les formations hydrogéologiques traversées sont nombreuses, généralement organisées de façon perpendiculaire (est-ouest) à l'écoulement de surface (sud-nord). On relève parmi celles-ci (Wuilleumier et al., 2017) :

- les calcaires urgoniens présents notamment entre la vallée d'Aspe et la vallée d'Ossau, dans le secteur du Pêne d'Escot ou des bois d'Izeste et d'Arudy par exemple. Ces calcaires karstifiés donnent naissance à de nombreuses sources ;
- les formations granitiques du massif des Eaux Chaudes. Ce massif plutonique est parcouru par de nombreuses failles et est susceptible d'être altéré sous la forme d'arènes sableuses propices à l'infiltration de l'eau.

Enfin, le régime d'écoulement du Gave d'Oloron est de type pluvio-nival, avec un écoulement différé lié à la fonte des neiges et des glaciers. On relève aussi la présence de barrages hydroélectriques.

#### 3.14.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations annuelles dans le bassin versant (1959-2020), ainsi que pour le nombre de journées pluvieuses et la contribution des 10 jours les plus pluvieux. On relève néanmoins, pour cette dernière variable, une hausse non significative des valeurs d'un point de vue statistique (+40 mm environ pour la période 1959-2020), tandis que le nombre de journées pluvieuses semble diminuer d'une dizaine de jours tout au long de la période.

Dans ce bassin versant de montagne, une analyse des précipitations solides (neige) a été conduite. Si aucune évolution nette ne se dégage des séries de données étudiées, on relève que les précipitations neigeuses annuelles et la contribution des 10 jours les plus neigeux sont en hausse. Ceci est potentiellement lié aux années 2013 à 2019 plus enneigées que les précédentes.

Comme ailleurs, les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle et la température moyenne annuelle de l'air qui, pour la période 1959-2020, sont globalement à la hausse. Ces hausses ne sont pas linéaires et sont particulièrement importantes entre 1980 et 1990. Les évolutions sont par ailleurs fortement corrélées.

### **3.14.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie (Q7002910, le Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie) se situe après la confluence entre les gaves d'Ossau et d'Aspe.

Les débits moyens, ainsi que l'ensemble des indicateurs d'étiage et de crues, ne présentent pas de tendance pendant la période considérée (1912-2020), à l'exception d'un indicateur de crue, le VCX3, qui présente une tendance à la hausse (avec rupture en 1964). Une évolution à la hausse, non significative, semble se dessiner aussi pour le VCX10, voire dans une moindre mesure pour le VCX30.

A l'inverse, les débits moyens, ainsi que l'ensemble des indicateurs d'étiage, présentent une évolution non significative à la baisse. Elle est particulièrement prononcée pour le QMNA et le VCN30.

Notons que ce résultat est conforme à celui qui avait été obtenu lors de la période 1912-2016, pour quelques indicateurs, par Seguin et Wuilleumier (2017) et que des tendances à la baisse étaient identifiées de façon significative pendant une période restreinte (1967-2011) pour les débits moyens et le QMNA (ibid.).

### **3.14.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

En l'absence de chroniques piézométriques disponibles dans le bassin versant, celle du piézomètre de Moumour (10295X0032/PZ4), suivant les alluvions du Vert, a été étudiée.

Les niveaux moyens, maximum et minimum annuels suivent une évolution à la hausse pendant la période considérée (2004-2020), mais seule celle relative aux niveaux minimum est significative.

Notons que la pluie efficace suit une évolution à la hausse lors de la même période. On retiendra d'ailleurs l'existence d'une très bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés.

### **3.14.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Température / Niveau / Débit, à la station, ont été mises en œuvre. Au regard du caractère éminemment complexe du bassin

versant, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

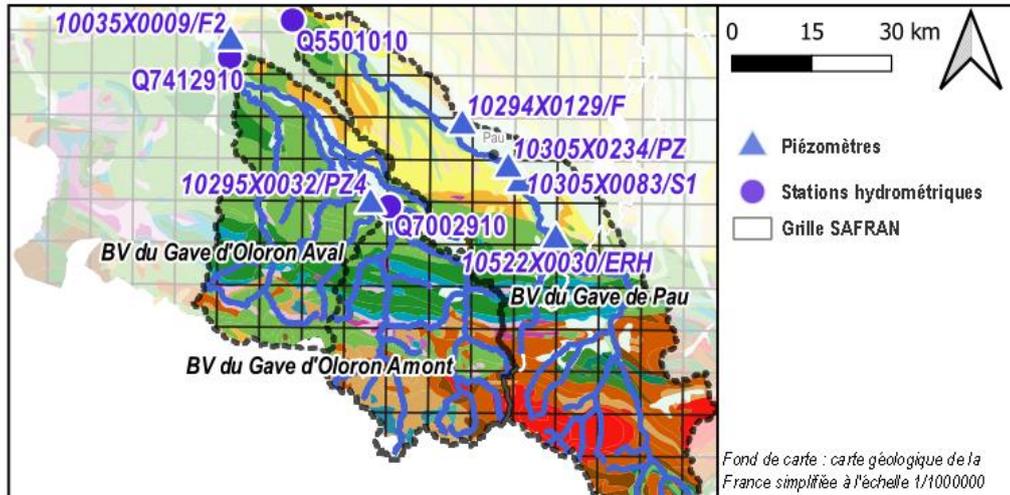
La méthode du BFI ne met en évidence aucune évolution significative de l'écoulement de base ou du BFI pour la période 1912-2020. Néanmoins, une forte variabilité de l'écoulement de base apparaît notamment lorsque cette variable est moyennée sur 10 ans. Le BFI connaît une variabilité similaire, moins accentuée cependant. Les deux variables évoluent à la baisse pour la période considérée (baisse non significative). Ces résultats sont conformes à ceux présentés par Wuilleumier et Seguin (2018).

Deux modèles GARDENIA ont été développés, tous présentant un bon calage (Nash = 0,75 et 0,81) pour la période de simulation (1959-2020). Ils se différencient par l'absence (cas 1) ou la présence (cas 2) d'échanges d'eau (surface, ou souterrain) avec les bassins limitrophes (on peut par exemple citer la perte du Gave d'Oloron, à Arudy, vers le Gave de Pau, via la source de l'œil du Neez).

Les deux modèles font apparaître une nette tendance à la baisse du stock annuel de neige modélisé et une nette tendance à la hausse du ratio "fonte / débit total" (avec une rupture en l'an 2000 pour ce ratio). Notons, comme pour le Gave de Pau, que le ratio ne peut demeurer élevé que sous réserve d'un stock de neige suffisant pour l'alimenter, ce qui ne peut qu'interroger sur la durabilité de ces tendances.

Pluie efficace et recharge simulées présentent une évolution à la baisse, de peu non significative statistiquement parlant pour la recharge. La fonte des neiges simulée est en hausse pour la période analysée (1959-2019).

### 3.15. BASSIN VERSANT DU GAVE D'OLORON - STATION AVAL



#### 3.15.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Gave d'Oloron s'étend sur le département des Pyrénées-Atlantiques. Il est constitué pour un tiers d'un relief de montagne culminant jusqu'à un peu moins de 3000 m (Pic Palas) et pour les deux tiers d'un contexte de piedmont et de plaine alluviale. Trois axes hydrographiques sud-nord constituent le Gave d'Oloron : il s'agit, d'est en ouest, de la vallée d'Ossau, la vallée d'Aspe et la vallée du Saison.

Dans la partie alluviale, le cours d'eau s'écoule sur des alluvions récentes de fortes perméabilités. Dans le secteur de montagne et comme pour le Gave de Pau, les formations hydrogéologiques traversées sont nombreuses, généralement organisées de façon perpendiculaire (est-ouest) à l'écoulement de surface (sud-nord). On relève parmi celles-ci (Wuilleumier et al., 2017) :

- les calcaires urgoniens présents notamment entre la vallée d'Aspe et la vallée d'Ossau, dans le secteur du Pêne d'Escot ou des bois d'Izeste et d'Arudy par exemple, ou encore dans le massif des Arbailles. Ces calcaires karstifiés contiennent une ressource en eaux souterraines conséquente et donnent naissance à de nombreuses sources ;
- les « Calcaires des Cañons » du Crétacé supérieur, eux aussi karstifiés, et armant notamment le secteur de la Pierre-Saint-Martin.

Enfin, le régime d'écoulement du Gave d'Oloron est de type pluvio-nival, avec un écoulement différé lié à la fonte des neiges et des glaciers. On relève aussi la présence de barrages hydroélectriques.

#### 3.15.2. Principaux constats, à partir de l'historique climatique disponible, concernant l'évolution de la pluie disponible à l'infiltration et au ruissellement

Aucune évolution nette ne se dégage de l'historique des précipitations annuelles dans le bassin versant (1959-2020), ainsi que pour le nombre de journées pluvieuses et la contribution des 10 jours les plus pluvieux. On relève néanmoins, pour cette dernière variable, une hausse non significative des valeurs d'un point de vue statistique (+35 mm environ pour la période étudiée), tandis que le nombre de journées pluvieuses semble diminuer de 7 jours sur l'ensemble de la période.

Dans ce bassin versant de montagne, une analyse des précipitations solides (neige) a été conduite. Si aucune évolution nette ne se dégage des séries de données étudiées, on relève que les précipitations neigeuses annuelles et la contribution des 10 jours les plus neigeux sont en hausse. Comme précédemment évoqué, ceci est potentiellement lié à des années 2013 à 2019 plus enneigées que les précédentes.

Là encore, les évolutions les plus notables concernent l'ETP annuelle et la température moyenne annuelle de l'air qui, au cours de la période 1959-2020, sont globalement à la hausse. Ces hausses ne sont pas linéaires et sont particulièrement importantes entre 1980 et 1990. Les évolutions sont par ailleurs fortement corrélées, à l'exception des années 2015 à 2020.

### **3.15.3. Principaux constats, à partir de l'historique débitométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des débits des cours d'eau**

La station choisie (Q7412910, le Gave d'Oloron à Escos) se situe à l'aval du bassin versant.

Les débits moyens, ainsi que l'ensemble des indicateurs d'étiage, ne présentent pas de tendance pour la période considérée (1922-2020). Les indicateurs de crue sont tous en baisse, les VCX10 et VCX30 présentant une tendance significative d'un point de vue statistique. Les débits moyens annuels sont par ailleurs en baisse au cours de la période.

Notons que ce résultat est conforme à celui qui avait été obtenu pour la période 1949-2016, pour quelques indicateurs, par Seguin et Wuilleumier (2017).

### **3.15.4. Principaux constats, à partir de l'historique piézométrique disponible, concernant l'évolution des valeurs moyennes et extrêmes des stocks en eau souterraine**

La nappe alluviale du Gave d'Oloron est étudiée au travers du piézomètre d'Auterrive (10035X0009/F2), situé juste à l'aval de la station hydrométrique d'Escos.

Les niveaux moyens, maximum et minimum annuels suivent une évolution à la hausse tout au long de la période considérée (2002-2020), mais seule celle relative aux niveaux minimum est significative. Notons que celle-ci est marquée par une première valeur (2002) particulièrement faible.

La pluie efficace suit une évolution à la hausse lors de la même période. On retiendra d'ailleurs l'existence d'une bonne, voire très bonne adéquation entre l'évolution des pluies efficaces et celle des niveaux piézométriques enregistrés.

### **3.15.5. Principaux constats, à partir des historiques et modèles disponibles, concernant l'évolution de la recharge des nappes d'eau souterraine**

La méthode du BFI et une modélisation GARDENIA Pluie / Température / Niveau / Débit, à la station, ont été mises en œuvre. Au regard du caractère éminemment complexe du bassin versant, l'interprétation globale des résultats des méthodes mises en œuvre doit être faite avec précaution.

La méthode du BFI met en évidence une évolution significative à la hausse du BFI au cours de la période 1922-2020. Cette tendance s'accompagne d'une rupture en 1963. Durant la même période, l'écoulement de base semble en légère hausse. Il présente, en tout état de cause, une forte variabilité, particulièrement visible quand la variable est moyennée sur 10 ans glissants. Le BFI connaît une variabilité similaire, moins accentuée cependant.

Le modèle GARDENIA présente un bon calage (Nash = 0,82) pour la période de simulation (1959-2020). Il fait apparaître une nette tendance à la baisse du stock annuel de neige modélisé (avec une rupture en 1982) et une nette tendance à la hausse du ratio "fonte / débit total" (rupture en l'an 2000). Notons, comme précédemment indiqué, que le ratio ne peut demeurer élevé que sous réserve d'un stock de neige suffisant pour l'alimenter, ce qui ne peut qu'interroger sur la durabilité de ces tendances.

Pluie efficace et recharge simulées présentent une évolution à la baisse pendant la période analysée (1959-2019). La fonte des neiges et le ratio "recharge / pluie efficace" simulés sont relativement stables pour la même période.



## 4. Analyse des séries temporelles - Synthèse à l'échelle régionale

### 4.1. OBJECTIF DU CHAPITRE

L'objectif principal de cette étude est d'apporter, à l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine, un regard sur les évolutions hydrogéologiques observées par le passé. On rappelle que l'historique piézométrique directement disponible est souvent limité et que, par conséquent, l'analyse de l'historique de variables additionnelles participant au cycle de l'eau et apportant une information complémentaire et plus ou moins directe sur les eaux souterraines est nécessaire. Dans ce chapitre, qui se veut synthétique, nous proposons de faire ressortir les principaux enseignements, se dégageant de l'analyse croisée des résultats obtenus au chapitre précédent pour les différents bassins versants. Pour faciliter l'analyse, des fiches ont été produites pour chacune des variables analysées permettant l'inter-comparaison de ces dernières dans le secteur d'étude. Dans la suite, les conclusions, établies à propos des variables les moins directement en lien avec les eaux souterraines, sont grisées.

Les fiches éditées pour réaliser cette comparaison sont disponibles en Annexe 5.

### 4.2. PRINCIPAUX CONSTATS, A PARTIR DE L'HISTORIQUE CLIMATIQUE DISPONIBLE, CONCERNANT L'EVOLUTION DE LA PLUIE DISPONIBLE A L'INFILTRATION ET AU RUISSELLEMENT (PERIODE 1959-2020)

#### ETP annuelle et température moyenne annuelle

- ⇒ Une tendance systématiquement significative à la hausse de l'ETP est observée sur l'historique disponible, mais cette évolution à la hausse n'est pas similaire entre les bassins versants. Elle est parfois brutale avec une rupture à la fin des années 1980 (bassins du Clain, du Midour, de l'Engranne, et du Gave de Pau), parfois plus régulière (bassins de la Benaize et de la Vige).
- ⇒ Une tendance systématiquement significative à la hausse de la température est observée sur tous les bassins. À noter que la corrélation de l'ETP avec la température existe parfois, mais n'est pas toujours évidente.

#### Précipitations

- ⇒ Le cumul annuel des précipitations ne montre pas de tendance significative dans l'historique disponible. La même observation est faite concernant le nombre de journées pluvieuses par an.
- ⇒ Des tendances significatives sont observées, dans certains cas, pour la contribution des 10 jours les plus pluvieux, avec notamment une hausse dans les bassins des Pyrénées, mais sans qu'il soit possible d'identifier un comportement homogène à l'échelle régionale.
- ⇒ Concernant les précipitations neigeuses (analysées seulement pour les bassins versants des gaves), on note que le cumul de neige annuel, le nombre de jours neigeux et la contribution des jours les plus neigeux n'évoluent, pour aucun d'entre eux, de façon significative pour l'historique disponible.

### Précipitations efficaces

- ⇒ Les évolutions du cumul annuel des précipitations efficaces sont toutes à la baisse dans l'historique disponible, mais toutes ne sont pas significatives, contrairement à la hausse de l'ETP qui était significative partout. On observe quand même dans tous les bassins étudiés (sauf pour les gaves pour lesquels la pluie efficace ne peut être simplement calculée) une sur-représentation des « événements extrêmes bas » (cumul déficitaire) (3 à 4 événements à fréquence 10 %) et une sous-représentation des « événements extrêmes hauts », au cours de la période 2000-2020.
- ⇒ Aucune tendance significative n'est identifiée dans les précipitations du premier, troisième et quatrième trimestre même si, très souvent, les pentes calculées sont à la baisse. Un comportement homogène et net se dégage concernant les précipitations efficaces estivales : très peu d'années contributives sont observées après l'an 2000, alors qu'elles étaient plus nombreuses par le passé.
- ⇒ Le nombre annuel de journées contributives en pluie efficace évolue de la même manière que les précipitations efficaces cumulées. On observe une évolution à la baisse dans l'historique disponible (parfois significative, mais pas toujours), avec une concentration d'événements extrêmes bas (déficitaires) pendant les 20 dernières années de l'historique.
- ⇒ Le cumul de pluie efficace sur les 5 jours les plus contributifs chaque année montre une évolution moins nette que les autres indicateurs : même si les pentes calculées sont toutes à la baisse (à l'exception du bassin de la Vige), aucune tendance n'est significative et on note une répétition assez homogène des événements extrêmes hauts et bas.

### **4.3. PRINCIPAUX CONSTATS, A PARTIR DE L'HISTORIQUE DEBIMETRIQUE DISPONIBLE, CONCERNANT L'EVOLUTION DES VALEURS MOYENNES ET EXTREMES DES DEBITS DES COURS D'EAU (PERIODES HETEROGENES)**

La comparaison entre les bassins versants est rendue difficile par la différence d'historique disponible des différentes stations hydrométriques considérées. Dans une situation idéale, où tous les historiques seraient suffisants pour analyser des tendances, la plus petite période commune entre les historiques devrait être choisie pour comparer les tendances. Néanmoins, cette période commune étant trop courte, les fiches d'inter-comparaison ont été produites avec la totalité de l'historique disponible, avec toutefois un début de chronique fixé au 1<sup>er</sup> janvier 1960 pour celles bénéficiant de données avant cette date.

#### Débits moyens annuels

- ⇒ Les chroniques bénéficiant d'un historique remontant aux années 1960 ou 1970 sont systématiquement à la baisse (à l'exception du Gave d'Oloron aval), en lien avec la baisse observée des pluies efficaces depuis 1959.
- ⇒ Pour les séries commençant après 1980 ou ultérieurement, il n'est pas observé de tendance significative, de façon concordante avec la baisse non linéaire des pluies efficaces.

#### Débits caractéristiques de crue : VCX3, VCX10 et VCX30

- ⇒ La plupart des VCX3, VCX10 et VCX30 sont à la baisse (sauf dans les bassins de la Lizonne, du Gave d'Oloron amont et de la Vienne), baisse qui n'est significative que pour un nombre limité de bassins.

#### Débits caractéristiques d'étiage : QMNA, VCN3, VCN10 et VCN30

- ⇒ Un point de vigilance est à signaler concernant l'analyse des évolutions des débits à l'étiage : quand ces derniers sont très faibles, la valeur mesurée peut être sujette à des incertitudes importantes.
- ⇒ Tous les QMNA sont à la baisse, baisse qui n'est significative que pour un nombre limité de bassins. Si on ne considère que les historiques les plus longs, une hétérogénéité spatiale semble se dessiner avec une baisse significative des QMNA au sud de la région et moins significative au nord.
- ⇒ Des évolutions assez similaires sont notées pour les autres indicateurs d'étiage (VCN3, VCN10 et VCN 30) : en particulier, les trois bassins les plus au sud de la région (hors Pyrénées) et bénéficiant d'un historique important (bassins versants du Midour, de la Lémance et de l'Engranne) montrent une baisse significative.

#### **4.4. PRINCIPAUX CONSTATS, A PARTIR DE L'HISTORIQUE PIEZOMETRIQUE DISPONIBLE, CONCERNANT L'EVOLUTION DES VALEURS MOYENNES ET EXTREMES DES STOCKS EN EAU SOUTERRAINE (PERIODES HETEROGENES)**

- ⇒ Parmi les piézomètres pris en compte, nombreux sont ceux présentant un historique bref. En outre, certains sont soumis au débordement quand d'autres présentent une atteinte régulière d'un niveau de base (écrêtement par le haut et/ou par le bas). Enfin, des influences anthropiques directes sont clairement visibles pour certaines chroniques. Toutes ces difficultés montrent que l'échelle d'analyse la plus pertinente est, pour ces chroniques piézométriques, avant tout l'échelle du bassin versant (chapitre 3), alors que l'échelle régionale apparaît peu adaptée. Ces observations justifient également le travail proposé dans le cadre du présent rapport, c'est-à-dire l'utilisation, en compléments des chroniques piézométriques, d'indicateurs certes indirects mais plus robustes (plus longs, moins soumis à des influences directes) pour juger de l'évolution passée des écoulements souterrains.
- ⇒ Une remarque peut toutefois être faite globalement pour la région Nouvelle-Aquitaine à partir de l'ensemble des chroniques piézométriques : il ne semble pas y avoir de décalage dans le temps du mois de survenue de l'étiage.

#### **4.5. PRINCIPAUX CONSTATS, A PARTIR DES HISTORIQUES ET DES MODELES DISPONIBLES, CONCERNANT L'EVOLUTION DE LA RECHARGE DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE**

##### Écoulement de base et *Base Flow Index* (annuel et sur 10 ans glissants, périodes hétérogènes)

- ⇒ Pour les chroniques débitométriques, aux historiques antérieurs aux années 1970, on retrouve des tendances à la baisse pour l'écoulement de base annuel, très souvent significatives (mis à part pour les bassins du Gave d'Oloron aval et de la Vige). Les baisses ne sont pas significatives pour les chroniques plus courtes, avec même des pentes calculées à la hausse pour les bassins de la Lizonne et de la Petite Leyre.
- ⇒ Le calcul de l'écoulement de base sur 10 ans glissants amène aux mêmes conclusions relativement aux tendances générales, mais permet la mise en évidence de la variabilité pluridécadaire (la baisse observée est non linéaire). Attention toutefois : même si le test choisi pour la détection de tendances significatives prend en compte l'autocorrélation causée par l'utilisation de moyennes mobiles dans les calculs, il est possible que la significativité des tendances soit légèrement surévaluée.

- ⇒ Aucun changement net / clair du BFI n'est mis en évidence. Cela semble traduire une certaine stabilité du régime des infiltrations (et des pluies efficaces) à l'échelle de la région, malgré les différences de contextes et logiquement de valeur moyenne de BFI entre bassins.

#### GARDENIA (période 1959-2020)

- ⇒ *Pluie efficace estimée* : on rappelle qu'ici la méthode de calcul de la pluie efficace est bien plus élaborée que celle utilisée pour le calcul à partir des seules chroniques climatiques. Pour autant, les résultats sont très similaires en matière d'évolution tout au long de la période simulée : on retrouve ainsi des précipitations efficaces cumulées annuelles à la baisse, mais toutes ne sont pas significatives. On retrouve également une sur-représentation des événements extrêmes bas (3 à 4 événements à fréquence inférieure à 10 %) et une sous-représentation des événements extrêmes hauts pour la période 2000-2020. À noter que ces observations sont à nuancer pour les bassins des gaves de Pau et d'Oloron, pour lesquels une certaine stabilité semble se produire.
- ⇒ *Recharge annuelle estimée* : une baisse significative de la recharge semble se produire tout au long de la période simulée, notamment au sud de la région, hors Pyrénées. Se dégage même une certaine homogénéité de comportement entre les bassins de l'Engranne, de la Lémance, de la Petite Leyre et du Midour. Ailleurs, plus au nord, une baisse semble se dégager également, mais elle est souvent non significative.
- ⇒ *Ratio "recharge / pluie efficace"* : dans le logiciel GARDENIA, cet indicateur dépend principalement des chroniques climatiques dans la mesure où le fonctionnement de l'hydrosystème est représenté de manière homogène dans le temps. On voit, avec certaines chroniques, une hausse de cet indicateur (significative pour les bassins de l'Engranne et de la Lémance) qui est vraisemblablement due aux évolutions des pluies efficaces (en quantité et/ou en distribution des événements intenses). Les évolutions à la hausse constatées dans certains bassins versants sont en apparence différentes de celles discutées pour le BFI. Deux raisons peuvent être avancées pour expliquer cela : 1) la période d'observation / modélisation n'est pas la même et 2) le BFI, dépendant des chroniques de débits mesurés, est intégrateur de changements plus globaux au-delà des seules évolutions climatiques.
- ⇒ *Variables en lien avec les précipitations neigeuses (ne concerne que les bassins du piémont pyrénéen)* : on note une hausse de la fonte des neiges associée à une baisse significative du stock de neige annuel restant en fin d'année civile.

## 5. Campagnes de jaugeages dans les Pyrénées-Atlantiques - Suivi du débit des deux sources équipées et bilan des données déjà acquises

### 5.1. CAMPAGNES DE JAUGEAGES DE 2021

Quatorze sources ont été suivies dans le cadre de cette étude (illustration 9). Elles se répartissent sur 11 sites de mesures, dont deux « doubles sites » :

- à Arette, pour les sources d'Abat D'Ire 1 et 2 d'une part et celle du Pas des Estes d'autre part ;
- à Larrau, avec les sources Jeuxalguia 1 et 2 ; cette dernière étant aussi dénommée Jeuxalberri.

Les deux dernières sources de l'illustration 9 (celles apparaissant en vert) n'ont pas fait l'objet de mesures sur le terrain : les données acquises par les exploitants ont cependant été collectées (cf. chapitre 5.2).

Indice BSS	Commune	Nom de la source	Bassin versant	Altitude BSS (mNGF)	Intégrée aux campagnes	XL93	YL93
10518X0016	BIELLE	AYGUELADE	Gave d'Oloron	440	oui	420572	6224276
10525X0005	LOUVIE-JUZON	GOURGOUCH	Gave de Pau	470	oui	429402	6225807
10696X0027	BORCE	LOUS CLOUTETS	Gave d'Oloron	1160	oui	408736	6201382
10516X0007	SARRANCE	MOURTES	Gave d'Oloron	660	oui	404998	6224150
10518X0012	BILHERES	RIOU, BAS-SERVICE	Gave d'Oloron	730	oui	418606	6223795
10692X0010	ACCOUS	CARE	Gave d'Oloron	630	oui	407895	6214473
10698X0017	LARUNS	LES TROIS SAPINS	Gave d'Oloron	1130	oui	420640	6204708
10696X0009	ACCOUS	BISCOS	Gave d'Oloron	1050	oui	404681	6208369
10684X0022	ARETTE	AUMARRE	Gave d'Oloron	1050	oui	395013	6219485
10682X0003	LARRAU	JEUXALGUIA 1	Gave d'Oloron	953	oui	376954	6220147
10682X0004	LARRAU	JEUXALBERRI (JEUXALGUIA 2)	Gave d'Oloron	953	oui	376834	6220146
10515X0004	ARETTE	ABAT D'IRE 1	Gave d'Oloron	900	oui	397099	6223883
BSS004CNAJ	ARETTE	ABAT D'IRE 2	Gave d'Oloron	920	oui	396790	6223550
10515X0005	ARETTE	PAS DES ESTES	Gave d'Oloron	720	oui	397148	6224839
10518X0021	ASTE-BEON	MIEDOUGE	Gave d'Oloron	450	Non - Suivi exploitant	421354	6221366
10523X0206	MONTAUT	LOUSTAU (MOUSCLE)	Gave de Pau	345	Non - Suivi exploitant	443922	6231525

Illustration 9 - Sources suivies dans le cadre des campagnes de jaugeages ou par des exploitants

#### 5.1.1. Dates et méthodes de mesures

Six campagnes de jaugeages ont été conduites entre février et décembre 2021, dans les sources figurant dans l'illustration 9. Lors de chaque campagne, les paramètres mesurés sur le terrain ont été le débit de la source et sa physico-chimie, à savoir : température, pH, conductivité électrique.

Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés à l'aide de multimètres équipés de sondes de mesures calibrées quotidiennement lors de chaque campagne.

La technique mise en œuvre pour la mesure du débit à chacune des sources est demeurée inchangée par rapport aux descriptions figurant dans les rapports BRGM/RP-66803-FR et BRGM/RP-68816-FR.

### 5.1.2. Débits mesurés

Les résultats des campagnes de jaugeages, réalisées en 2021, sont présentés en Annexe 6, qui comporte également les données historiques qui ont pu être réunies pour chacune des sources, ainsi que l'ensemble des mesures effectuées lors des campagnes depuis 2016.

L'évolution des débits est commentée dans la partie 5.4.1. Concernant la réalisation et la représentativité des mesures, il ressort trois points principaux :

- la survenue d'un incident, en juin, sur le courantomètre utilisé pour les sources de Gourgouch et Ayguelade : ce qui n'a pas permis de mesurer le débit de ces sources lors de cette campagne ;
- l'impossibilité de mesurer le débit de la source d'Abat d'Ire 2, de février à août, au niveau de l'ouvrage de répartition des sources Abat d'Ire 1 et 2. Le débit a pu être à nouveau mesuré en octobre sur ce site. Il convient de noter que lors de la campagne d'août, une mesure de ce débit a été effectuée plus à l'amont, dans un tampon situé immédiatement à l'aval de la source. Cette mesure, répétée 6 fois sur une durée totale de 5 minutes environ, a mis en évidence une forte variabilité du débit entrant (de 0,21 à 0,34 l/s, pour une valeur moyenne (hors extrema) de 0,25 l/s). Cette forte variabilité incite à un usage prudent des débits mesurés pour cette source lors des différentes campagnes ;
- il n'a pas été possible d'accéder aux sources de la commune d'Arette lors de la campagne de décembre, compte tenu du contexte météorologique (neige et verglas) et sanitaire (malade du covid dans le personnel du service technique de la mairie). La source Lou Cloutets de Borce n'a pu être visitée également, du fait d'enneigement et de risque d'avalanches.

### 5.1.3. Physico-chimie mesurée

Les mesures des paramètres physico-chimiques (température, pH et conductivité électrique à 25°C) sont présentées dans la même annexe que les débits (Annexe 6), par source.

L'évolution de la physico-chimie est commentée dans la partie 5.4.2. Concernant la réalisation et la représentativité des mesures, il ressort :

- l'absence de données physico-chimiques pour la source d'Abat d'Ire 2, de février à juin, pour les raisons précédemment évoquées ;
- l'absence de données physico-chimiques pour la source Ayguelade de Bielle en juin ;
- l'absence de données de conductivité électrique pour plusieurs sources, lors de la campagne de décembre ; les deux sondes prévues sont tombées en panne à l'issue de la première journée de terrain ;
- une température de l'eau anormalement élevée en juin à la source Biscos d'Accous (8,5°C, valeur de près d'un degré supérieure à l'ensemble des mesures de température réalisées dans la source) ;

- un pH étonnamment faible en août, dans la source des Trois-Sapins à Laruns (7,0, inférieur de 0,7 point pH au moins aux autres valeurs mesurées depuis 2016) et dans une moindre mesure, en février, à la source Ayguelade de Bielle (7,6, inférieure de 0,4 point pH aux autres mesures enregistrées) ;
- une mesure de conductivité électrique élevée, en juin, dans la source de Care à Accous (319  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , supérieure de plus de 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aux autres mesures effectuées depuis 2016) ;
- une modification nette de la conductivité électrique et du pH de l'eau en provenance de la source Jeuxalberri de Larrau, entre la période 2016-2018 et 2019-2021. La conductivité électrique à 25°C passe ainsi d'une valeur moyenne de 47  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , tandis que le pH passe de 6,3 à 8,3. Les mesures étant faites dans l'ouvrage de répartition des deux sources Jeuxalguia 1 et Jeuxalberri, l'hypothèse de la mise en œuvre d'un traitement par minéralisation de l'eau à l'amont de l'ouvrage est envisagée, sans qu'elle ne soit confirmée à la date de rédaction du rapport.

## 5.2. SUIVIS EN CONTINU EFFECTUES PAR DES EXPLOITANTS

Les chroniques de débit, constituées par les exploitants grâce à leur suivi respectif des sources de Miédougé à Aste-Béon (2012-2021) et de Loustau (Mouscle) à Montaut (2014-2020) (cf. illustration 9), sont présentées respectivement aux illustration 10 et illustration 11. A la source de Miédougé, le débit de la partie captée de la source (« B - départ de source ») n'est pas disponible entre le 28/01/2020 et le 15/10/2021. C'est la courbe grise (cumul des débits transitant en « A » et « B ») qui donne le débit total de la source.

La source de Miédougé présente, au cours de la période 2012-2020, un débit moyen journalier de 130  $\text{m}^3/\text{h}$  environ, les débits enregistrés variant entre 57 et 255  $\text{m}^3/\text{h}$ . Le ratio entre les débits journaliers les plus faibles et les débits journaliers les plus forts est modéré (facteur 4).

La source de La Mouscle présente, au cours de la période 2014-2021, un débit moyen journalier de 47  $\text{m}^3/\text{h}$  environ, les débits enregistrés variant entre 25 et 252  $\text{m}^3/\text{h}$ . Le ratio entre les débits journaliers les plus faibles et les débits journaliers les plus forts est assez élevé (facteur 10). Cette chronique laisse envisager l'existence d'écoulements rapides qui se surimposent à des écoulements potentiellement plus inertiels, permettant de maintenir le débit journalier moyen de la source à un débit de 25  $\text{m}^3/\text{h}$  environ durant la période de suivi.

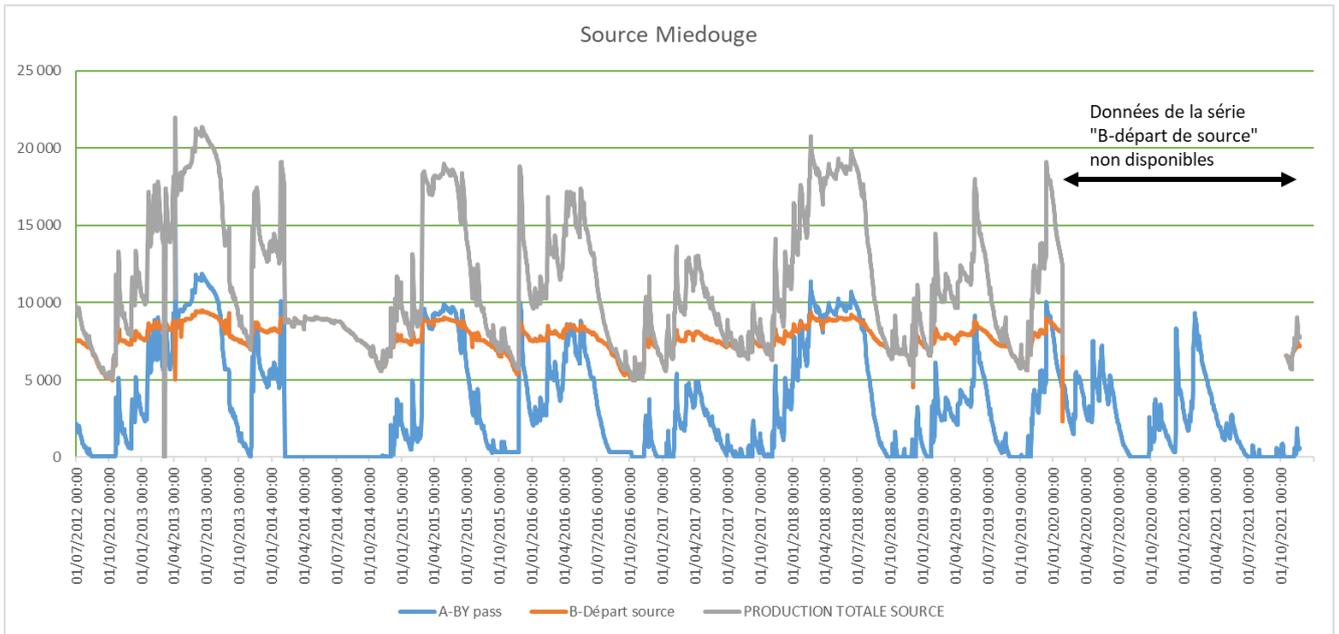


Illustration 10 - Volumes journaliers ( $m^3/jr$ ) écoulés à la source de Miédougé à Aste-Béon (source : Suez)

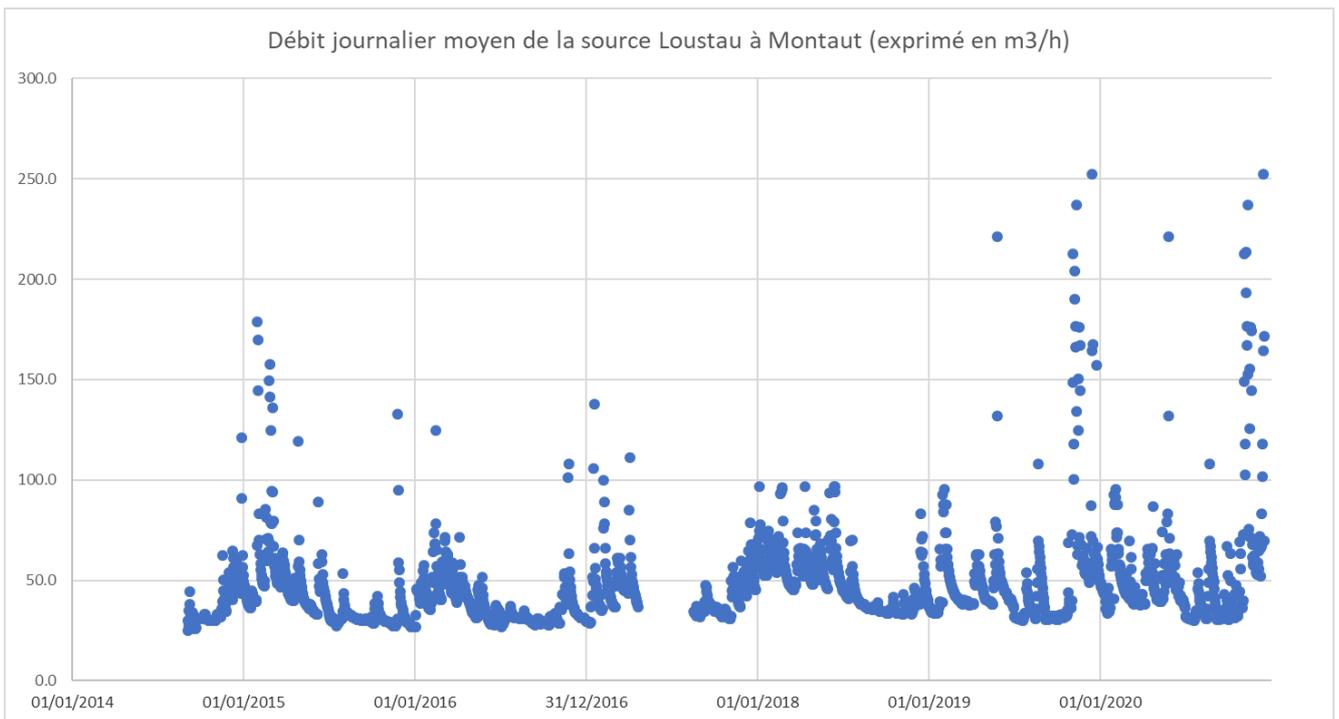


Illustration 11 - Débit journalier moyen de la source Loustau (Moussle) à Montaut (source : SEAPAN<sup>4</sup>)

<sup>4</sup> SEAPAN : Syndicat d'Eau et d'Assainissement du Pays de Nay

### **5.3. SUIVI EN CONTINU DES SOURCES DE GOURGOUCH, A LOUVIE-JOUZON, ET DE RIOU, A BILHERES**

Un système automatisé de suivi de la hauteur d'eau dans le canal de collecte des eaux de la source de Gourgouch, à Louvie-Jouzon, a été mis en place le 04 avril 2017 (cf. rapport BRGM/RP-66803-FR).

A Bilhères, le débit de la source est suivi depuis le 24 juin 2019 (cf. rapport BRGM/RP-68816-FR), par la mesure du niveau d'eau au droit d'un seuil calibré et d'un compteur de débit installé sur la canalisation d'eau potable prélevant une partie de l'eau de la source.

L'acquisition des données de hauteur d'eau sur les deux sites est opérationnelle depuis la mise en place de ces équipements et aménagements. Les données sont télétransmises quotidiennement sur un site Internet afin d'en faciliter l'accès.

Le bilan du suivi de ces deux sources est consultable en Annexe 7, présentant notamment les courbes de tarage révisées pour ces deux sources.

En particulier, il fait apparaître, pour la source de Gourgouch, deux difficultés principales :

- le développement de la végétation au voisinage et dans le canal, induisant une modification du régime d'écoulement, est nettement observable sur un graphique présentant les relations hauteur-débit ;
- la fermeture imparfaite du panneau occultant le canal secondaire induit une perte de débit, qui est estimée à moins de 0,5 l/s. Une intervention sur ce panneau est prévue début 2022.

### **5.4. BILAN DES SUIVIS DE 2016 A 2021**

#### **5.4.1. Débit**

Des statistiques sommaires (minimum, moyenne, maximum, écart-type et ratios écart-type / moyenne et maximum / minimum) sont présentées à partir des données de débit disponibles et réalisées lors d'opérations de jaugeage (Illustration 12). Les sources sont présentées par ordre croissant de ratio écart-type / moyenne. Ce ratio est un indicateur global de la variabilité des données étudiées.

Sur la base de cet indicateur, on peut envisager de mettre en avant :

- une faible variabilité des débits jaugés à la source de Riou et à celle de Gourgouch, qui présentent toutes deux un écoulement assez stable, ce qui n'empêche pas l'existence de pics de crue occasionnels comme le montre le suivi continu des débits pour ces deux sites ;
- une variabilité intermédiaire des sources émergeant de formations de qualité hydrogéologique modérée (marnes, flysch, poudingues) ; ce sont les sources d'Aumarre, Pas des Estes, Care, Mourtès et Abat d'Ire 2 ;
- une forte variabilité des sources émergeant des formations du Primaire (schistes ou granite) et de formations carbonatées (calcaire ou dolomie) du Secondaire. Dans ce dernier cas, le caractère karstique des écoulements souterrains peut être évoqué.

On peut noter que l'indicateur utilisé propose une classification voisine de celle apportée par l'utilisation d'un ratio max. / min., sans qu'elle soit pour autant similaire. Ce dernier mesurerait davantage l'intensité de la variation de débit que sa variabilité temporelle (dispersion des valeurs).

Indice BSS	Dénomination	Commune	Altitude (mNGF)	Vallée	Lithologie	Géologie	Moyenne (m3/h)	ecart type (m3/h)	E-T / Moyenne	Min (m3/h)	Max (m3/h)	Ratio Max / Min (m3/h)
10518X0012	Riou	Bilhères	730	Ossau	Moraines	Quaternaire	215.5	40.9	0.19	151.2	320.4	2.1
10525X0005	Gourgouch	Louvie-Juzon	470	Gave de Pau	Calcaire	Kimméridgien	88.5	25.5	0.29	57.6	147.6	2.6
10684X0022	Aumarre	Arette	1050	Barretous	Flysch schisto - gréseux	Sénonien	28.0	9.8	0.35	9.7	54.0	5.6
10515X0005	Pas des Estes	Arette	720	Barretous	Marnes schisteuses	Albien	3.2	1.2	0.38	1.1	7.2	6.7
10692X0010	Care	Accous	630	Aspe	Flysch schisto - gréseux	Sénonien	41.7	24.1	0.58	5.0	82.4	16.5
10516X0007	Mourtès	Sarrance	660	Aspe	Marnes	Trias	16.7	10.6	0.63	5.4	44.0	8.1
B5S004CNAJ	Abat d'Ire 2	Arette	920	Barretous	Poudingues	Albien	2.6	1.7	0.66	0.7	5.5	7.7
10696X0027	Lou Cloutets	Borce	1160	Aspe	Schistes	Carbonifère	35.0	26.9	0.77	11.3	116.6	10.3
10515X0004	Abat d'Ire 1	Arette	900	Barretous	Calcaires	Albien / Jurassique	16.5	14.0	0.85	3.5	64.3	18.2
10696X0009	Biscos	Accous	1050	Aspe	Schistes	Carbonifère	11.2	9.5	0.85	2.7	39.6	14.5
10682X0004	Jeuxalguia2 ou Jeuxalberri	Larrau	953	Haute Vallée Saison	Schistes	Dévonien	2.2	1.9	0.87	1.0	10.8	11.1
10682X0003	Jeuxalguia1	Larrau	953	Haute Vallée Saison	Schistes	Dévonien	3.6	3.5	0.98	0.8	18.4	24.3
10698X0017	3 sapins	Laruns	1130	Ossau	Granite	Primaire	7.1	7.1	1.00	0.2	28.9	187.9
10518X0016	Ayguelade	Bielle	440	Ossau	Dolomie	Callovo-Oxfordien	717.1	760.8	1.06	86.4	2797.2	32.4

Illustration 12 - Statistiques descriptives des jaugeages disponibles

L'analyse des dates de survenue des hautes eaux et des basses eaux ne permet pas d'apporter un éclairage complémentaire. Les interruptions de suivi (de fin février à fin novembre 2017, puis d'octobre 2018 à février 2021, à l'exception d'une mesure en mai 2019), la fréquence de mesures (tous les 3 mois, puis tous les 2 mois) et le faible recul disponible (3 cycles hydrologiques) ne permettent pas d'en identifier précisément la temporalité.

Enfin, on peut relever que l'année 2021 ressort de façon spécifique dans les suivis réalisés, avec un maxima le plus souvent atteint dès février et une décroissance rapide du débit (dès avril) qui se maintient à des valeurs faibles, voire très faibles, au vu des données disponibles et de l'expérience des exploitants des sources.

#### 5.4.2. Physico-chimie

Des statistiques sommaires (minimum, moyenne, maximum, écart-type et ratio écart-type / moyenne) sont présentées pour la température (Illustration 13), le pH (Illustration 14) et la conductivité électrique (Illustration 15).

On note la variabilité des températures mesurées (de 5,6 à 12,2°C) d'une source à l'autre, ce qui est conforme en première approche à la variation de température moyenne interannuelle de l'air intervenant dans la gamme d'altitudes d'émergence des sources (de 440 à 1 160 m, variation de température de l'ordre de 1°C par 100 m). On observe également une variation sensible d'une campagne de mesures à l'autre, pour certaines sources, comme celle des Trois-Sapins à Laruns (de 5,6 à 8,9°C) ou d'Abat d'Ire 1 et 2 à Arette (respectivement de 6,7 à 9,7°C et de 7,7 à 12,2°C). Lorsque la mesure de température n'est pas effectuée directement à l'émergence, comme c'est le cas à Abat d'Ire ou aux sources de Larrau, une partie de la variabilité relevée est à imputer à la modification de la température de l'eau lors de sa circulation entre l'émergence et le point de mesure. Cet aspect est notamment sensible pour la température de la source Abat d'Ire 2. On note par ailleurs la stabilité de la température mesurée aux sources de Gourgouch, Lous-Cloutets, Mourtès, Riou, Aumarre ou encore du Pas des Estes lors des différentes campagnes. De façon générale, la stabilité de la température est un indicateur d'une circulation relativement lente des eaux dans le sous-sol, permettant à celles-ci de s'équilibrer thermiquement avec les formations géologiques qu'elles traversent. La profondeur de l'eau doit par ailleurs ne pas être trop superficielle pour ne pas être sujette aux variations de la température de l'air se propageant dans les roches.

Le pH est en règle générale très stable, pour l'ensemble des campagnes de mesures, à l'exception de quelques valeurs spécifiques, comme celles faites à :

- Gourgouch et Riou, lors de la campagne du mois de juillet 2016, la valeur étant supérieure d'une unité pH environ par rapport aux autres mesures effectuées ;

- Laruns, dans la source des Trois-Sapins, en août 2021, la valeur étant inférieure d'une unité pH environ par rapport aux autres mesures effectuées ;
- Jeuxalguia 1, à Larrau, la valeur étant supérieure d'une unité pH environ par rapport aux autres mesures effectuées.

Ces valeurs sont à considérer comme « douteuses » au vu de l'ensemble des autres mesures effectuées à ces points.

Par ailleurs, le pH - comme la conductivité électrique - de la source Jeuxalberri, à Larrau, est très modifié entre octobre 2018 et mai 2019. Ainsi, antérieurement à 2019, le pH s'établit entre 6,0 et 6,9 ; tandis qu'il est de 8,8 en mai 2019, puis compris entre 8,5 et 8,8 au premier semestre 2021, et entre 7,1 et 7,5 au second semestre de l'année. L'hypothèse de la mise en place d'un poste de minéralisation de l'eau entre l'émergence de la source et le point de mesure est avancée. Ce sont les valeurs antérieures à 2019 qui semblent représentatives de la physico-chimie à l'émergence de cette source.

Si le pH est en règle générale légèrement basique (majoritairement entre 7 et 8 unités pH), trois sources présentent des pH acides. Il s'agit des sources de Jeuxalberri (de 6,0 à 6,9) et de Jeuxalguia 1 (de 5,9 à 6,4 - hormis la mesure de décembre 2021) à Larrau et de celle d'Abat d'Ire 2 (de 5,3 à 6,0) à Arette. Ces sources émergent des schistes du Dévonien pour les premières et des poudingues de l'Albien pour la dernière.

Les conductivités électriques mesurées et rapportées à 25°C s'échelonnent de 18 à 458  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De même que pour le pH, la conductivité électrique de l'eau à la source Jeuxalberri, à Larrau, évolue nettement entre octobre 2018 et mai 2019. Elle est ainsi comprise entre 35 et 64  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de 2016 à 2018 (exception faite de la valeur de 73  $\mu\text{S}/\text{cm}$  lors de la campagne de novembre 2016, qui paraît élevée au regard des autres valeurs mesurées dans cette source à cette époque), puis comprise entre 88 et 110  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les mesures allant de mai 2019 à octobre 2021.

Les eaux les moins minéralisées sont issues de formations de socle (Trois-Sapins à Laruns - granite) ou datant du Primaire (Jeuxalberri et Jeuxalguia 1 à Larrau, Lou Cloutets à Borce et Biscos à Accous - schistes du Carbonifère), ainsi que des poudingues de l'Albien (source Abat d'Ire 2 à Arette). Les plus fortes minéralisations sont rencontrées dans des eaux issues de massifs calcaires dont l'écoulement demeure majoritairement lent (Gourgouch à Louvie-Jouzon par exemple) ou de formations morainiques (Riou à Bilhères). Enfin, on observe une variation importante de la minéralisation aux sources d'Ayguelade et d'Aumarre, qui apparaissent corrélées aux variations de débit observées dans ces captages, traduisant probablement des apports d'eau d'origine différente, en fonction du régime saisonnier de ces captages.

Température (°C)	Indice BSS	Commune	Lieu-dit	Min	Moyenne	Max	ecart-type	Ecart-type / moyenne
	10518X0016	Bielle	Ayguelade	8.3	10.7	12.0	1.0	10%
	10525X0005	Louvie-Juzon	Gourgouch	11.0	11.4	11.7	0.2	2%
	10696X0027	Borce	Lous-Cloutets	6.3	6.6	6.8	0.1	2%
	10516X0007	Sarrance	Mourtes	10.4	10.8	11.2	0.2	1%
	10518X0012	Bilhères	Riou, bas-service	9.5	9.8	10.2	0.2	2%
	10692X0010	Accous	Care	8.4	8.8	9.9	0.4	4%
	10698X0017	Laruns	Trois-Sapins	5.6	7.2	8.9	1.2	16%
	10696X0009	Accous	Biscos	6.7	7.2	8.5	0.4	6%
	10684X0022	Arette	Aumarre	7.2	7.6	8.0	0.2	3%
	10682X0004	Larrau	Jeuxalberri	7.4	8.7	9.8	0.8	9%
	10682X0003	Larrau	Jeuxalguia 1	8.0	8.5	9.2	0.4	4%
	10515X0004	Arette	Abat d'Ire 1	6.7	8.5	9.8	1.0	11%
	BSS004CNAJ	Arette	Abat d'Ire 2	7.7	9.3	12.2	1.7	18%
	10515X0005	Arette	Pas des Estes	8.7	9.1	9.3	0.2	2%

Illustration 13 - Statistiques descriptives des mesures de température réalisées lors des campagnes

pH (-)	Indice BSS	Commune	Lieu-dit	Min	Moyenne	Max	ecart-type	Ecart-type / moyenne
	10518X0016	Bielle	Ayguelade	7.6	8.0	8.2	0.1	2%
	10525X0005	Louvie-Juzon	Gourgouch	7.5	7.7	8.6	0.3	3%
	10696X0027	Borce	Lous-Cloutets	7.7	7.9	8.1	0.1	2%
	10516X0007	Sarrance	Mourtes	7.4	7.6	7.7	0.1	1%
	10518X0012	Bilhères	Riou, bas-service	7.4	7.5	8.4	0.2	3%
	10692X0010	Accous	Care	7.6	7.8	8.0	0.1	1%
	10698X0017	Laruns	Trois-Sapins	7.0	7.9	8.1	0.3	3%
	10696X0009	Accous	Biscos	6.9	7.4	7.7	0.2	3%
	10684X0022	Arette	Aumarre	7.7	7.9	8.0	0.1	1%
	10682X0004	Larrau	Jeuxalberri	6.0	7.1	8.8	1.0	15%
	10682X0003	Larrau	Jeuxalguia 1	5.9	6.3	7.2	0.3	5%
	10515X0004	Arette	Abat d'Ire 1	7.6	7.8	8.2	0.2	2%
	BSS004CNAJ	Arette	Abat d'Ire 2	5.3	5.7	6.0	0.3	5%
	10515X0005	Arette	Pas des Estes	7.6	7.7	7.9	0.1	1%

Illustration 14 - Statistiques descriptives des mesures de pH réalisées lors des campagnes

	Indice BSS	Commune	Lieu-dit	Min	Moyenne	Max	ecart-type	Ecart-type / moyenne
Conductivité électrique (µS/cm)	10518X0016	Bielle	Ayguelade	265.0	333.3	382.0	42.2	13%
	10525X0005	Louvie-Juzon	Gourgouch	436.0	445.8	456.0	5.6	1%
	10696X0027	Borce	Lous-Cloutets	136.0	144.7	153.0	4.2	3%
	10516X0007	Sarrance	Mourtes	288.0	303.7	315.0	6.4	2%
	10518X0012	Bilhères	Riou, bas-service	383.0	395.8	409.0	6.7	2%
	10692X0010	Accous	Care	225.0	265.8	319.0	18.5	7%
	10698X0017	Laruns	Trois-Sapins	123.3	150.4	179.0	13.7	9%
	10696X0009	Accous	Biscos	74.2	83.4	94.4	4.5	5%
	10684X0022	Arette	Aumarre	290.0	353.8	458.0	51.2	14%
	10682X0004	Larrau	Jeuxalberri	35.2	68.0	110.0	29.1	43%
	10682X0003	Larrau	Jeuxalguia 1	33.7	41.0	47.0	3.9	9%
	10515X0004	Arette	Abat d'Ire 1	163.0	196.7	231.0	21.0	11%
	BSS004CNAJ	Arette	Abat d'Ire 2	18.4	21.2	25.0	1.9	9%
	10515X0005	Arette	Pas des Estes	268.0	282.2	298.0	9.9	4%

Illustration 15 - Statistiques descriptives des mesures de conductivité électrique réalisées lors des campagnes

## 5.5. RETROCESSION DES EQUIPEMENTS ET AMENAGEMENTS

Les aménagements et équipements mis en place ont fait l'objet d'une proposition de rétrocession auprès des mairies concernées. La mairie de Bilhères a accepté cette rétrocession par délibération municipale en date du 26 novembre 2021.

Concernant Louvie-Juzon, le principe de la rétrocession a été discuté pour le site de Gourgouch le 05 novembre 2021, en présence notamment du maire, du propriétaire de la pisciculture de Pé-de-Hourat et des repreneurs (désormais propriétaires à la date de rédaction du rapport) et du vice-président de la Communauté de Communes de la Vallée d'Ossau, en charge des politiques de l'eau. Les discussions se poursuivent à la date de rédaction du rapport.



## 6. Conclusion

Le module 3.3 « Caractérisation de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines en région Nouvelle-Aquitaine » s'est poursuivi avec deux objectifs principaux :

1. L'élargissement des analyses temporelles des chroniques du cycle de l'eau, préalablement entamées pour les territoires des gaves de Pau et d'Oloron et du bassin versant du Midour, à une quinzaine de bassins versants de la région Nouvelle-Aquitaine. On rappelle que l'objectif de cette analyse est d'évaluer les modifications observées sur les eaux souterraines (aspects quantitatifs) depuis le début des historiques disponibles.
2. La poursuite du suivi du débit et de la physico-chimie des sources, engagé depuis 2016 pour les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron, et de dresser un bilan des données acquises.

Concernant le premier objectif, le développement d'une approche homogène a permis une analyse exhaustive des variables climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques ainsi que des bilans hydroclimatiques obtenus dans quinze bassins versants, répartis dans la région Nouvelle-Aquitaine. Les changements observés depuis le début des différents historiques ont été détaillés pour chacun des bassins ciblés, puis une synthèse à l'échelle régionale a permis de mettre en évidence des homogénéités ou des hétérogénéités de comportement. Ainsi, les principales observations faites à l'échelle de la région sont les suivantes :

1. La disparité de la durée des historiques, associés aux différentes variables au sein d'un bassin versant et pour une même variable entre bassins versants, est une limite importante à l'exercice. Des inversions de tendance peuvent même être observées (tendance à la hausse détectée pendant une période courte, alors que pendant une période plus longue, la tendance est à la baisse).
2. Les évolutions des précipitations efficaces cumulées, annuelles entre 1959 et 2020, sont toutes à la baisse pour l'historique disponible et on observe une sur-représentation des événements extrêmes bas avec un cumul annuel très déficitaire (3 à 4 événements à fréquence 10 %) et une sous-représentation des événements extrêmes hauts au cours de la période 2000-2020. À noter que ces observations sont à nuancer pour les bassins des gaves de Pau et d'Oloron pour lesquels une certaine stabilité semble se produire.
3. Si on ne considère que les historiques les plus longs (avec enregistrement depuis 1970 au moins), tous les débits caractéristiques d'étiage (dont le QMNA) sont à la baisse ; une hétérogénéité spatiale semble se dessiner avec une baisse significative (au seuil de 5 %) des QMNA au sud de la région et moins significative au nord.
4. Peu d'informations ont pu être retirés de la comparaison des évolutions piézométriques de par l'historique bref de la plupart des chroniques, associé aux influences anthropiques directes et à des caractéristiques locales (e.g. écrêtement par exemple). Ces observations justifient également le travail proposé dans le cadre du présent rapport, c'est-à-dire l'utilisation, en compléments des chroniques piézométriques, d'indicateurs certes indirects mais plus robustes (plus longs, moins soumis à des influences directes) pour juger de l'évolution passée des écoulements souterrains. Une remarque peut toutefois être faite globalement pour la région Nouvelle-Aquitaine à partir de l'ensemble des chroniques piézométriques : il ne semble pas y avoir de décalage dans le temps du mois de survenue de l'étiage.
5. Pour les chroniques débitométriques aux historiques antérieurs aux années 1970, on retrouve (comme pour les débits caractéristiques d'étiage ou pour les pluies efficaces) des

tendances à la baisse de l'écoulement de base annuel. Elles sont très souvent significatives au seuil de 5 %.

6. Aucun changement net / clair du BFI (*Base Flow Index*), qui peut traduire le ratio "infiltration / ruissellement", n'est mis en évidence pour cette même période. Cela semble traduire une certaine stabilité du régime des infiltrations (et des pluies efficaces) à l'échelle de la région, malgré les différences de contextes et logiquement de valeur moyenne de BFI entre bassins.
7. Les chroniques de recharge estimée par modélisation globale montrent toutes une tendance à la baisse au cours de la période 1959-2020. Il se dégage même une homogénéité de comportement entre les bassins du sud de la région, hors bassins des gaves (Engranne, Lémance, Petite Leyre et Midour), pour lesquels la baisse est significative (au seuil de 5 %) alors qu'ailleurs, plus au nord, une baisse semble se produire également mais elle est souvent non significative.
8. Pour les bassins des gaves concernés par les précipitations neigeuses, les modélisations globales traduisent toutes une hausse de la fonte des neiges associée à une baisse significative du stock de neige annuel, restant en fin d'année civile, pour la période 1959-2020.

Ainsi, ces travaux montrent, globalement, une évolution à la baisse des ressources en eau souterraine (baisse de la pluie efficace, du débit de base et de la recharge modélisée) dans les bassins versants étudiés et pour la période 1959-2020, quand l'historique était disponible, avec une significativité des tendances souvent plus importante pour les bassins situés au sud de la région (hors bassins de montagne). D'autres travaux, moins régionaux et plus locaux, pourraient permettre de quantifier plus précisément ces baisses (par exemple en étudiant localement les bilans "entrées/sorties", en prenant en compte les prélèvements de manière précise) et d'étudier d'autres changements (par exemple, le régime des précipitations au pas de temps horaire).

Concernant le second objectif, six campagnes de jaugeages ont été conduites entre février et décembre 2021, dans les 14 sources suivies. Malgré deux interruptions de suivi, dans la période 2016-2021, ces mesures apportent des éléments de connaissance sur l'évolution des débits et de la physico-chimie de ces sources, émergeant dans des environnements distincts du bassin versant des gaves de Pau et d'Oloron. L'aménagement et les équipements mis en place dans la source Riou, à Bilhères, ont été rétrocédés à la commune. La rétrocession des équipements de la source Gourgouch, à Louvie-Juzon, est en cours de discussion à la date de rédaction de ce rapport.

## 7. Bibliographie

Bel F., avec la collaboration de Belkaid A., Lapeyre R. et Mazurier C. (1983) - Etude hydrogéologique des anciennes tourbières de la Lizonne à Vendoire et de la Pude (Dordogne). Rapport 83 SGN 266 AQI.

Cabaret O., Abasq L., Douez O., Wuilleumier A. (2016) - Projet AZENA - Atlas des Zones à ENjeux Aval du SAGE Nappes profondes de Gironde - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-66335-FR.

Capdeville J.P. avec la collaboration de Charnet F., Lenoir M. (1996) - Notice explicative de la feuille géologique de Podensac à 1/50000<sup>ème</sup>. Editions BRGM.

Compère F., Thinon-Larminach M. (2021) - Reconstitution et caractérisation des régimes hydrologiques naturels sur les unités hydro(géo)logiques cohérentes négociées du SAGE SNMP, et calcul de l'impact du changement climatique sur quatre d'entre elles. Rapport final. BRGM/RP-71074-FR.

Corbier P., Wuilleumier A. (2010) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Gestion intégrée des nappes alluviales - Etude des nappes alluviales de la Garonne, de la Dordogne, du Gave de Pau et du Dropt – Module 5 - Année 1 – BRGM/RP-57811-FR.

Dubreuilh J. avec la collaboration de Kervazo B., Turq A., Ruhard J.-P. et Bambier A. (1988) - Notice explicative de la feuille géologique de Belvès à 1/50000<sup>ème</sup>. Editions BRGM.

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, Vol. vol.18, pp.65-71.

Hamed, K.H., Rao, A.R., 1998. A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrol.*, 204, 219–246.

Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.

Le Moigne, 2002 - Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME.

Lubes-Niel, H., Masson, J., Paturel, J. & Servat, E. (1998) - Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 11(3), 383–408.

Manceau J.C., Wuilleumier A., avec la collaboration de Bourbon P., Caperan F., Branellec M., Gregorio R. (2019) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Caractérisation de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines en région Nouvelle-Aquitaine - Module 3.3 - Année 2. Rapport final. BRGM/RP-68816-FR, 122 p., 93 ill., 7 ann.

Mann, 1945 ; Kendall, 1975

Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171.

Pettitt AN. 1979. A non-parametric approach to the change-point detection. *Applied Statistics* 28: 126–135.

Platel J.P. (1983) - Notice explicative de la feuille géologique de Fumel à 1/50000<sup>ème</sup>. Editions BRGM.

Renard, B. (2006) - Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de l'INP Grenoble.

Saltel, M., Wuilleumier, A. avec la collaboration de Pedron N. et Platel J.P. (2009) - Evaluation des ressources en eaux souterraines disponibles du bassin versant de la Lizonne (24), BRGM/RP-57836-FR 69 p., 47 figures, 18 tableaux, 3 annexes

Saltel M., Wuilleumier A., et Cabaret O. (2015) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 1 - Année 5. Rapport BRGM/RP-65039-FR.

Seguin J.J., Wuilleumier A. (2017) - Recherche d'évolutions climatique et hydrologique dans les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron. Rapport final. BRGM/RP-66802-FR.

Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. J. Am. Stat. Assoc. 63, 1379–1389.

Vidal J. P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. and Soubeyroux J. M. (2010) - A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, Int.J.Climatol., 30(11), 1627-1644., doi:10.1002/joc.2003

Wuilleumier A., Graveline N., Rinaudo J.D., avec la collaboration de Caperan F., Hoareau A., Thicoïpe P. (2017) - Hydrogéologie, usage de l'eau et changement climatique dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron. Rapport final. BRGM/RP-66803-FR.

Wuilleumier A., Seguin J.J. (2018) - Looking for trends within the water cycle of the "Gave de Pau" and "Gave d'Oloron" catchment areas. Climate Change and Water 2018, Feb 2018, Tours, France. <hal-01677751>



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 - Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine**

**Site de Bordeaux**

Parc Technologique Europarc  
24, avenue Léonard de Vinci  
33600 - Pessac - France  
Tél. : 05 57 26 52 70

**Site de Poitiers**

5, rue de la Goélette  
86280 - Saint-Benoit - France  
Tél. : 05 49 38 15 38

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