

Document public

MESURA

Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau

Rapport final

BRGM/RP-70978-FR
Version 0 du 18 novembre 2021

J.F. Vernoux, D. Allier, L. Arnaud, C. Castillo

Vérificateur :

Nom : J. Lions
Fonction : Hydrogéologue
Date : 18/11/2021

Signature : 

Approbateur :

Nom : P. Audigane
Fonction : Responsable d'unité
Date : 19/11/2021

Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots-clés : état quantitatif, masse d'eau souterraine, suivi piézométrique, écoulement de base, BFI, indice d'état pluviométrique, test de tendance

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

Vernoux JF., Allier D., Arnaud L., Castillo C. (2021) – MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau. Rapport final BRGM/RP-70978-FR, 77 p., 58 ill..

Synthèse

L'évaluation de l'état quantitatif d'une masse d'eau souterraine, dans le cadre du rapportage DCE, peut s'avérer délicate dans le cas d'une absence de suivi piézométrique ou d'un suivi piézométrique considéré comme insuffisant vis-à-vis des hétérogénéités de la masse d'eau. L'objectif de l'étude, financée par l'Office Français de la Biodiversité, est d'étudier pour ces masses d'eau souterraines la possibilité d'aboutir à une évaluation fiable de l'état quantitatif des masses d'eau, à partir d'autres variables hydro-climatiques que les niveaux d'eau souterraine et donc de s'affranchir d'un suivi piézométrique complémentaire.

Cette approche a été testée sur cinq masses d'eau souterraine, sélectionnées en concertation avec les gestionnaires de bassin :

- AG302 Calcaires du Boulonnais (AP) - Dominante sédimentaire non karstique.
- CG013 (ex-CG003), socle Vosgien (RM) – Socle.
- HG511 (ex HG503), bassin de la Vire (SN) – Socle.
- FG013, Calcaires du Jurassique moyen dans la boucle de la Charente (AG) - Dominante sédimentaire karstique.
- LG101, Formations volcaniques du littoral nord (REU) – volcanique.

Pour ces cinq masses d'eau souterraine, nous avons réalisé un certain nombre de tests en utilisant les données disponibles (chroniques piézométriques, débits de sources, débits totaux et débits de base de cours d'eau, données climatiques), l'objectif étant de voir si ces données peuvent permettre d'expliquer les fluctuations piézométriques et donc être utilisées pour évaluer l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine. L'approche proposée a consisté à analyser ces chroniques en utilisant différentes méthodes : corrélations pluies-débits-niveaux, décomposition d'hydrogramme pour obtenir le débit de base d'un cours d'eau, indice d'état pluviométrique, simulation de chroniques piézométriques avec un modèle global.

A partir de ces tests, une méthodologie a été proposée, applicable quel que soit le type d'aquifère, à quelques exceptions près. Elle se présente sous forme d'un enchaînement de 5 étapes successives :

- Compilation de données ;
- Alternatives possibles ;
- Représentativité et qualité des chroniques ;
- Validation de la solution alternative ;
- Valorisation possible.

La méthodologie a été validée sur les 5 masses d'eau sélectionnées en début de projet. Pour 3 d'entre elles, on a pu montrer qu'il existait des alternatives possibles pour les masses d'eau en déficit de piézomètres, mais ces approches doivent être utilisées avec prudence. L'utilisation du débit de base, par exemple, n'est envisageable que si la contribution de la nappe au débit du cours d'eau est avérée, en particulier en période d'étiage et si les prélèvements en rivière ou les aménagements impactent peu les débits naturels. De la même manière, l'utilisation de l'indice d'état pluviométrique présente des incertitudes, dans la mesure où il n'a été testé que sur quelques exemples et qu'il ne saurait se substituer à un suivi piézométrique classique.

Parmi les alternatives possibles, l'utilisation du débit de base semble être la plus intéressante, du fait de l'existence de nombreuses données hydrométriques susceptibles d'être exploitées.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Synthèse des travaux réalisés sur les 5 masses d'eau souterraine sélectionnées	13
2.1. AG302 – CALCAIRES DU BOULONNAIS	13
2.2. LG101 – LITTORAL NORD DE LA RÉUNION	16
2.3. CG003 - SOCLE VOSGIEN	19
2.4. HG511 - BASSIN DE LA VIRE	21
2.5. FG013 – CALCAIRES DU JURASSIQUE MOYEN ENTRE CHARENTE ET SON- SONNETTE	23
3. Méthodologie proposée	25
3.1. ETAPES 1 & 2 : CHOIX DES ALTERNATIVES POSSIBLES.....	27
3.2. ETAPE 3 : REPRÉSENTATIVITÉ ET QUALITÉ DES CHRONIQUES	27
3.3. ETAPE 4 : VALIDATION DE LA SOLUTION ALTERNATIVE.....	28
3.4. ETAPE 5 : VALORISATION POSSIBLE.....	30
4. Validation de la méthodologie.....	33
4.1. AG302 – CALCAIRES DU BOULONNAIS	33
4.1.1. Etapes 1 et 2.....	33
4.1.2. Etape 3	33
4.1.3. Etape 4	36
4.1.4. Etape 5	39
4.1.5. Conclusion	41
4.2. LG101 – LITTORAL NORD DE LA RÉUNION	42
4.2.1. Etapes 1 et 2.....	42
4.2.2. Etape 3	43
4.2.3. Etape 4	45
4.2.4. Etape 5	47
4.2.5. Conclusion	48
4.3. CG003 - SOCLE VOSGIEN	48
4.3.1. Etapes 1 et 2.....	48
4.3.2. Etape 3	49
4.3.3. Etape 4	49

4.3.4. Etape 5	54
4.3.5. Conclusion	55
4.4. HG511 - BASSIN DE LA VIRE	55
4.4.1. Etapes 1 et 2.....	55
4.4.2. Etape 3 : Représentativité et qualité des chroniques disponibles	56
4.4.3. Etape 4 : Validation des solutions alternatives	58
4.4.4. Etape 5 : Tests de tendance	62
4.4.5. Conclusions	64
4.5. FG013 – CALCAIRES DU JURASSIQUE MOYEN ENTRE CHARENTE ET SON- SONNETTE	64
4.5.1. Etapes 1 et 2.....	64
4.5.2. Etape 3	65
4.5.3. Etape 4	66
4.5.4. Etape 5	74
5. Conclusion.....	75
6. Bibliographie	77

Liste des illustrations

Illustration 1 – Logigramme du test Balance (MTES, 2018).....	10
Illustration 2 – Répartition des ouvrages de suivi des MESO en France métropolitaine (base ADES)	11
Illustration 3 – Piézomètres présents au droit de la masse d'eau AG302 et dont les chroniques sont exploitables (les deux piézomètres entourés sont ceux encore actifs)	15
Illustration 4 – Stations hydrométriques présentes au droit de la masse d'eau AG302 (banque Hydro)	16
Illustration 5 –Ouvrages de la masse d'eau LG101 disposant de données piézométriques (fond : carte géologique simplifiée) ; piézomètres DCE : 21038, 21049, 21064-1, 21064-2, 22095).....	17
Illustration 6 – Stations hydrométriques du Nord de la Réunion (Fond cartographique : IDPR) 18	
Illustration 7 – Chronique du débit journalier et de l'écoulement de base de la station 14015 sur la Rivière Saint-Denis (en haut) et chronique de l'écoulement de base seul (en bas)	19
Illustration 8 – Sources disposant de plus de 100 mesures sur la masse d'eau CG003	20
Illustration 9 – Chronique du débit journalier et de l'écoulement de base de la Meurthe à Fraize21	
Illustration 10 – Coefficient de corrélation (R) obtenu entre l'indice d'état pluviométrique et les séries piézométriques à proximité de la masse d'eau HG511	22
Illustration 11 – Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec ceux d'un piézomètre situé sur la masse d'eau voisine	23
Illustration 12 – Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec les débits de base de la station de Saint-Front.....	24

Illustration 13 – Logigramme d'analyse des données disponibles	31
Illustration 14 - Superposition des chroniques piézométriques (signal centré – réduit) encore suivies (00103X0322/F- Baincthun et 00104X0054/P1-Wirwignes) et abandonnée (00058X0068/P1- Marquise), de la MESO AG302.....	34
Illustration 15 – Caractéristiques des stations hydrométriques de la MESO AG302.....	35
Illustration 16 - Débit moyen mensuel calculé à la station hydrométrique E530021001 de la Liane à Wirwignes	35
Illustration 17 - Calcul de l'IEP calé pour les niveaux mesurés sur la commune de Marquise (ouvrage 00058X0068/P1) et extension de la chronique d'IEP sur la période récente	36
Illustration 18 - Débits de base de la Liane à Wirwignes	37
Illustration 19 - Corrélogramme croisé du débit de base de la Liane à Wirwignes et du niveau de la nappe à Wirwignes.	38
Illustration 20 – Chroniques superposées du débit de base (en bleu, en m ³ /s) et du niveau piézométrique (en orange, en mNGF), à Wirwignes sur la période où le pas de temps de suivi est le meilleur.....	39
Illustration 21 – Résultats des tests statistiques réalisés sur la chronique d'IEP (calculée à l'aide des données de Pluie et d'ETP de la maille SAFRAN n°50 et calée sur les données piézométrique située à Marquise).....	40
Illustration 22 - Résultats des tests statistiques réalisés sur la chronique de débits de base de la Liane à Wirwignes.....	41
Illustration 23 – Chroniques piézométriques des stations 21049 et 21090.....	43
Illustration 24 – Chroniques hydrométriques des stations 22011 et 22181	44
Illustration 25 – QMNA de la station 22181	44
Illustration 26 – Calage du niveau piézométrie de Domenjod sur la période 2007-2011	45
Illustration 27 – Simulation du niveau piézométrique de Domenjod sur la période 2012-2017..	46
Illustration 28 – Chronique du débit de base de la station 22181	46
Illustration 29 – Corrélation entre débits de base de la station 22181 et pluies efficaces	47
Illustration 30 – Calcul de tendance sur le niveau piézométrique de Domenjod simulé sur la période 2007-2017(à gauche) à comparer au piézomètre DCE F4 Ilet Quinquina (à droite)	47
Illustration 31 – Calcul de tendance sur le débit de base de la station 22181 (rivière Saint-Jean)48	
Illustration 32 : Calcul du BFI et débit de base moyen pour 11 stations de la MESO CG003	50
Illustration 33 : Bassins versants des 8 stations de la CG003 sélectionnées pour leurs chroniques de débit de base	50
Illustration 34 – Chronique du débit de base de la Bruche à Russ	51
Illustration 35 – Coefficients de corrélation entre niveaux piézométriques et débits de base mensuels	51
Illustration 36 – Comparaison des niveaux piézométriques du piézomètre de Xonrupt (03415X00337) et des débits de base de la Vologne à Chenimenil (A4362030)52	
Illustration 37 – Comparaison des niveaux piézométriques du piézomètre de Xonrupt (03415X00337) et des débits de base de de la Weiss à Kayserberg (A2120200)53	
Illustration 38 - Tests de corrélation entre débits de base et pluie efficaces avec l'outil IEP.....	54
Illustration 39 – Tendances à la baisse observées sur les débits de base (CG003)	54

Illustration 40 : Localisation des piézomètres (à gauche) et des stations hydrométriques (à droite) en service au droit et à proximité de la masse d'eau HG511	56
Illustration 41 : Caractéristiques des piézomètres en service sur les masses d'eau alternatives (piézomètres sélectionnés en vert).....	57
Illustration 42 : Caractéristiques des stations hydrométriques en service sur la MESO cible (stations sélectionnées en vert : I5013615 & I5053010)	57
Illustration 43 : Ecoulements de base calculés aux stations I5013615 (en haut) et I5053010 (en bas)	58
Illustration 44 : Résultats des corrélogrammes croisés Niveaux-Débits de base au pas de temps mensuel pour les piézomètres 01756X0008, 02108X0020 et BSS003UJSA ...	59
Illustration 45 : Niveaux piézométriques au forage 01756X0008 vs Débits de base à la station hydrométrique I5013615 au pas de temps mensuel sur la période 2000-2020 (moyennes mensuelles sur le graphique du haut, minimums mensuels sur le graphique du bas)	59
Illustration 46 : Niveaux piézométriques au forage 01756X0008 vs Débits de base à la station hydrométrique I5013615 au pas de temps annuel sur la période 2000-2020 (moyennes annuelles sur le graphique du haut, minimums annuels sur le graphique du bas)	60
Illustration 47 : Corrélations obtenues entre l'indice d'état pluviométrique et les séries piézométriques alternatives sélectionnées	61
Illustration 48 : Résultats des corrélogrammes croisés Débits de base-Niveaux au pas de temps mensuel pour les stations hydrométriques I5053010 et I5013615	62
Illustration 49 : Corrélations obtenues entre l'indice d'état pluviométrique et les séries de débits de base sélectionnées	62
Illustration 50 : Résultats des tests statistiques sur la chronique piézométrique 01756X0008 ..	63
Illustration 51 : Résultats des tests statistiques sur la chronique des débits de base de la Virène à Saint-Germain (I5013615)	63
Illustration 52 : Localisation des piézomètres captant le Dogger et des stations hydrométriques présents sur la MESO FG013 et les MESO voisines.	65
Illustration 53 : Liste des piézomètres captant le Dogger présents sur la MESO FG014 voisine (sont surlignés en gris les piézomètres non représentatifs de la MESO cible).	66
Illustration 54 : Comparaison des niveaux aux piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière avec les débits à la station de Saint-Front au pas de temps mensuel.	68
Illustration 55 : Corrélations obtenues entre précipitations efficaces et évolutions des niveaux piézométriques sur les piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière.	69
Illustration 56 : Débit de base journalier et BFI calculés à partir des débits totaux mesurés aux stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front.	71
Illustration 57 : Moyennes mensuelles interannuelles calculées à partir des débits de base journaliers des stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front.....	72
Illustration 58 : Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec les débits de base de la station de Saint-Front pour différents pas de temps.....	73

1. Introduction

Les obligations relatives à l'état des masses d'eau souterraine, dans le cadre de la DCE, impliquent de définir **l'état quantitatif des masses d'eau souterraine**. L'état quantitatif d'une masse d'eau souterraine est considéré comme bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation en eau des écosystèmes aquatiques de surface et des zones humides directement dépendantes.

La procédure d'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine (MESO) est définie par l'article 3 de l'arrêté modifié du 17 décembre 2008 (MTES, 2018) :

« En application de l'article R. 212-2 du code de l'environnement, la procédure visant à déterminer l'état quantitatif d'une masse d'eau ou d'un groupe de masses d'eau souterraine consiste à comparer le niveau de prélèvements avec la capacité de renouvellement de la ressource disponible. Elle prend notamment en compte :

- *l'évolution des niveaux piézométriques des eaux souterraines ;*
- *l'évolution de l'état des eaux de surface associées ;*
- *l'évolution des écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine ;*
- *les modifications de la direction d'écoulement occasionnant une invasion d'eau salée ou autre ou montrant une tendance durable susceptible d'entraîner de telles invasions ;*
- *les zones de répartition des eaux telles que définies à l'article R. 211-71 du code de l'environnement. »*

Cette évaluation est en particulier basée sur le **test Balance** qui doit évaluer s'il existe une tendance sur le long terme à la baisse du fait des prélèvements (Illustration 1). Pour les MESO sur lesquelles existent des prélèvements, il s'agit d'abord d'évaluer les tendances d'évolution à long terme des niveaux piézométriques (1) puis, en cas de tendance à la baisse, d'estimer la recharge à long terme (2), les prélèvements moyens annuels (3), de déterminer le rapport prélèvements sur ressource (4) pour conclure selon le ratio observé (et/ou sur la base de données spécifiques, sur l'existence de ZRE) sur l'état de la MESO (5).

La réalisation du test Balance nécessite de disposer :

- de chroniques piézométriques suffisamment longues et représentatives de l'ensemble de la MESO pour déterminer une éventuelle tendance à la baisse ;
- de données permettant d'estimer la recharge à long terme sur la MESO ;
- des prélèvements moyens annuels sur la MESO

L'exercice peut s'avérer délicat dans le cas d'une absence de suivi piézométrique ou d'un suivi piézométrique considéré comme insuffisant vis-à-vis des hétérogénéités de la masse d'eau. L'estimation de la recharge à long terme nécessite quant à elle de disposer de données spatialisées de la Pluie Efficace et du Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (RIPE) (Béranger et al., 2019).

On dénombre actuellement environ 4200 ouvrages pour le suivi des masses d'eau souterraines en France, mais cette répartition est assez hétérogène et certaines MESO sont insuffisamment suivies (Illustration 2).

L'objectif de l'étude, financée par l'Office Français de la Biodiversité, est d'étudier pour ces masses d'eau souterraine peu ou pas suivies la possibilité d'aboutir à une évaluation fiable de l'état quantitatif des masses d'eau, **à partir d'autres variables hydro-climatiques que les niveaux d'eau souterraine** et donc de s'affranchir d'un suivi piézométrique complémentaire.

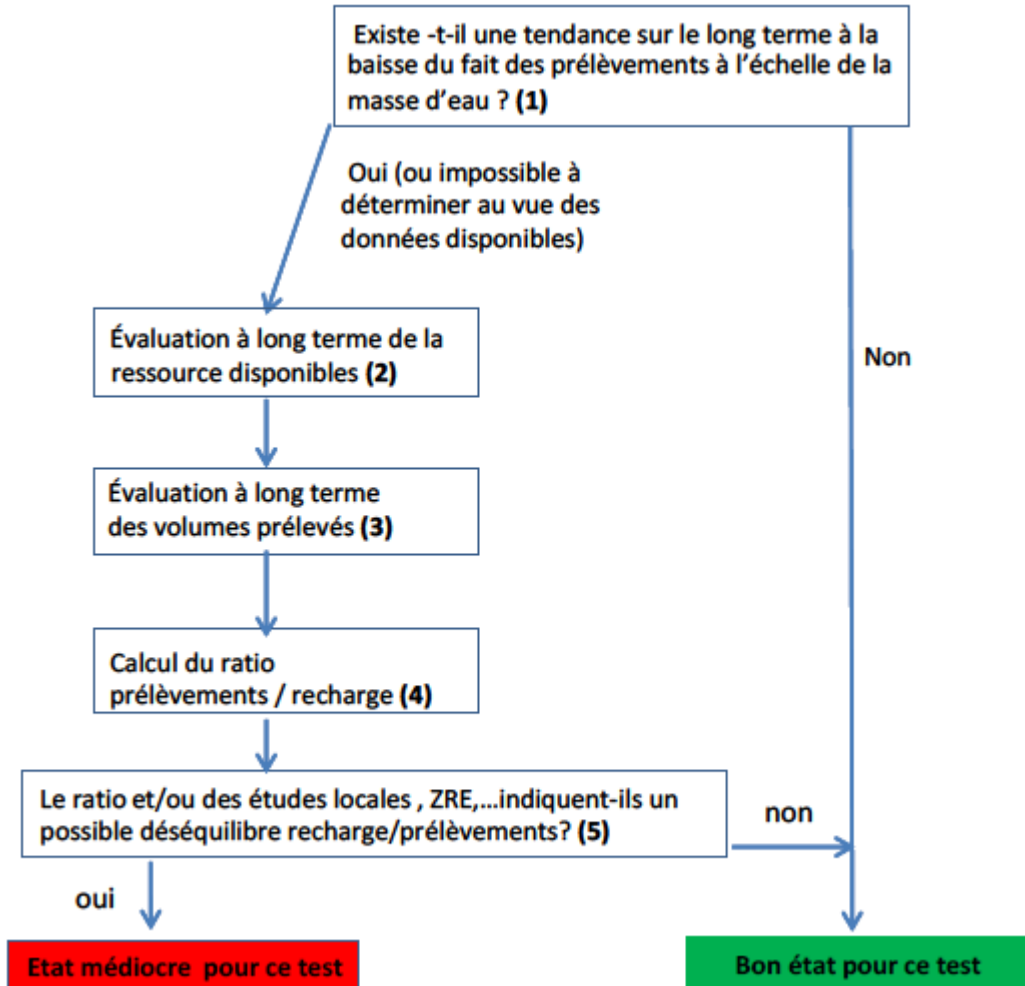


Illustration 1 – Logigramme du test Balance (MTES, 2018)

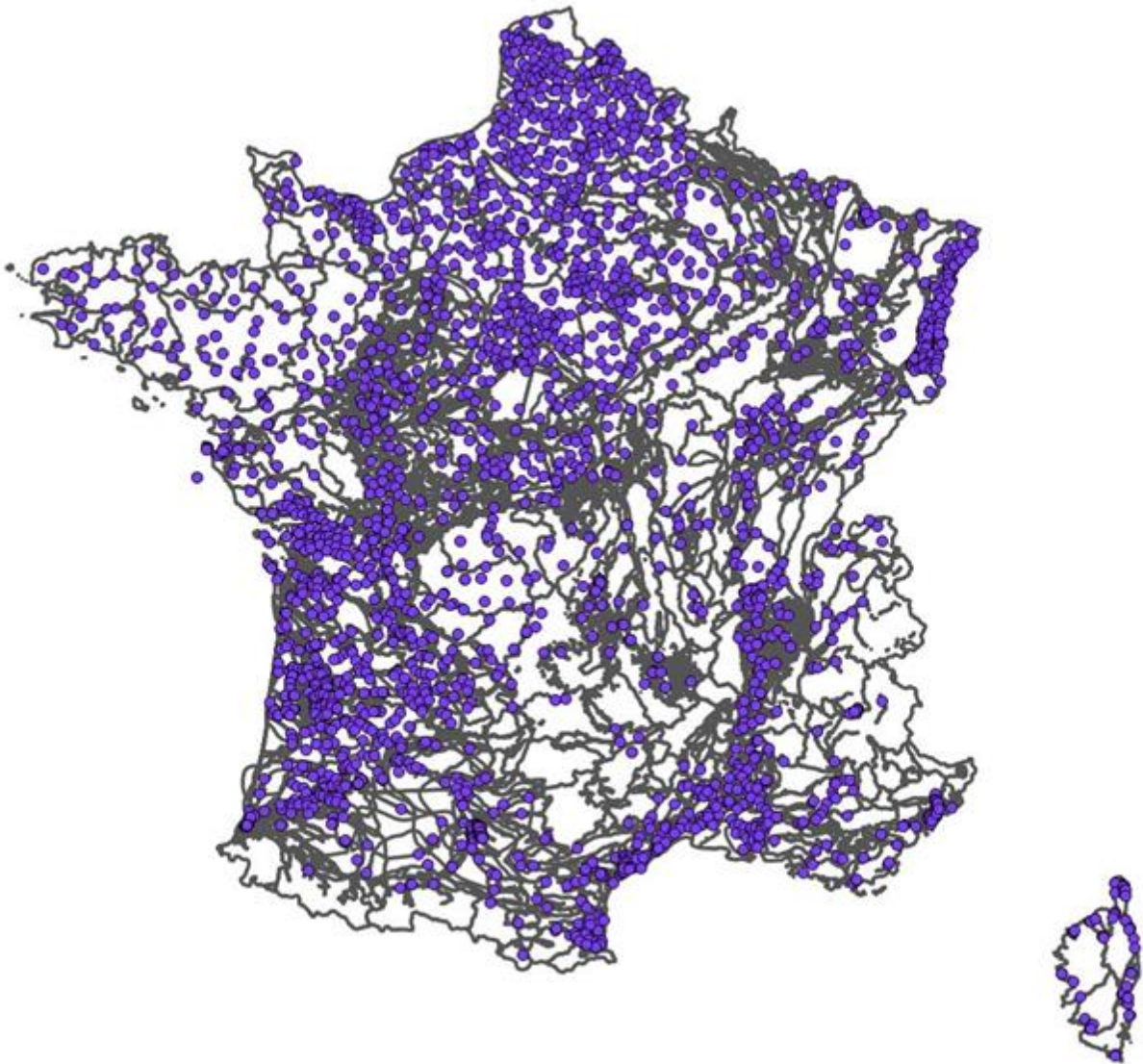


Illustration 2 – Répartition des ouvrages de suivi des MESO en France métropolitaine (base ADES)

D'un point de vue méthodologique, l'étude est décomposée en quatre étapes :

1. Revue bibliographique internationale sur les méthodes d'extrapolation (piézométriques et hydrométriques) incluant une enquête sur les adaptations / solutions mises en œuvre par les gestionnaires des bassins lors des derniers rapportages DCE.
2. Echanges avec les gestionnaires de bassin pour lister les MESO considérées comme sous-équipées pour mener à bien l'évaluation quantitative et sélection de 6 zones d'étude pilotes en veillant à la diversité des contextes hydrogéologiques.
3. Tests méthodologiques basés sur le fonctionnement intrinsèque des aquifères pour les zones d'étude retenues.
4. Synthèse méthodologique et outils associés pouvant être utilisés par tous les bassins.

Ce rapport final présente une synthèse des travaux réalisés sur les 5 masses d'eau souterraine sélectionnées (le détail figure dans le rapport d'avancement n°2, RP-70673-FR), la méthodologie proposée et la validation de cette méthodologie sur les 5 masses d'eau test.

2. Synthèse des travaux réalisés sur les 5 masses d'eau souterraine sélectionnées

Les travaux ont été conduits sur cinq masses d'eau souterraine, sélectionnées en concertation avec les gestionnaires de bassin :

- AG302 Calcaires du Boulonnais (AP) - Dominante sédimentaire non karstique.
- CG013 (ex-CG003), socle Vosgien (RM) – Socle.
- HG511 (ex HG503), bassin de la Vire (SN) – Socle .
- FG013, Calcaires du Jurassique moyen dans la boucle de la Charente (AG) - Dominante sédimentaire karstique.
- LG101, Formations volcaniques du littoral nord (REU) – volcanique.

Pour ces cinq masses d'eau souterraine, nous avons réalisé un certain nombre de tests en utilisant les données disponibles (chroniques piézométriques, débits de sources, débits totaux et débits de base de cours d'eau, données hydro-climatiques), l'objectif étant de voir si ces données peuvent être utilisées pour évaluer l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine.

L'approche proposée a consisté à analyser ces chroniques en utilisant différentes méthodes. Cette analyse a été faite en grande partie avec l'outil **ESTHER** (Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R), développé par le BRGM (Seguin et al., 2018), qui permet d'analyser des chroniques de niveaux, débits, pluies et ETP et de réaliser des études croisées pluies-débits-niveaux, apportant une aide à la détermination d'indicateurs piézométriques, à la prédétermination d'étiages et de crues, à la détection de tendances, et, plus généralement, à l'analyse de la dynamique d'une nappe. Une approche intéressante quand on manque de données piézométriques, mais que l'on dispose de chroniques de débit, est la décomposition d'hydrogrammes pour obtenir le **débit de base d'un cours d'eau**. Nous avons également testé une nouvelle approche mise en œuvre par le BRGM. Il s'agit de l'**Indice d'état pluviométrique**. Cet indice est calculé à partir des chroniques de pluie efficace ; il est basé sur les corrélations entre les chroniques météorologiques et les niveaux piézométriques afin de pouvoir évaluer les liens existant entre apports pluviométriques et évolution des stocks en eau souterraine (Manceau et al., 2020).

Les cinq sites d'étude, bien que montrant une grande diversité de contextes hydrogéologiques, ont permis de tester ces différentes méthodes.

2.1. AG302 – CALCAIRES DU BOULONNAIS

La masse d'eau souterraine des calcaires du Boulonnais est constituée d'aquifères de faibles extensions aux lithologies très hétérogènes. Seuls deux piézomètres sont encore suivis (Wirwignes et Baincthun), ils sont tous les deux situés au sud-ouest de la MESO, dans le bassin versant de la Liane (Illustration 3). L'analyse de ces piézomètres et des anciennes chroniques piézométriques confirme la diversité hydrogéologique de la MESO et met en évidence des dynamiques et des variations de stock très différentes d'un secteur à l'autre.

L'analyse des débits montre que la Slack et le Wimereux (Illustration 4), avec des BFI plus faibles, sont moins soutenus par la nappe que la Liane. Même si le débit de base de la Liane semble être un bon indicateur de la contribution de la nappe, la superposition de chroniques des débits de base et des niveaux piézométriques montre un décrochage sur les minimas depuis 2003. La tendance à la baisse observée sur les niveaux piézométriques à Wirwignes n'est pas observée sur les débits et les débits de base de la Liane à Wirwignes.

L'indice de sensibilité aux pluies, calculé avec les pluies efficaces, permet de bien reproduire la piézométrie, sauf pour deux piézomètres situés au nord de la MESO.

Il semble donc difficile dans le secteur nord où la nappe est la plus sollicitée (nombreux prélèvements) de s'appuyer sur les autres variables hydro-climatiques (pluie efficace, débits, débits de base) pour l'évaluation quantitative de la masse d'eau.

Il n'est pas possible non plus de s'appuyer sur les chroniques piézométriques des ouvrages DCE situés au sud, les propriétés des systèmes aquifères étant bien distinctes (dynamiques différentes, relations nappe/rivière différentes).

Il est donc recommandé sur cette MESO de mettre en place un suivi piézométrique supplémentaire, notamment au nord dans un secteur, semble-t-il, à enjeux, avec de nombreux prélèvements.

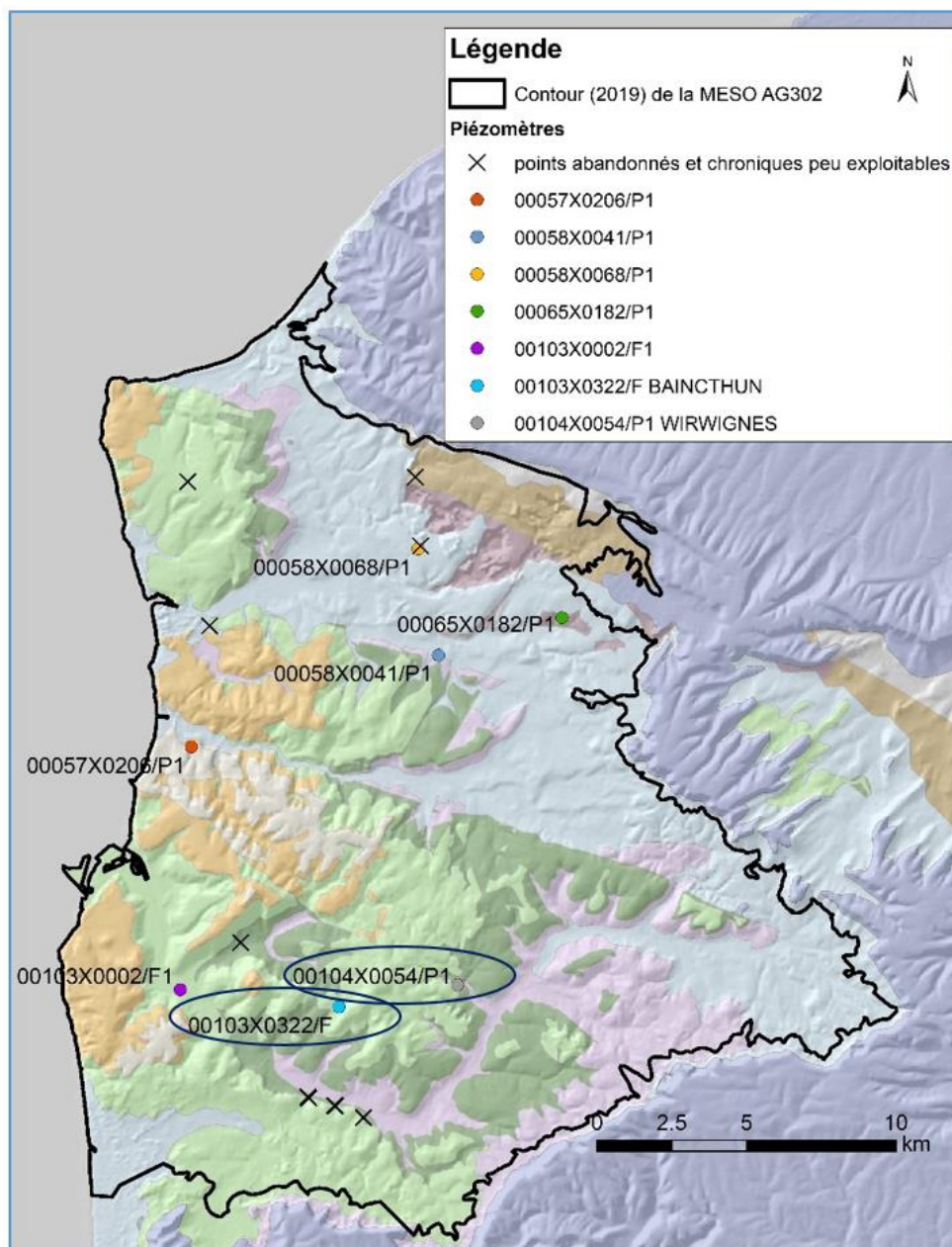


Illustration 3 – Piézomètres présents au droit de la masse d'eau AG302 et dont les chroniques sont exploitables (les deux piézomètres entourés sont ceux encore actifs)

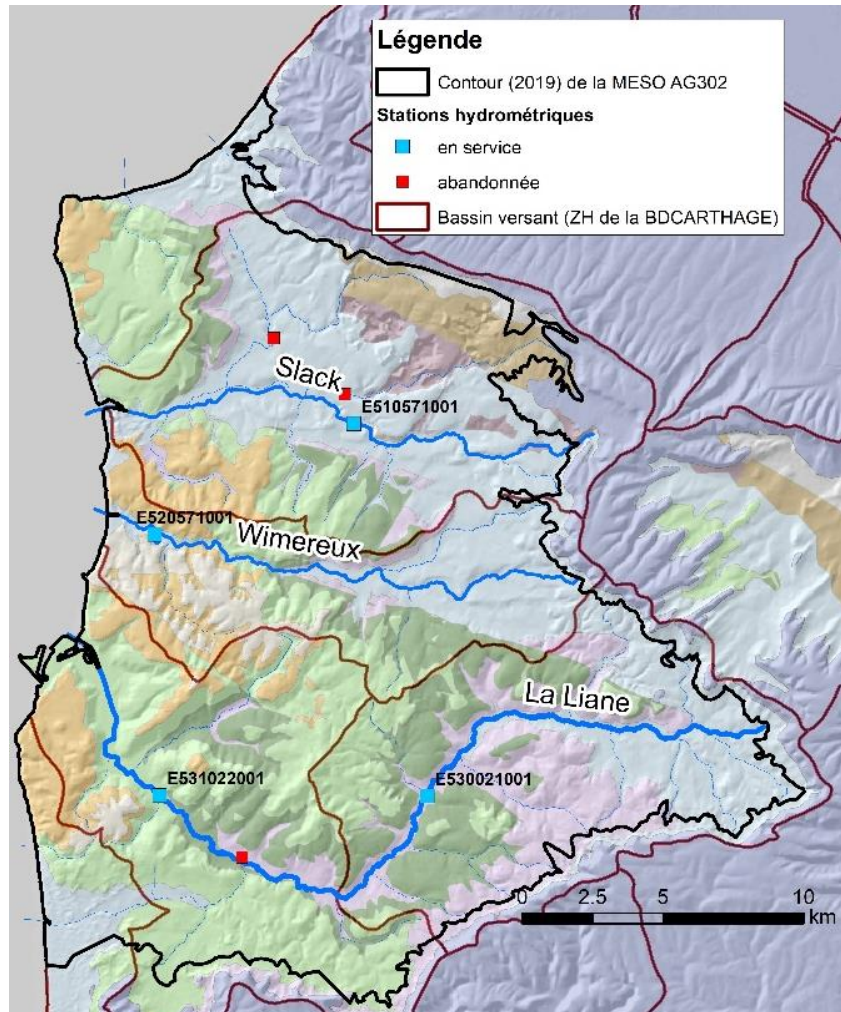


Illustration 4 – Stations hydrométriques présentes au droit de la masse d'eau AG302 (banque Hydro)

2.2. LG101 – LITTORAL NORD DE LA RÉUNION

On dispose de 5 piézomètres DCE pour le suivi de la masse d'eau LG101, ce qui peut paraître suffisant pour caractériser l'état de la masse d'eau (Illustration 5). Le piézomètre F4 Ilet Quinquina (21049), situé à la limite avec la LG102, est le seul représentatif de la recharge en amont de la masse d'eau, dont on a vu qu'elle joue un rôle important vis-à-vis la LG101. Ce piézomètre est susceptible d'être influencé par des prélèvements, ce qui expliquerait sa tendance à la baisse. Il existe un autre piézomètre en altitude (Domenjod, 21090), mais très proche de F4 Ilet Quinquina et qui n'est plus suivi depuis 2012. Il faudrait disposer d'autres piézomètres à la limite LG101-LG102, à l'Ouest, et surtout à l'Est, où plus d'un tiers de la superficie de la masse d'eau ne dispose d'aucun piézomètre DCE.

Une solution serait de compenser cette absence de piézomètres par le suivi du débit de base des cours d'eau sur des stations hydrométriques représentatives, en particulier sur la partie amont de la LG101 et/ou sur la LG102 (Illustration 6). L'analyse des chroniques de débit montrent que les stations situées en amont ont des BFI faibles (< 0.31), à l'exception notable de La Rivière Saint-Denis (14015) à l'amont du captage AEP (0.69), située sur la LG102.

La chronique du débit de base de cette station pourrait être utilisée pour des calculs de tendance (Illustration 7). Pour les stations à BFI faible, cela signifie que le soutien du débit du cours d'eau par les eaux souterraines est limité et que la prise en compte de la chronique de ce débit de base pour caractériser l'état de la masse d'eau souterraine est sujette à caution. Mais même dans le cas d'une station avec un BFI élevé, la prise en compte d'une chronique de débits de base comme alternative à une chronique piézométrique nécessite de valider sa pertinence.

Une autre approche possible est la prise en compte d'un indice d'état pluviométrique, dont on a pu montrer lors des tests réalisés qu'il était bien corrélé aux séries piézométriques disponibles. Cet indice pourrait être utilisé pour générer des chroniques d'indice des pluies efficaces, calées sur des chroniques piézométriques anciennes non influencées par des pompages, et extrapolées à partir de données de pluie et ETP actuelles. Il faut néanmoins garder à l'esprit que cette approche présente des incertitudes, qu'elle n'a été testée que sur quelques exemples et qu'elle ne saurait se substituer à un suivi piézométrique classique.

Les tests de corrélation niveaux piézométriques / débits de base des cours d'eau confirment par ailleurs, l'hétérogénéité des masses d'eau souterraines LG101 et LG 102 et la nécessité pour bien caractériser l'état de la masse d'eau LG101 de disposer de plusieurs stations de mesures correctement réparties (y compris sur la LG102 ?).

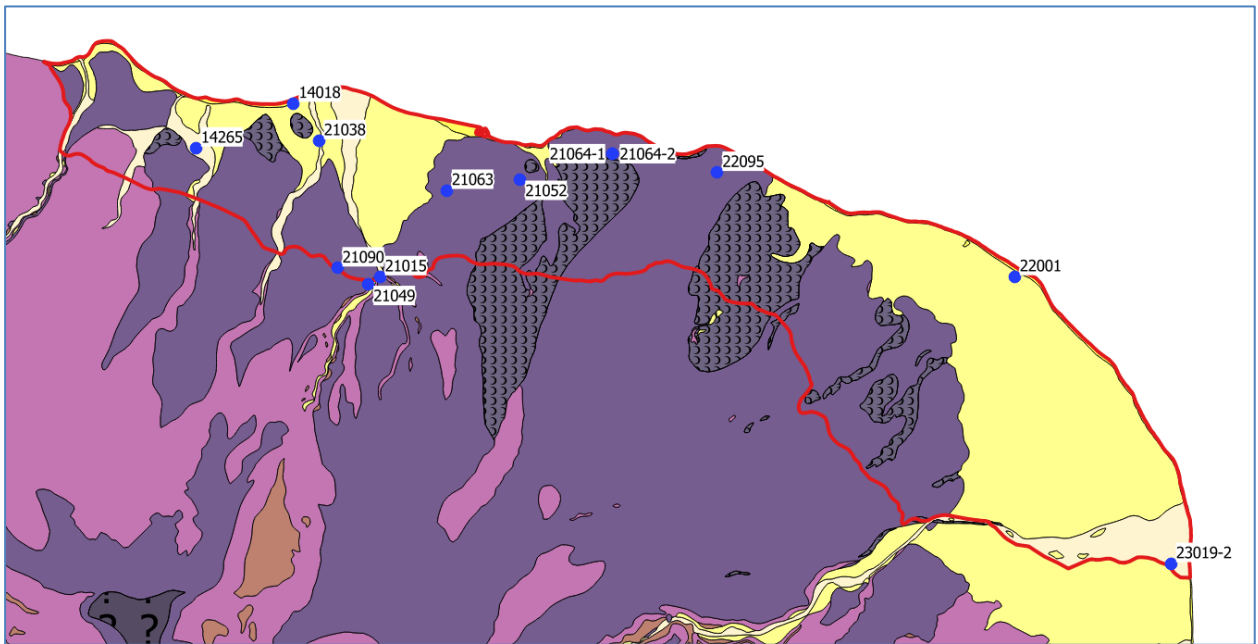


Illustration 5 – Ouvrages de la masse d'eau LG101 disposant de données piézométriques (fond : carte géologique simplifiée) ; piézomètres DCE : 21038, 21049, 21064-1, 21064-2, 22095)

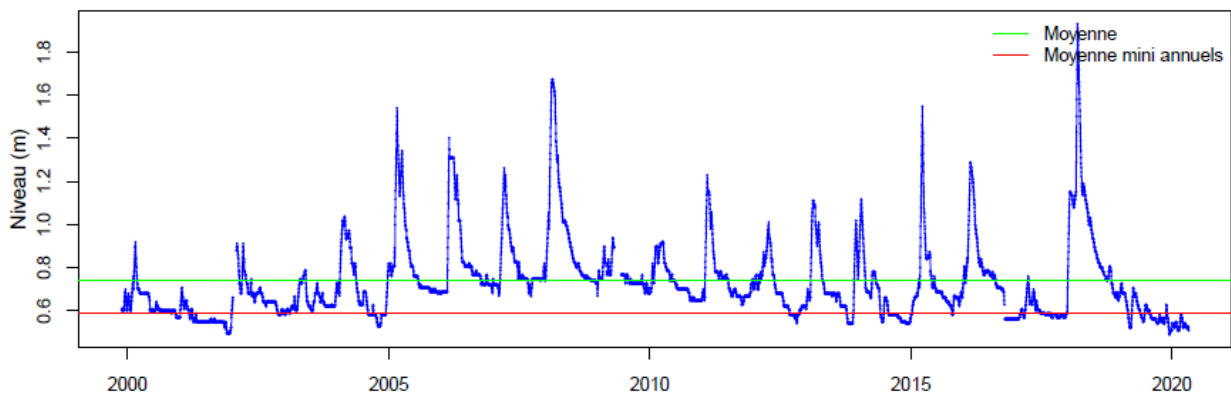
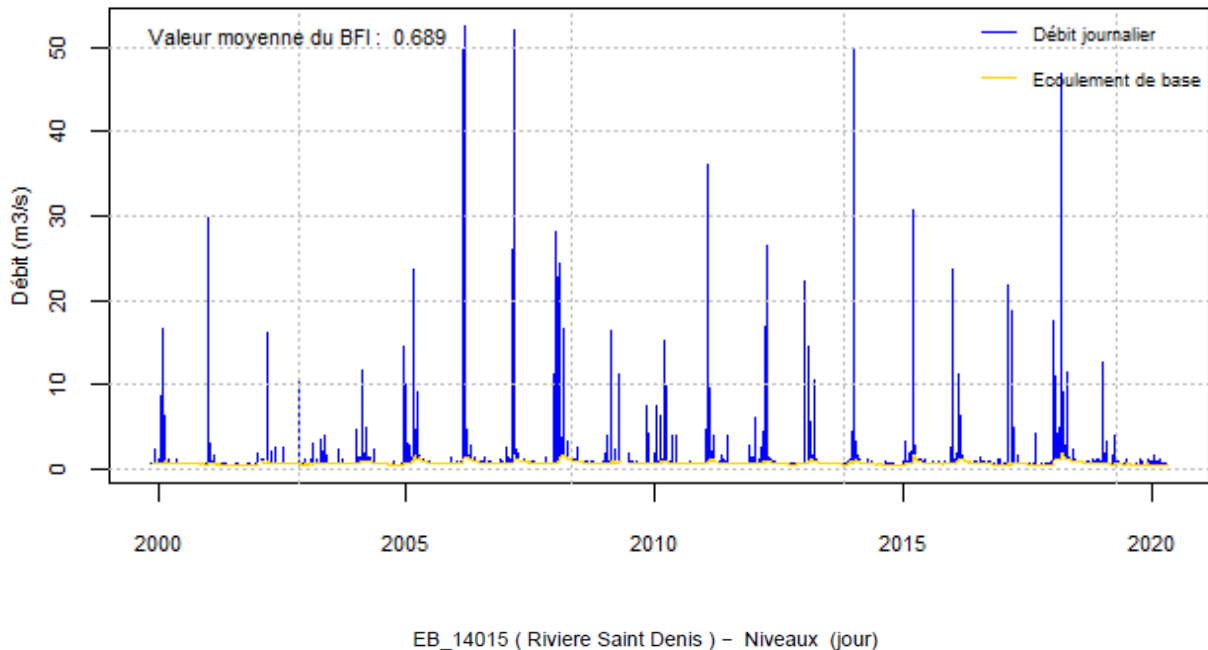


Illustration 7 – Chronique du débit journalier et de l'écoulement de base de la station 14015 sur la Rivière Saint-Denis (en haut) et chronique de l'écoulement de base seul (en bas)

2.3. CG003 - SOCLE VOSGIEN

On dispose de seulement deux piézomètres, situés à proximité l'un de l'autre, pour une masse d'eau qui présente une superficie de plus de 3000 km².

Dans ce type d'aquifère (socle), où de nombreuses sources sont présentes (Illustration 8), le suivi des sources peut être une bonne alternative au suivi des nappes, en particulier pour les sources qui présentent des débits importants comme la source de Grendelbruch. Un tel suivi nécessite des mesures journalières.

Pour la masse d'eau CG003, le comportement des sources est assez différent selon les secteurs. Cela nécessite de prendre en compte plusieurs sources pour une bonne représentativité.

Les tests sur les BFI montrent que tous les cours d'eau testés ont des BFI moyens (entre 0.45 et 0.68), conformes à ce que l'on observe en aquifère de socle (Seguin, 2016), ce qui témoigne d'une composante eau souterraine non négligeable dans le débit de base des cours d'eau. Les chroniques de débits de base peuvent être une alternative aux chroniques piézométriques pour le calcul de tendance, mais leur prise en compte nécessite de valider leur pertinence : station non influencée au moins sur une période récente de durée suffisante (5 à 10 ans) ; débit de base significatif (1 m³/s) caractérisant une composante importante des eaux souterraines au débit du cours d'eau.

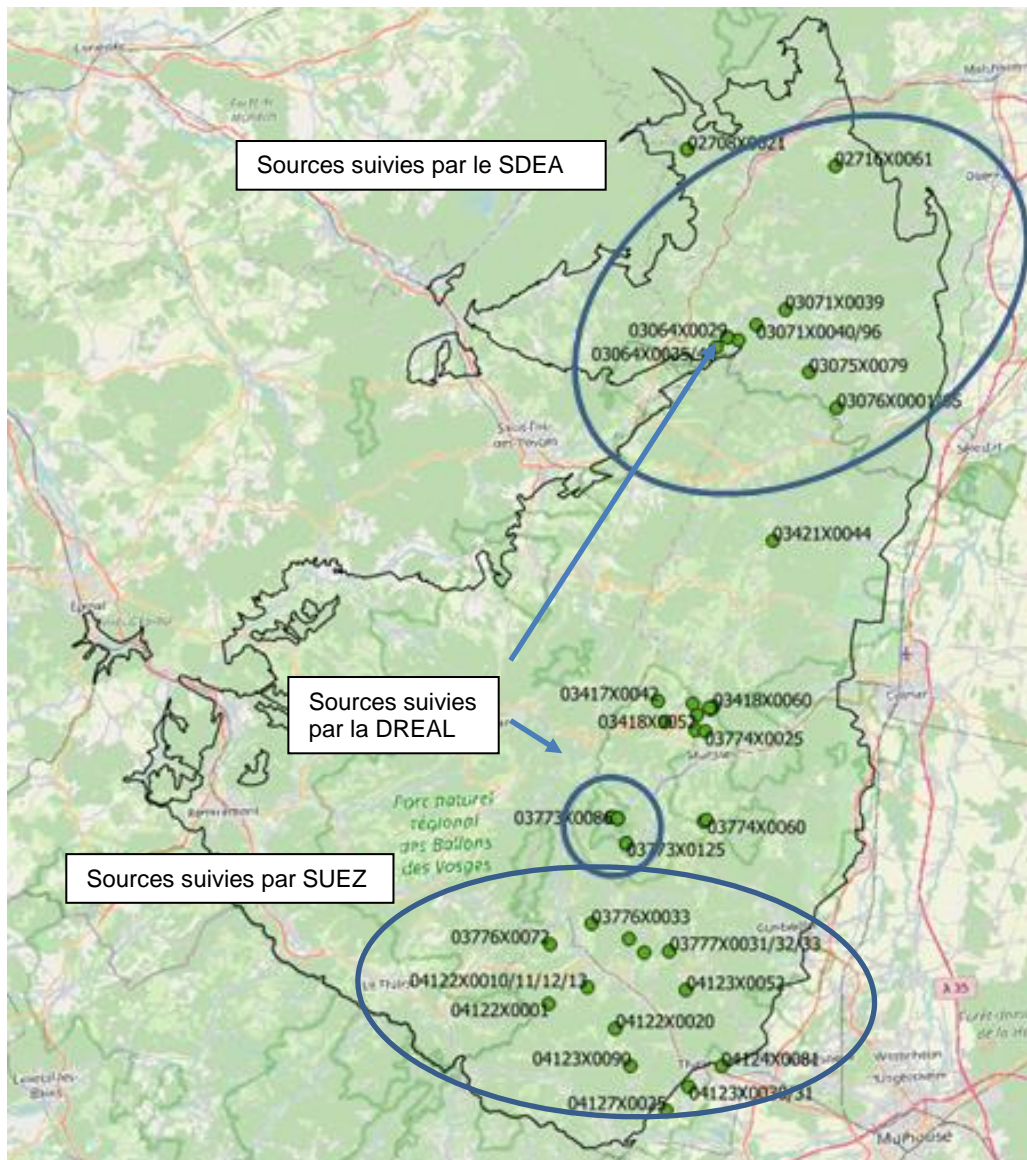


Illustration 8 – Sources disposant de plus de 100 mesures sur la masse d'eau CG003

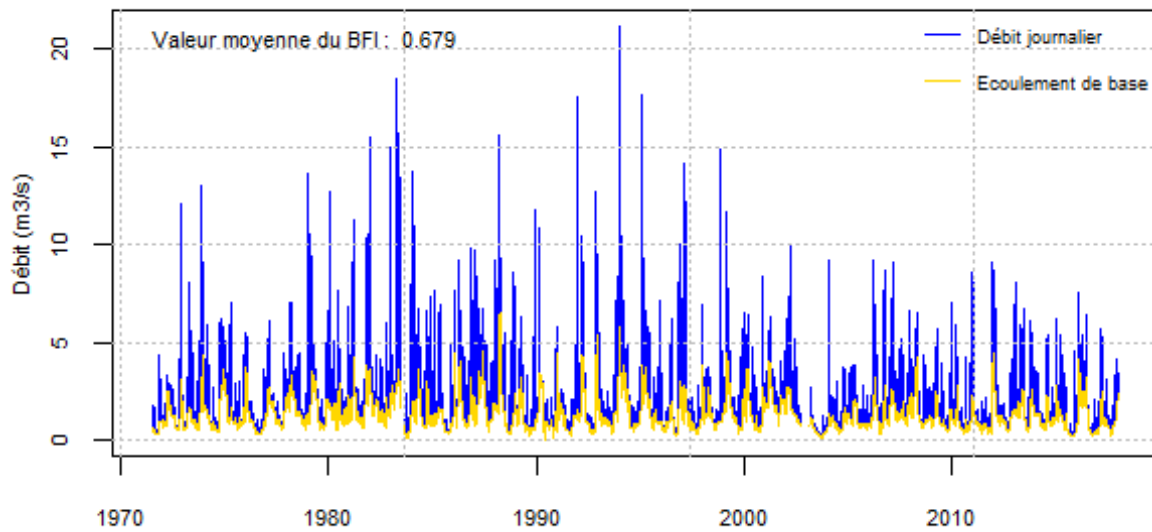


Illustration 9 – Chronique du débit journalier et de l'écoulement de base de la Meurthe à Fraize

2.4. HG511 - BASSIN DE LA VIRE

Le seul piézomètre (01446X0005) suivi sur la masse d'eau HG511 est caractérisé d'un point de vue hydrodynamique par une transmissivité médiocre (absence de fracturation) et par une forte épaisseur de l'horizon altéré (30 m). Au-delà de l'hétérogénéité des lithologies rencontrées sur le bassin de la Vire, le comportement hydrodynamique des eaux souterraines (et donc le signal piézométrique) est avant tout contrôlé par la fracturation des formations et par l'épaisseur des altérites, sus-jacentes à l'horizon fissuré potentiellement transmissif.

Ceci a été mis en évidence par les tests de corrélation conduits avec les chroniques piézométriques avoisinantes. En effet, les meilleures corrélations sont obtenues avec des piézomètres éloignés et captant une autre formation géologique (cornéennes), mais recoupant des altérites sur une importante épaisseur (entre 20 et 30 m). Au contraire, la corrélation n'est pas satisfaisante avec le piézomètre le plus proche et suivant la même formation, ce dernier interceptant une roche fracturée et non surmontée par une épaisseur significative d'arènes.

Dans le cas du piézomètre 01446X0005, aucune autre variable hydro-climatique (débit, débit de base, précipitation efficaces) ne semble en mesure de traduire les fluctuations piézométriques mesurées sur la période 2002-2020. A première vue (résultats de la modélisation globale, tendance à la baisse, etc.), une des hypothèses avancées pourrait être l'influence de pompages à proximité, mais après enquête, aucun indice ne semble aller dans ce sens. Une enquête terrain pourrait permettre de répondre à la question. L'autre hypothèse possible est le contexte hydrodynamique qui serait à l'origine d'un signal piézométrique atypique, en particulier en période de vidange. La question de la représentativité du piézomètre peut donc ici être posée.

L'indice d'état pluviométrique semble en mesure d'expliquer les fluctuations piézométriques de la nappe perchée contenue dans les altérites. En revanche, pour tous les piézomètres de la zone d'étude captant l'horizon fissuré profond, les basses eaux sont systématiquement mal reproduites (Illustration 10).

2.5. FG013 – CALCAIRES DU JURASSIQUE MOYEN ENTRE CHARENTE ET SON-SONNETTE

Un seul piézomètre (Amant - 06854X0051/S) est actuellement suivi sur la masse d'eau FG013. Il se trouve à l'extrême sud-ouest de celle-ci et était rattaché jusqu'en 2018 à la masse d'eau FG018 « Calcaires du karst de la Rochefoucauld BV Charente » dont il suivait l'évolution des niveaux.

La masse d'eau FG013 paraît relativement homogène (recharge uniforme, libre et karstique, prélèvements équitablement répartis, ...). Toutefois, plusieurs types de relation nappe-rivière y ont été observés (la nappe draine/alimente le cours d'eau) et nécessiteraient un suivi, au regard de l'étude sur la représentativité des réseaux DCE de surveillance des eaux souterraines (Auterives et al., 2013). La présence d'un seul et unique piézomètre paraît, ainsi, de prime abord, insuffisante pour caractériser l'état quantitatif de la masse d'eau dans son ensemble.

La chronique d'Amant (06854X0051/S) est relativement bien corrélée ($R \geq 0,77$) avec la totalité des chroniques piézométriques de la masse d'eau voisine FG014 « Calcaires du Jurassique moyen en rive droite de la Charente amont », qui présente les mêmes caractéristiques hydrogéologiques (à savoir celles d'une nappe karstique et capacitive). Il apparaît, ainsi, intéressant d'utiliser certains de ces piézomètres voisins pour caractériser la MESO FG013, en particulier ceux témoignant d'échanges nappe-rivière non suivis par le piézomètre d'Amant (Illustration 11).

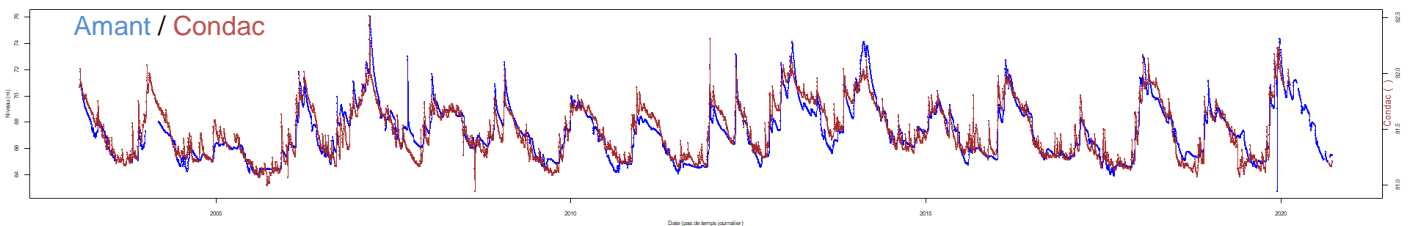


Illustration 11 – Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec ceux d'un piézomètre situé sur la masse d'eau voisine

D'autres variables hydro-climatiques (débit, débit de base, précipitations efficaces) semblent, par ailleurs, en mesure de traduire les fluctuations piézométriques observées. Les niveaux de nappe au piézomètre 06854X0051/S sont, en effet, très bien corrélés avec les débits et les débits de base calculés aux stations hydrométriques les plus proches, pas ou peu artificialisées par des lâchers de barrage ($R \geq 0,8$) (Illustration 12). Les chroniques de débit de base (ou de débit) de ces stations pourraient alors être utilisées pour des calculs de tendance. Ce n'est bien entendu pas le cas des chroniques de débit (notamment de base) artificialisées (comme celle de Saint-Saviol et Charroux) ; même si elles présentent des BFI élevés ($> 0,50$). Concernant les précipitations efficaces, l'indice d'état pluviométrique (IEP) explique de façon très satisfaisante l'évolution des niveaux au piézomètre d'Amant (corrélation de 0,92) et aux piézomètres de la MESO voisine ($\geq 0,8$). Cet indice semble ainsi en mesure de reproduire les fluctuations piézométriques du Dogger karstique. Toutefois, les niveaux bas de certains piézomètres voisins restent mal expliqués.

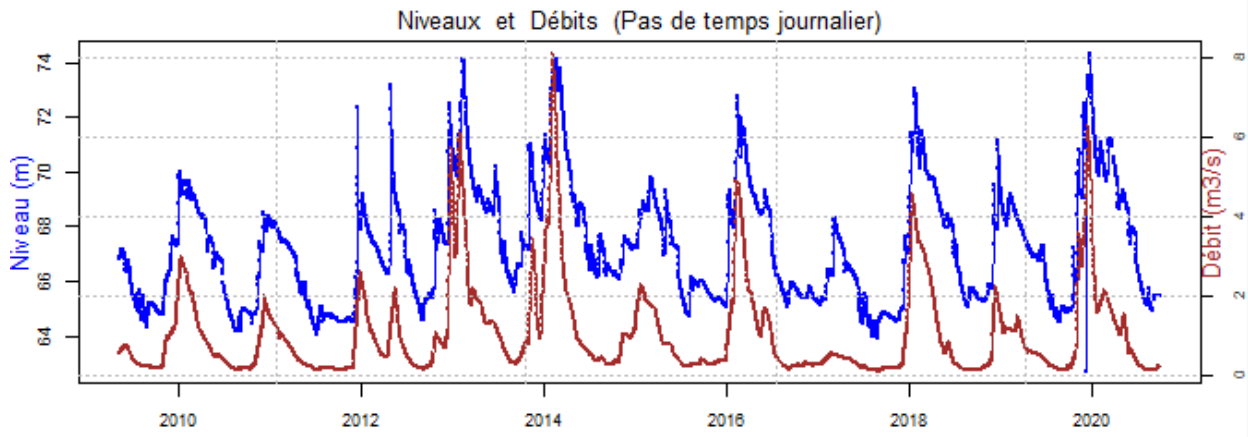


Illustration 12 – Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec les débits de base de la station de Saint-Front

En résumé, la surveillance piézométrique de la masse d'eau FG013 pourrait être complétée par celle de piézomètres voisins (en particulier ceux qui sont représentatifs d'autres échanges nappe-rivière) et celle du débit (ou du débit de base) des stations hydrométriques pas ou peu artificialisées présentes sur la masse d'eau et/ou la masse d'eau voisine.

3. Méthodologie proposée

L'analyse des 5 masses d'eau test a permis d'élaborer une méthodologie basée sur l'analyse et le traitement de différentes données susceptibles d'être prises en compte pour caractériser l'état quantitatif d'une masse d'eau souterraine.

En préambule, il nous paraît important, même si ce n'est pas l'objet de cette étude, de revenir sur la répartition des stations de suivi. On a vu pour certaines masses d'eau que des piézomètres étaient présents mais qu'ils pouvaient être insuffisants en nombre ou peu représentatifs pour caractériser son état quantitatif.

Pour évaluer la répartition des stations de suivi de l'état quantitatif par rapport aux caractéristiques hydrogéologiques de la masse d'eau, nous avons listé dans le tableau ci-dessous un certain nombre de critères à considérer en amont de la définition des réseaux.

Critère à prendre en compte	Evaluation du critère	Recommandations
Hétérogénéité spatiale de la MESO	Découpage BDLISA (en domaine sédimentaire)	1 station par entité BDLISA
Hétérogénéité verticale de la MESO	Caractérisation de l'horizon capté par le piézomètre	Pour les aquifères sédimentaires ? multi-couches : 1 station par couche aquifère indépendante Pour les aquifères de socle : distinction entre altérite et horizon fissuré
Inertie de la nappe	Evaluation du comportement hydrodynamique (cycle annuel avec ou sans inertie, double avec ou sans inertie, cycle pluriannuel)	1 piézomètre pour chacun des comportements hydrodynamiques observés sur la masse d'eau.
Présence d'une partie libre et une partie captive	Connaissance hydrogéologique Coupes hydrogéologiques Cartes du toit et mur de l'aquifère	Le réseau de surveillance de la MESO doit prendre en compte les zones libres et captives identifiées
Ecoulement souterrain (uniforme ou non)	Cartes piézométriques bassins versants souterrains	1 ou 2 stations par bassin versant souterrain (une en aval et une en amont, le cas échéant)
Relations nappe-rivière	Connaissance hydrogéologique Cartes piézométriques Comparaison entre les chroniques piézométriques et les chroniques de débit	1 ou plusieurs station(s) représentative(s) des différentes relations nappe-rivière (la nappe draine ou alimente le cours d'eau)
Pressions anthropiques	Connaissance des prélèvements	avoir des stations qui traduisent l'influence des prélèvements et des stations non influencées
Variabilité spatiale de la recharge (une part de la recharge provient d'une autre MESO)	Cartes de recharge moyenne	1 station par grande zone de recharge (y compris dans une MESO voisine le cas échéant)

La méthodologie proposée se présente sous forme d'un logigramme (Illustration 13), avec un enchaînement de 5 étapes successives :

1. Compilation de données
2. Alternatives possibles
3. Représentativité et qualité des chroniques
4. Validation de la solution alternative
5. Valorisation possible

3.1. ETAPES 1 & 2 : CHOIX DES ALTERNATIVES POSSIBLES

La compilation de données concerne toutes les données disponibles sur la **MESO cible** et les masses d'eau avoisinantes (**MESO alternative**) : données piézométriques, débits de source, débits des cours d'eau et données hydroclimatiques.

Ces données offrent différentes alternatives de traitement pour caractériser l'état de la masse d'eau. A ce stade, on n'établit pas de hiérarchisation des données. Dans certains cas, il peut être plus intéressant de tester des chroniques piézométriques sur une MESO située à proximité (MESO alternative) et dans d'autres cas de tester d'anciennes chroniques piézométriques ou des chroniques hydrométriques (débit de source ou de cours d'eau) sur la MESO cible.

Dans le cas des **MESO fortement karstifiées**, qui peuvent avoir des réserves très différents d'une unité voisine à l'autre, il semble délicat de prendre en compte des chroniques piézométriques des MESO voisines. L'utilisation du débit des sources au sein de la MESO et à défaut des cours d'eau à proximité des sources est préférable pour évaluer l'état d'une MESO karstique sans piézomètre.

3.2. ETAPE 3 : REPRÉSENTATIVITÉ ET QUALITÉ DES CHRONIQUES

La sélection des chroniques se fera dans l'étape 3 d'analyse de leur représentativité et de la qualité des données. Cette étape est importante, car si les tests de représentativité et de qualité des chroniques s'avèrent négatifs, la seule solution acceptable sera la création de nouveaux piézomètres. Les critères d'analyse de la représentativité et de la qualité des chroniques sont détaillés ci-dessous.

Remarque : Ces critères concernent les chroniques mais pas les stations elles-mêmes (cf. critères à évaluer en amont sur la répartition des stations)

Chroniques piézométriques sur une MESO à proximité

Qualité des chroniques :

- Durée minimum : 10 ans. A adapter en fonction de l'inertie de la nappe (la durée peut être moindre en domaine de socle par exemple).
- Données journalières (sauf pour les aquifères à forte inertie pour lesquels des données hebdomadaires voire mensuelles peuvent suffire).

Représentativité par rapport au contexte hydrogéologique :

- Avis d'expert.
- Utilisation de BD-LISA, coupes géologiques et techniques.

Représentativité par rapport à l'état des pressions

- Vérifier que les pressions sont identiques à celles de la MESO cible.

Chroniques piézométriques anciennes sur la MESO cible

Qualité des chroniques :

- Durée minimum : 10 ans. A adapter en fonction de l'inertie de la nappe (la durée peut être moindre en domaine de socle par exemple).
- Données journalières (sauf pour les aquifères à forte inertie).
- Intègre des périodes de Hautes Eaux (HE) et de Basses Eaux (BE).

Représentativité par rapport au contexte hydrogéologique :

- Avis d'expert.
- Utilisation de BD-LISA, coupes géologique et technique.

Chroniques de débit de source sur la MESO cible

Qualité des chroniques :

- Durée minimum : 10 ans (pas nécessairement les dernières années).
- Intègre des périodes HE et BE.
- Données journalières.

Représentativité par rapport au contexte hydrogéologique :

- Avis d'expert.
- Débit annuel moyen minimum : 1 m³/s.
- Débits d'étiage minimum : 0.2 m³/s.
- Source non captée ou captage gravitaire.
- Superficie du BV significative par rapport à la superficie de la MESO cible.

Chroniques de débit de cours d'eau sur la MESO cible

Qualité des chroniques :

- Durée minimum : 10 ans.
- Données journalières.
- Débit annuel moyen minimum : 1 m³/s pour avoir un débit de base significatif ; privilégier les stations qui ont les débits les plus élevés.
- Superficie drainée significative par rapport à la superficie de la MESO cible.

Représentativité par rapport au contexte hydrogéologique :

- Cours d'eau alimentés par les nappes en période d'étiage : analyse du QMNA5.
- Cours d'eau avec régime naturel (pas de barrage ni prélèvements d'eau de surface).
- Avis d'expert.

3.3. ETAPE 4 : VALIDATION DE LA SOLUTION ALTERNATIVE

Si l'une des chroniques est considérée comme représentative et fiable, l'étape 4 consistera à valider cette solution alternative, avec là encore en cas d'absence de validation, la nécessité de créer de nouveaux piézomètres.

Dans le cas où la chronique retenue est une **chronique piézométrique d'une MESO située à proximité**, la validation sera réalisée par des tests de corrélation entre niveau de nappe de la MESO alternative et débits de la MESO cible, si les stations sont dans le même contexte hydrogéologique, et des tests de corrélations entre niveau de nappe de la MESO alternative et pluies efficaces de MESO cible.

Dans le cas où la chronique retenue est une **ancienne chronique piézométrique sur la MESO cible**, deux méthodes d'extension de la chronique sont proposées : l'utilisation d'un modèle global pluie-niveau ou le calcul de l'IEP. Si le calage avec un modèle global pluie-niveau est considéré comme satisfaisant, nous privilégions l'extension de la chronique piézométrique sur la période actuelle avec le modèle calé et les données de précipitations et ETP (priorité 1), plutôt qu'avec les données de pluies efficaces issues du calage de l'IEP (priorité 2).

Dans le cas où la chronique retenue est une **chronique de débit de source sur la MESO cible**, la validation sera réalisée par des tests de corrélations entre débit, niveau de nappe et pluies efficaces de la MESO cible. Si on dispose uniquement de **chroniques anciennes**, on peut, comme pour les chroniques piézométriques, essayer de les étendre avec un modèle global pluie-débit.

Dans le cas où la chronique retenue est une **chronique de débit de cours d'eau sur la MESO cible**, l'objectif est d'évaluer si on peut utiliser le débit de base pour calcul la tendance. La première condition est l'alimentation du cours d'eau par la nappe en période d'étiage. Le Base Flow Index (BFI) peut être considéré comme un indicateur de cette relation. On a considéré une valeur seuil du BFI pour trois type d'aquifère différents :

- Pour un aquifère de socle ou volcanique, le BFI doit être supérieur à 0.4.
- Pour un aquifère sédimentaire karstique, le BFI doit être supérieur à 0.5.
- Pour un aquifère sédimentaire non karstique, le BFI doit être supérieur à 0.6.

Le choix de ces valeurs seuil est arbitraire mais repose néanmoins sur une analyse de BFI réalisée en France sur 66 bassins versants avec différent types d'aquifères (Arnaud, 2017). Cette analyse comparative montre que les BFI des aquifères sédimentaires sont globalement plus élevés que les BFI des aquifères de socle. La valeur du BFI est un indicateur susceptible d'être pris en compte mais il ne peut se substituer à la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de la masse d'eau.

Une fois le choix d'utiliser une chronique de débit de base de cours d'eau validé, il importe de vérifier la qualité de cette chronique, qui doit être comparable à une chronique piézométrique. Nous proposons d'établir un **débit de base annuel moyen minimum de 0.5 m³/s**. Il faut par ailleurs s'assurer que ce débit annuel est variable d'une année sur l'autre et que l'on n'observe pas de phénomène de « plateau » comme cela avait pu être observé sur une des stations du nord de la Réunion (cf. rapport d'avancement n°2. BRGM/RP-70673-FR).

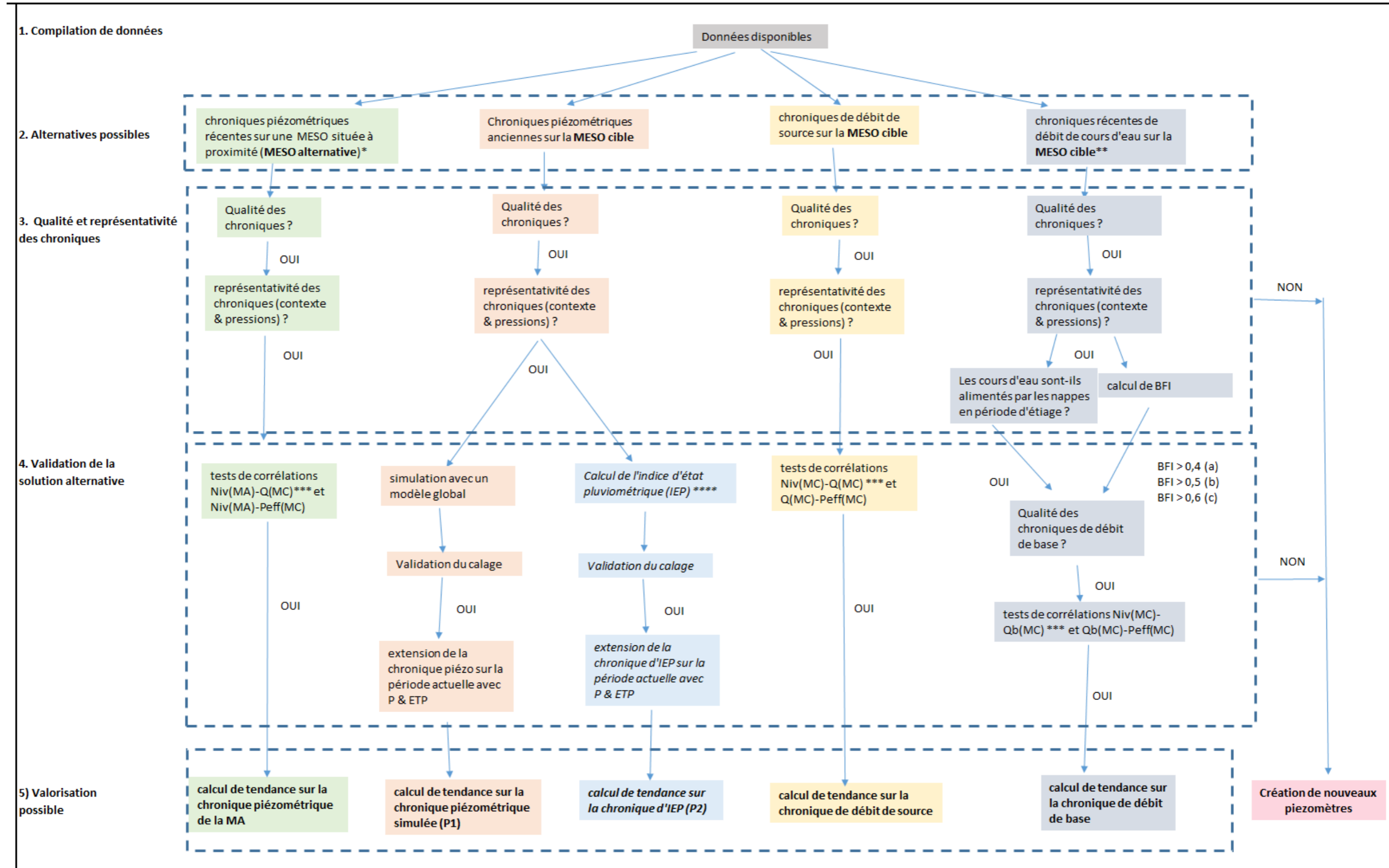
Des tests de corrélations entre débit de base, niveau de nappe et pluies efficaces de la MESO cible devront également être réalisés.

D'une manière générale, les tests de corrélation s'appliquent aux moyennes mensuelles, aux moyennes annuelles et aux minima annuels. Les tests de corrélation sont pertinents s'ils concernent des stations proches ou tout au moins dans un même contexte hydrogéologique et hydroclimatique. Le fait de ne pas avoir une bonne corrélation entre une chronique de débit de base et une chronique de niveau de nappe de deux stations situées sur deux sous-bassins différents ne signifie pas pour autant que la chronique de débit de base doit être nécessairement écartée. De même si on étudie la corrélation entre une chronique de débit de base et une chronique de pluie efficace, il importe de prendre une station climatique dans le même bassin versant que la station de débit. Enfin il faut s'assurer que les conditions d'exploitation varient peu entre la période de validation et l'actuelle.

3.4. ETAPE 5 : VALORISATION POSSIBLE

Si la solution alternative (étape 4) est validée, la dernière étape consistera à réaliser un calcul de tendance sur la ou les chronique(s) retenue(s) (cf. détails de la méthode dans les rapports d'avancement). Cette tendance pourra alors être prise en compte pour l'évaluation de l'état de la masse d'eau.

D'autres valorisations sont envisageables pour améliorer la gestion des masses d'eau souterraines, telles que le calcul des indicateurs de situation des nappes, l'aide à la gestion des étiages et des inondations. Ce type de valorisation n'a pas été testé dans le cadre de cette étude.



MA : MESO alternative

P1 : priorité 1

(a) aquifère de socle ou volcanique

MC : MESO cible

P2 : priorité 2

(b) aquifère sédimentaire karstique

* sauf pour les MESO fortement karstifiées

** nappe à fluctuations annuelles

*** pour des stations dans la même configuration hydrogéologique

(c) aquifère sédimentaire

**** sauf pour les chroniques influencées par des prélèvements

Illustration 13 – Logigramme d'analyse des données disponibles

4. Validation de la méthodologie

4.1. AG302 – CALCAIRES DU BOULONNAIS

4.1.1. Etapes 1 et 2

Les données disponibles sur la MESO AG302 sont listées dans le tableau ci-dessous

Données	Source	Description
Piézométrie	ADES	2 piézomètres DCE (+ 15 ouvrages abandonnés disposant d'un suivi)
Débits	Banque Hydro	4 stations hydrométriques ouvertes
Climat	Météo-France	4 stations + mailles SAFRAN

Seuls deux piézomètres DCE sont encore en service au droit de la masse d'eau AG302, ce qui est insuffisant au regard de son hétérogénéité hydrogéologique. Ils sont en plus tous les deux proches géographiquement (sud-ouest de la MESO). Il n'existe pas de piézomètres actifs dans une MESO voisine et dans le même type d'aquifère.

Par contre, il existe 15 anciens piézomètres disposant de chroniques piézométriques répertoriées dans la BSS-EAU ou ADES, dont cinq exploitables (historique intéressant et qualité des données) et qui couvrent un peu mieux la géographie de la MESO.

Pour le suivi des débits des principaux cours d'eau (la Slack, le Wimereux et la Liane), quatre stations hydrométriques sont encore en service.

On a testé deux alternatives : l'utilisation d'une chronique piézométrique ancienne et l'utilisation d'une chronique récente de débit de cours d'eau sur la MESO cible.

4.1.2. Etape 3

a) Chroniques piézométriques anciennes sur la MESO cible

Pour sélectionner les chroniques anciennes, une analyse préalable de leur fiabilité (pas de temps d'acquisition, longueur de l'historique, basses eaux et hautes eaux bien représentées) et du contexte hydrogéologique (profondeur des crépines, nappe captée, position du point, etc.) a été menée.

La chronique ancienne 00058X0068/P1, située sur la commune de Marquise présente l'intérêt d'être de bonne qualité, d'être située au Nord de la MESO et son signal piézométrique met en évidence une nappe assez réactive aux épisodes saisonniers de recharge mais aussi présentant un effet mémoire (cf. chapitre 3.2.2 du rapport intermédiaire n° 2, BRGM/RP-70673-FR).

L'illustration 14 montre cette chronique ancienne, superposée aux deux chroniques des piézomètres DCE encore suivis. Les hautes eaux et les basses eaux semblent avoir été bien suivies et ne sont pas toujours synchrones avec celles mesurées au sud de la MESO. L'étude de cette chronique pourrait donc apporter des informations complémentaires pour le suivi quantitatif de cette MESO.

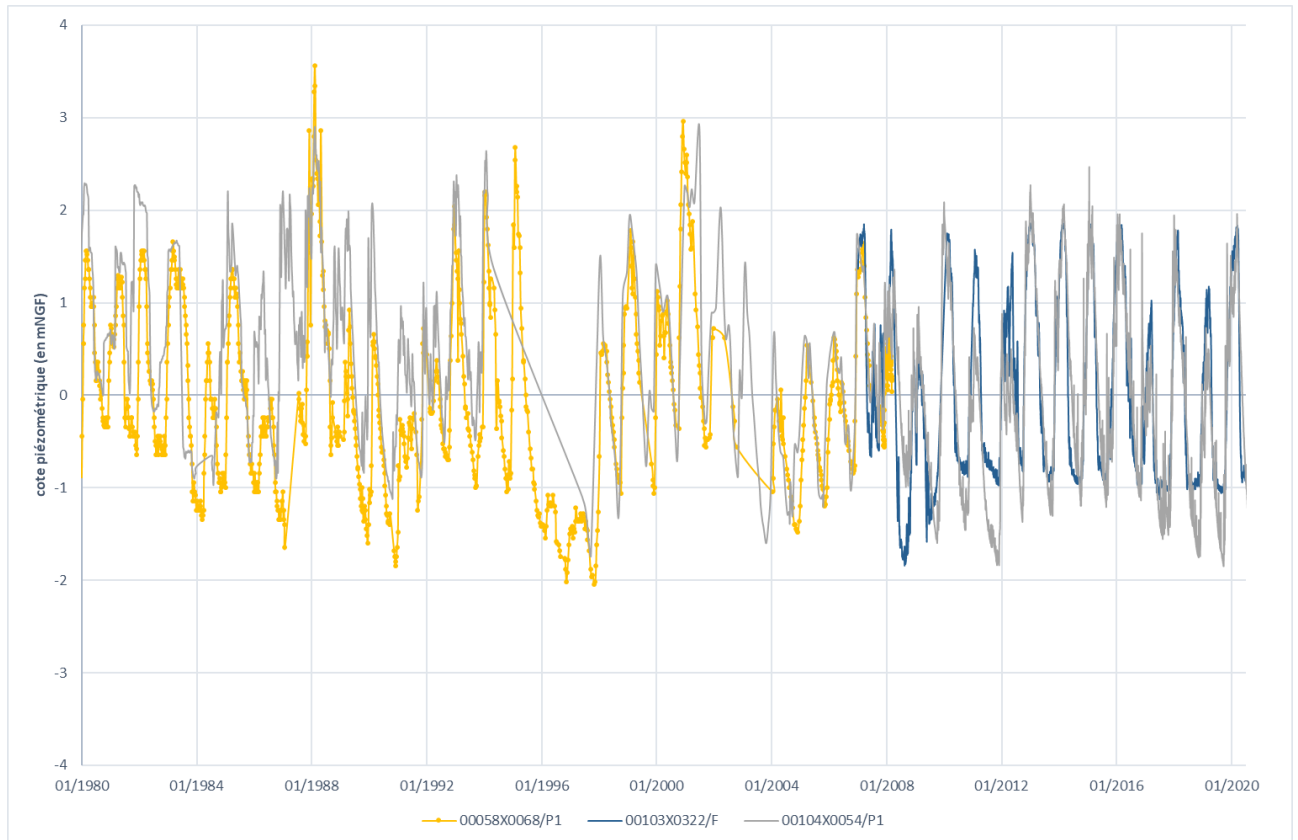


Illustration 14 - Superposition des chroniques piézométriques (signal centré – réduit) encore suivies (00103X0322/F- Baincthun et 00104X0054/P1-Wirwignes) et abandonnée (00058X0068/P1- Marquise), de la MESO AG302

b) Chroniques de débit de cours d'eau sur la MESO cible

Seule la chronique du débit de la Liane à Isques présente un débit de base significatif et une surface drainée de 213 km² (soit 43% de la surface de la MESO). Par contre elle possède moins de 10 ans de données (cf. Illustration 15).

Code Station	E5107710	E5205710	E5300210	E5310220
Cours d'eau	La Slack à Rinxent	Le Wimereux à Wimille	La Liane à Wirwignes	La Liane à Isques
Période de suivi	1998 - 2021	1981 - 2021	1973 - 2021	2013 - 2021
Débit moyen mensuel minimum	QMm(aout) = 0.151 m ³ /s	QMm(Juillet) = 0.234 m ³ /s	QMm(Août) = 0.596 m ³ /s	QMm(Juillet) = 1.31m ³ /s
BFI (en %)	48	38	58	57
Superficie (km ²)	38	74	100	213

Illustration 15 – Caractéristiques des stations hydrométriques de la MESO AG302

Le débit d'étiage, le débit de base et le BFI de la Liane étant assez importants quelle que soit la station (Wirwignes qui est située à l'amont ou Isques à l'aval) (cf. Illustration 15 et Illustration 16), on peut supposer que le soutien de la nappe est assez important sur tout le linéaire de la Liane. La station hydrométrique à Wirwignes dispose d'un historique bien plus important que celle d'Isques et en plus, il existe un suivi de la piézométrie sur la même commune, il est donc intéressant de choisir cette station pour l'étape 4.

Station hydrométrique - E530 0210 01 : La Liane à Wirwignes

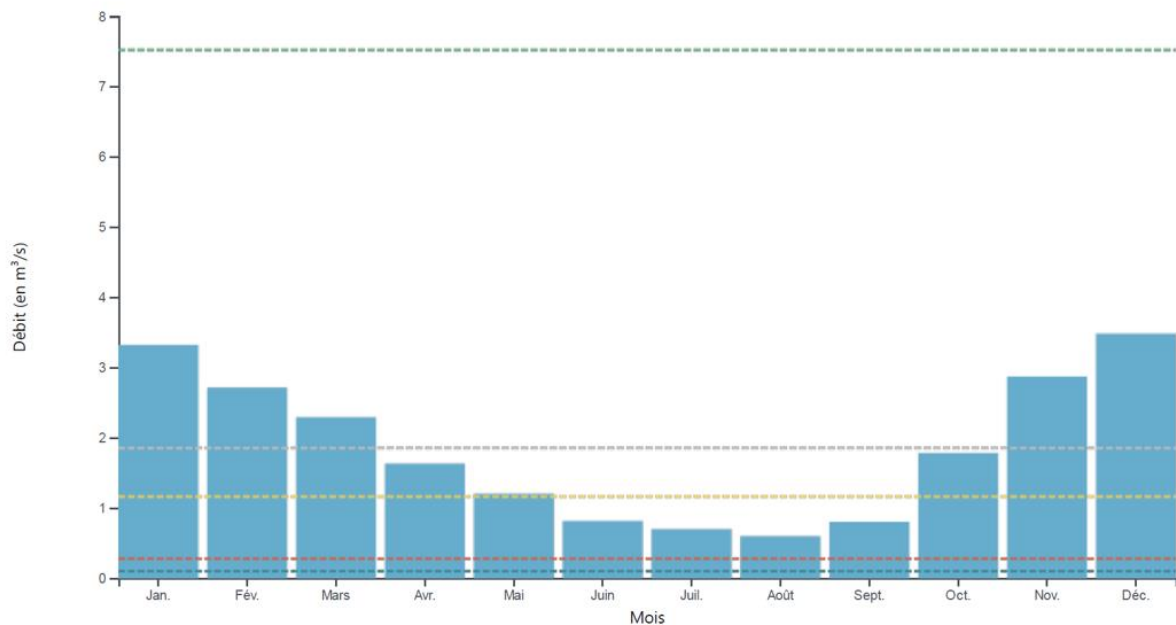


Illustration 16 - Débit moyen mensuel calculé à la station hydrométrique E530021001 de la Liane à Wirwignes

4.1.3. Etape 4

L'étape 3 a permis de vérifier la représentativité et la qualité des chroniques suivantes :

- Chronique piézométrique ancienne située sur la commune de Marquise.
- Chronique des débits de la Liane à Wirwignes.

Pour valider l'utilisation de ces deux chroniques, nous allons :

- 1- Tester la corrélation de la chronique piézométrique avec l'indice d'état pluviométrique (IEP). Si celle-ci est bonne, nous pourrions alors étendre la chronique d'IEP sur la période récente où l'on dispose de données de Pluie et d'ETP.
- 2- Tester la corrélation des débits de base de la Liane avec la piézométrie mesurée à Wirwignes.

L'indice d'état pluviométrique a été calculé (cf. rapport intermédiaire n°2) à partir de la Pluie et de l'ETP de la maille SAFRAN n°50 (données publiques de Météo France) et il est bien corrélé avec la piézométrie mesurée sur l'ouvrage situé sur la commune de Marquise (cf. Illustration 17).

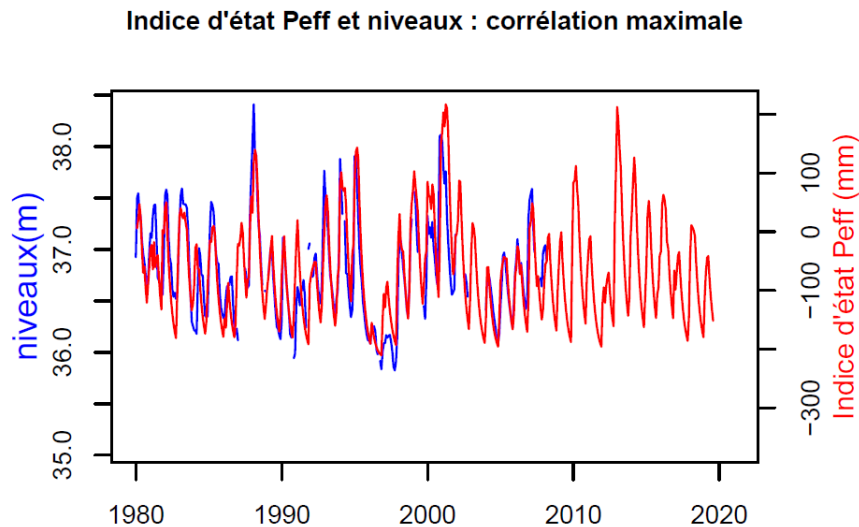


Illustration 17 - Calcul de l'IEP calé pour les niveaux mesurés sur la commune de Marquise (ouvrage 00058X0068/P1) et extension de la chronique d'IEP sur la période récente

L'IEP a ensuite été calculé sur la période 2008-2019 avec les données de pluies et ETP disponibles sur cette période (Illustration 27).

Le débit de base de la Liane à Wirwignes a ensuite été calculé sur les 48 années d'historiques disponibles (cf. Illustration 18).

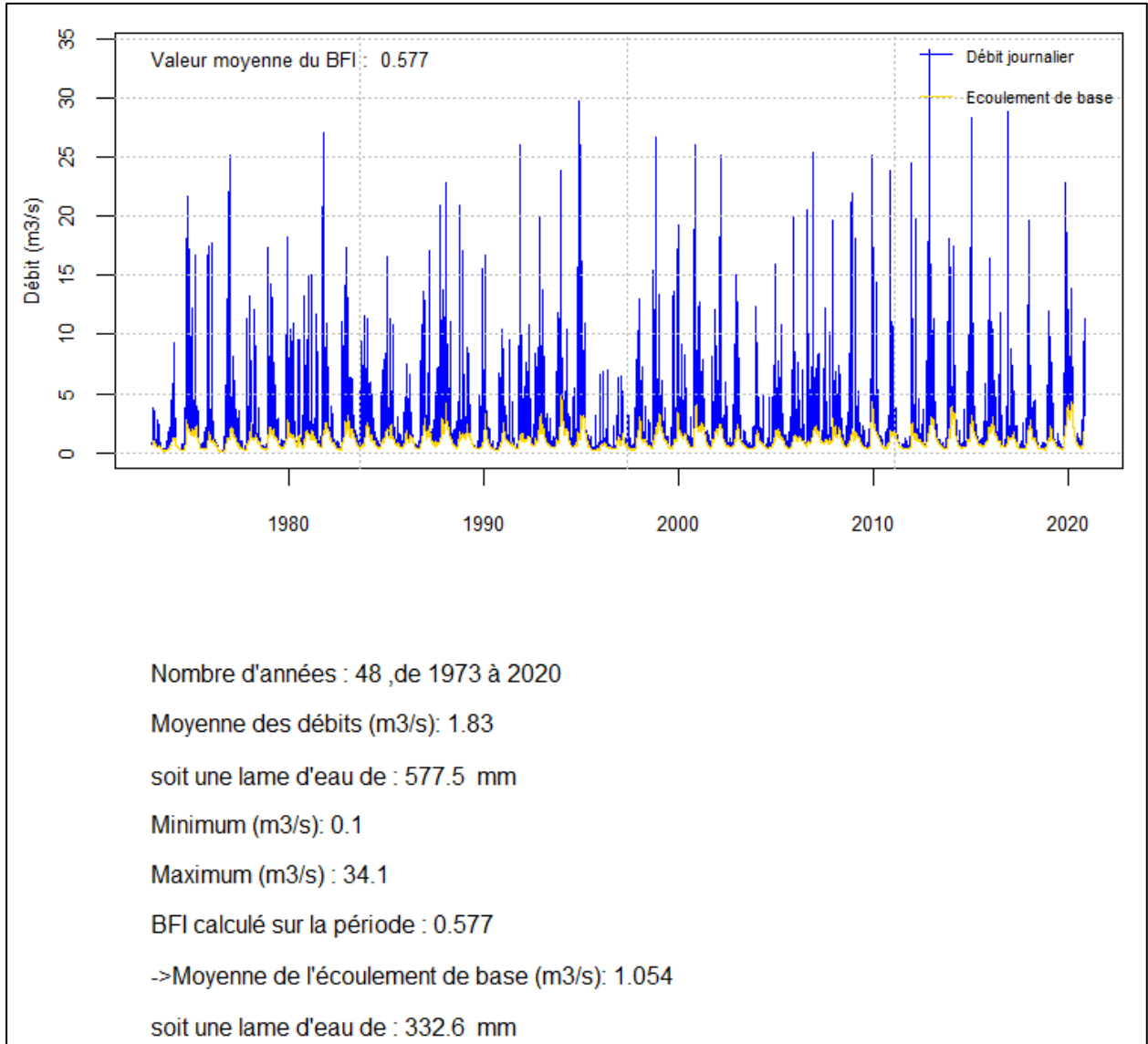
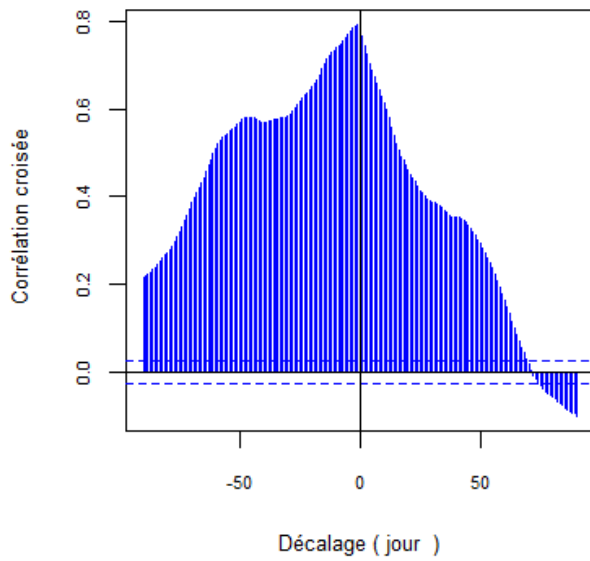


Illustration 18 - Débits de base de la Liane à Wirwignes

Les tests de corrélations Niveau / Débit ont été faits à partir des chroniques du piézomètre 00104X0054/P1 et des débits de la Liane à Wirwignes.



Valeurs journalières

Partie droite

Corrélation maximale positive: 0.79
obtenue avec un décalage de : 0 jour
Corrélation maximale négative: -0.1
obtenue avec un décalage de : 90 jour

Partie gauche

Corrélation maximale positive : 0.79
obtenue avec un décalage de : -1 jour
Corrélation maximale négative: 0.22
obtenue avec un décalage de : -90 jour

Illustration 19 - Corrélogramme croisé du débit de base de la Liane à Wirwignes et du niveau de la nappe à Wirwignes.

Cette analyse croisée Débit /Niveau (cf. Illustration 19) montre une bonne corrélation du niveau avec le débit de base (coefficient R de 0.79), celui-ci peut donc être représentatif de la composante eau souterraine du débit des cours d'eau.

Les chroniques des débits de base et du niveau de la nappe ont été superposées (cf. Illustration 20).

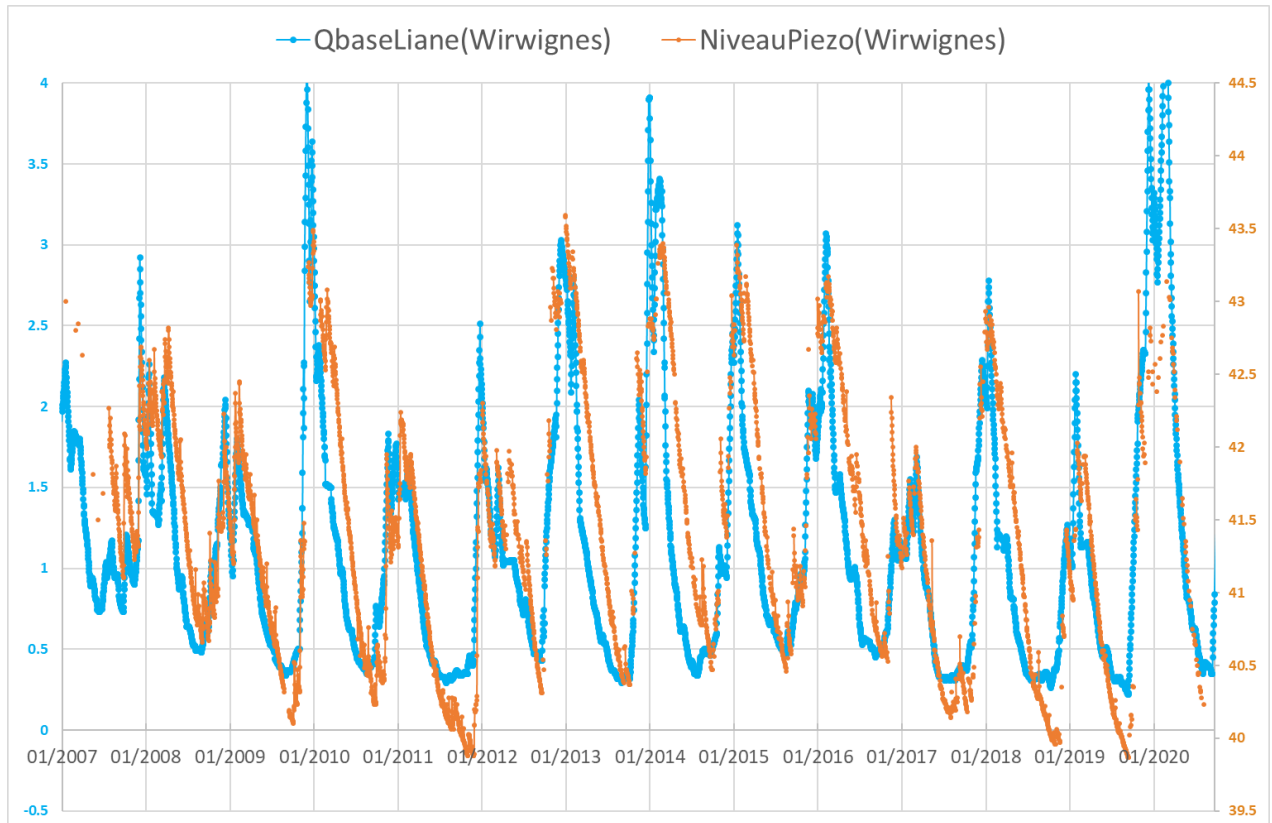


Illustration 20 – Chroniques superposées du débit de base (en bleu, en m^3/s) et du niveau piézométrique (en orange, en mNGF), à Wirwignes sur la période où le pas de temps de suivi est le meilleur

Malgré une bonne corrélation globale, les superpositions des débits les plus bas avec les niveaux bas montrent des différences notables (comme fin 2011, les basses eaux sur la piézométrie sont plus tardives et semblent être plus extrêmes).

4.1.4. Etape 5

La dernière étape est le calcul de tendance sur la chronique d'IEP calée à partir de la chronique piézométrique ancienne, située sur la commune de Marquise sur la période 1980-2008 et étendue à l'aide des données P, ETP jusqu'en 2019.

L'illustration 21 montre qu'il n'y a pas de tendance détectée sur la chronique de l'IEP sur la période 1980-2019 (moyenne annuelle).

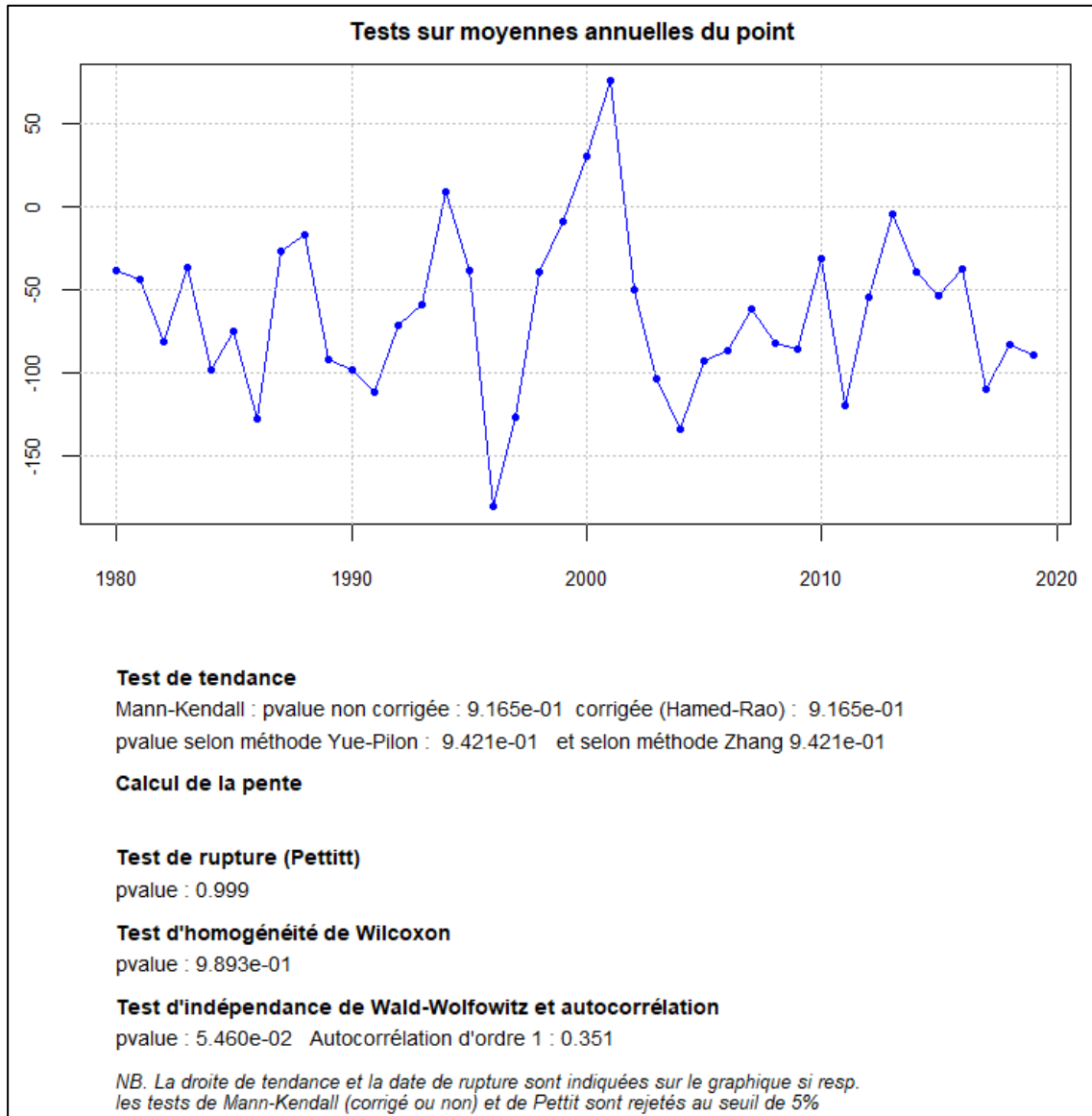


Illustration 21 – Résultats des tests statistiques réalisés sur la chronique d'IEP (calculée à l'aide des données de Pluie et d'ETP de la maille SAFRAN n°50 et calée sur les données piézométrique située à Marquise)

De même pour la chronique du débit de base de la Liane à Wirwignes, sur la période 1973-2020, on n'observe pas de tendance significative sur les moyennes annuelles (Illustration 22).

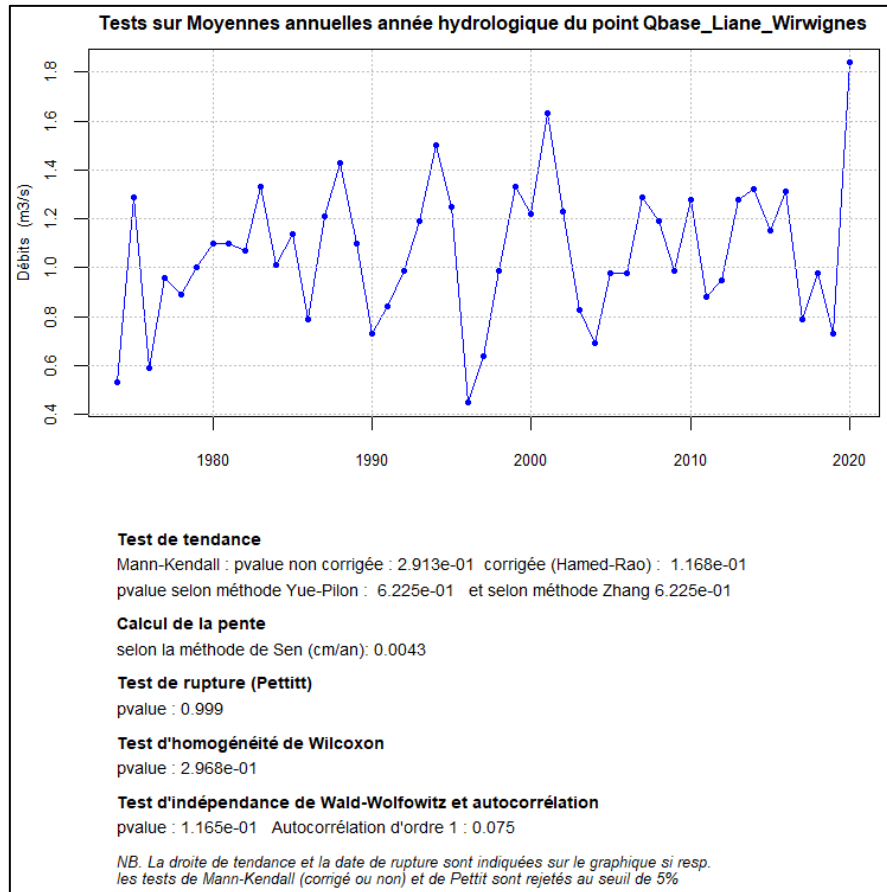


Illustration 22 - Résultats des tests statistiques réalisés sur la chronique de débits de base de la Liane à Wirwignes

Ces tests de tendance ne semblent pas indiquer d'évolution à la baisse des ressources en eau souterraine sur cette MESO. Or il semblait y avoir une tendance sur les niveaux minimums du piézomètre de Wirwignes. Le calcul de celle-ci (rapport intermédiaire n°2) est toutefois à prendre avec beaucoup de précaution. Avant 2008, il y a beaucoup de lacunes dans les données de ce piézomètre. Et vue la présence de « cycles » pluriannuels dans le signal piézométrique, la période 2008-2020 est trop courte pour réaliser un test de tendance.

4.1.5. Conclusion

L'utilisation d'une chronique piézométrique ancienne située dans un secteur peu suivi au nord de la MESO des calcaires du Boulonnais, couplée à l'indice d'état pluviométrique, dont la chronique peut être étendue, donne des résultats intéressants. Pour autant, les prélèvements étant nombreux dans ce secteur, l'IEP utilisé seul, basé uniquement sur des données climatologiques (P, ETP) ne peut pas mettre en évidence l'influence de ces prélèvements sur le niveau de la nappe.

La chronique du débit de base de la Liane à Wirwignes pourrait permettre de caractériser l'état quantitatif de la masse d'eau, elle est bien corrélée au niveau de la nappe mesuré à proximité. Toutefois, en regardant de plus près les corrélations, il semble que le niveau en étiage n'évolue pas tout à fait de la même manière que les débits de base. Ces observations sont à confirmer par une étude plus approfondie.

Il n'existe pas de tendances à la baisse observées sur les variables alternatives (IEP, débits de base).

Au final, même si l'analyse des autres variables hydroclimatiques disponibles sur la masse d'eau semble apporter des informations complémentaires sur l'état de la masse d'eau, il semble plus prudent d'opter pour un suivi piézométrique supplémentaire, notamment au nord dans un secteur avec de nombreux prélèvements.

4.2. LG101 – LITTORAL NORD DE LA RÉUNION

4.2.1. Etapes 1 et 2

Les données disponibles sur la MESO LG101 et la MESO voisine LG114 sont listées dans le tableau ci-dessous

Données	Source	Description
Piézométrie	Office de l'eau	13 piézomètres dont 5 DCE avec données journalières Données du secteur Saint-André / Bras-Panon
Débits	Office de l'eau	14 stations de jaugeage pour les débits moyens journaliers (6 sur la MESO et 8 sur la partie amont)
Climat	Météo-France	Pluie (8 stations) et ETP journalière localisée (1 station) sur FRLG101 Pluie (9 stations) et ETP journalière localisée (1 station) sur FRLG114 / FRLG115 pour Saint-André

Pour la MESO LG101, il existe 13 piézomètres dont 5 DCE avec données journalières. On a vu lors de l'étude de ce site (cf. rapport intermédiaire n°2) que les piézomètres sont situés à quelques km du littoral tout au plus (altitude < 200 m) alors que la recharge se manifeste en altitude (précipitations plus fréquentes et plus intenses) avec des altitudes de recharge de l'ordre de 1000m. La MESO alternative serait alors la LG102 située au sud, mais elle ne dispose d'aucun piézomètre.

On a par contre 3 piézomètres situés à la limite des deux MESO, malheureusement proches les uns des autres : 21015, 21049 (piézomètre DCE) et 21090. Le 21015 n'a qu'une année de données, ce qui est insuffisant, tandis que le 21090 dispose de 6 années de données. Ce piézomètre pourrait être testé en vue d'une extension de la chronique, même si on considère qu'une durée minimum de 10 ans est souhaitable. L'analyse des chroniques existantes (cf. rapport intermédiaire n°2) a montré qu'on avait des fluctuations marquées et donc qu'une chronique de moins de 10 ans pourrait néanmoins être représentative. On peut d'ores et déjà considérer qu'il faudrait un voire deux piézomètres supplémentaires en limite des MESO LG101 et LG102 dans le secteur oriental.

Il n'existe pas de chronique piézométrique sur une MESO situé à proximité.

Il n'existe pas de chronique de débit de source sur la MESO LG101.

On a 6 stations de jaugeage sur la LG101 et 8 sur la LG102, susceptibles d'être utilisées pour des calculs de débit de base.

On a testé deux alternatives : l'utilisation d'une chronique piézométrique ancienne sur la MESO cible et l'utilisation d'une chronique de débit de cours d'eau sur la MESO cible.

4.2.2. Etape 3

La représentativité et la qualité de la station 21090 (Domenjod), peut être évalué en la comparant dans un premier temps à la station DCE 21049 (F4 Illet Quinquina) située à proximité (cf. Illustration 5 pour l'emplacement des stations).

La chronique de la station 21090 est semblable à celle de de la station 21049 avec des données journalières et elle intègre des périodes de hautes eaux et de basses eaux (Illustration 23). Sur la période de suivi de la station 21090 (2007-2011), on peut même considérer que la chronique est de meilleure qualité que celle de la station DCE 21049.

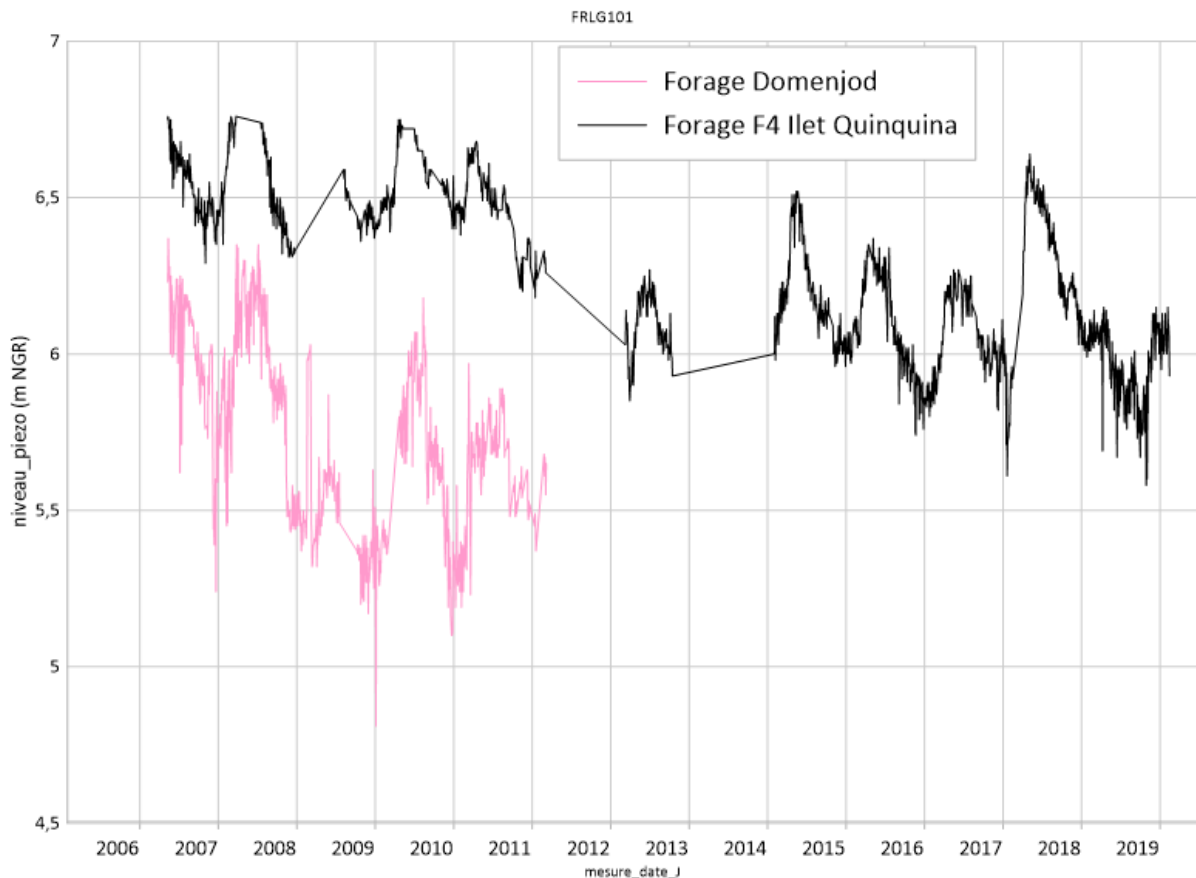


Illustration 23 – Chroniques piézométriques des stations 21049 et 21090

Pour les stations hydrométriques, nous disposons de 2 stations dans la partie Est de la MESO, avec au moins 10 ans de données journalières, qui plus est, récentes : les stations 22011 et 22181 sur la rivière Saint-Jean (cf. Illustration 6 Illustration 5 pour l'emplacement des stations).

La station 22181 présente des débits plus importants avec un débit annuel moyen de 0.69 m³/s (un peu inférieur au débit préconisé de 1 m³/s) et un débit de base beaucoup plus marqué en période d'étiage (Illustration 24). L'analyse du QMNA montre que le cours d'eau est alimenté par la nappe en période d'étiage, avec un QMNA5 de 0.13 m³/s (Illustration 25).

La superficie drainée par la partie permanente du cours d'eau en amont de la station est de 5.5 km², ce qui faible par rapport à la surface de la masse d'eau (112 km²).

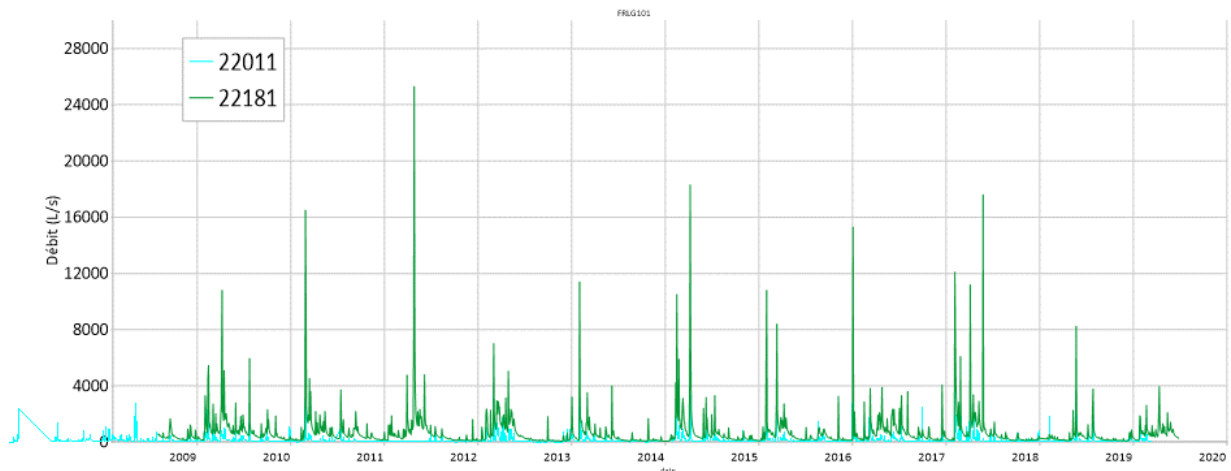


Illustration 24 – Chroniques hydrométriques des stations 22011 et 22181

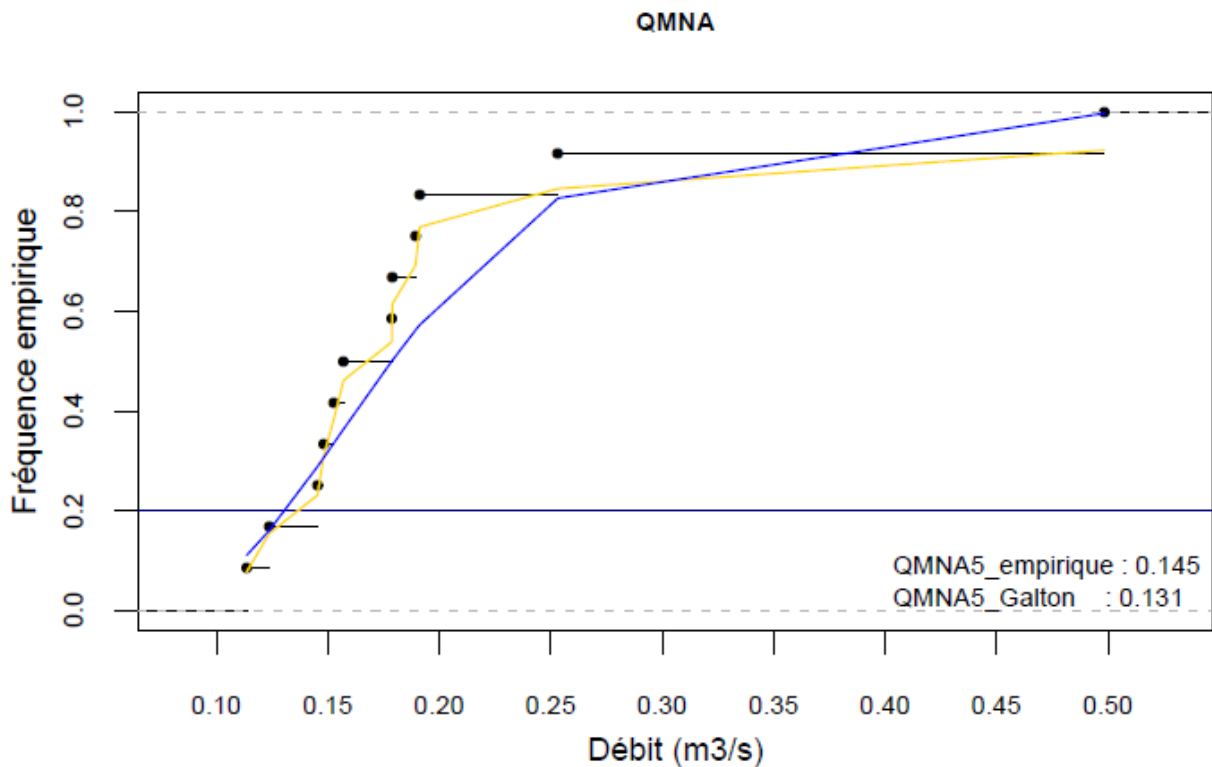


Illustration 25 – QMNA de la station 22181

4.2.3. Etape 4

Pour tester la possibilité d'extension de la chronique piézométrique sur la période actuelle, on a réalisé une simulation avec le modèle global GARDENIA (Thiéry, 2013) sur la station 21090 avec la pluviométrie de Beaufond Saint-Marie (97418150) et l'ETP de Gillot-aéroport (97418110).

Le calage est correct, avec un coefficient de Nash de 0.822 (Illustration 26). Le calage restitue bien les fluctuations annuelles, mais pas les fluctuations rapides. Dans l'objectif d'un calcul de tendance, on peut considérer qu'une bonne représentation des fluctuations annuelles est suffisante.

Le niveau piézométrique a ensuite été simulé sur la période 2012-2017 avec les données de pluies et ETP disponibles sur cette période (Illustration 27).

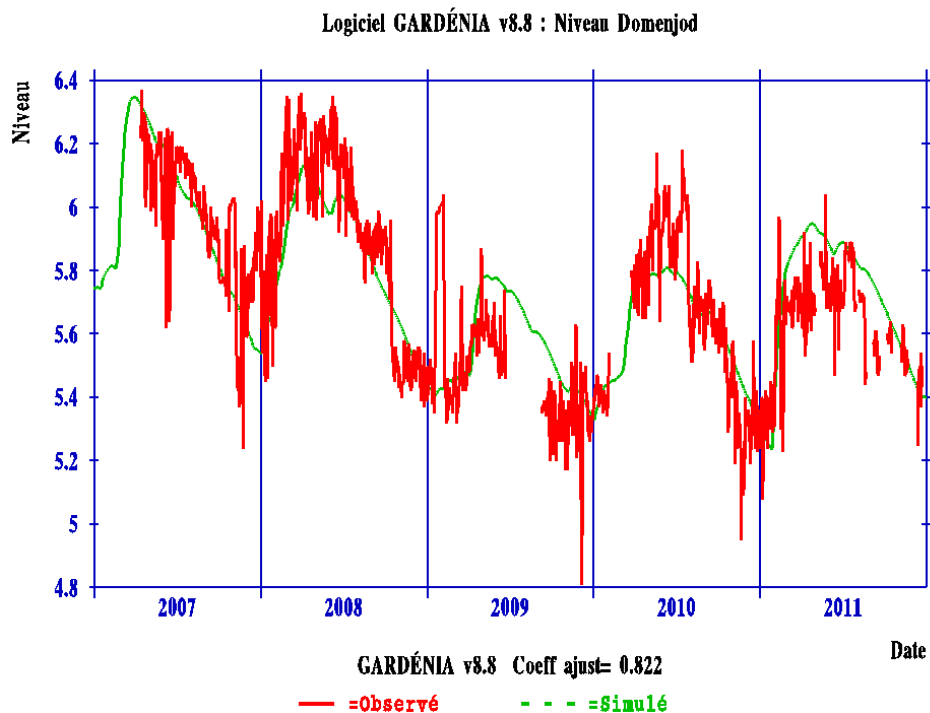


Illustration 26 – Calage du niveau piézométrie de Domenjod sur la période 2007-2011

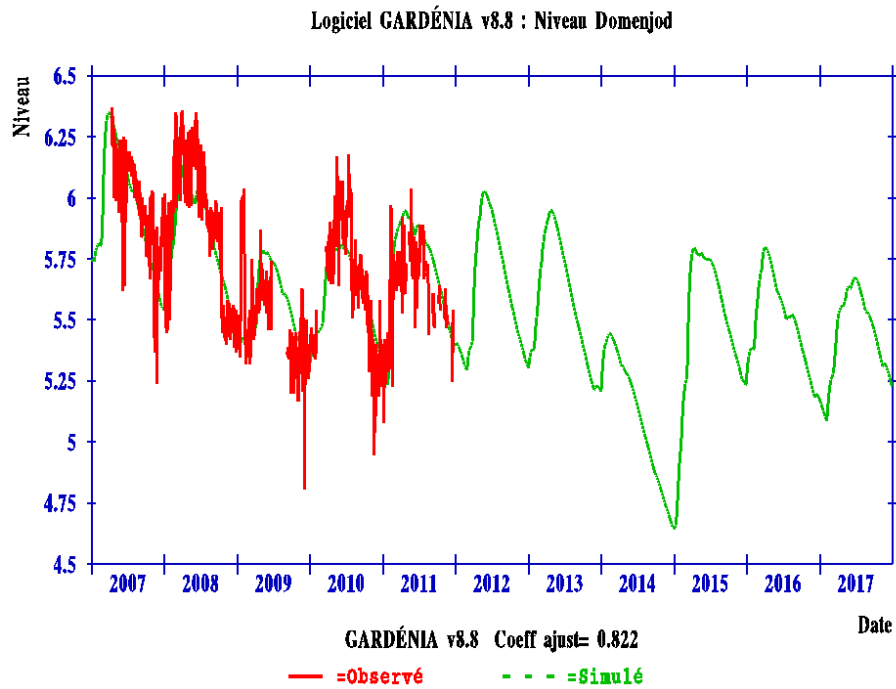


Illustration 27 – Simulation du niveau piézométrique de Domenjod sur la période 2012-2017

Pour la station hydrométrique sélectionnée (22181), le BFI est de 0.5, ce qui est considéré comme acceptable pour un aquifère de socle ou volcanique. La chronique du débit de base montre des fluctuations marquées avec des hautes eaux et des basses eaux et pourrait être assimilé à une chronique piézométrique (Illustration 28). Le débit de base moyen (0.35 m³/s) est légèrement inférieur au débit de base minimum préconisé de 0.5 m³/s qui reste néanmoins assez théorique.

Les tests de corrélations ont été réalisés avec les débits de base mensuels de la station 22181 et la pluie efficace calculée à partir des données de précipitation de la station de Menciol (située à 2 km au nord-ouest de la station hydrométrique) et des données d'ETP de la station Gillot-aéroport. La corrélation maximale (R = 0,7) est obtenue avec un décalage de 1 mois (Illustration 29).

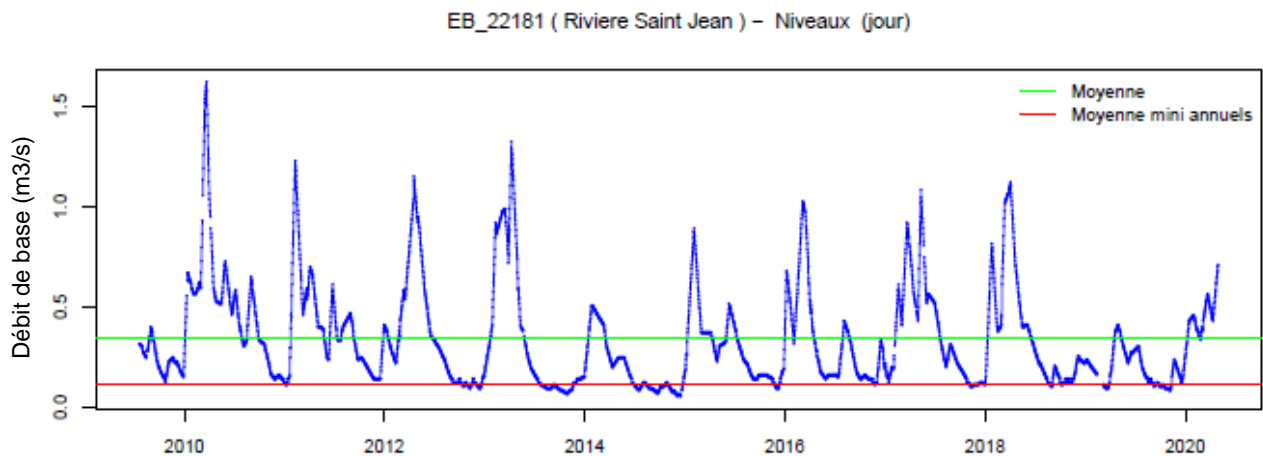


Illustration 28 – Chronique du débit de base de la station 22181

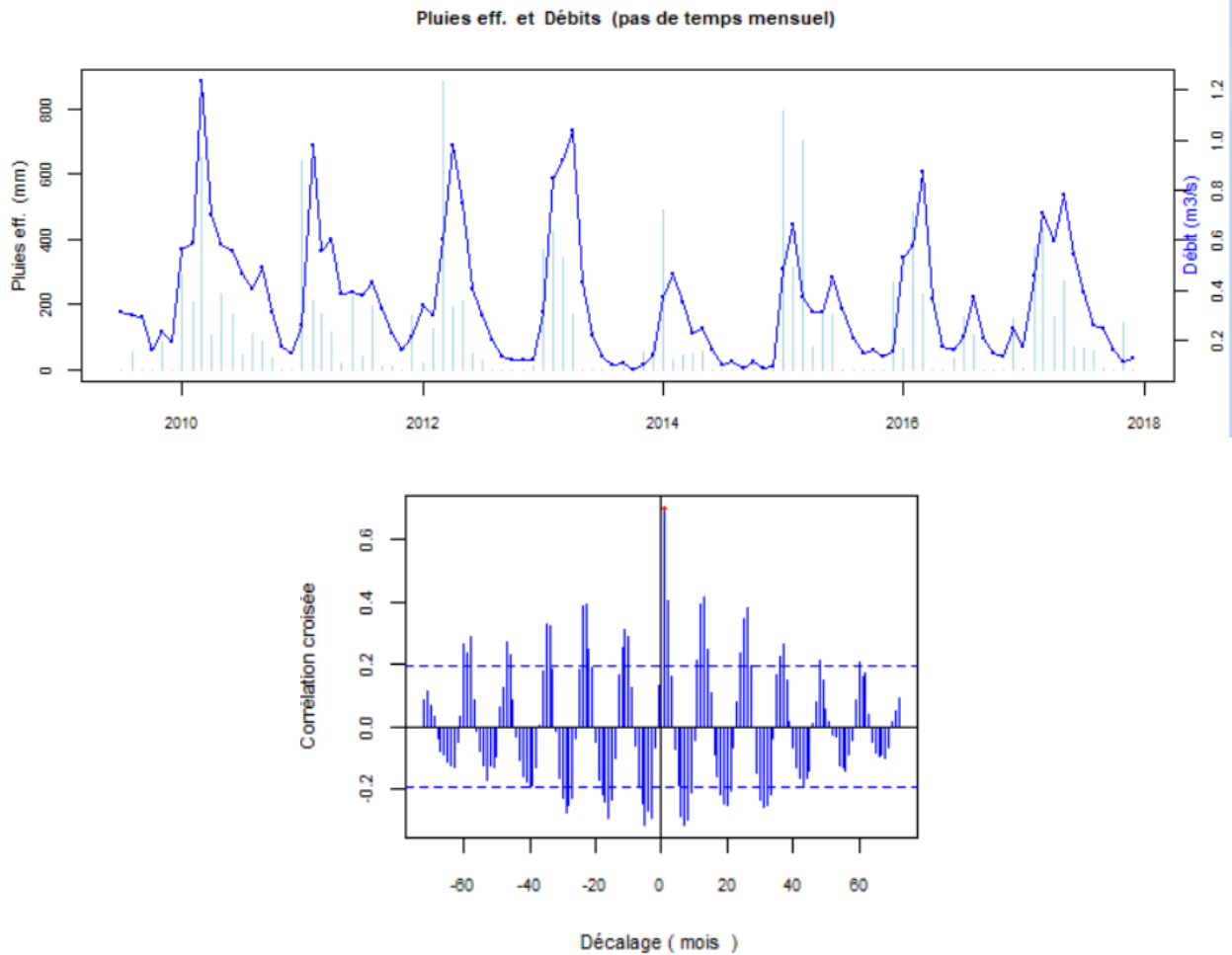


Illustration 29 – Corrélation entre débits de base de la station 22181 et pluies efficaces

4.2.4. Etape 5

La dernière étape est le calcul de tendance sur la chronique piézométrique simulée sur la période 2007-2017. La chronique simulée montre une tendance significative à la baisse, tout comme le piézomètre DCE situé à proximité ((Illustration 30).

Pour la chronique du débit de base de la station 22181, on n'observe pas de tendance significative (Illustration 31).

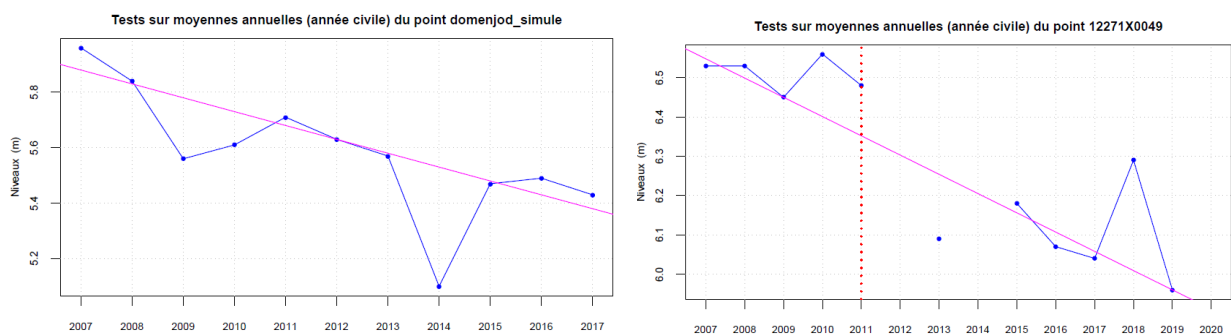


Illustration 30 – Calcul de tendance sur le niveau piézométrique de Domenjod simulé sur la période 2007-2017 (à gauche) à comparer au piézomètre DCE F4 Illet Quinquina (à droite)

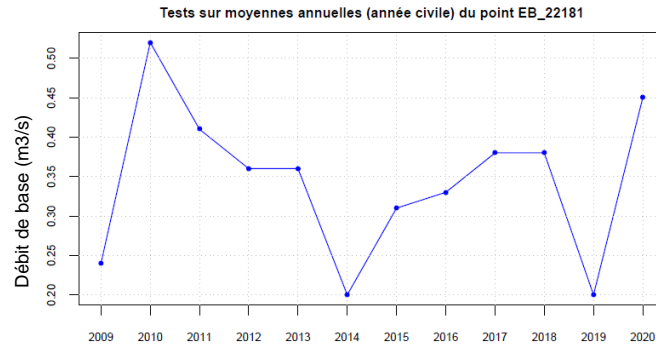


Illustration 31 – Calcul de tendance sur le débit de base de la station 22181 (rivière Saint-Jean)

4.2.5. Conclusion

L'utilisation d'une chronique piézométrique ancienne de 5 années sur la MESO cible, étendue jusqu'à la période actuelle à l'aide d'un modèle global, donne des résultats que l'on peut considérer comme intéressants. Dans la pratique, son intérêt est néanmoins limité dans la mesure où ce piézomètre est proche du piézomètre DCE en activité. Il aurait été plus utile d'avoir une ancienne chronique dans la partie Est de la MESO LG101, le plus en altitude possible.

La chronique du débit de base de la station hydrométrique 22181 sur la rivière Saint-Jean serait susceptible d'être utilisée mais elle représente une faible superficie drainée (moins de 5% de la superficie de la masse d'eau).

Les deux solutions alternatives testées sur cette masse d'eau ne nous paraissent pas pertinentes pour caractériser son état quantitatif.

4.3. CG003 - SOCLE VOSGIEN

4.3.1. Etapes 1 et 2

Les données disponibles sur la MESO CG003 sont listées dans le tableau ci-dessous

Données	Source	Description
Piézométrie	ADES	2 piézomètres ADES actifs (+ 1 source) pour le réseau de suivi quantité DCE Quelques points d'eau avec quelques mesures
Débits	Banque Hydro	1600 sources ; 37 avec plus de 100 mesures 1 source pour le réseau de suivi quantité DCE 37 stations hydro
Climat	Météo France	Données SAFRAN

Pour la MESO CG003, il existe seulement 2 piézomètres DCE (Xonrupt et Gerardmer) avec données journalières et à proximité l'un de l'autre. Les quelques chroniques piézométriques anciennes concernent des formations alluviales. Il n'existe pas de piézomètre dans une MESO situé à proximité et dans le même type d'aquifère.

On dispose par ailleurs de 39 sources avec plus de 100 mesures, dont 7 sources avec plus de 1000 mesures et de 35 stations hydrométriques.

On a testé deux alternatives : l'utilisation d'une ou plusieurs chroniques de débit de source sur la MESO cible et l'utilisation d'une ou plusieurs chroniques de débit de cours d'eau sur la MESO cible.

4.3.2. Etape 3

a) Débit de source

Les sources avec des données journalières ont un suivi récent depuis quelques années seulement (4 ans max.), ce qui est nettement inférieur aux 10 ans requis. La plupart des sources ont des débits moyens inférieurs à quelques m^3/s à l'exception de la source de Grendelbruch dont le débit moyen est supérieur à $10 m^3/s$ et la source de Grandfontaine dont le débit moyen est de $80 m^3/s$, mais cette source est particulière dans la mesure où il s'agit d'un exutoire de galerie minière avec des débits naturels surestimés (cf. rapport intermédiaire n°2).

En reprenant l'analyse des données du rapport intermédiaire n°2, 4 sources respectent les critères de la méthodologie proposée, à l'exception de la durée des chroniques : Grendelbruch, Steige 1&2 et Mittelbach. Ces 4 sources intègrent des périodes de hautes eaux et de basses eaux, un débit annuel moyen supérieur à $1 m^3/s$ et un débit d'étiage moyen supérieur à $0.2 m^3/s$.

b) Débit de cours d'eau

Lors de l'étude de cette masse d'eau (cf. rapport intermédiaire n°2), nous avons retenu 11 stations dont 8 avec un QMNA5 élevé ($> 5 L/s/km^2$), ce que nous avons considéré dans la méthodologie proposée comme un critère de représentativité.

En reprenant l'analyse des données du rapport intermédiaire n°2, Les 11 stations respectent les critères de la méthodologie proposée. La plupart des stations hydrométriques drainent des bassins versants d'une superficie conséquente (cf. Illustration 33). Il faudrait également vérifier le régime des cours d'eau (influencé ou non).

4.3.3. Etape 4

a) Débit de source

La durée des chroniques (4 ans maximum) ne permet pas de réaliser les tests de corrélations entre débit, niveau de nappe et pluies efficaces de la MESO cible

b) Débit de cours d'eau

Il s'avère que les 11 stations, y compris les 3 avec des QMNA5 plus faibles, ont un BFI relativement élevé, supérieur à 0.4, respectant le critère proposé dans la méthodologie pour les aquifères de socle ou volcanique (Illustration 32). Parmi ces stations, nous avons retenu celles dont le débit de base moyen est supérieur à $0.70 m^3/s$ (un peu supérieur au seuil de $0.50 m^3/s$ proposé dans la méthodologie), soit 8 stations. Les bassins versants de ces stations couvrent une superficie significative de la masse d'eau (Illustration 33).

Toutes ces stations ont des chroniques de débit de base assimilables à des chroniques piézométriques, avec des fluctuations annuelles et des périodes de hautes eaux et basses eaux, comme le montre l'illustration 34.

		BFI	Débit de base moyen (m ³ /s)
A6001010	la Meurthe à Fraize	0.679	1.33
A2023030	la Petite Fecht à Stosswihr	0.626	0.82
A2732010	la Bruche à Russ	0.615	3.53
A4173010	la Cleurie à Cleurie	0.551	1.27
A1402020	la Thur à Wildenstein	0.448	0.16
A4142010	la Moselotte à Vagney	0.464	3.80
A1432010	la Thur à Willer-sur-Thur	0.560	2.73
A1502040	la Lauch à Linthal	0.569	0.46
A2120200	la Weiss à Kayserberg	0.661	1.39
A4362030	la Vologne à Cheniménil	0.594	5.49
A2312020	le Giessen à Thanvillé	0.498	0.70

Illustration 32 : Calcul du BFI et débit de base moyen pour 11 stations de la MESO CG003

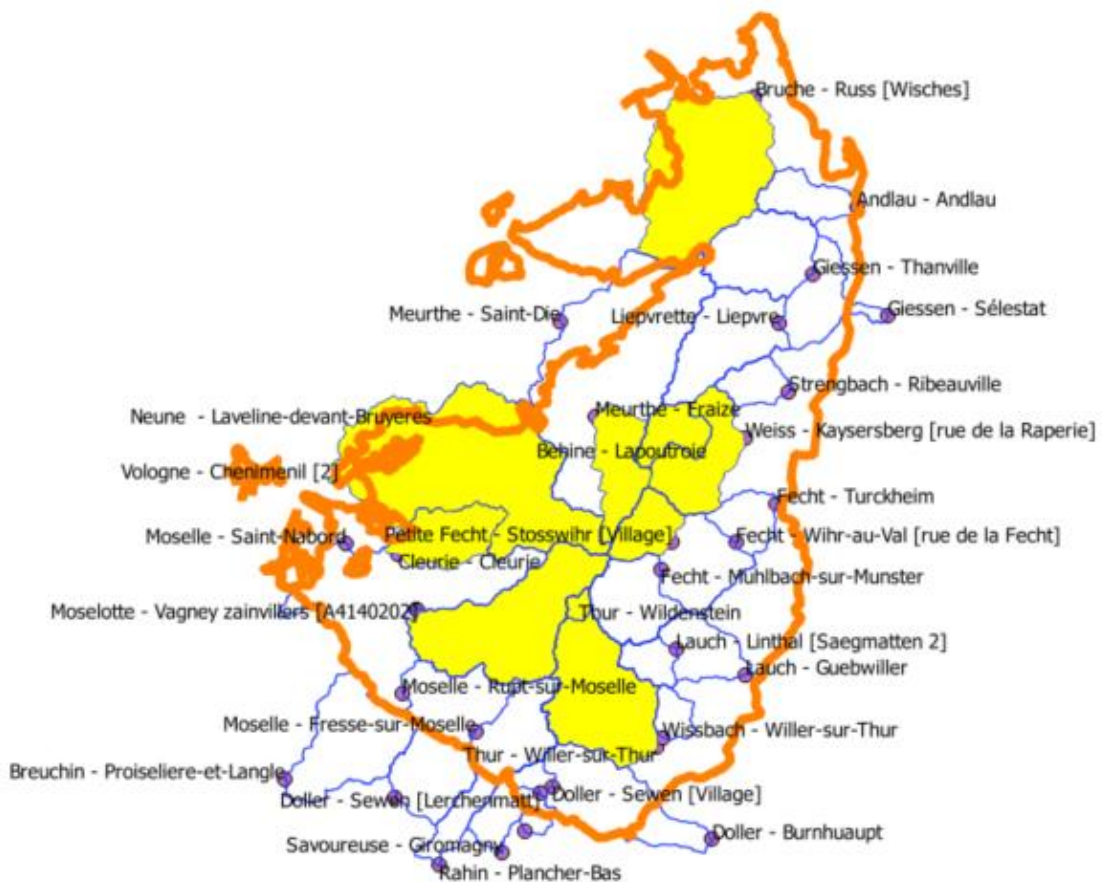


Illustration 33 : Bassins versants des 8 stations de la CG003 sélectionnées pour leurs chroniques de débit de base

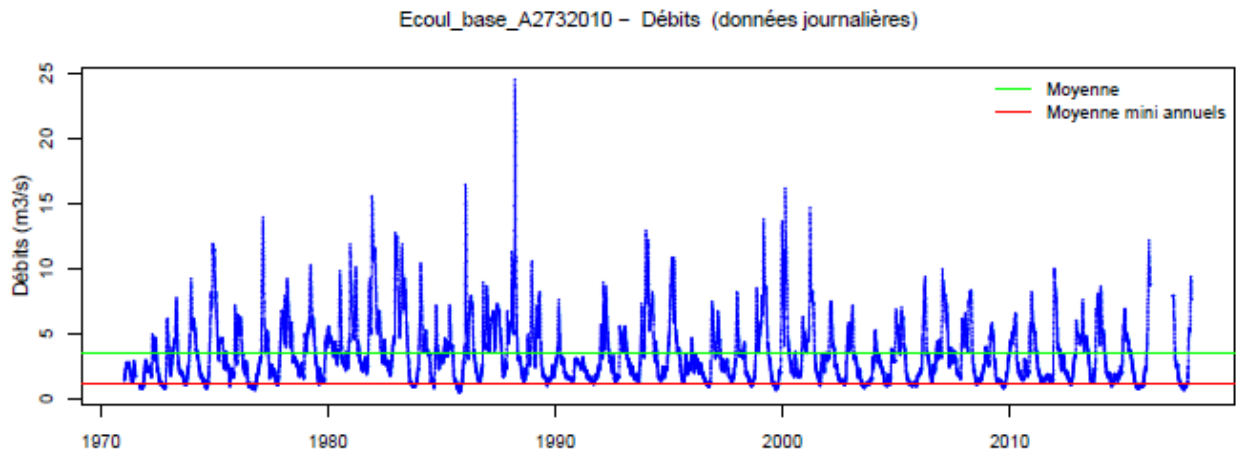


Illustration 34 – Chronique du débit de base de la Bruche à Russ

Des tests de corrélation niveau piézométrique / débit de base ont été réalisés avec les 2 stations piézométriques DCE et les 8 stations hydrométriques sélectionnées précédemment (Illustration 35). Les deux piézomètres sont situés en amont du bassin versant de la Vologne. Les corrélations entre les stations et les piézomètres sont meilleures avec le piézomètre de Xonrupt (03415X0037), mais restent néanmoins inférieures à 0.7 (cf. par exemple Illustration 36) à l'exception de la station Weiss à Kayserberg (A2120200) (Illustration 37).

Piézomètres

	03415X0037	03771X0070
A2023030	0.66	0.59
A2732000	0.71	0.57
A4173010	0.59	0.63
A6001010	0.70	0.62
A4362030	0.64	0.58
A4142010	0.62	0.65
A2120200	0.82	0.58
A1432010	0.59	0.56

Illustration 35 – Coefficients de corrélation entre niveaux piézométriques et débits de base mensuels

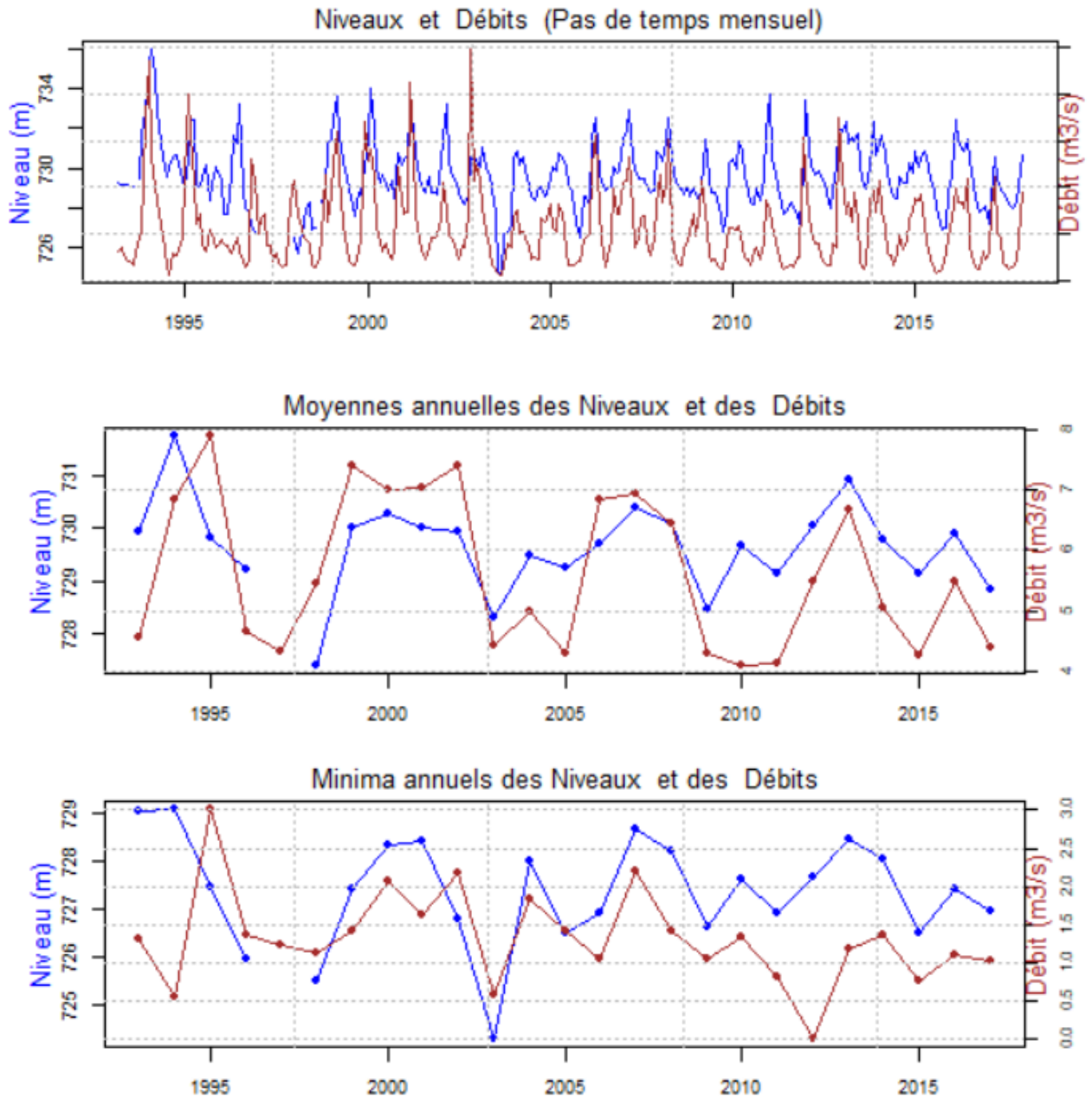


Illustration 36 – Comparaison des niveaux piézométriques du piézomètre de Xonrupt (03415X00337) et des débits de base de la Vologne à Chenimenil (A4362030)

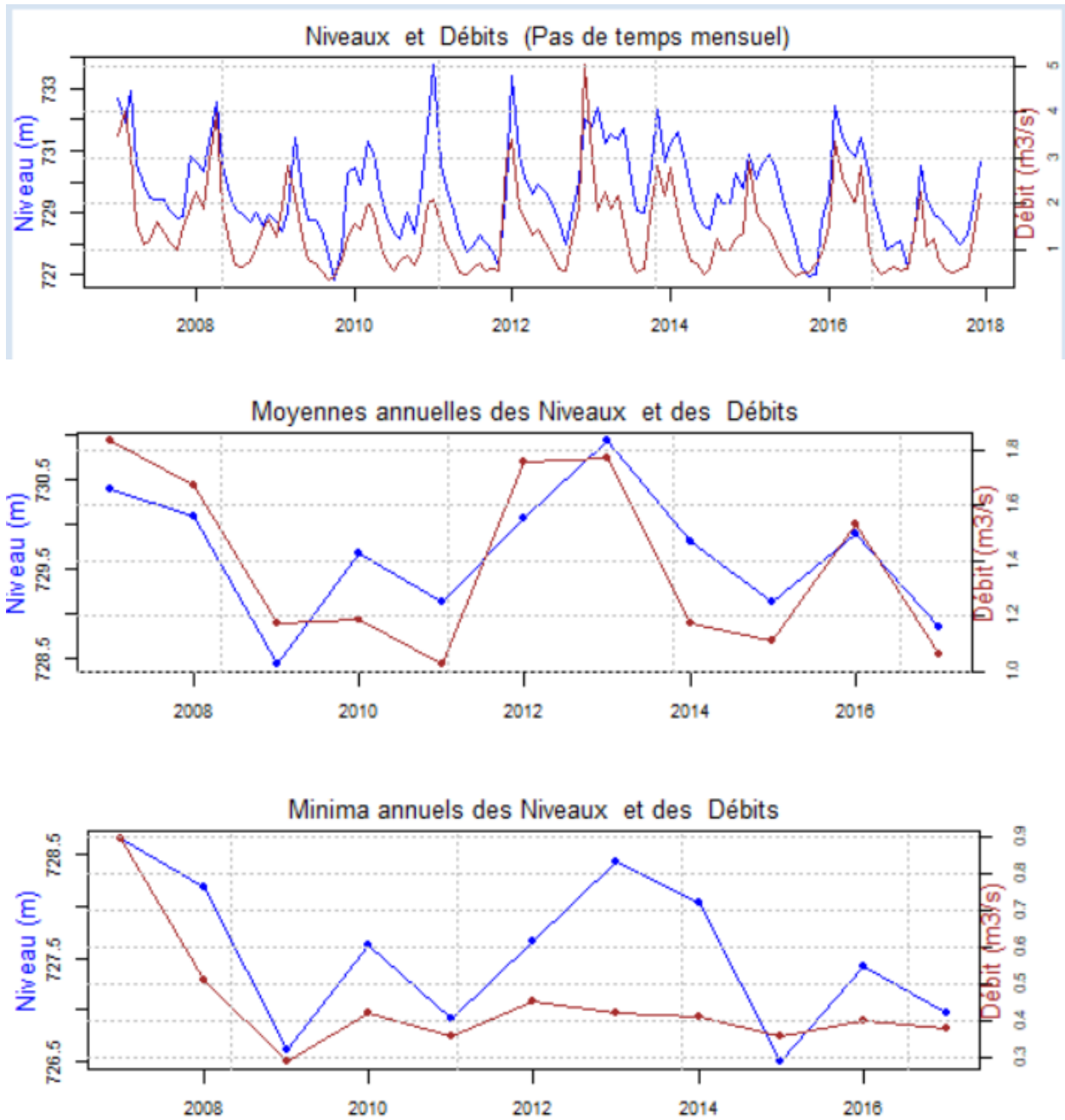


Illustration 37 – Comparaison des niveaux piézométriques du piézomètre de Xonrupt (03415X00337) et des débits de base de la Weiss à Kayserberg (A2120200)

Des tests de corrélation ont été également réalisés entre débits de base et pluie efficaces (mailles Safran) avec l'outil IEP. Sur les 8 stations testés, seules 3 (A2120200, A4142010 et A4173010) semblent être correctement modélisées, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.8 (Illustration 38).

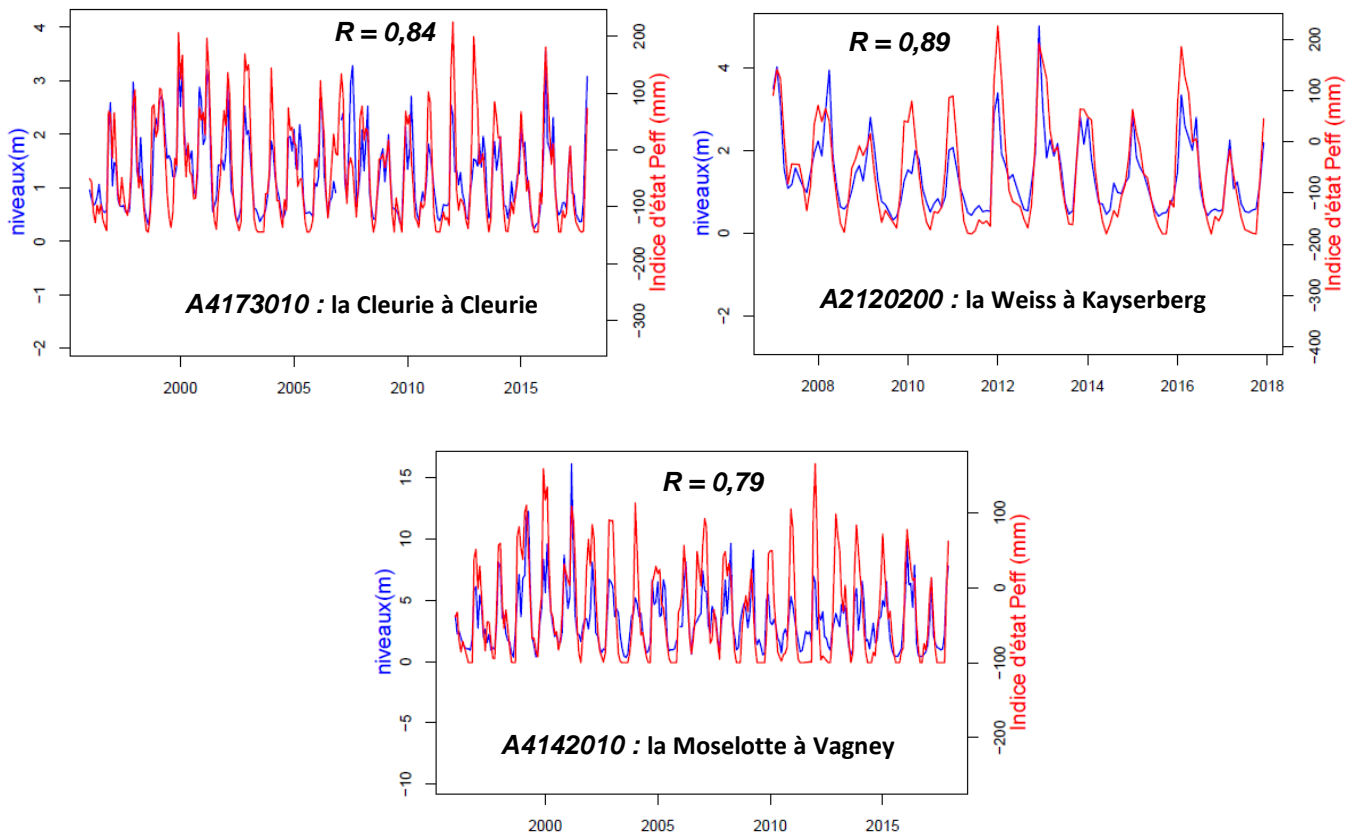


Illustration 38 - Tests de corrélation entre débits de base et pluie efficaces avec l'outil IEP

4.3.4. Etape 5

Les calculs de tendance sur les chroniques de débit de base des 8 stations sélectionnées montrent une tendance à la baisse des moyennes annuelles pour 2 d'entre elles : la Petite Fecht à Stosswihr et la Moselotte à Vagney (Illustration 39).

La Weiss à Kayserberg qui présente la meilleure corrélation avec le piézomètre de Xonrupt ne présente pas de tendance à la baisse, tout comme ce dernier.

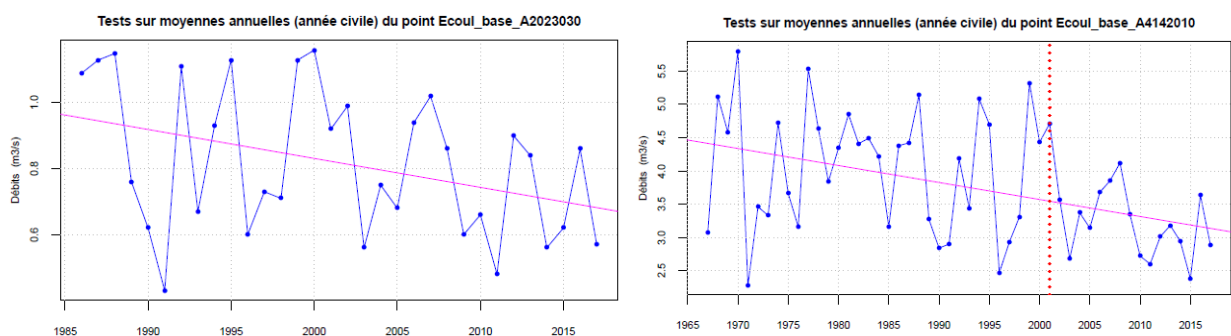


Illustration 39 – Tendances à la baisse observées sur les débits de base (CG003)

4.3.5. Conclusion

Les 4 sources sélectionnées ne disposent pas d'un suivi suffisamment long pour les prendre en compte. Il serait souhaitable à ce stade de les analyser en détail, de les équiper le cas échéant et de poursuivre le suivi journalier avec un système de télétransmission des mesures.

La chronique du débit de base de la station hydrométrique de la Weiss à Kayserberg, bien corrélée avec le piézomètre de Xonrupt pourrait être utilisée pour caractériser l'état quantitatif de la masse d'eau. 7 autres stations hydrométriques seraient aussi susceptibles d'être utilisées. Ces stations ont des bassins versants couvrant une part non négligeable de la superficie de la masse d'eau.

4.4. HG511 - BASSIN DE LA VIRE

4.4.1. Etapes 1 et 2

Les données disponibles sur la MESO CG003 et les MESO à proximité sont listées dans le tableau ci-dessous

Données	Source	Description
Piézométrie	ADES	1 piézomètres ADES actif plusieurs piézomètres présents à proximité, toujours en domaine de socle : 1 sur les masses d'eau HG508, HG510, HG513, HG514 et GG018 et 5 sur la masse d'eau HG512
Débits	Banque Hydro	10 stations hydro
Climat	Météo France	Données SAFRAN

Un seul piézomètre du réseau DCE (OFB-BRGM) est en service au droit de la masse d'eau HG511 (01446X0005), il est suivi depuis août 2002. Aucun suivi plus ancien n'a été retrouvé. En revanche, plusieurs piézomètres en service sont disponibles sur les masses d'eau voisines (Illustration 40).

De nombreuses stations hydrométriques sont en service sur le bassin versant de la Vire, dont 9 au droit de la masse d'eau HG511 (Illustration 40). Aucun suivi de source n'est par contre répertorié.

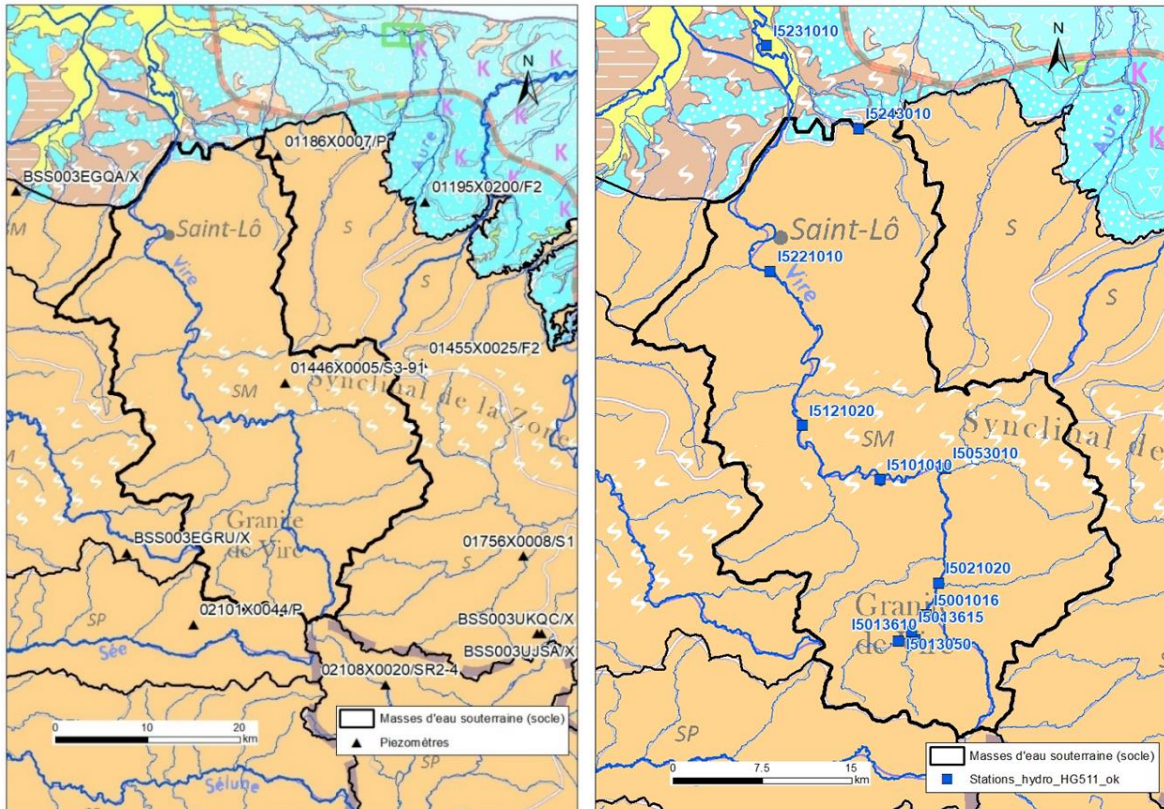


Illustration 40 : Localisation des piézomètres (à gauche) et des stations hydrométriques (à droite) en service au droit et à proximité de la masse d'eau HG511

Au regard des données disponibles, nous disposons donc de deux types d'alternative possibles pour caractériser l'état quantitatif de la MESO HG511 : des chroniques piézométriques sur les MESO voisines ainsi que des chroniques de débit de la Vire et de ses affluents sur la MESO cible.

4.4.2. Etape 3 : Représentativité et qualité des chroniques disponibles

c) Chroniques piézométriques sur une MESO voisine

Neuf piézomètres sont suivis à la fréquence journalière sur les MESO voisines. Plusieurs candidats peuvent être écartés à ce stade (Cf. caractéristiques, Illustration 41) :

- Les piézomètres BSS003EGRU et BSS003EGQA présentent des chroniques de trop courte durée (< 5 ans).
- Les piézomètres 01186X0007 et 02101X0044, de faible profondeur (respectivement 8 et 12 m), ne suivent que l'horizon altéré et ne sont donc pas représentatifs de la ressource en eau souterraine mobilisable au sein de l'horizon fissuré.
- Les piézomètres BSS003UJSA et BSS003UKQC portent la même information, ils sont en effet implantés à 500 m l'un de l'autre et leur chronique sont très fortement corrélées ($R=0.942$). Il est par conséquent proposé de ne conserver qu'une des deux chroniques.

MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau

Code BSS	01186X0007/P	01455X0025/F2	01756X0008/S1	02101X0044/P	02108X0020/SR2-4	BSS003EGRU/X	BSS003UJSA/X	BSS003UKQC/X	BSS003EGQA/X
Maitre d'ouvrage	BRGM	BRGM	SDE61	BRGM	SDE61 - bassin LB	BRGM	SDE61	SDE61	BRGM
Date début	22/01/2007	11/12/2014	22/06/1995	19/03/2007	14/10/2011	25/09/2018	24/05/2007	24/05/2007	25/08/2019
Fréquence suivi	journalière	journalière	journalière	journalière	journalière	journalière	journalière	journalière	journalière
MESO	HG512	HG512	HG512	HG513	GG018	HG514	HG512	HG512	HG510
BDUSA Niv3	165AC01	163AA04	163AE03	171AA03	179AC01	170AA02	163AE03	163AE03	167AC02
Lithologie	Schistes, grès du Briovérien et autres roches du Massif armoricain	Grès, calcaires et schistes du Paléozoïque	Cornéennes	Roches métamorphiques du Massif armoricain	Socle plutonique	Granites ou roches apparentées du Massif armoricain	Roches métamorphiques du Massif armoricain	Roches métamorphiques du Massif armoricain	Granites ou roches apparentées du Massif armoricain
Profondeur (m)	8	110	85	12	111	??	85	100	??
Horizon capté	altérites a priori	fissuré	fissuré	altérites a priori	fissuré	??	fissuré	fissuré	??

Illustration 41 : Caractéristiques des piézomètres en service sur les masses d'eau alternatives (piézomètres sélectionnés en vert)

A ce stade du déroulé de la méthodologie, les piézomètres 01756X0008, 02108X0020 et BSS003UJSA sont des alternatives à étudier pour caractériser l'état quantitatif de la MESO HG511. A noter que ces trois piézomètres sont tous situés au sud-est de la MESO HG511.

d) Chroniques de débit de base de cours d'eau sur la MESO cible

Neuf stations hydrométriques sont suivies à la fréquence journalière sur la MESO HG511 (Cf. caractéristiques, Illustration 42). Les barrages hydro-électriques implantés en amont et dont le fonctionnement impacte très probablement les débits d'étiage du cours d'eau (régulation des débits) ne permettent cependant pas de garantir la représentativité hydrologique de la majorité des stations hydrométriques situées à l'aval de ces installations. Il faut rappeler que les corrélations niveaux – débits réalisées lors des tests préliminaires ont mis en évidence une rupture à partir de 2017, non expliquée mais l'hypothèse d'une évolution des prélèvements ne peut être écartée.

Code station	I5001016	I5013610	I5013615	I5021020	I5101010	I5121020	I5221010	I5053010	I5243010
Cours d'eau	La Vire à Vire [amont confluence Virène]	La Virène à Saint-Germain-de-Tallevende	La Virène à Saint-Germain-de-Tallevende	La Vire à Coulonces	La Vire à Malloué	La Vire à Tessay-sur-Vire	La Vire à Saint-Lô	La Souleuvre à Carville	L'Elle à Saint-Jean-de-Savigny
Période de suivi	2002-2021	1970-2021	1993-2020	2002-2021	1991-2021	1993-2021	1971-2021	1969-2021	1990-2021
Superficie (km ² / % MESO)	52 / 5%	42 / 4%	75 / 7%	142 / 13%	469 / 42%	640 / 57%	868 / 77%	115 / 10%	57 / 5%
Module (m ³ /s)	0.895	0.825	1.71	2.66	7.4	9.8	12.9	1.65	0.667
Qs (L/s/km ²)	16.9	20.6	22.1	18.3	15.8	15.3	14.8	14.4	11.6
BFI	0.58	0.72	0.7	0.69	0.58	0.57	0.57	0.44	0.76

Illustration 42 : Caractéristiques des stations hydrométriques en service sur la MESO cible (stations sélectionnées en vert : I5013615 & I5053010)

Sur la base des critères de sélection proposés concernant la qualité des chroniques (durée minimum = 10 ans, suivi journalier, module minimum = 1 m³/s, superficie drainée représentative de la MESO), les stations hydrologiques de la Virène à Saint-Germain-de-Tallevende (I5013615) et de la Souleuvre à Carville (I5053010) sont des alternatives possibles pour caractériser l'état quantitatif de sous-secteurs de la MESO HG511. Pour la Virène, la station a été sélectionnée en raison d'une superficie drainée plus importante que celles des stations implantées plus en amont.

Les deux stations sélectionnées présentent un BFI relativement élevé, supérieur à 0.4, respectant le critère proposé dans la méthodologie pour les aquifères de socle. Les chroniques de débit de base suivent un cycle de fluctuations annuelles avec des périodes de hautes eaux et basses eaux (Illustration 43). Le soutien de nappe est plus marqué pour la Virène (BFI de 0.7 contre 0.44 pour la Souleuvre).

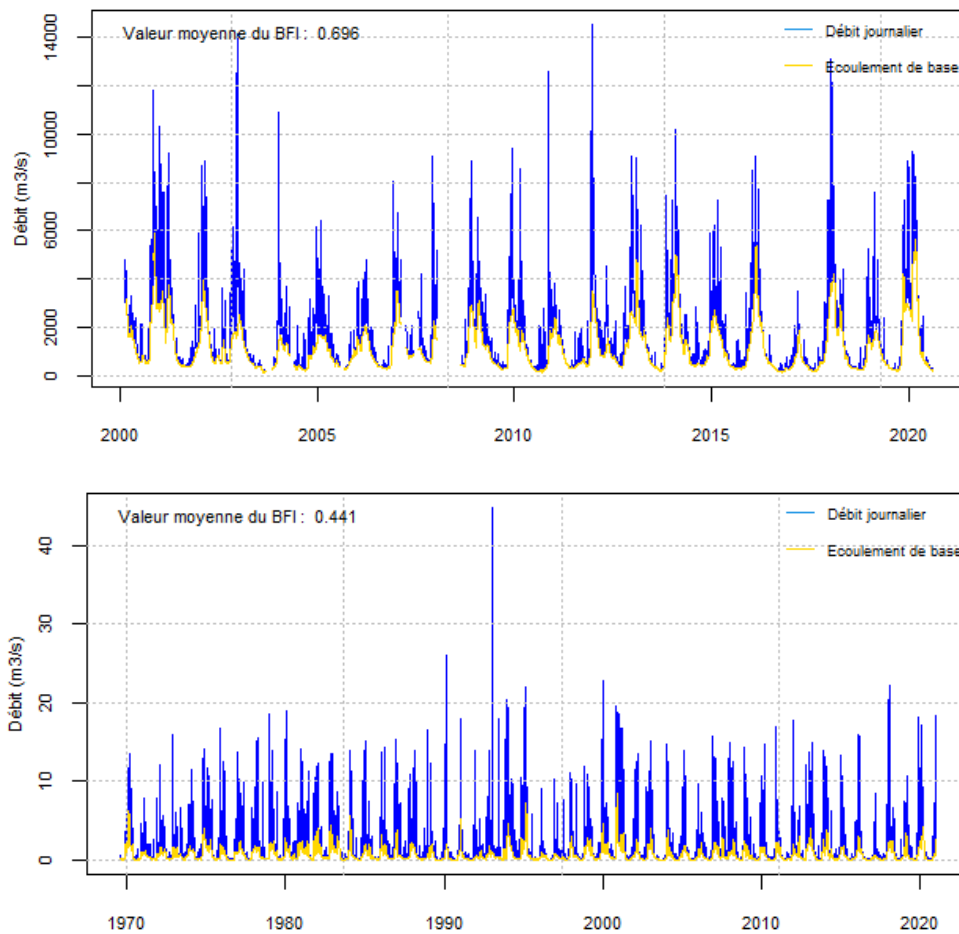


Illustration 43 : Ecoulements de base calculés aux stations I5013615 (en haut) et I5053010 (en bas)

Il faut d'ores et déjà noter que ces stations n'apporteront des informations que sur des secteurs limités : l'extrémité amont de la MESO dans le cas de la station de la Virène (7% de la MESO) et le bassin versant de la Souleuvre (10% de la MESO) déjà suivi par le piézomètre de référence de la MESO HG511 (Illustration 40).

4.4.3. Etape 4 : Validation des solutions alternatives

a) Chroniques piézométriques sur une MESO voisine

Dans un premier temps, des **tests de corrélation croisée entre les piézomètres des MESO alternatives et les stations hydrométriques de la MESO cible ont été mis en œuvre**. Pour ce faire, la station hydrométrique est choisie sur la base de critères géographiques et géologiques.

Etant donné que les trois piézomètres sélectionnés sont implantés dans le même secteur et qu'ils recoupent tous des granites ou les cornéennes associées (auréole de métamorphisme), les tests de corrélation ont été conduits avec la chronique de débit de base de la station de la Virène à Saint-Germain-de-Tallevende.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le piézomètre 01756X0008 (Illustration 44) qui présentait par ailleurs la plus longue période d'étude. A contrario, le test n'est pas concluant pour les piézomètres BSS003UJSA et 02108X0020 dans une moindre mesure, que ce soit au pas de temps mensuel ($R < 0.7$ sur les minimums mensuels) ou au pas de temps annuel.

Piézomètres	R (moy. mensuelles)	R (min. mensuelles)	R (valeurs journalières)	Déphasage (jours)
01756X0008 2000-2020	0.8	0.8	0.69	-13
02108X0020 2013-2020	0.8	0.68	0.74	0
BSS003UJSA 2008-2020	0.67	0.64	0.67	-8

Illustration 44 : Résultats des corrélogrammes croisés Niveaux-Débits de base au pas de temps mensuel pour les piézomètres 01756X0008, 02108X0020 et BSS003UJSA

Les Illustration 45 et Illustration 46 confrontent les évolutions des niveaux piézométriques et des débits de base, respectivement aux pas de temps mensuel et annuel, pour le piézomètre 01756X0008.

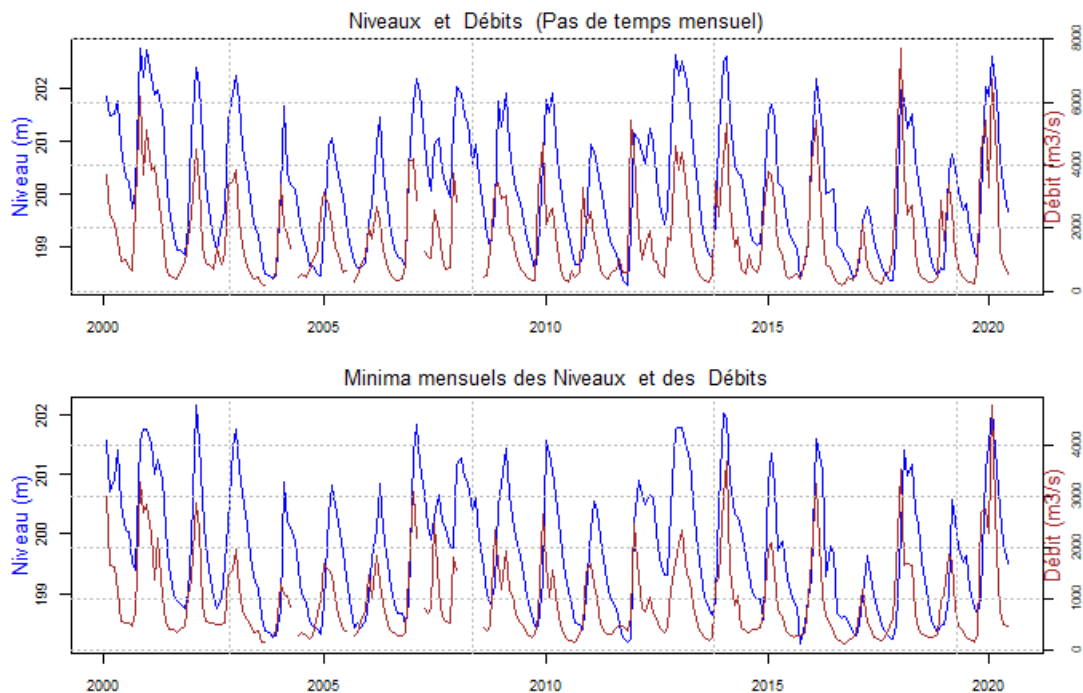


Illustration 45 : Niveaux piézométriques au forage 01756X0008 vs Débits de base à la station hydrométrique I5013615 au pas de temps mensuel sur la période 2000-2020 (moyennes mensuelles sur le graphique du haut, minimums mensuels sur le graphique du bas)

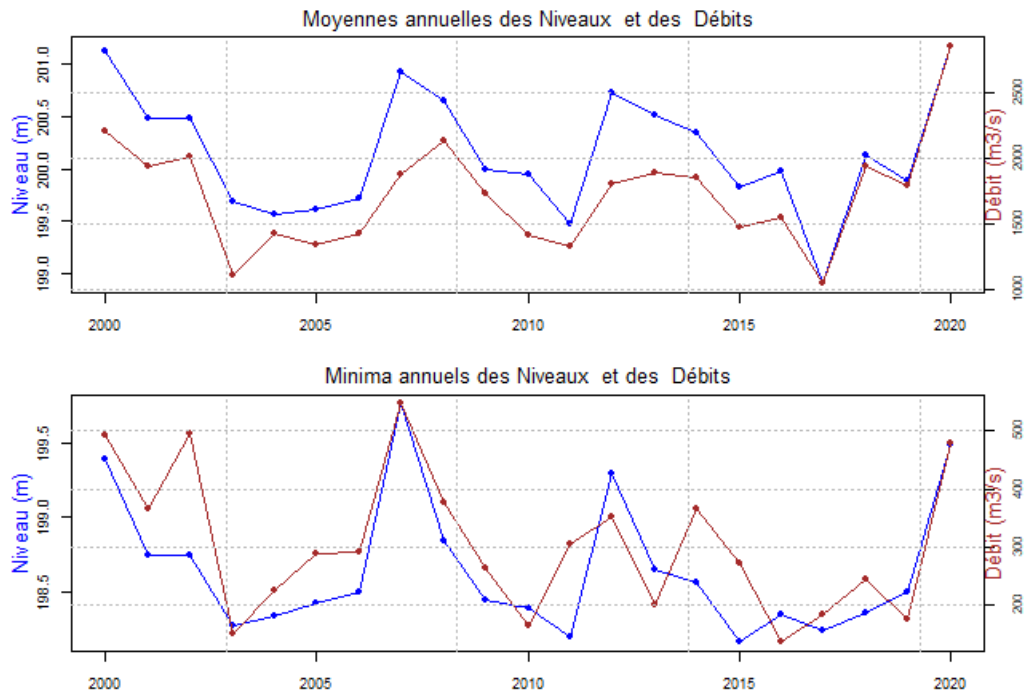


Illustration 46 : Niveaux piézométriques au forage 01756X0008 vs Débits de base à la station hydrométrique I5013615 au pas de temps annuel sur la période 2000-2020 (moyennes annuelles sur le graphique du haut, minimums annuels sur le graphique du bas)

Une étude de corrélation entre toutes les séries piézométriques disponibles et l'**indice d'état pluviométrique (IEP)** a été conduite au pas de temps mensuel à partir des pluies et ETP SAFRAN disponibles sur la masse d'eau HG511 (rapport BRGM/RP-70673-FR).

Il en ressortait des coefficients de détermination globalement satisfaisants mais des niveaux de basses eaux rarement bien retranscrits. Seules les chroniques piézométriques associées aux altérites sont bien expliquées par l'IEP.

La validation des trois chroniques piézométriques sélectionnées à partir de l'IEP n'est donc pas concluante (Illustration 47), mais compte tenu du fait que localement l'IEP ne semble pas en mesure d'expliquer les fluctuations piézométriques au sein de l'horizon fissuré, il est proposé de ne pas en faire un critère de rejet.

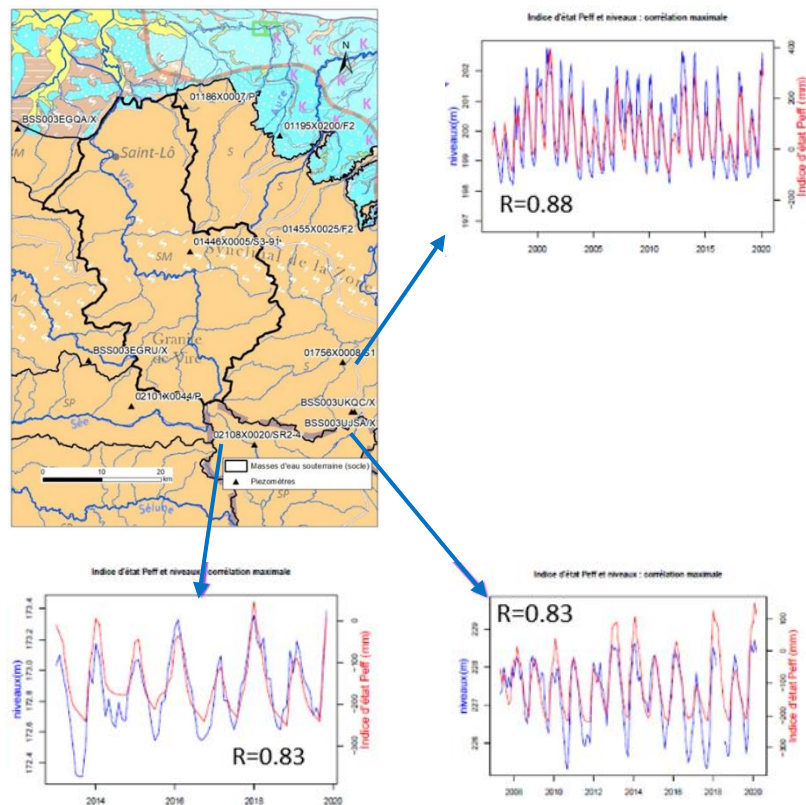


Illustration 47 : Corrélations obtenues entre l'indice d'état pluviométrique et les séries piézométriques alternatives sélectionnées

A l'issue de l'étape de validation, la seule alternative possible en terme de piézométrie sur une MESO alternative serait le piézomètre 01756X0008.

b) Chroniques de débit de base de cours d'eau sur la MESO cible

Dans un premier temps, des tests de corrélation croisée entre les séries de débits de base sélectionnées et des séries piézométriques ont été mises en œuvre. Comme précédemment, les piézomètres utilisés pour le test de corrélation ont été choisis sur la base de critères géographiques et géologiques : le piézomètre 01756X0008 pour la Virène à Saint-Germain (I5013615) et les piézomètres 01446X0005 (MESO HG511) et 01455X0025 (MESO voisine à proximité immédiate du précédent) pour la Soulevre (I5053010).

Pour la station de la Soulevre (I5053010), la corrélation est meilleure avec le piézomètre 01446X0005 de la MESO voisine qu'avec le piézomètre de référence de la MESO HG511 (Illustration 48). Comme souligné dans le rapport intermédiaire n°2 de l'étude, ce piézomètre capte un horizon beaucoup plus transmissif et est plus représentatif des relations nappe-rivière. Cette bonne corrélation doit cependant être nuancée en raison de la courte période d'étude (2015-2020).

Concernant la station de la Virène (I5013615), le test de corrélation avec le piézomètre 01756X0008 est probant (Illustration 48) comme vu précédemment (Illustration 45 et Illustration 46).

Stations hydrométriques	Piézomètres	R (moy. mensuelles)	R (min. mensuelles)	R (valeurs journalières)	Déphasage (jours)
I5053010	01446X0005 2002-2020	0.59	0.59	0.56	-15
	01455X0025 2015-2020	0.81	0.76	0.75	0
I5013615	01756X0008 2000-2020	0.8	0.8	0.69	-13

Illustration 48 : Résultats des corrélogrammes croisés Débits de base-Niveaux au pas de temps mensuel pour les stations hydrométriques I5053010 et I5013615

Dans un second temps, un test de corrélation entre les séries de débit de base et l'IEP est conduit. L'IEP permet de reproduire tout à fait correctement les fluctuations de débits de base de la Virène à Saint-Germain alors que cela n'est pas le cas pour la station de la Soulevre (Illustration 49).

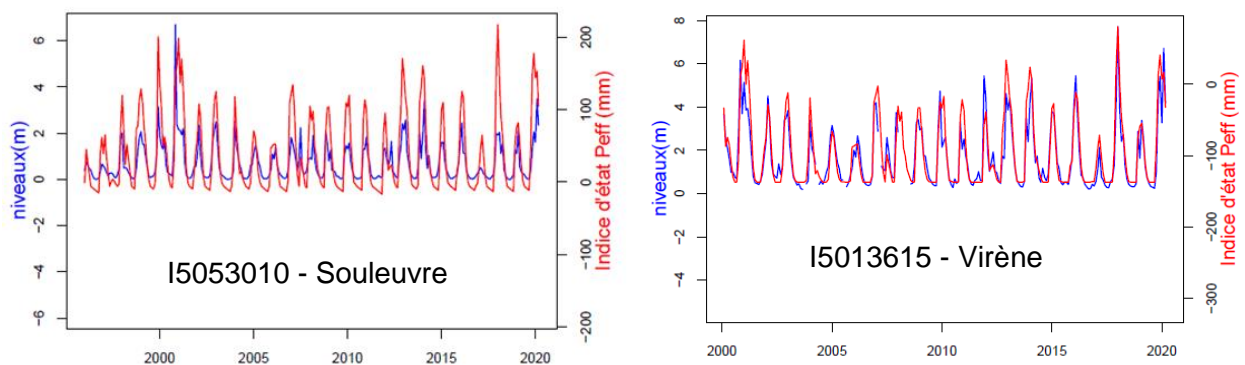


Illustration 49 : Corrélations obtenues entre l'indice d'état pluviométrique et les séries de débits de base sélectionnées

A l'issue de l'étape de validation, la seule alternative possible en termes débits de base sur la MESO cible serait la station hydrométrique de la Virène à Saint-Germain. Il est rappelé que celle-ci ne peut caractériser l'état quantitatif de la MESO HG511 que sur son extrémité amont avec une superficie jaugée représentant 7 % de la MESO.

4.4.4. Etape 5 : Tests de tendance

La dernière étape est le calcul de tendance, celui-ci a été réalisé sur la chronique piézométrique 01756X0008 de la MESO alternative et sur la chronique des débits de base de la Virène à Saint-Germain, ces deux variables caractérisent l'extrémité amont de la MESO HG511 concernée par les granites de Vire et son auréole de métamorphisme (cornéennes).

Dans les deux cas, les calculs de tendance ont été réalisés sur la période 2002-2019, période sur laquelle le calcul a également été réalisé pour le piézomètre de référence de la MESO (01446X0005).

Les résultats montrent une tendance à la baisse sur les moyennes et les minimums annuels pour le piézomètre 01756X0008 (Illustration 50) et uniquement sur les minimums annuels pour les débits de base de la Virène (Illustration 51).

MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau

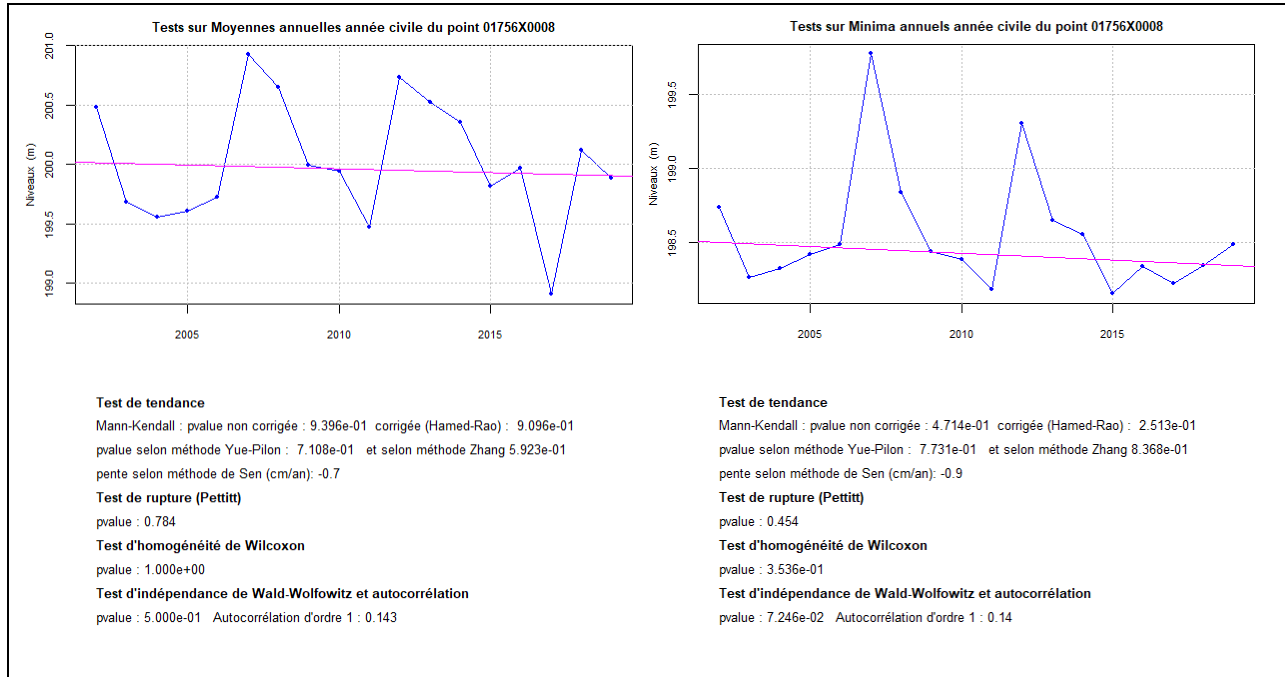


Illustration 50 : Résultats des tests statistiques sur la chronique piézométrique 01756X0008

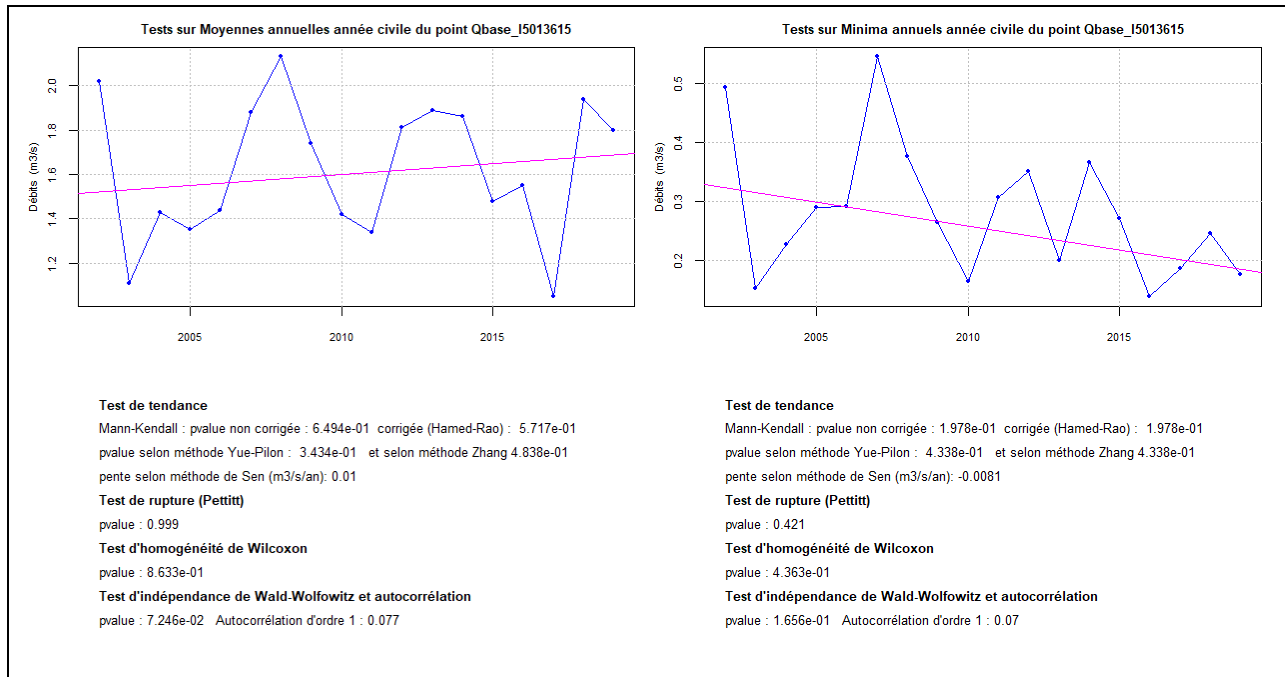


Illustration 51 : Résultats des tests statistiques sur la chronique des débits de base de la Virène à Saint-Germain (I5013615)

Les résultats sont cohérents avec la tendance à la baisse également calculée sur les minimums annuels du piézomètre de référence 01446X0005. Les tendances à la baisse ne sont *a priori* pas expliquées par les prélèvements en nappe qui restent très modérés sur la MESO HG511.

4.4.5. Conclusions

En définitive, après déroulement de la méthodologie proposée dans le cadre du projet MESURA, deux alternatives seraient intéressantes pour compléter le suivi piézométrique de la MESO HG511 assuré par l'ouvrage 01446X0005 : le piézomètre 01756X0008 implanté sur la MESO et les débits de base de la Virène à Saint-Germain.

Ces deux alternatives concernent l'extrémité amont de la MESO et portent la même information au regard du corrélogramme croisé niveau-débit de base. Aussi, l'alternative du débit de base pourrait être privilégiée à ce stade, car le suivi concerne directement la MESO cible. Il faut rappeler que la superficie du bassin versant jaugé par la station de la Virène ne représente que 7 % de la MESO HG511.

En revanche, l'étude n'a révélé aucune alternative possible pour caractériser l'état quantitatif de la moitié aval de la MESO. En effet, les débits des cours d'eau sont influencés par les captages et les centrales hydroélectriques et les piézomètres implantés sur les MESO voisines ne répondent pas aux critères de validation de la méthodologie (suivi des altérites superficielles pour le piézomètre 01186X0007 et suivi de très courte durée (2019) pour BSS003EGQA).

Enfin, la présente étude a également permis de questionner la représentativité du seul piézomètre de référence disponible (01446X0005) qui capte un horizon profond très peu perméable. Un complément d'information pourrait être apporté par le piézomètre 01445X0025, implanté à proximité dans le même contexte géologique, mais captant un horizon fissuré beaucoup plus transmissif et plus représentatif des échanges nappes-rivières par exemple. La bonne corrélation niveau-débit de la Souleuvre obtenue pour cet ouvrage sera cependant à valider avec l'allongement de la chronique piézométrique.

4.5. FG013 – CALCAIRES DU JURASSIQUE MOYEN ENTRE CHARENTE ET SON-SONNETTE

4.5.1. Etapes 1 et 2

Les données disponibles sur la MESO FG013 et les MESO voisines sont listées dans le tableau ci-dessous et localisées sur l'illustration 52.

Données	Source	Description
Piézométrie	ADES	1 seul piézomètre + 11 sur les MESO voisines (dont 2 arrêtés)
Débits	Banque hydro	7 stations (dont 3 inactives) + 4 sur les MESO voisines (dont 1 arrêté)
Climat	Météo-France	18 mailles SAFRAN

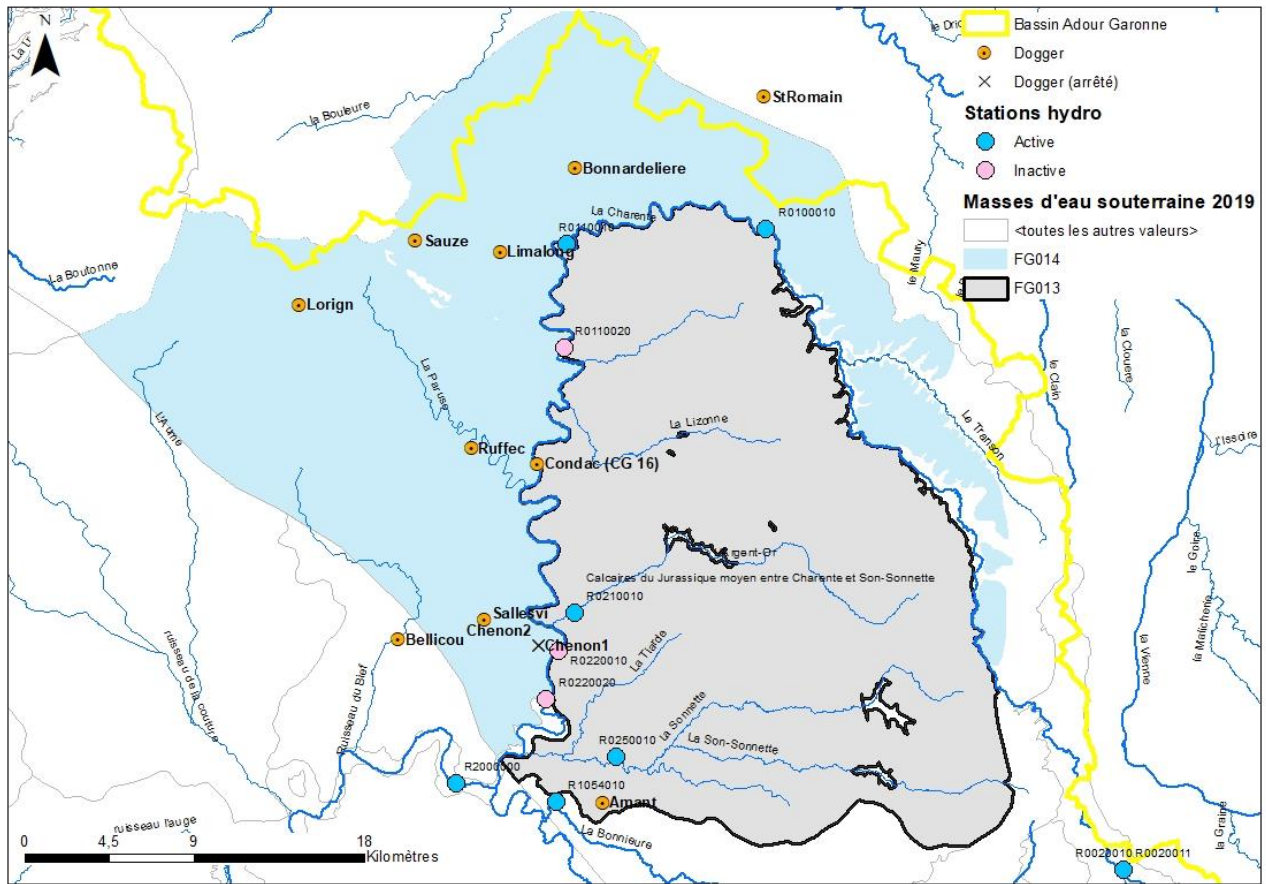


Illustration 52 : Localisation des piézomètres captant le Dogger et des stations hydrométriques présents sur la MESO FG013 et les MESO voisines

4.5.2. Etape 3

Au regard des données disponibles, nous disposons a priori de deux types d'alternative possibles pour caractériser l'état de la MESO FG013 : des chroniques piézométriques sur les MESO voisines (FG014 notamment) et des chroniques de débit de cours d'eau (affluents de la Charente).

Chroniques piézométriques sur une MESO voisine

Les 7 piézomètres actifs sur la MESO FG014 voisine disposent tous de chroniques journalières, longues (entre 18 et 31 ans de données) et relativement complètes (plus de 96% des jours sont renseignés). Malgré cela, certaines de ces chroniques piézométriques ne pourront pas être utilisées pour caractériser la MESO FG013 cible (libre, karstique et capacitive) (cf. tableau ci-dessous).

Code National BSS	Dénomination	Altitude (m NGF)	Profondeur investigation maximale (m)	Représentativité de la chronique (contexte & pressions)
06617X0042/S	SALLESVI	102.16	114	Mise en charge immédiate (caractéristique d'une nappe captive).
06613X0036/F1	CONDAC	83	19	Fortement contraint par la Charente
06613X0039/S	RUFFEC	96.51	37	Oui
06373X0113/P	BONNARDELIERE	118	13.35	Oui
06375X0003/P	LORIGNE1	138	11.52	Impacté par des pompages
06376X0020/P	SAUZE	129.34	23.2	Impacté par des pompages
06377X0030/P	LIMALONG	127.16	36.1	Oui

Illustration 53 : Liste des piézomètres captant le Dogger présents sur la MESO FG014 voisine (sont surlignés en gris les piézomètres non représentatifs de la MESO cible)

Chroniques de débit de cours d'eau sur la MESO cible

Les deux stations hydrométriques actives sur la MESO FG013 (Poursac R0210010 et Saint-Front R0250010) disposent de chroniques journalières, longues (> 10 ans) et relativement complètes (plus de 88% des jours sont renseignés). La superficie des bassins versants drainés est de 92.3 km² pour la station de Poursac (15% de la MESO) et de 191 km² pour celle de Saint-Front (31% de la MESO). Les débits annuels moyens mesurés sont, ainsi, de 1.05 m³/s et 1.72 m³/s respectivement, soit supérieurs ou égaux à la limite de 1 m³/s fixée par la méthodologie proposée (§ 3.2). Les deux cours d'eau que ces stations suivent sont alimentés par la MESO FG013 et ne sont pas ou peu artificialisés.

A ce stade du déroulé de la méthodologie, les piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière ainsi que les stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front sont des alternatives possibles pour caractériser l'état de la MESO FG013.

4.5.3. Etape 4

Chroniques piézométriques sur une MESO voisine

Les chroniques piézométriques alternatives de Ruffec et Limalong sont très bien corrélées avec les chroniques hydrométriques de Poursac et Saint-Front disponibles sur la MESO cible FG013 ($R \geq 0.81$). La corrélation avec la chronique alternative de Bonnardelière est moindre, mais reste bonne ($R \geq 0.73$). Ces bonnes corrélations sont visibles directement sur les chroniques, comme le montre l'exemple de la corrélation des niveaux mensuels avec les débits mensuels mesurés à la station de Saint-Front (Illustration 54).

Un indice d'état pluviométrique (IEP) a été calculé à partir des pluies et ETP SAFRAN disponibles sur la MESO FG013 (18 mailles) pour ces 3 piézomètres. Des corrélations ont ainsi été calculées au pas de temps mensuels entre les chroniques d'état pluviométrique calculées et les 3 chroniques piézométriques considérées (Illustration 55). Bien que le pas de temps mensuel ne soit pas le plus adapté au système karstique, les corrélations obtenues sont satisfaisantes pour les 3 piézomètres (coefficient de corrélation supérieur ou égal à 0.89). Cet indice explique de façon très satisfaisante l'évolution des niveaux de nappe même si certains niveaux bas restent mal expliqués (cas en particulier pour le piézomètre de Limalong). Il est ainsi en mesure de reproduire les fluctuations piézométriques du Dogger karstique.

Au regard des corrélations obtenues, **les piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière sont des solutions alternatives validées pour caractériser l'état de la MESO FG013**. Le piézomètre de Ruffec est actuellement utilisé pour la gestion DCE de la MESO FG014.



Ruffec / Saint-Front ($R \geq 0,81$)



Limalong / Saint-Front ($R \geq 0,82$)



Bonnardelière / Saint-Front ($R \geq 0,73$)

Illustration 54 : Comparaison des niveaux aux piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière avec les débits à la station de Saint-Front au pas de temps mensuel

MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau



Illustration 55 : Corrélations obtenues entre précipitations efficaces et évolutions des niveaux piézométriques sur les piézomètres de Ruffec, Limalong et Bonnardelière

Chroniques de débit de cours d'eau sur la MESO cible

Les stations de Poursac et Saint-Front présentent des BFI supérieurs à 0.50 (Illustration 56) ; soit un écoulement qui serait majoritairement apporté par la nappe. Toutefois, les débits de base calculés et les BFI correspondants doivent être analysés avec précaution. Il s'agit par exemple de vérifier que les débits d'étiage des cours d'eau considérés ne soient pas influencés comme par des lâchers de barrage, ce qui est bien le cas pour les stations de Poursac et Saint-Front comme on peut le voir à partir des moyennes mensuelles interannuelles calculées à partir des débits de base journaliers (Illustration 57). Les débits de base annuels moyens calculés sur ces deux stations sont, par ailleurs, supérieurs à 0.5 m³/s (valeur minimale fixée par la méthodologie proposée, § 3.3). Les chroniques correspondantes sont donc considérées comme représentatives.

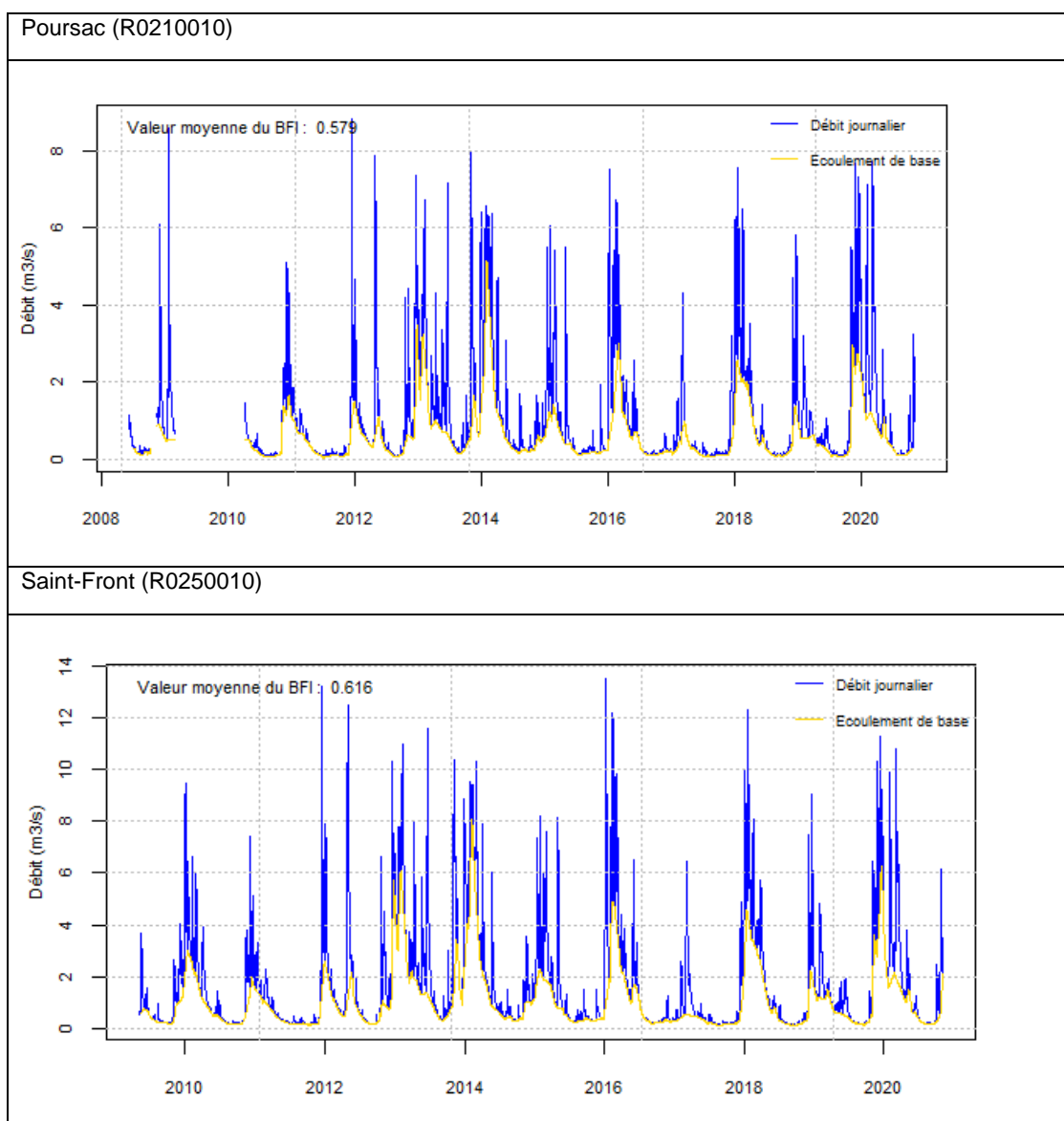


Illustration 56 : Débit de base journalier et BFI calculés à partir des débits totaux mesurés aux stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front.

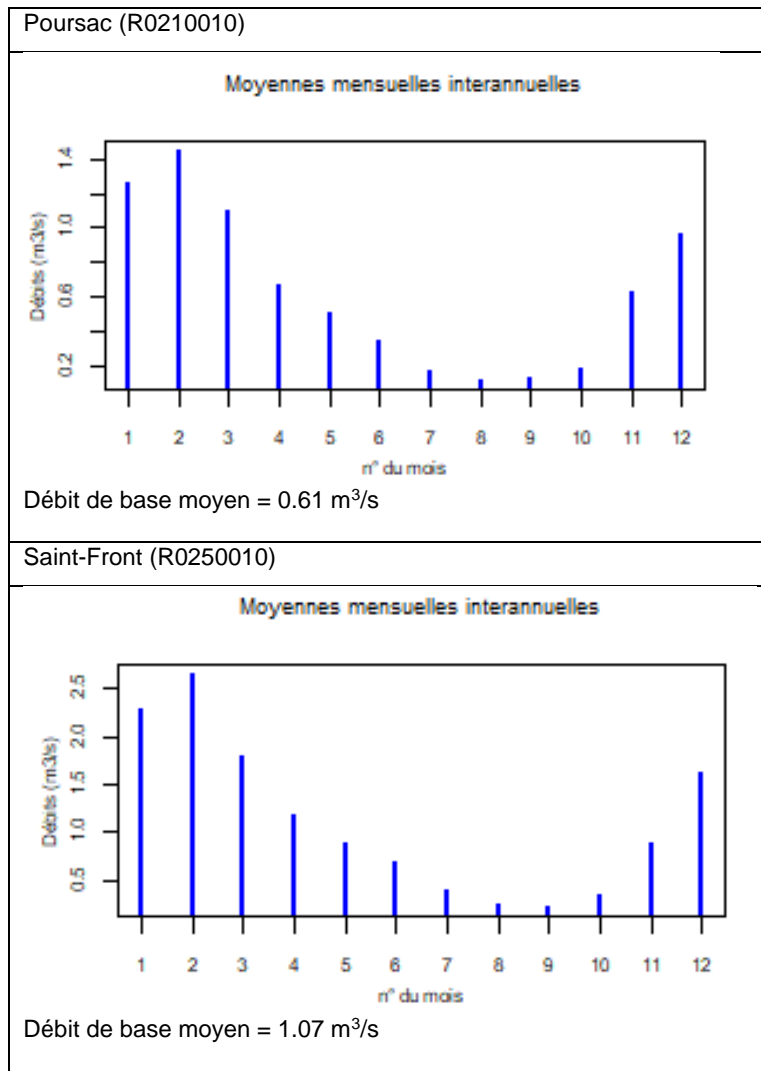


Illustration 57 : Moyennes mensuelles interannuelles calculées à partir des débits de base journaliers des stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front

Des tests de corrélation niveau-débit de base ont, de ce fait, été réalisés avec la chronique d'Amant, et les corrélations obtenues sont bonnes ($R \geq 0.81$). Ces bonnes corrélations sont visibles directement sur les chroniques (exemple de la chronique de Saint-Front, Illustration 58).

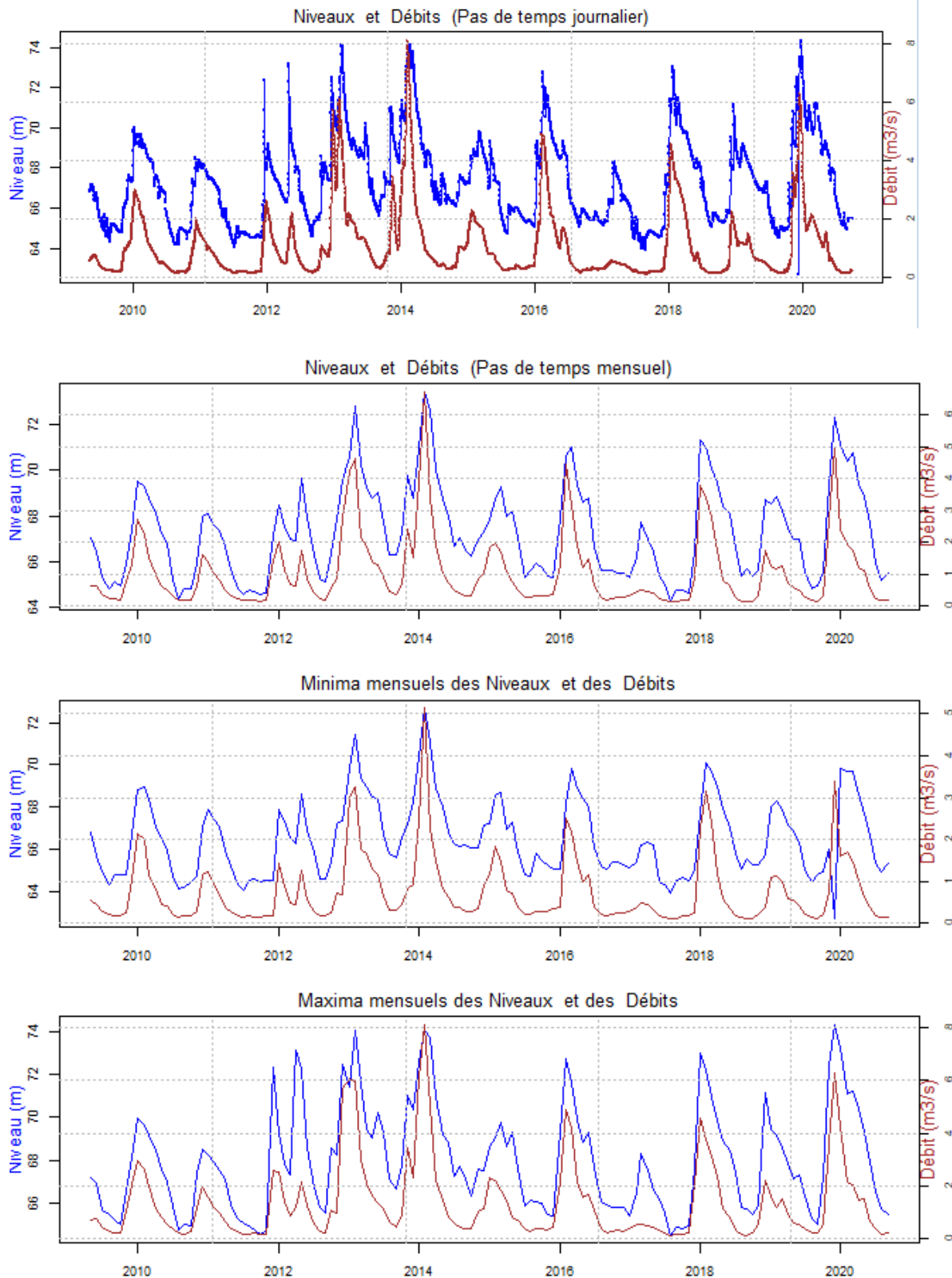


Illustration 58 : Comparaison des niveaux mesurés au piézomètre d'Amant avec les débits de base de la station de Saint-Front pour différents pas de temps.

Au regard des corrélations obtenues, **les chroniques de débit de base des stations hydrométriques de Poursac et Saint-Front peuvent être utilisées pour caractériser l'état de la MESO FG013.**

4.5.4. Etape 5

Des tests de tendance Mann-Kendall ont été menés sur toutes les chroniques retenues ci-dessus comme des solutions alternatives pour caractériser la MESO FG013 :

- Chroniques piézométriques de Ruffec, Limalong et Bonnardelière.
- Débits de base calculés sur les stations hydrométriques Poursac et Saint-Front.

Aucune tendance n'a été constatée, comme pour la chronique d'Amant.

4.5.5. Conclusions

Après le déroulé de la méthodologie proposée, cinq alternatives paraissent intéressantes pour compléter le suivi piézométrique de la MESO FG013 (actuellement assuré par le piézomètre d'Amant, 06854X0051/S) :

- Les chroniques piézométriques de Ruffec (06613X0039/S), Limalong (06377X0030/P) et Bonnardelière (06373X0113/P) implantés sur la MESO FG014 voisine.
- Les débits de base calculés sur les stations hydrométriques Poursac (R0210010) et Saint-Front (R0250010) situées sur deux affluents de la Charente.

Toutefois, la station de Saint-Front (R0250010) et le piézomètre d'Amant (06854X0051/S, seul piézomètre implanté sur la MESO FG013) concernent, tous deux, le sud de la MESO FG013, et portent la même information au regard de la corrélation de leurs données. Aussi, l'alternative du débit de base calculé à la station de Poursac (R0210010) pourrait être privilégiée pour compléter le suivi de la MESO FG013, même si cette station draine une superficie moindre que celle de Saint-Front (15 % de la MESO contre 31 %).

Cette alternative pourrait, en outre, aisément être complétée par le suivi du piézomètre de Ruffec ; ce dernier étant d'ores et déjà utilisé pour la gestion de la MESO FG014.

5. Conclusion

La méthodologie proposée se présente sous forme d'un enchaînement de 5 étapes successives : (i) compilation de données, (ii) alternatives possibles, (iii) représentativité et qualité des chroniques, (iv) validation de la solution alternative et (v) valorisation possible. Elle est identique quel que soit le type d'aquifère, à quelques exceptions près. En ce qui concerne la valorisation de ces solutions alternatives, nous nous sommes essentiellement focalisés sur le calcul de tendance, ce qui était l'objectif de l'étude.

La méthodologie a été validée sur les 5 masses d'eau sélectionnées en début de projet. Pour 3 d'entre elles, on a pu montrer qu'il existait des alternatives possibles pour les masses d'eau en déficit de piézomètres, mais ces approches doivent être utilisées avec prudence. L'utilisation du débit de base, par exemple, n'est envisageable que si la contribution de la nappe au débit du cours d'eau est avérée, en particulier en période d'étiage et si les prélèvements en rivière ou les aménagements impactent peu les débits naturels. De la même manière, l'utilisation de l'indice d'état pluviométrique présente des incertitudes, dans la mesure où il n'a été testé que sur quelques exemples et qu'il ne saurait se substituer à un suivi piézométrique classique.

Il est important de souligner que les conclusions qui découlent de ces tests sont basées essentiellement sur un traitement des données disponibles mais ne prennent pas en compte une expertise locale qui pourrait nuancer voire contredire ces résultats. Par ailleurs, ces solutions alternatives doivent être testées sur le long terme avant d'être utilisées de manière opérationnelle. Il faut également prendre certaines précautions vis-à-vis des prélèvements et de l'évolution des usages qui pourrait modifier les corrélations établies pour des périodes et conditions données.

Ces tests ont également permis de détecter des problèmes sur des piézomètres existants notamment de représentativité.

Parmi les alternatives possibles, l'utilisation du débit de base semble être la plus intéressante, du fait de l'existence de nombreuses données hydrométriques susceptibles d'être exploitées.

6. Bibliographie

Arnaud L. (2017) – Estimation prélèvements / ressource dans le cadre de la DCE : compléments méthodologiques pour les eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-67212-FR, 31 p., 22 ill.

Auterives C., Gourcy L., Nicolas J. (2013) Proposition méthodologique d'évaluation de la représentativité des réseaux DCE de surveillance des eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-63055-FR, 261 p., 152 fig., 46 tabl.

Manceau JC, Allier D, Buscarlet E (2020) – Analyse de la sécheresse hydrogéologique dans la région Grand Est – Phase 2 : amélioration des indicateurs de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69867-FR, 371 p., 29 ill., 4 tabl., 5 ann., 1 CD.

Seguin J.J. (2016) – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR, 219 p., 106 ill., 49 tabl., 7 ann.

Seguin J.J., Allier D., Croiset N., Thomas Klinka, Manceau J.C. (2018) – ESTHER. Etudes de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final BRGM/RP-67518-FR, 299 p., 126 fig., 10 ann.

Thiéry D. (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 138 p., 102 fig.

Vernoux JF., Castillo C., Manceau JC. (2020) – MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau. Rapport d'avancement. BRGM/RP-70057-FR, 34 p., 9 ill., 2 ann.

Vernoux J.F., Castillo C., D. Allier, L. Arnaud. (2021) – MESURA Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau. Rapport d'avancement n°2. BRGM/RP-70673-FR, 235 p., 185 ill.



Centre scientifique et technique
Direction Eau Environnement Procédés et Analyses
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr