



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Projet « De l'Eau pour Demain » - Dynamiques annuelles et pluriannuelles des ressources en eau en Région Bretagne

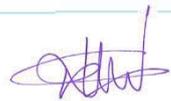
Rapport Final

BRGM/RP-73058-FR

19 septembre 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche

Boisson A. avec la collaboration de Lucassou F. et Boivin B.

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Benoît DEWANDEL	Nom : Pauline DRZEWIECKI
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directrice régionale
Date : 26/09/2023	Date : 03/10/2023
Signature : 	Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



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.

Sa communicabilité ultérieure à des tiers est définie conformément à l'article L.213-1 du Code du patrimoine. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est définie conformément à l'article L.213-1 du Code du patrimoine.

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 accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Eaux souterraines, Alimentation en eau potable, Climat, Niveaux piézométriques, Aquifères de socle Bretagne.

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

Boisson A. avec la collaboration de Lucassou F. et Boivin B. (2023) – Projet « De l'Eau pour Demain » - Dynamiques annuelles et pluriannuelles des ressources en eau en Région Bretagne. Rapport Final. BRGM/RP-73058-FR, 181 p., 164 ill., 6 ann.

Synthèse

Les ressources en eau sont de plus en plus sous pression et la Bretagne ne fait pas exception notamment avec des périodes de sécheresses semblant à la fois plus fréquentes et intenses. Face à cette situation, le projet « *De l'eau pour demain* » a été mis en place. Le projet a été financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB), la Région Bretagne et le BRGM. Il rassemble pour la première fois les trois syndicats départementaux d'eau potable de Bretagne (SMG Eau 35, Eau du Morbihan et le SDAEP 22), ainsi que le Conseil Départemental du Finistère et le BRGM pour une réalisation technique commune. Le projet vise à apporter des éléments de connaissance et de compréhension sur l'impact du climat sur les ressources en eau de Bretagne. Ceci doit amener à la sécurisation et la pérennité des ressources prélevées pour l'eau potable à l'échelle régionale et à proposer des méthodes et des outils généralisables.

Le projet est décomposé en quatre volets. Le premier cherche à mieux connaître les consommations d'eau potable du réseau public. Le second est axé sur le fonctionnement actuel des ressources en eaux de Bretagne et intègre à la fois des éléments sur les retenues d'eau et barrages, et des travaux sur la dynamique des nappes et leur exploitation. Le troisième volet vise à représenter les équilibres entre besoins et ressources en eau potable. Il est réalisé sur le territoire du syndicat mixte de l'Aulne dans le Finistère en collaboration avec le projet INTERREG Water for tomorrow. Enfin, le quatrième volet cherche des solutions alternatives pour optimiser la gestion de la ressource au travers d'études de faisabilité sur la réutilisation des eaux traitées industrielles et le réaménagement de carrières. Le présent rapport est un élément du volet 2 du projet « *De l'eau pour demain* » sur les ressources en eaux. Les autres volets du projet font l'objet de rapports indépendants.

Les spécificités des aquifères de socle nécessitent le développement de méthodes et connaissances adaptées pour pouvoir gérer la ressource à la fois sur le long terme mais aussi dans les cas de sécheresses de plus en plus fréquentes. Dans ce rapport sont étudiés, dans un premier temps les différences spatiales des propriétés des aquifères du territoire et l'évolution de la dynamique des ressources à l'échelle annuelle. Dans un second temps, les indicateurs issus d'études précédentes sont synthétisés dans une cartographie de la répartition de facteurs indiquant une favorabilité de ressources en eau à l'échelle du territoire. Dans un troisième temps, les dynamiques long terme du lien entre climat, ressources superficielles et souterraines sont étudiées. Enfin sur un territoire restreint du sud Finistère, le lien entre climat et impact sur l'exploitation des ressources est présenté.

Les analyses réalisées dans le cadre de cette étude montrent qu'il existe des différences de comportement des bassins versants selon leurs lithologies à l'échelle de la région. Ces différences n'étaient auparavant pas quantifiées. Ce constat a été validé sur la base des éléments suivants :

- position géographique des sources et relation avec les lithologies ;
- paramètres hydrodynamiques ;
- productivité des champs captants ;
- contribution des différentes lithologies aux cours d'eau (BFI) ;
- temporalité des phases de recharge et d'étiage des piézomètres ;
- temporalité des phases de crue et récession des cours d'eau ;
- cyclicité des variations piézométriques.

L'analyse conjointe des contributions des différentes lithologies aux cours d'eau et la répartition des sources indiquent que les roches plutoniques tendent à avoir un soutien d'étiage plus marqué alors que les roches méta-sédimentaires ont des soutiens d'étiages plus faibles (et des propriétés hydrodynamiques des aquifères associés relativement plus limitées). Ces différences n'étaient que peu marquées par l'analyse des paramètres hydrodynamiques des aquifères. Cette étude montre des indicateurs de comportements et une dynamique générale mais ne fournit pas une quantification directe des propriétés hydrodynamiques.

Les analyses montrent aussi que l'inertie de la recharge et la vidange des aquifères sur le territoire présente une certaine hétérogénéité. Bien que les différences de comportements hydrodynamiques des aquifères et bassins versants de différentes lithologies soient limitées, elles permettent des soutiens d'étiage plus ou moins longs avec des différences de l'ordre du mois à trois mois. Bien que celles-ci puissent paraître faibles, à l'échelle régionale où la majorité des ressources en eau sont sur des roches de socle, cette différence peut permettre dans certains cas une gestion différenciée entre les territoires bretons. Cette différence saisonnière peut être suffisante pour induire des étiages plus longs et des recharges plus tardives pour certains territoires. La capacité de recharge peut être plus limitée lors d'années où la période de recharge est concentrée et diminuer la résilience face à des successions de sécheresse.

Un gradient temporel est-ouest est observable sur la dynamique de la recharge sur les piézomètres et reste visible sur les cours d'eau bien que nettement moins marqué. Le rôle de la géologie sur cette inertie est identifiable en prenant en compte la nature et l'âge des formations. Ce gradient montre une recharge plus précoce et une vidange plus rapide à l'ouest qu'à est du territoire.

Le croisement des informations issues des études existantes a permis de réaliser une carte homogène de synthèse des informations. Celle-ci permet de définir à l'échelle de la région les zones, qui selon ces études, sont les plus favorables à la présence d'eau souterraine exploitable. La différenciation par type de données permet de synthétiser les informations disponibles qui est une demande des acteurs de l'eau dans les territoires.

La dynamique des ressources en eau a été étudiée par l'analyse des écarts aux normales des différents compartiments du cycle de l'eau. Les travaux ont pour but de reconstituer les tendances d'évolution des ressources en eaux à l'échelle de la région en intégrant à la fois des variables climatiques (précipitations et évapotranspiration potentielle (ETP)), hydrologiques (débit des cours d'eau) et hydrogéologiques (niveaux piézométriques). Les résultats montrent que si l'évolution de l'ETP est en hausse sur toute la région Bretagne, les précipitations comme les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques présentent des oscillations mais restent relativement stables.

Les ressources en eau souterraine à l'ouest de la région ont des cycles de recharge/vidange purement annuels et leurs anomalies sont extrêmement corrélées aux anomalies de précipitations annuelles. A l'inverse, sur l'est de la région, il existe un décalage temporel entre les anomalies de précipitations et les anomalies des ressources souterraines. Ce décalage semble s'accroître sur les dernières années. Ces ressources souterraines, globalement moins perméables et avec une inertie plus grande peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresses que les ressources souterraines de l'ouest qui vont avoir tendance à se vidanger naturellement chaque année. En raison de l'effet mémoire pouvant perdurer, ces ressources peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresses ou à des recharges faibles en hiver (sécheresses hivernales). Ces éléments s'observent aussi sur les cours d'eau dans une amplitude moindre. L'impact des sécheresses hivernales semble plus marqué à l'est qu'à l'ouest, l'est étant globalement plus vulnérable.

Les anomalies d'évolution des ressources souterraines ou sur des périodes plus longues de cours d'eau permettent de reconstituer l'historique jusqu'aux années 1970. Ces reconstitutions très semblables sur tout le territoire montrent que la sécheresse de 1976 reste la plus intense et que la période 1989-1991 reste la période de déficit la plus longue. Bien que les sécheresses récentes de 2011, 2016, 2019 et 2022 soient moins intenses, leur fréquence semble augmenter. Les successions de sécheresses rapides sur la Vilaine notamment n'avaient pas été observées par le passé.

L'ETP présente une augmentation sur l'ensemble de la région Bretagne mais ne semble pas avoir à l'heure actuelle, un impact direct systématique sur les ressources en eau, en induisant une tendance à la baisse pour les cours d'eau et piézomètres. Cependant, les anomalies d'ETP peuvent avoir un lien avec les ressources en eau et prendre de l'importance lors de certains événements, tels que les sécheresses. Les comparaisons des chroniques de niveau d'eau et de débit montrent une bonne corrélation entre les anomalies de précipitations et d'ETP, ce qui semble indiquer une amplification du risque de sécheresses par rapport à un apport de précipitations identique dans le passé. Les évaluations sur les périodes de recharge et l'amplitude des battements de nappe ont montré des résultats variables entre les différents points du territoire et des faibles amplitudes de variations. Si de légères tendances semblent ressortir, celles-ci ne sont pas marquées et sont à prendre avec précaution.

L'analyse de la variabilité de production en alimentation en eau potable (AEP) en lien avec les évolutions climatiques a été réalisée sur le territoire du Syndicat Mixte de l'Aulne (SMA). Cette analyse a montré un fort lien entre volumes distribués par le SMA et la disponibilité de la ressource. Ce lien est dû à la fois à une augmentation de la demande (quantifiée dans une autre tâche du projet Eau Pour Demain) et à la déficience de la production de certaines ressources individuelles en eau souterraine de sub-surface (puits) induisant un report vers la prise d'eau superficielle du SMA.

La méthodologie développée permet de quantifier la dépendance d'une ressource exploitée aux variations climatiques annuelles et pluriannuelles. Les variations climatiques pluriannuelles ont des impacts sur les prélèvements, non seulement en raison d'une hausse de la demande (non quantifiée dans cette partie de l'étude) mais sur certains points d'eau en raison des déficiences des différentes ressources individuelles se reportant sur l'unique ressource de sécurisation (prise d'eau superficielle du SMA) ce qui induit une vulnérabilité importante sur le territoire.

La présente étude permet de généraliser le comportement des différentes typologies de ressources (forages, puits, eaux de surface) sur un territoire et d'appréhender leur vulnérabilité. Les ressources profondes ne connaissent pas de diminution annuelle et permettent même une légère augmentation estivale de production pour répondre à la demande. Ainsi, la présence de forages par rapport aux puits permet le maintien de la production sur la période estivale et une plus faible dépendance aux variations pluriannuelles. La création de forages en soutien aux puits existants pourrait ainsi permettre de maintenir la production, la sécuriser et limiter le report sur les ressources en eau de surface.

Le report de certaines ressources en eau souterraine sur des eaux de surface montre le besoin de méthodologies de gestion prenant en compte la disponibilité annuelle de la ressource et non une ressource en eau infinie comme cela est souvent le cas dans des études se basant uniquement sur la demande. Cet élément est particulièrement important dans un contexte d'aquifères de socle peu capacitifs.

Le constat réalisé ici montre la nécessité de la mise en place d'une démarche de sécurisation dans un contexte d'aquifères de socle particulièrement vulnérables aux variations climatiques. Elle met aussi en avant le besoin d'un suivi continu et homogène des ressources en eau à l'échelle d'un territoire et le besoin de communication entre les acteurs.

Le fort lien entre le niveau des nappes et les défaillances des ressources permet l'utilisation d'outils de prévisions du niveau des nappes tels que « MétéEAU Nappes - BRGM » (<https://meteeanappes.brgm.fr/fr>) pour prévoir et estimer les risques de perte de productivité des différentes ressources individuelles et prévenir les risques de report des prélèvements sur les ressources de sécurisation. Ces éléments permettront à terme de développer des modèles de gestion de la ressource tels que réalisés sur le territoire du SMA par Bourgeois *et al.*, (2023).

Une des recommandations pour améliorer la sécurisation des ressources sur le SMA est de compléter les sites exploitant des puits peu profonds par des forages plus profonds. Si cette solution ne crée pas réellement une nouvelle ressource exploitable, elle permet d'exploiter une ressource existante plus longtemps dans l'année et donc de limiter le report vers le SMA ou vers d'autres ressources superficielles en période estivale. De plus, cette solution à l'avantage de ne pas nécessiter de profondes révisions des périmètres de protection de captages (PPC) en place.

L'ensemble des sites étudiés dans cette étude, à l'exception des forages de Botcarn (29), sont affectés directement (par des baisses de production) ou indirectement (par une compensation ou un report d'autres ressources) par des variations climatiques. Même si sur certains sites les variations sont faibles, la généralisation des mécanismes de baisse de production et de report vers d'autres ressources induit des variations importantes sur les ressources de sécurisation pouvant elles-mêmes avoir des contraintes (maintiens du débit réservé pour l'Aulne). Il semble donc important de prévoir et de quantifier ce phénomène pour une gestion appropriée des sécheresses.

Si les variations climatiques ont actuellement un effet limité sur la hausse des consommations (Bourgeois et Neverre, 2022), les mécanismes de report entre les différentes ressources et la concentration des prélèvements vers un nombre limité de ressources de sécurisation induit une forte vulnérabilité du territoire. La quantification de la vulnérabilité aux variations climatiques de chaque ressource de sécurisation à l'échelle régionale est un élément majeur de la sécurisation du réseau AEP à l'échelle régionale.

Sommaire

1. Introduction	19
2. Différenciation des propriétés hydrodynamiques des aquifères à l'échelle régionale – Dynamique annuelle	23
2.1 INTRODUCTION	23
2.2 FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES DE SOCLE	24
2.3 INDICATEURS SPATIALISÉS EXISTANTS EN LIEN AVEC LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES SOUTERRAINES.....	26
2.3.1 Le réseau de suivi piézométrique régional.....	26
2.3.2 Paramètres hydrodynamiques.....	27
2.3.3 Densité de forages et débits au soufflage	31
2.3.4 Densité de sources	32
2.3.5 Position des Périmètres de protection de captages (PPC)	33
2.4 CARTOGRAPHIE DE LA FAVORABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES – PROJET SILURES BRETAGNE.....	35
2.5 INERTIE DES AQUIFÈRES : ÉTUDES EXISTANTES.....	38
2.6 RELATION ENTRE GÉOLOGIE ET SOUTIEN D'ÉTIAGE.....	40
2.6.1 Introduction	40
2.6.2 Méthodologie	41
2.6.3 Résultats.....	42
2.6.4 Comparaison avec les études existantes.....	46
2.6.5 Conclusions	46
2.7 INERTIE DES AQUIFÈRES – FRÉQUENCE ANNUELLE	46
2.7.1 Piézométrie.....	47
2.7.2 Débits des cours d'eau	55
2.8 QUANTIFICATION DE L'INERTIE PLURIANNUELLE DES AQUIFÈRES SUR LES SUIVIS PIÉZOMÉTRIQUES	58
2.9 CONCLUSION CHAPITRE 2	61
3. Croisement des informations disponibles sur la présence de ressources souterraines exploitables	65
3.1 INTRODUCTION.....	65
3.1.1 Objectif.....	65
3.1.2 Contraintes sur l'utilisation des données	66
3.2 MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ÉLABORATION DES CRITÈRES	67
3.3 CRITÈRES UTILISÉES.....	67
3.3.1 Transmissivité.....	67
3.3.2 Épaisseur d'altérites	67
3.3.3 Débit fissuré utile et Épaisseur fissurée utile.....	67
3.3.4 L'IDPR	68
3.3.5 Sources.....	68
3.3.6 BFI	68
3.3.7 Failles	68
3.3.8 Pluviométrie	69

3.4 RÉSULTATS	69
3.4.1 Cartographie des critères	69
3.4.2 Validation des résultats	72
3.5 CONCLUSION CHAPITRE 3	74
4. Sécheresses : historique, impacts et évolutions	75
4.1 ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES.....	75
4.1.1 Objectifs.....	75
4.1.2 Méthodologie	75
4.1.3 Résultats – Climat	77
4.1.4 Facteurs explicatifs des oscillations de précipitations	79
4.1.5 Résultats – eaux souterraines – Échelle locale.....	81
4.1.6 Résultats – eaux souterraines – Échelle régionale	85
4.1.7 Résultats – ressources superficielles	88
4.1.8 Limites de la méthodologie mise en œuvre.....	89
4.2 RECONSTRUCTION LONG TERME DE L'ÉVOLUTION DES RESSOURCES - CONSTRUCTION D'UNE CHRONIQUE DE RÉFÉRENCE	90
4.2.1 Cas de l'Aulne.....	90
4.2.2 Cas de l'Arguenon	93
4.2.3 Cas de la Vilaine.....	93
4.2.4 Comparaison des variations d'anomalies des cours d'eau	95
4.2.5 Analyse à l'échelle régionale des évolutions des ressources superficielles	95
4.3 COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS TYPES DE RESSOURCES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE.....	100
4.4 AMPLITUDE DE LA RECHARGE	101
4.5 DÉCALAGE TEMPOREL	104
4.5.1 Objectif.....	104
4.5.2 Méthodologie	104
4.5.3 Résultats.....	104
4.6 CONCLUSIONS CHAPITRE 4.....	108
5. Influence du climat et de la disponibilité de la ressource sur la répartition spatiale et temporelle des prélèvements.....	109
5.1 INTRODUCTION.....	109
5.2 MÉTHODOLOGIE	111
5.2.1 Relations entre climat et sollicitation de la ressource	111
5.2.2 Dynamique annuelle de la ressource	111
5.2.3 Données nécessaires	111
5.2.4 Site d'étude.....	112
5.3 RÉSULTATS – DYNAMIQUE PLURIANNUELLE DES PRÉLÈVEMENTS ET RELATIONS AVEC LE CLIMAT	112
5.4 VULNÉRABILITÉ DE LA RESSOURCE EXPLOITÉE EN FONCTION DE LA DISPONIBILITÉ DE LA RESSOURCE NATURELLE	118
5.4.1 Objectifs.....	118
5.4.2 Méthodologie	119
5.4.3 Variabilité des niveaux piézométriques	120
5.4.4 Variation des volumes distribués sur la ressource de sécurisation du SMA.....	122

5.4.5 Lien entre production et disponibilité des ressources – Fonctionnement par type de ressources - Cas de la CCDzCO	122
5.4.6 Lien entre production des ressources et disponibilité - Cas des ressources mixtes - CCHPB	126
5.4.7 Vulnérabilité des ressources par typologies	129
5.5 CARTOGRAPHIE DU LIEN ENTRE ACHAT AU SMA ET CYCLES CLIMATIQUES	133
5.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 4	138
6. Conclusion générale	141
7. Références	145
8. Annexes	151

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004)	24
Illustration 2 :	Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (Mougin et al., 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6 089 forages.	25
Illustration 3 :	Schéma conceptuel des aquifères de socle Bretons (Schroëtter et al., 2020)	26
Illustration 4 :	Localisation et géologie des piézomètres du réseau piézométrique de Bretagne. Source : SIGES Bretagne	27
Illustration 5 :	Carte de répartition des données de paramètres hydrodynamiques sur la Bretagne bancarisées en 2023 (Source : SIGES Bretagne).....	28
Illustration 6 :	Log géologique de la Bretagne avec transmissivité et emmagasinement associés à chaque lithologie.	29
Illustration 7 :	Distributions de transmissivités par ensembles géologiques	30
Illustration 8 :	Transmissivités moyennes et médianes par ensembles géologiques et âges	31
Illustration 9 :	Densité de forage à l'échelle de la région Bretagne	31
Illustration 10 :	Débit instantanés mesurées à l'échelle de la Bretagne (Schroëtter et al., 2020).....	32
Illustration 11 :	Densité de sources et contours des principales formations géologiques au 1/1 000 000.	33
Illustration 12 :	Positionnement des PPC dans le sud Finistère en lien avec la topographie et la géologie.....	33
Illustration 13 :	Position des captages d'eau souterraine en Bretagne.	34
Illustration 14 :	Débit moyen journalier des sites AEP par nature et âge.....	35
Illustration 15 :	Cartographie de l'épaisseur des altérites en place (m) – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)	36
Illustration 16 :	Épaisseur du milieu fissuré utile calculé par régressions successives (Mougin et al., 2008)	37
Illustration 17 :	Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée. Carte principale : débit du milieu fissuré utile. En rouge orangé les secteurs défavorables et en bleu les secteurs les plus favorables – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)	38
Illustration 18 :	Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)	39
Illustration 19 :	Cartographie de l'inertie du milieu physique souterrain, en bleu les secteurs où l'inertie est faible, en orange et rouge les secteurs où l'inertie est forte – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)	40
Illustration 20 :	Calcul du BFI sur l'Horn (Année 2018).....	41
Illustration 21 :	Regroupements lithologiques réalisés à partir la carte géologique de la France au millionième (BRGM).....	42
Illustration 22 :	Spatialisation des BFI calculés	43
Illustration 23 :	Bassins versants bretons classés par BFI et pourcentages des catégories géologiques associées	44
Illustration 24 :	Relation entre BFI et % de lithologie	45
Illustration 25 :	BFI par lithologie pour les lithologies couvrant plus de 55 % de la surface des bassins.....	45
Illustration 26 :	Prédictions de probabilité d'intermittence des cours d'eau – Snelder et al., 2013.....	46

Illustration 27 : Variations piézométriques aux piézomètres de Louvigné-du-Désert - BSS000TRGE (en haut) et Spézet – BSS000XDRF (en bas)	47
Illustration 28 : Comparaison des variations de niveau sur une sélection de piézomètres	48
Illustration 29 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landrévarzec avec en rouge la médiane, en bleu la moyenne et en vert une année sélectionnée (2012). Les zones grises représentent les minimum et maximum et les quartiles des valeurs.	48
Illustration 30 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des 52 piézomètres de Bretagne. La moyenne de l'ensemble des piézomètres est présenté en rouge.	49
Illustration 31 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur (Est bleu – Ouest rouge)	49
Illustration 32 : Décomposition des moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne. En haut (bleu) piézomètres de l'est Bretagne, au milieu (vert) piézomètres du centre et en bas (rouge) piézomètres de l'ouest.	50
Illustration 33 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des précipitations (PPT) sur 52 stations de Bretagne classées d'est en ouest par code couleur (Est bleu – Ouest Rouge).....	51
Illustration 34 : Moyennes mensuelles (centrée réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur (est bleu – ouest Rouge)	51
Illustration 35 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés par lithologie. De haut en bas : schistes et grès paléozoïques (vert foncé), granites (rouges), schistes briovériens (vert clair) et micaschistes (bleu).....	53
Illustration 36 : Localisation des piézomètres et codes de bassin associés	54
Illustration 37 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres situés dans les formation9 des roches plutoniques hercyniennes (en rouge) et schistes paléozoïques du Finistère (en orange). Deux points aux dynamiques différentes dans les roches plutoniques hercyniennes (Bignan et Plougouven) sont isolées en noir. ..	54
Illustration 38 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des piézomètres situés dans les formations des roches plutoniques cadomiennes (violet), schistes briovériens (vert clair) et schistes paléozoïques d'Ille-et-Viliane.	55
Illustration 39 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) des piézomètres situés dans les bassins tertiaires.	55
Illustration 40 : Localisation des stations hydrologiques utilisées	56
Illustration 41 : Moyennes mensuelles des débits (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne classés par position géographique (Est bleu – Ouest Rouge)).	56
Illustration 42 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) des cours d'eau de Bretagne classés par BFI (en bleu BFI important – Fort soutien d'étiage ; en rouge BFI faible – Faible soutien d'étiage).....	57
Illustration 43 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne décomposés par lithologie. Classe plutonique et métamorphique.....	57
Illustration 44 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne décomposés par lithologie. Classe sédimentaire.....	57
Illustration 45 : Chronique piézométrique (en haut) et périodogramme (en bas) pour le piézomètre de Spézet (29) présentant des cycles annuels.....	58
Illustration 46 : Chronique piézométrique (en haut) et périodogramme (en bas) pour le piézomètre de Louvigné-du-Désert (35) présentant des cycles pluriannuels	59
Illustration 47 : Cartographie des périodes secondaires observées sur les chroniques piézométriques sur fond de carte géologique simplifiée	59
Illustration 48 : Ratio de l'intensité de la période secondaire sur le cycle annuel en fonction de la période	60

Illustration 49 : Intensité des cycles pluriannuels. Les chiffres en étiquettes indiquent la valeur de la période secondaire.	60
Illustration 50 : Sites où les cycles secondaires sont les plus marqués. Les valeurs du piézomètre de Theix semblent être affectées par des éléments non naturels (pompages) et peut être exclu.....	61
Illustration 51 : Données utilisées pour la réalisation de la cartographie de critères	69
Illustration 52 : Cartographie de la compilation des critères cumulés favorables à la présence d'eau souterraine. Le nombre de critères disponibles est présenté sur l'encart.	71
Illustration 53 : Comparaison de la cartographie de critères avec les positionnements des captages AEP souterrains	72
Illustration 54 : Ratio de distribution des captages AEP et des surfaces des formations géologiques par critères (Données normalisées par le nombre total d'AEP et la superficie de la région).....	73
Illustration 55 : Décomposition des chroniques de débit du Néal à Médréac (J0626610) avec en haut les données brutes journalières (en m ³ /s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge).....	76
Illustration 56 : Propagation des anomalies de précipitations dans le cycle hydrologique (de haut en bas : Précipitations, ruissellement, humidité du sol, débit des cours d'eau et niveaux piézométriques). Extrait de Van Loon, 2015	77
Illustration 57 : Évolution de l'ETP à Landivisiau (1989 - 2020) et Louvigné-du-Désert (2005-2020). En haut en noir les données brutes (en mm/jour) ; en bas en rouge les tendances calculées à partir de ces données.	78
Illustration 58 : Tendances d'évolution de l'ETP à Landivisiau, Quimper, Brest et Louvigné-du-Désert (période 2005 -2020). Les courbes en pointillées représentent les stations proches de la côte.	78
Illustration 59 : Évolution des précipitations à Landivisiau (1989 - 2020) et Louvigné-du-Désert (2005-2020). En haut en noir les données brutes (en mm/jour) ; en bas en rouge les tendances calculées à partir de ces données.	79
Illustration 60 : Tendances d'évolution des précipitations à Quimper et Louvigné-du-Désert (période 2005 -2020).....	79
Illustration 61 : Corrélation entre NAO Hivernale précipitations et indices de sécheresse (Rust et al., 2018). Les couleurs chaudes indiquent une corrélation ; les couleurs froides, une anti-corrélation.	80
Illustration 62 : Comparaison entre anomalie de NAO (en noir) et Débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (en rouge).....	80
Illustration 63 : Comparaison des tendances d'évolution des précipitations (en pointillés) et de la piézométrie (traits pleins) à Landudec (en rouge en haut) et Louvigné-du-Désert (en bleu en bas).....	81
Illustration 64 : Chronique piézométrique de Landudec (29)	82
Illustration 65 : Chronique piézométrique de Louvigné-du-Désert (35)	82
Illustration 66 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landudec et Louvigné-du-Désert. Les dégradés gris représentent les maximums et minimums ainsi que les quartiles. Les lignes rouges et bleues représentent respectivement les médianes et moyennes mensuelles et les lignes vertes les mesures piézométriques de l'année 2017	83
Illustration 67 : Comparaison des tendances d'évolution des précipitations-ETP (en pointillés) et de la piézométrie (traits pleins) à Landudec (en rouge en haut) et Louvigné-du-Désert (en bleu en bas).....	84
Illustration 68 : Comparaison des anomalies de précipitations, précipitation et ETP cumulées, anomalies piézométriques et de débit du cours d'eau.	84
Illustration 69 : Anomalies des variations piézométriques sur 50 piézomètres du réseau.	85

Illustration 70 : Chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (Est bleu – Ouest rouge).....	86
Illustration 71 : Différenciation des chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu (en haut) – ouest rouge (en bas)).....	87
Illustration 72 : Chroniques de précipitations normalisées (postes associés aux piézomètres de Bretagne) classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu – ouest rouge).....	88
Illustration 73 : Chroniques de débits des cours d'eau normalisées des stations hydrologiques de Bretagne classées d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu – ouest rouge).....	89
Illustration 74 : Chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne sur leur chronique complète classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (Est bleu – Ouest rouge)	90
Illustration 75 : Décomposition des chroniques de débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (J3811810) (29) avec en haut les données brutes journalières et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).	91
Illustration 76 : Identification des périodes de sécheresses sur la chronique de débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (29).	91
Illustration 77 : Hydrographes unitaires de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou pour les années 1976, 1989, 2003, 2011. Le débit a pu être influencé par le soutien d'étiage opéré par le réservoir Saint-Michel	92
Illustration 78 : Décomposition des chroniques journalières de débit de l'Arguenon avec en haut les données brutes et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).	93
Illustration 79 : Décomposition des chroniques journalières de débit de la Vilaine à Vitré avec en haut les données brutes et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).....	94
Illustration 80 : Identification des périodes de sécheresses et des périodes humides sur la chronique de la Vilaine à Vitré.	94
Illustration 81 : Comparaison des anomalies des chroniques journalières de débit de L'Aulne, L'Arguenon et la Vilaine	95
Illustration 82 : Tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région. Les traits gris correspondent à chacune des chroniques individuelles. La courbe rouge représente la moyenne des 104 points de mesure.	96
Illustration 83 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région d'est (bleu) en ouest (rouge)	97
Illustration 84 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région d'est (bleu) en ouest (rouge) – Positions extrêmes	97
Illustration 85 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région en fonction du BFI (bleu, BFI important ; rouge, BFI faible)	98
Illustration 86 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région en fonction de grands ensembles géologiques (bleu, proportion de roches plutoniques et métamorphiques importante ; rouge, proportion de roches sédimentaires importante)	99
Illustration 87 : Compilation des anomalies des données moyennes de 50 stations météorologiques (PPT et ETP), 104 cours d'eau et 50 piézomètres sur la Bretagne sur la période 2005-2021.	100
Illustration 88 : Compilation des anomalies des données de 50 stations météorologiques (PPT et ETP), 104 cours d'eau et 50 piézomètres sur la Bretagne sur la période 2005-2021.	101

Illustration 89 : Évolution du battement de nappe, des maxima et minima annuels	102
Illustration 90 : Pentas de régressions linéaires pour les évolutions du battement de nappe et les maxima et minima annuels par site	103
Illustration 91 : Effectifs présentant des hausses ou des baisses du battement de nappe, des maxima et minima annuels.....	103
Illustration 92 : Identification des dates de début de recharge (point bleu) sur le piézomètre de Pleurtuit (35)	104
Illustration 93 : Tendence d'évolution des dates de début de recharge sur le piézomètre de Pleurtuit (35)	105
Illustration 94 : Tendence d'évolution des dates de recharges estimées	106
Illustration 95 : Tendances d'évolution des dates de recharge en fonction d'un gradient est-ouest.	107
Illustration 96 : Représentation cartographique des tendances d'évolution des dates de début de recharge (en bleu recharge plus précoce en rouge plus tardive).....	107
Illustration 97 : Cartographie de la zone d'étude des 6 communautés de communes et identification des ressources. Les ressources propres du SMA sont identifiées par des points de plus gros diamètre.	112
Illustration 98 : Évolution temporelle des volumes mis en distribution par le SMA sur la période 1973-2020. En Haut : Volumes mensuels distribués ; Centre : en noir anomalie mensuelle et en rouge anomalie mensuelle lissée. Bas : Evolution du nombre de communes connectées.....	113
Illustration 99 : Évolution temporelle des volumes mis en distribution par le SMA sur la période 1983-2020. En Haut : Volumes mensuels distribués ; Centre : en noir anomalie mensuelle et en rouge anomalie mensuelle lissée (sur 12 mois).	114
Illustration 100 : Dates des minima et maxima sur les volumes distribués par le SMA (Période 1983-2021).....	114
Illustration 101 : Anomalies de distribution d'eau par le SMA et précipitations à la station de Brest Guipavas (29) (Sur cette figure, les volumes distribués les plus importants sont les anomalies négatives).....	115
Illustration 102 : Anomalies calculées sur le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (J3811810) et distribution d'eau par le SMA. En haut : Les anomalies positives représentent pour le débit de l'Aulne les débits forts et les volumes distribués les plus importants et inversement. En bas : les anomalies positives représentent pour le débit de l'Aulne les débits forts et les volumes distribués les plus faibles et inversement.	115
Illustration 103 : Comparaison des anomalies de débit journalier sur les principaux cours d'eau de la zone étudiée (Aulne, Odet, Langelin et Goyen).....	116
Illustration 104 : Corrélogramme entre prélèvements du SMA et débit de l'Aulne. Les abscisses représentent le décalage temporel et les ordonnées la valeur de corrélation. Les points rouges indiquent les plus fortes corrélations et les points bleu les plus fortes anti-corrélation	117
Illustration 105 : Résultats de la décomposition saisonnière additive pour les volumes distribués par le SMA. De haut en bas : Signal brut, composante tendancielle, composante saisonnière, part aléatoire.	117
Illustration 106 : Importance de la composante tendancielle sur les volumes distribués par le SMA.	118
Illustration 107 : Variations de niveau piézométrique (en m NGF) au piézomètre de Landrévarzec (Source : ADES)	120
Illustration 108 : Variations mensuelles moyennes de niveau au piézomètre de Landrévarzec (BSS000XCWZ).....	120
Illustration 109 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landrévarzec (2005-2020).....	121

Illustration 110 : Anomalie mensuelle lissée calculée pour la piézométrie à Landrévarzec et les précipitations à Quimper	121
Illustration 111 : Moyenne mensuelle de production pour le SMA en m ³ (Données 1983-2020)	122
Illustration 112 : Prélèvements moyens par ressources sur la CCDzCo (Données 2011-2020)	123
Illustration 113 : Comparaison entre les niveaux piézométriques annuels et les productions par site de différents types. L'année 2011 représente l'année la plus sèche de la série temporelle (2011-2020) et l'année 2012 l'année la plus humide. De haut en bas sont présentés : les niveaux au piézomètre de Landrévarzec, la production de Kergaouledan (puits), de Keratry (superficielle) et de Botcarn F1 (forage). Les lignes rouges et bleues représentent respectivement les médianes et moyennes mensuelles et les lignes vertes la production de l'année mentionnée	124
Illustration 114 : Écart par rapport aux normales lissées sur 12 mois des précipitations (en noir), d'une ressource de type puits (bleu), d'une ressource superficielle (rouge) et de la ressource souterraine profonde de type forage (vert).	125
Illustration 115 : Écart par rapport aux normales lissées sur 12 mois d'une ressource de type puits (bleu) et d'une ressource superficielle (rouge).	126
Illustration 116 : Variations annuelles des volumes distribués (en haut), produits (au milieu) et importés (en bas) sur le site de Saint Ronan. Échelle verticale en m ³ /jour.....	127
Illustration 117 : Variations annuelles des volumes distribués sur le site de Kergamet.	127
Illustration 118 : Comparaison entre la production du site de Saint Ronan et les niveaux piézométriques annuels à Landrévarzec. De haut en bas : année 2011, 2016, 2014	128
Illustration 119 : Variation de volumes produits mensuels à l'échelle de chaque ouvrage des 3 sites AEP de la CCHPB. Exemples des champs captants de Saint Avé et Kergamet (uniquement cumul des ouvrages pour Saint Ronan).	129
Illustration 120 : Données utilisées.....	130
Illustration 121 : Évolution annuelle de la production des ressources superficielles	130
Illustration 122 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine de sub-surface (puits)	131
Illustration 123 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine profondes (forages).....	131
Illustration 124 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine mixtes (surface + forage)	131
Illustration 125 : Ratios de production en septembre par rapport à la production de février et valeurs calculées. Les valeurs sont présentées sur une échelle logarithmique.	132
Illustration 126 : Haut : niveaux piézométriques à Landrévarzec des années 2011 et 2012 par rapport à l'historique des mesures ; Bas : Comparaison des productions par type de ressource en 2011 et 2012.....	133
Illustration 127 : Corrélations entre les volumes distribués par le SMA et le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou.....	134
Illustration 128 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats d'eau potable au SMA pour la commune de Le Faou	135
Illustration 129 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats d'eau potable au SMA pour la commune de Cast.....	135
Illustration 130 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les communes (les zones non colorées sont desservies par les syndicats)	136
Illustration 131 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les Syndicats ..	136
Illustration 132 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les Syndicats et les communes.....	137

Illustration 133 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA du Syndicat de Clohars-Fouesnant. En haut, période 1973-2017 en bas, période 2000-2017.....	138
Illustration 134 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de l'altitude du piézomètre	158
Illustration 135 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de l'épaisseur des altérites au point de foration. En haut, échelle de couleur 0-50 m ; en bas échelle reserrée sur la plage la plus représentée (0-20m) .	158
Illustration 136 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur du haut des crépines.	159
Illustration 137 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur des premières arrivées d'eau	159
Illustration 138 : Carte de critère des transmissivités.....	162
Illustration 139 : Carte de critère des altérites.....	162
Illustration 140: Carte de critère des débits du milieu fissuré utile.	163
Illustration 141: Carte de critère de l'épaisseur du milieu fissuré utile	163
Illustration 142 : Carte de critère de l'IDPR.	164
Illustration 143 : Carte de critère des sources.....	164
Illustration 144 : Carte de critère des BFI (Base Flow Index).....	165
Illustration 145: Carte de critère des failles.	165
Illustration 146 : Carte de critères des précipitations efficaces.....	166
Illustration 147 : Écarts aux normales par âge des formations plutoniques.....	168
Illustration 148 : Écarts aux normales par âge des formations métasédimentaires.....	169
Illustration 149 : Moyenne journalière mensuelle de production (m ³ /j) des deux principaux sites de la CC, Kenagoff en haut et Poraon en bas.....	172
Illustration 150 : Ecarts par rapport aux normales mensuelles des précipitations à Brest, production à Kernagoff et Poraon et débit de l'Aulne à Châteauneuf du Faou.....	173
Illustration 151 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour les années 2011 (en haut) et 2017 (en bas).	173
Illustration 152 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour l'année 2012.....	174
Illustration 153 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour l'année 2015.....	174
Illustration 154 : Données utilisées pour l'analyse d'évolution des tendances sur le site de l'Aff.....	176
Illustration 155 : Anomalie de débits journaliers aux stations de mesures de l'Aff	177
Illustration 156 : Anomalie de débits journaliers aux stations de mesures de l'Aff et de prélèvements sur le site – Période 2000-2021 – la courbe en pointillés représente l'évolution des prélèvements sur le site d'exploitation.....	177
Illustration 157 : Corrélation entre anomalies des deux stations de mesure hydrologique de l'Aff. Encart principal avec l'ensemble des valeurs. Sur la droite en rouge : période 2012-2020 isolée ; en noir : période 1968-2011 isolée	178
Illustration 158 : Anomalies de prélèvements, de précipitations, niveau piézométrique à Paimpont, débit de l'Aff au Pont du secret.....	178
Illustration 159 : Corrélations entre anomalies de précipitation et variations de prélèvements	179
Illustration 160 : Corrélations entre anomalies de débit de l'Aff au Pont du Secret et variations de prélèvements	179

Illustration 161 : Anomalies de prélèvement à l'échelle du site et pour chacun des forages pris individuellement	180
Illustration 162 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE3 et évolution des niveaux maxima et minima.	180
Illustration 163 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE4 et évolution des niveaux maxima et minima.	180
Illustration 164 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE7 et évolution des niveaux maxima et minima.	181

Liste des annexes

Annexe 1 : Distribution des transmissivités par lithologies et âges	153
Annexe 2 : Illustration des éléments complémentaires de la section 2.5 relative à la dynamique annuelle des piézomètres	157
Annexe 3 : Cartographie des critères	161
Annexe 4 : Tendances d'évolution des cours d'eau en fonction de la lithologie et de l'âge des formations.....	167
Annexe 5 : Analyses des données de production sur les autres Communautés de Communes (Complément du chapitre 4)	171
Annexe 6 : Analyse de tendances à l'échelle du site d'exploitation – Exemple de l'Aff (56)	175

1. Introduction

Les ressources en eau sont de plus en plus sous pression à l'échelle mondiale. Localement, à l'échelle de la Bretagne, le même constat est fait notamment lors de périodes de sécheresses semblant à la fois plus fréquentes et plus intenses. Les spécificités des aquifères de socle nécessitent le développement de méthodes et connaissances adaptées pour pouvoir gérer la ressource à la fois sur le long terme mais aussi dans les cas de sécheresses ponctuelles de plus en plus fréquentes.

Les ressources de sub-surface assurent la pérennité des cours d'eau en période d'étiage mais restent en prise avec les forçages climatiques et sont particulièrement vulnérables dans les zones d'aquifères de socle (Liesch and Wunsch, 2019). C'est par exemple le cas de la Bretagne où le climat océanique apporte des précipitations régulières mais où le socle cristallin n'offre que des capacités de stockage limitées pour un enjeu fort de pression sur la ressource (Bevillon and Thomas, 2016).

Dans un contexte d'aquifères de socle, et plus spécifiquement dans le cas de la Bretagne, les capacités de gestion de la ressource nécessitent de répondre à un certain nombre de questions scientifiques et opérationnelles parmi lesquelles :

- comment se traduit la variabilité climatique régionale sur les ressources en eau ?
- comment quantifier, à une échelle régionale dans un contexte d'hétérogénéité climatique et géologique, l'évolution des ressources ?
- comment développer les connaissances sur la dynamique des ressources et leurs interactions dans un cadre homogène pour les rendre accessibles et permettre une gestion multi-échelle ?
- comment prendre en compte la saisonnalité de la disponibilité de la ressource et des prélèvements ainsi que les variations multi-annuelles ?
- ces questions se heurtent actuellement à des verrous techniques et scientifiques liés à :
 - l'hétérogénéité des connaissances ;
 - l'hétérogénéité des mesures ;
 - l'hétérogénéité des acteurs et des besoins ;
 - la disponibilité et l'échange des données ;
 - le besoin d'amélioration de la communication entre acteurs.

Ces questions et verrous opérationnels sont à lever pour permettre une meilleure gestion à court et long terme dans un contexte d'évolution démographique et climatique.

Le climat de la Bretagne, tempéré océanique, présente une grande diversité régionale avec une tendance maritime, limitée à quelques dizaines de kilomètres le long des côtes. Dans les terres, la perte progressive de l'influence de l'océan occasionne une plus grande amplitude thermique et des précipitations moindres à l'exception des monts d'Arrée. Cette diversité climatique est un élément qui participe aux différences de vulnérabilité aux sécheresses observées à l'échelle du territoire (Lamy, 2013). Le sud de la Bretagne connaît ainsi des épisodes secs plus intenses et plus fréquents, par rapport au nord de la région où les sécheresses sont moins intenses et un peu plus rares (Dubreuil, 1994; Dubreuil *et al.*, 2018; Lamy, 2013; Lamy and Dubreuil, 2013). Des travaux prospectifs (Lamy, 2013) montrent que ces phénomènes et différenciations au sein du territoire tendront à s'amplifier avec le temps que ce soit pour la recharge ou lors les sécheresses.

Si les connaissances sur l'impact du changement climatique et un recul historique existent sur les températures et précipitations, leur impact sur les ressources en eau reste relativement peu connu et reste largement à explorer, de même que l'historique de la variabilité des stocks. Des études existent sur les variations de cours d'eau notamment pour leurs débits (Boé and Habets, 2014 ; Ducharne *et al.*, 2010) ou en lien avec leur évolution géochimique (Gascuel-Oudou *et al.*, 2010 ; Guillaud and Bouriel, 2006) mais localement aucune étude ne précise l'historique et les variations de stock d'eaux souterraines. Ces études sont plus courantes dans les aquifères sédimentaires de plus large extension (Jackson *et al.*, 2011 ; Saltel and Bourguin, 2016).

La structure des aquifères de socle, majoritaires en Bretagne, dépend principalement des propriétés d'altération des roches. Si les connaissances sur le développement de ces aquifères de socle ont beaucoup évolué (Acworth, 1987; Chilton and Foster, 1995; Dewandel *et al.*, 2006; Lachassagne *et al.*, 2021; Wright, 1992; Wyns *et al.*, 2004) avec des quantifications de leurs propriétés hydrodynamiques avec la profondeur (Boisson *et al.*, 2015; Dewandel *et al.*, 2006) ou de leur variabilité spatiale (Dewandel *et al.*, 2012; Guihéneuf *et al.*, 2014), leur généralisation reste complexe. Dans le cas des régions de socle cristallin, les ressources en eaux souterraines sont considérées comme limitées aux horizons altérés (Wyns, 2004; Dewandel, 2006; Mougou, 2008), aux grandes failles et aux zones densément fracturées (Leray *et al.*, 2013; Roques *et al.*, 2016; Schroëtter *et al.*, 2020).

À l'échelle régionale, de nombreux travaux ont été conduits pour quantifier les stocks dans les horizons d'altération (Mougou *et al.*, 2008) et dans des structures de failles ou contacts géologiques (Leray *et al.*, 2013; Roques *et al.*, 2016; Schroëtter *et al.*, 2020). Malgré ces travaux, la régionalisation de ces propriétés reste difficile à appréhender (Dewandel *et al.*, 2021, 2012; Gleeson *et al.*, 2011) et fait toujours l'objet de travaux (Thèse de Nicolas Cornette BRGM-OSUR ; Cornette, 2022).

Cette hétérogénéité géologique, rendant complexe l'évaluation des ressources, mais peut aussi être un atout dans sa gestion par des remplissages et une résilience des aquifères différents permettant de répartir la disponibilité de la ressource dans le temps (Hartmann *et al.*, 2017).

Même si en comparaison des grands aquifères sédimentaires, les ressources des aquifères de socle sont plus limitées, ce qui les rend plus vulnérables, ils sont particulièrement importants à l'échelle mondiale (Gleeson *et al.*, 2011; Gustafson and Krasny, 1994) et ils régulent le cycle de l'eau à l'échelle régionale. Face à cette vulnérabilité, les aquifères de proche surface offrent une capacité de stockage qui filtre les événements extrêmes tout en restant vulnérables aux évolutions long-terme du forçage climatique (Hartmann *et al.*, 2017; Taylor *et al.*, 2013). Les recherches récentes ont montré que l'infiltration y est largement dominante sur le ruissellement. En bilan annuel, l'infiltration est en moyenne trois fois supérieure au ruissellement (Marçais, 2018; Mougou *et al.*, 2008). Ces aquifères de région de socle même faiblement capacitifs (stocks d'eau limités) soutiennent les ressources en eau superficielles à travers les saisons. Bien que le lien entre ressources souterraines et cours d'eau soit avéré, les dynamiques et résilience restent peu quantifiées à l'échelle régionale.

L'augmentation de possibles sécheresses peut avoir d'importantes répercussions sur les ressources en eau au travers de l'irrigation ou de l'élevage, avec des reports estivaux des prélèvements privés sur forage agricole vers le réseau d'eau potable, sur lequel un accroissement des sollicitations par l'agriculture est observé sans être totalement quantifié (report des consommations depuis les forages particuliers vers le réseau public lorsque ces ressources ont vu leur productivité baisser).

Comme la géologie et le climat, les demandes en eau sont variables en différents points du territoire. Si les demandes en eau sont affectées par le tourisme en été sur la côte bretonne

et par l'augmentation de la population autour des grandes agglomérations, elles sont impactées par l'irrigation et l'élevage sur une large partie du territoire. En plus de cette variabilité spatiale, une forte saisonnalité de ces prélèvements se reporte sur la ressource. Le niveau des ressources en eau n'a pas la même importance tout au long de l'année et l'évolution des ressources et des prélèvements en périodes de basses eaux n'est actuellement pas pris en compte dans les bilans régionaux.

Le niveau des ressources en eau est dépendant des précipitations récentes mais aussi de leur fréquence, amplitude et antécédents. À l'heure actuelle, la dynamique des ressources, si elle est suivie grâce au réseau piézométrique (Salquèbre *et al.*, 2018) et stations hydrologiques, n'a pas été clairement définie sur le long terme. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour quantifier à partir de mesures piézométriques la résilience des aquifères en se basant sur les mécanismes de recharge et leur fréquence (Jiménez-Martinez *et al.*, 2013) ou l'analyse de mesures long terme qui permet d'identifier les variations de stocks (Boutt, 2018; Boutt *et al.*, 2010; Weider and Boutt, 2010). Ces analyses peuvent permettre de connaître le déphasage entre recharge et vidange des ressources, qu'il s'agisse d'aquifères ou de cours d'eau. Ces analyses peuvent être mises en parallèle avec les datations des eaux existantes (Ayraud *et al.*, 2008; Kolbe *et al.*, 2016; Marçais *et al.*, 2015).

Les problèmes liés à la gestion de l'eau sont eux aussi complexes et les nombreux paramètres à prendre en compte, incluant des facteurs climatiques, géologiques, géomorphologiques ((Price, 2011; Taylor *et al.*, 2013)), économiques et humains (Rinaudo *et al.*, 2012; Scanlon *et al.*, 2007), techniques tels que l'interconnexion des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP), avec une temporalité et des incertitudes importantes. Ces facteurs rendent les événements comme les sécheresses, difficiles à appréhender. Les prises de décisions devenant de plus en plus complexes, des outils doivent être développés pour aider cette prise de décision (Girard *et al.*, 2015; Lanini *et al.*, 2004) en interaction avec les différents acteurs (Montginoul and Rinaudo, 2009; Rinaudo and Garin, 2005).

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet « *De l'eau pour demain* ». Le projet a été financé par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, le Conseil Régional de Bretagne et le BRGM. Ce projet rassemble pour la première fois les trois syndicats départementaux d'eau potable de Bretagne (SMGEau 35, Eau du Morbihan et le SDAEP 22) ainsi que le Conseil Départemental du Finistère et le BRGM pour une réalisation technique commune. Il vise à apporter des éléments de connaissance et de compréhension sur l'impact du climat sur les ressources en eau de Bretagne. Au travers du projet « *De l'eau pour demain* », l'ensemble des acteurs du projet ont pour objectif de grouper leurs connaissances et compétences complémentaires pour élaborer un même socle permettant le développement de méthodes et procédures de gestion communes. Ceci doit amener à la sécurisation et la pérennité des ressources prélevées pour l'eau potable à l'échelle régionale et à proposer des méthodes et des outils généralisables.

Le projet comporte quatre volets. Le premier cherche à mieux connaître les consommations d'eau potable du réseau public. Le second est axé sur le fonctionnement actuel des ressources en eau de Bretagne et intègre à la fois des éléments sur les retenues d'eau et barrages, et des travaux sur la dynamique des nappes et leur exploitation. Le troisième volet vise à représenter les équilibres entre besoins et ressources en eau potable. Il est réalisé sur le territoire du syndicat mixte de l'Aulne dans le Finistère en collaboration avec le projet INTERREG Water for Tomorrow (Bourgeois *et al.*, 2023). Enfin, le quatrième volet cherche des solutions alternatives pour optimiser la gestion de la ressource au travers d'études de faisabilité sur la réutilisation des eaux traitées industrielles et le réaménagement de carrières. Le présent rapport est un élément du volet 2 du projet sur les ressources en eau. Les autres volets du projet font l'objet de rapports indépendants.

Dans le présent rapport sont étudiés, dans un premier temps les différences spatiales des propriétés des aquifères du territoire et l'évolution de la dynamique des ressources à l'échelle annuelle. Dans un second temps, les indicateurs issus d'études précédentes sont synthétisés dans une cartographie de la répartition de facteurs indiquant une favorabilité de ressources en eau à l'échelle du territoire. Dans un troisième temps, les dynamiques sur le long terme du lien entre climat, ressources superficielles et souterraines sont étudiées. Enfin, sur un territoire restreint du sud Finistère, le lien entre climat et impact sur l'exploitation des ressources est présenté.

2. Différenciation des propriétés hydrodynamiques des aquifères à l'échelle régionale – Dynamique annuelle

2.1 INTRODUCTION

Les propriétés hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement) des aquifères de socle sont difficilement quantifiables et généralisables à l'échelle régionale. De ce fait, à cette échelle les différenciations des propriétés hydrodynamiques entre les différentes lithologies des aquifères restent très peu connues. Cependant cette connaissance est essentielle à la fois pour la recherche de nouvelles ressources, pour l'anticipation de l'impact d'évènements climatiques (sécheresses) et pour la gestion des ressources, à la fois pour l'AEP mais aussi pour évaluer les risques de report de forages domestiques ou agricoles sur le réseau en eau potable (report des consommations depuis les forages particuliers vers le réseau public lorsque ces ressources ont vu leur productivité baisser). Les raisons de ces difficultés de généralisation sont multiples et proviennent à la fois d'une géologie contrastée, des propriétés des aquifères de socle issues de l'altération des roches (à la fois géochimique et structurale) et de l'hétérogénéité de ces formations dont la mesure peut être soumise à des effets d'échelle (Clauser, 1992).

La résilience des aquifères est dépendante à la fois de leur stock et de leur capacité d'écoulements mais ces éléments sont soumis aux aléas climatiques et peuvent avoir une variabilité aussi bien spatiale et temporelle. Jusqu'à présent, ces éléments ont été évalués d'un point de vue statique mais il n'existe pas à l'heure actuelle d'évaluation dynamique de ces ressources et de leurs interactions.

Pourtant, la capacité des aquifères et des différentes lithologies à contribuer au débit des cours d'eau et aux ressources superficielles est un élément particulièrement important dans le contexte régional où une majorité des ressources exploitées pour l'AEP sont des ressources superficielles (prises d'eau en rivière, barrages) ou de proche surface. Il est donc nécessaire de quantifier la dynamique de vidange annuelle des aquifères et leurs capacités à stocker sur des temps longs des ressources. Or l'impact des différences de stock et de perméabilités sur la résilience des ressources reste inconnu à l'échelle régionale. Cette question devient de plus en plus prégnante en raison des évolutions climatiques existantes et à venir.

Plusieurs projets menés par le BRGM ont été réalisés à l'échelle de la région afin de mieux quantifier les ressources en eau. Le projet SILURES Bretagne (Mougin *et al.*, 2008) a permis une cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau peut être encouragée, le projet ANAFORE (Schroëtter *et al.*, 2020) a permis de mieux appréhender les zones de recherche de ressources en eau souterraine et de comprendre la structure des aquifères sollicités, le projet MORPHEUS (Dewandel *et al.*, 2021, 2020) a permis de développer des méthodes pour la prise en compte de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques des aquifères à l'échelle de bassins versants. Une majorité de ces projets prennent en compte des conditions statiques et nécessitent d'être complétés par des données dynamiques.

Dans le cadre du projet « *De l'eau pour demain* », l'objectif est de définir et spatialiser la dynamique des ressources en eau afin d'évaluer, leur résilience et leurs comportements face à des évènements climatiques. Ces connaissances sont un prérequis pour une optimisation de gestion de la ressource et servira de base d'observation pour l'évaluation de modèles prévisionnels d'évolution des ressources.

2.2 FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES DE SOCLE

Régionalement le massif armoricain ne possède pas de grands aquifères et l'hydrogéologie est composée d'une multitude de petits aquifères locaux. Les capacités aquifères locales sont dépendantes de la lithologie, de l'altération et de la fracturation. Ces aquifères ont des extensions généralement limitées et des propriétés hydrodynamiques très hétérogènes pouvant varier sur plusieurs ordres de grandeurs à la fois pour la perméabilité (capacité conductrice) et l'emmagasinement (capacité de stockage).

En domaine de socle (granites et schistes), une structure d'aquifère stratiforme découlant de l'altération peut être décrite de la surface vers la profondeur par trois zones en fonction de l'altération et de la fracturation rencontrée (Illustration 1) :

- **les altérites** constituent un horizon meuble riche en argiles provenant de la décomposition *in situ* de la roche mère. En raison de sa composition argilo-sableuse, les altérites ont une porosité effective importante souvent comprise entre 3 et 10%. Elles sont donc souvent considérées comme ayant **un rôle capacitif**. En revanche leur conductivité hydraulique est généralement faible et est généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s ;
- en dessous, **l'horizon fissuré** se caractérise par une fissuration très dense dans les premiers mètres qui décroît par la suite avec la profondeur à partir d'un maximum obtenu à l'interface entre la base des altérites et l'horizon fissuré. Dans les roches isotropes (granitoïdes) ou à foliation verticale, cette fissuration est dominée par les fractures sub-horizontales. Cet horizon fissuré peut avoir localement une forte conductivité hydraulique et assure le **rôle transmissif de l'aquifère** ;
- en dessous de l'horizon fissuré, la roche saine n'est perméable que très localement à la faveur de fractures d'origine tectonique.

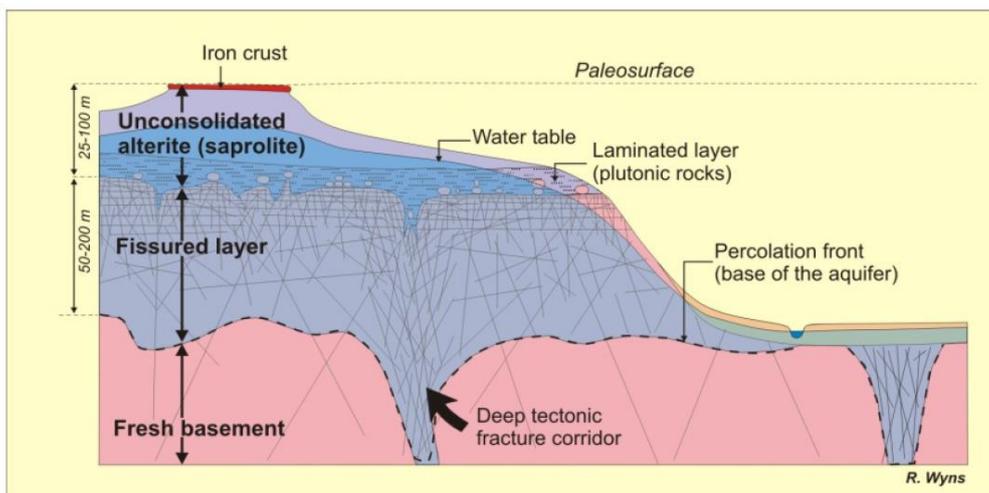


Illustration 1 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004)

Cette structuration du milieu implique une diminution de la perméabilité et de l'emmagasinement avec la profondeur (Boisson et al., 2015; Dewandel et al., 2006). Ceci se traduit par une diminution des débits instantanés par mètre linéaire avec la profondeur. La compilation des données bretonnes effectuées dans le cadre du projet SILURES Bretagne (Illustration 2) illustre ce comportement (Mougin et al., 2008a).

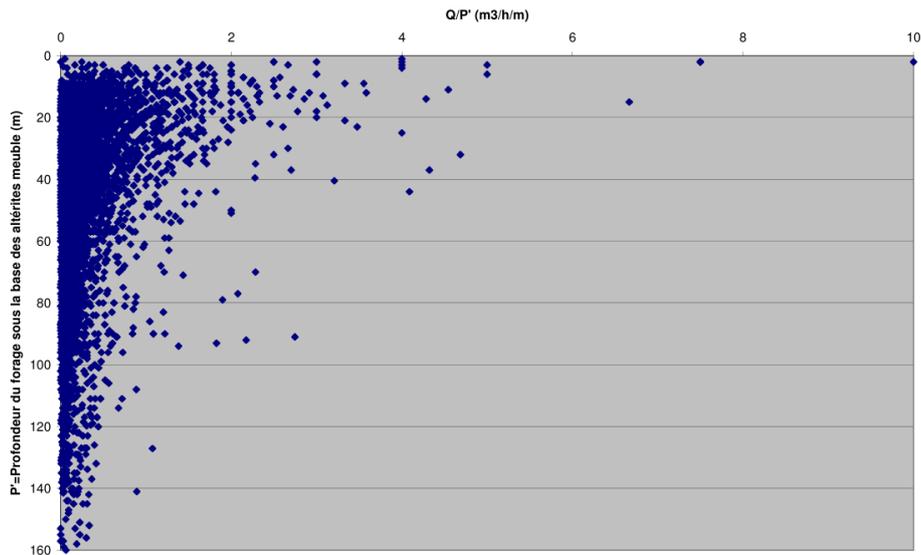


Illustration 2 : Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (Mougin *et al.*, 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6 089 forages.

En plus de ces horizons d'altération, les différents réservoirs peuvent être recoupés par des failles majeures ou des déformations liées à la tectonique ou au métamorphisme lors de la mise en place de plutons granitiques.

L'impact de la présence de failles sur le potentiel d'exploitation et sur la continuité des aquifères de socle est difficile à identifier *a priori* (Bense *et al.*, 2013). Dans certains cas, les failles sont faiblement perméables (Gleeson and Novakowski, 2009) et agissent comme des barrières hydrauliques. Dans d'autres situations, les failles favorisent la présence d'importants flux souterrains (Le Borgne *et al.*, 2006; Roques *et al.*, 2014). La présence de failles donne souvent lieu à des comportements hydrogéologiques complexes, provoqués par des combinaisons entre chemins d'écoulements locaux et régionaux, sans parler des interactions possibles avec des compartiments profonds (Jiménez-Martínez *et al.*, 2013; Roques *et al.*, 2014). La présence de failles d'échelle régionale peut donner lieu à des débits importants (ex : 110 m³/h en exploitation sur le site de Ploemeur Jiménez-Martínez *et al.*, 2013) mais ont souvent des comportements complexes avec des échanges entre écoulements souterrains et superficiels (ex : Site de Saint-Brice-en-Coglès, Roques *et al.*, 2014).

Les différents types d'aquifères et de contexte ont été synthétisés par (Schroëtter *et al.*, 2020), Illustration 3. Du fait de ces hétérogénéités, les propriétés de ces aquifères restent difficilement régionalisables.

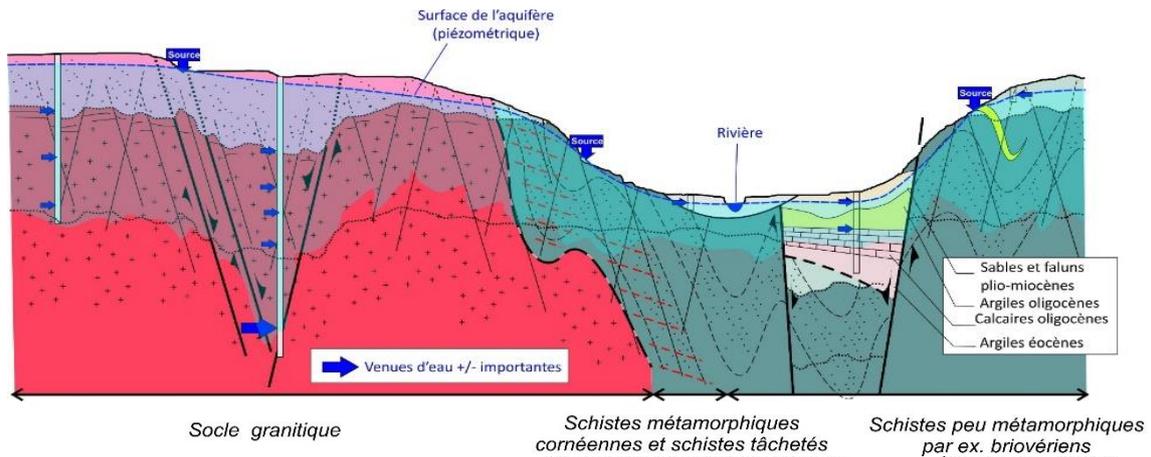


Illustration 3 : Schéma conceptuel des aquifères de socle Bretons (Schroëtter et al., 2020)

2.3 INDICATEURS SPATIALISÉS EXISTANTS EN LIEN AVEC LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES SOUTERRAINES

2.3.1 Le réseau de suivi piézométrique régional

En Bretagne, le niveau des nappes souterraines est suivi grâce à 52 piézomètres, de 30 mètres de profondeur en moyenne, qui mesurent en permanence au pas de temps horaire le niveau des nappes. Ces forages sont répartis sur l'ensemble de la région (16 dans le Finistère et 12 dans chacun des trois autres départements) de façon à couvrir les principales formations géologiques et hydrogéologiques existantes en Bretagne mais aussi pour prendre en compte les conditions climatiques très contrastées d'ouest en est et du littoral vers l'intérieur des terres. Une présentation plus détaillée est disponible sur le site internet du SIGES Bretagne (<https://sigesbre.brgm.fr/Reseau-piezometrique-regional.html>). Le réseau permet de suivre les niveaux sur l'ensemble du territoire depuis 2005 avec quelques points remontant aux années 1980 (encart Illustration 4).

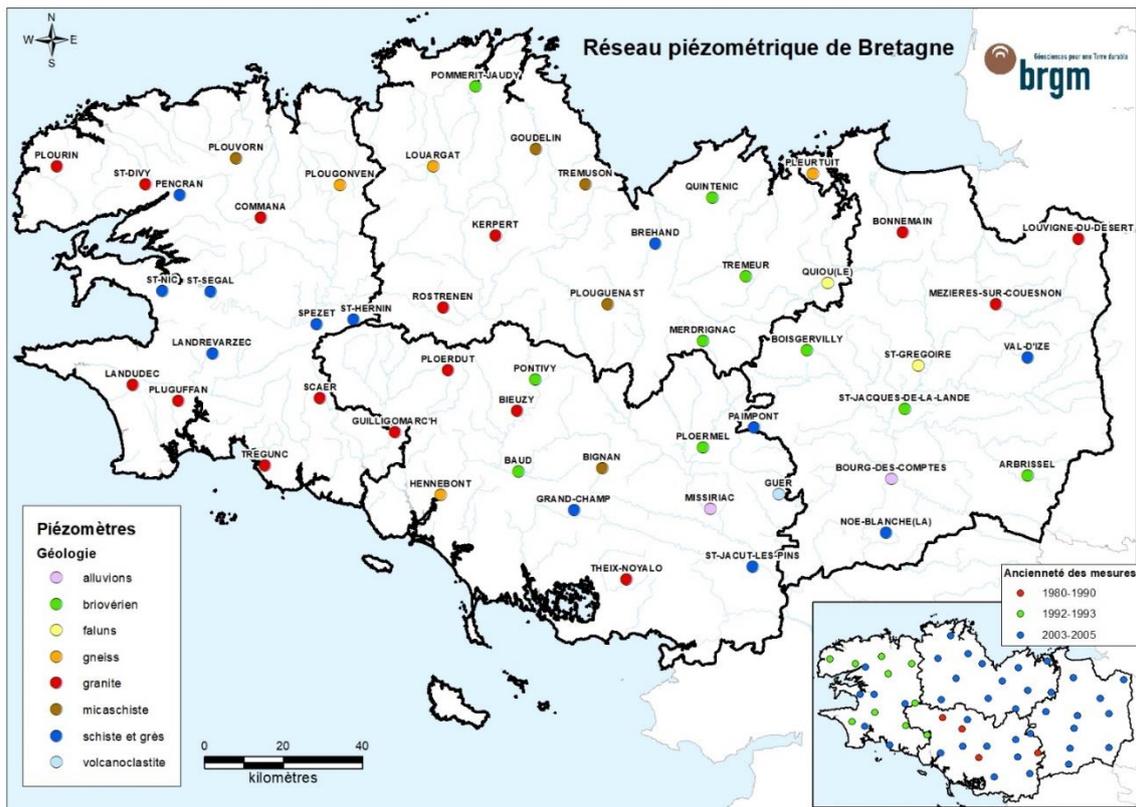


Illustration 4 : Localisation et géologie des piézomètres du réseau piézométrique de Bretagne.
Source : SIGES Bretagne

2.3.2 Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques des aquifères tels que l'emmagasinement (capacité de stockage) et les capacités à conduire les écoulements (transmissivité et perméabilité) sont à l'échelle régionale peu connus et difficilement généralisables.

Malgré le référencement de 19 684 forages (ouvrages issus de la Banque du Sous-Sol du BRGM [BSS]) utilisés dans le projet ANAFORE (Schroëtter *et al.*, 2020), les bases de données sur les paramètres hydrodynamiques à l'échelle régionale contiennent seulement 501 valeurs de transmissivité (T) et 223 valeurs d'emmagasinement (S), ce qui reste limité dans un contexte d'aquifères particulièrement hétérogènes.

Les informations disponibles au travers des paramètres hydrodynamiques issus des essais de pompage font face à des biais d'échantillonnage. Selon l'inventaire réalisé, les valeurs vont de $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à $9,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les transmissivités et de $3 \cdot 10^{-8}$ à 0.1 pour l'emmagasinement.

Les essais de pompage étant coûteux et longs à réaliser, ils n'ont pas été mis en œuvre dans une majorité des cas pour des forages de petits débits, induisant donc un biais dans les mesures. Ce possible biais est moins présent pour les années récentes car depuis les arrêts départementaux forages (2016, 2017 ou 2019 selon les départements), les essais sont obligatoires sur tous les forages d'eau hors usage domestique. Cependant, les données restent peu accessibles.

Une part importante des essais disponibles le sont sur des forages d'eau potable dont l'implantation a été réalisée suite à des études hydrogéologiques et sont de ce fait représentatifs de contextes particuliers. Le recensement du SIGES Bretagne phase 4 estime que 37% des paramètres hydrodynamiques estimés le sont à partir de forages AEP. Cela a notamment été mis en avant dans le cadre du projet ANAFORE où une majorité des ouvrages analysés, choisis pour être parmi les plus productifs de Bretagne étaient en lien avec des failles. L'étude ANAFORE a notamment montré un lien fort entre ces forages très productifs et les éléments structuraux locaux, mais a moins clairement fait le lien entre les capacités des forages et la lithologie.

De plus, la représentativité spatiale des paramètres hydrodynamiques issus des essais de pompage et qui ont pu être bancarisés en BSS EAU n'est pas homogène spatialement à l'échelle du territoire comme le montre la carte issue du SIGES Bretagne en Illustration 5.

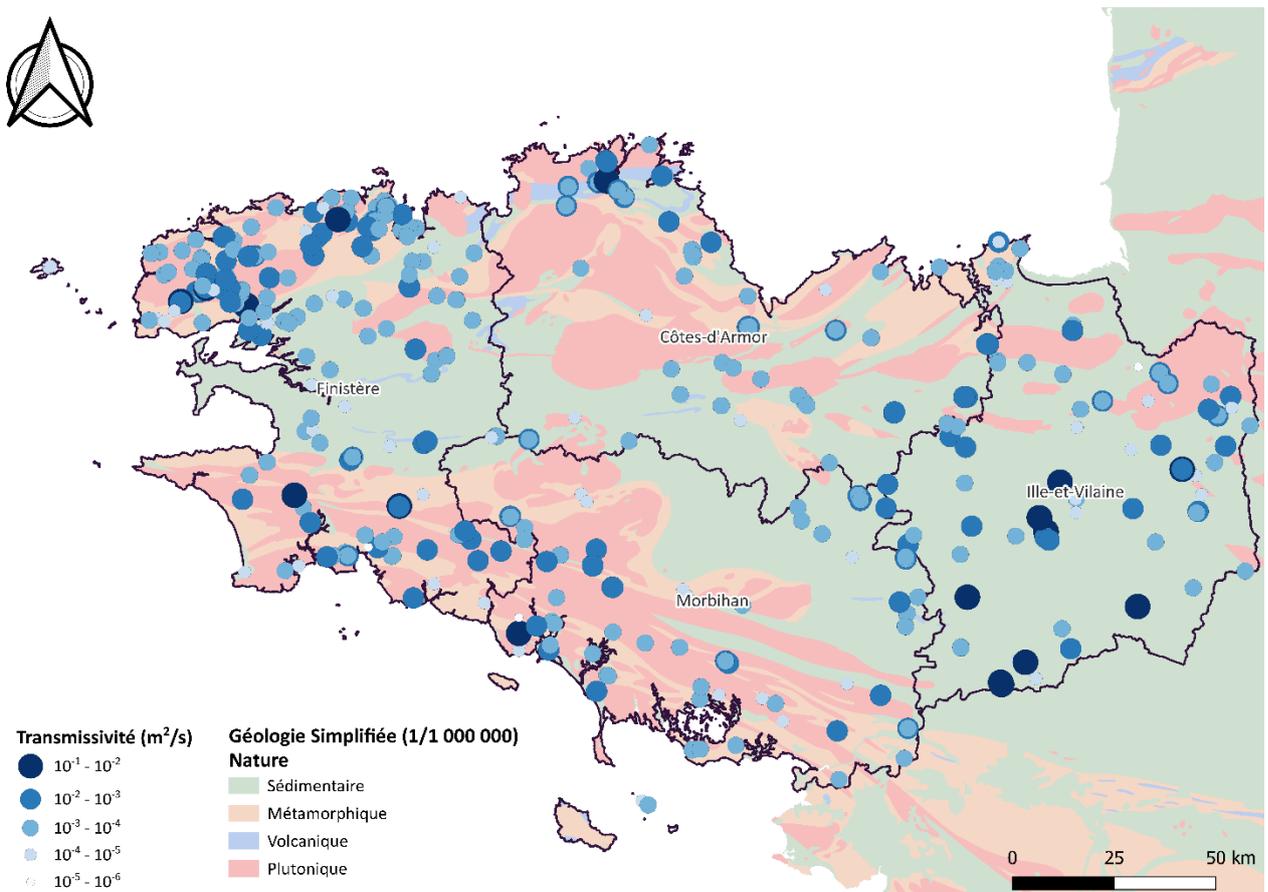


Illustration 5 : Carte de répartition des données de paramètres hydrodynamiques sur la Bretagne bancarisées en 2023 (Source : SIGES Bretagne)

Le classement par lithologie détaillée réalisé dans le cadre du SIGES Bretagne est actuellement le plus précis et montre que pour la majorité des lithologies la variabilité interclasse est proche de la variabilité intra-classe (Illustration 6).

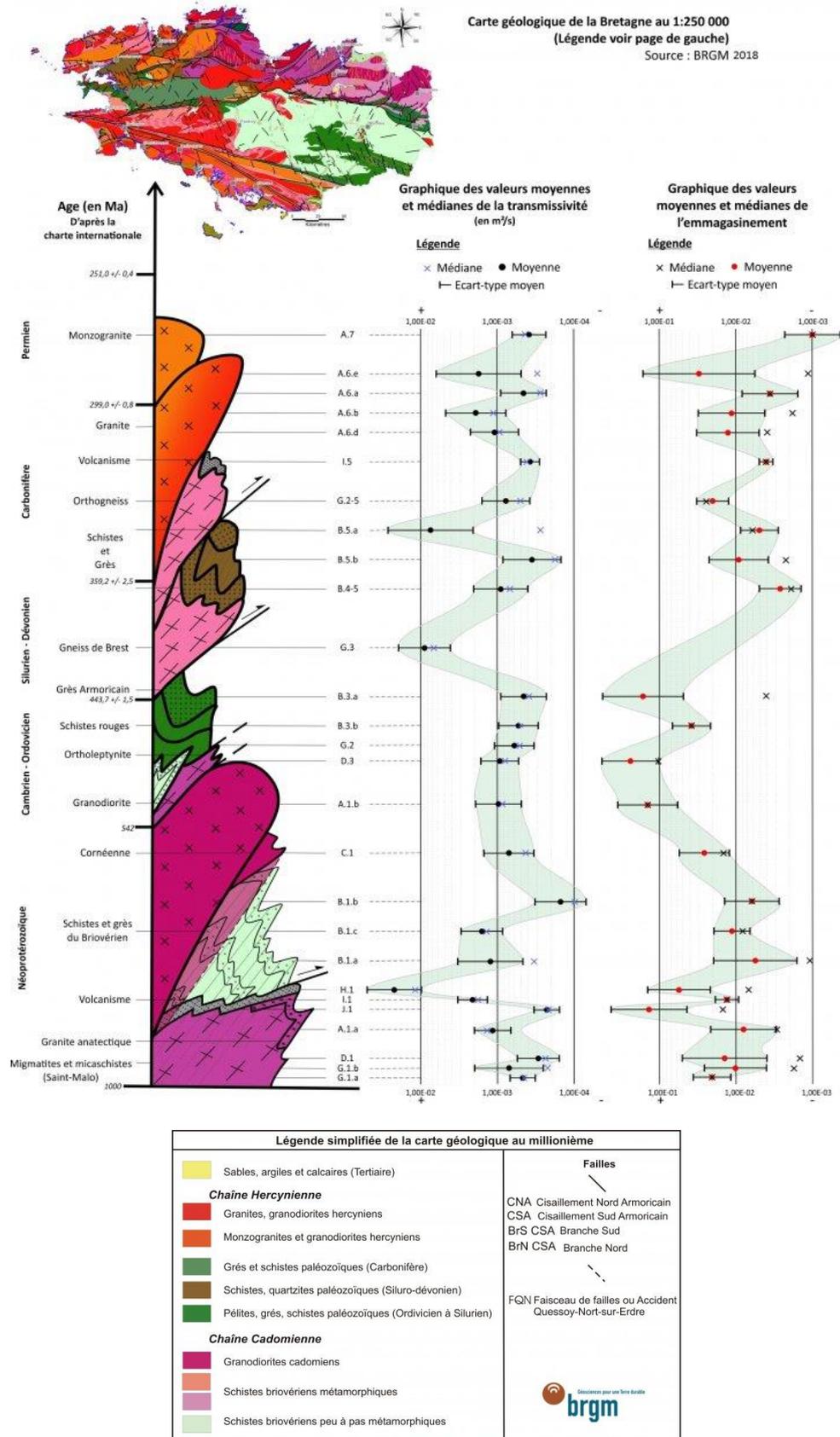


Illustration 6 : Log géologique de la Bretagne avec transmissivité et emmagasinement associés à chaque lithologie.

Dans le cadre du projet SIGES Bretagne, la base de données des paramètres hydrodynamiques a été mise à jour en 2022 avec l'ajout de 118 essais de pompage. Les nouvelles données ont également permis de réaliser une analyse par grandes classes lithologiques vérifiées par log de forages et par position géographique sur les cartes géologiques au 1/50 000^{ème}. Dans le cadre de la présente étude, le choix a été fait de ne considérer qu'un nombre restreint de classes lithologiques et d'âges issus des informations de la carte géologique au 1/1 000 000^{ème} afin de maintenir un cadre homogène applicable à l'ensemble des analyses réalisées dans la suite de l'étude. Les distributions sont fournies dans l'illustration 7 et sous forme de tableau (Illustration 8). Les distributions par âges sont fournies en annexes. Ces distributions présentent un étalement fort et des différences limitées entre les classes avec de forts recouvrements. Les formations plutoniques sont légèrement plus transmissives que les lithologies métamorphiques et méta-sédimentaires. Le détail des répartitions des transmissivités par âges et lithologies est fourni en annexe 1.

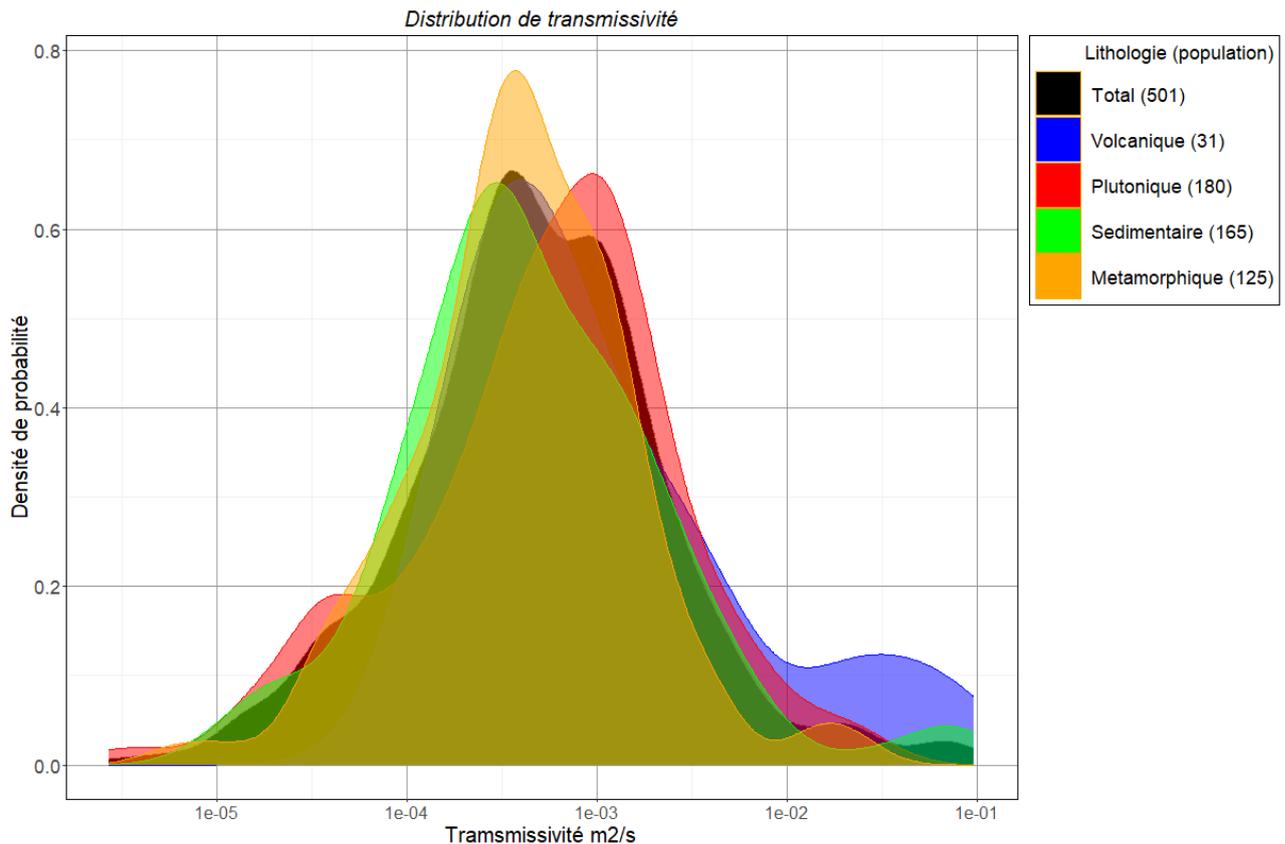


Illustration 7 : Distributions de transmissivités par ensembles géologiques

Formations	Nombre de mesures	Moyenne transmissivité (m ² /s)	Médiane transmissivité (m ² /s)	Ecart-type Transmissivité
Stats_Total	501	2.20E-03	4.56E-04	8.43E-03
Grand ensembles				
Stats_Plu	180	1.65E-03	6.34E-04	3.60E-03
Stats_Sed	165	2.86E-03	3.88E-04	1.19E-02
Stats_Meta	125	1.08E-03	4.02E-04	2.79E-03
Stats_Vol	31	6.37E-03	6.00E-04	1.66E-02
Decomposition par ages				
Plu_Paléozoïque	160	1.71E-03	6.12E-04	3.80E-03
Plu_Protérozoïque	20	1.15E-03	1.21E-03	8.58E-04
Sed_Paléozoïque	93	1.63E-03	3.20E-04	6.74E-03
Sed_Protérozoïque	26	1.13E-03	3.69E-04	1.84E-03
Sed_Prot_Pal	40	6.06E-04	3.25E-04	8.69E-04
Sed_Cen	6	4.08E-02	3.10E-02	4.42E-02
Meta_Paléozoïque	40	2.01E-03	6.11E-04	4.70E-03
Meta_Protérozoïque	39	6.49E-04	3.98E-04	8.02E-04
Meta_Prot_Pal	46	5.58E-04	3.60E-04	5.86E-04

Illustration 8 : Transmissivités moyennes et médianes par ensembles géologiques et âges

2.3.3 Densité de forages et débits au soufflage

Une indication indirecte des capacités des aquifères a été réalisée au travers de l'analyse de la densité de forages réalisées (Illustration 9). Une carte de densité a été produite basée sur 19 684 forages issus de la BSS. Cette densité de forage semble majoritairement impactée par les activités économiques et les campagnes de recherche en eau et est donc peu représentative du potentiel hydrogéologique de la région.

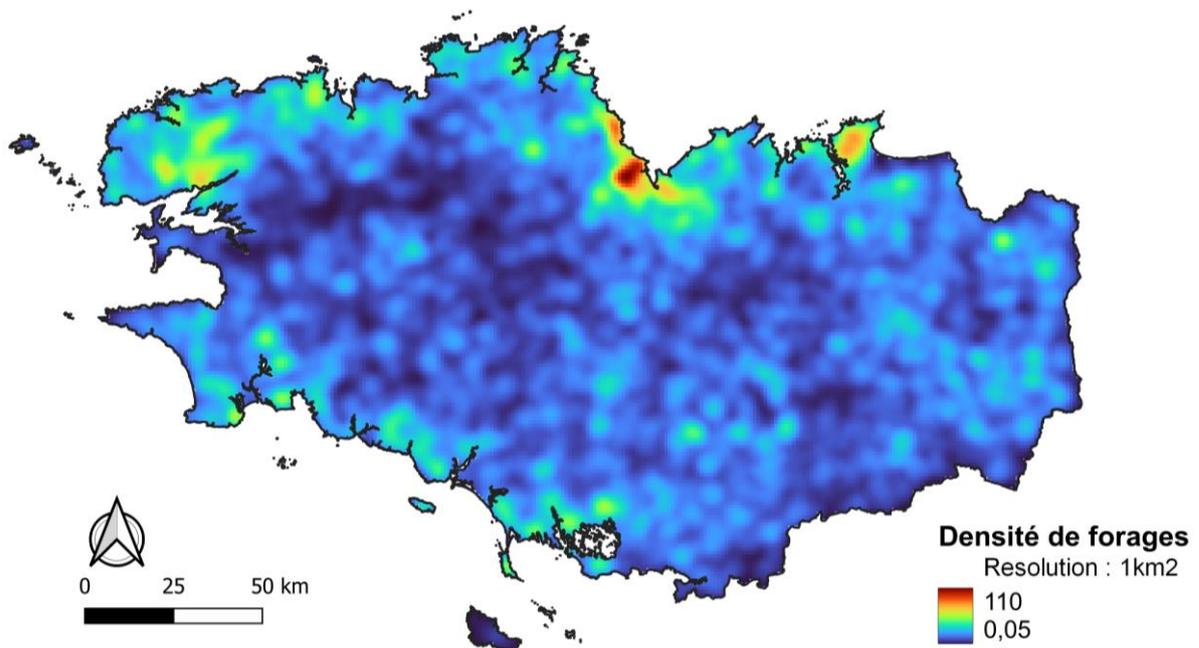


Illustration 9 : Densité de forage à l'échelle de la région Bretagne

Une cartographie des débits au soufflage, a été réalisée dans le cadre du projet ANAFORE (Schroëtter *et al.*, 2020 - Illustration 10). Elle montre une répartition relativement homogène des territoires où ont été mesurées des débits importants mais aussi qu'il semble possible d'avoir des débits importants dans de nombreuses lithologies à la faveur de contextes locaux (altération, fracturation...).

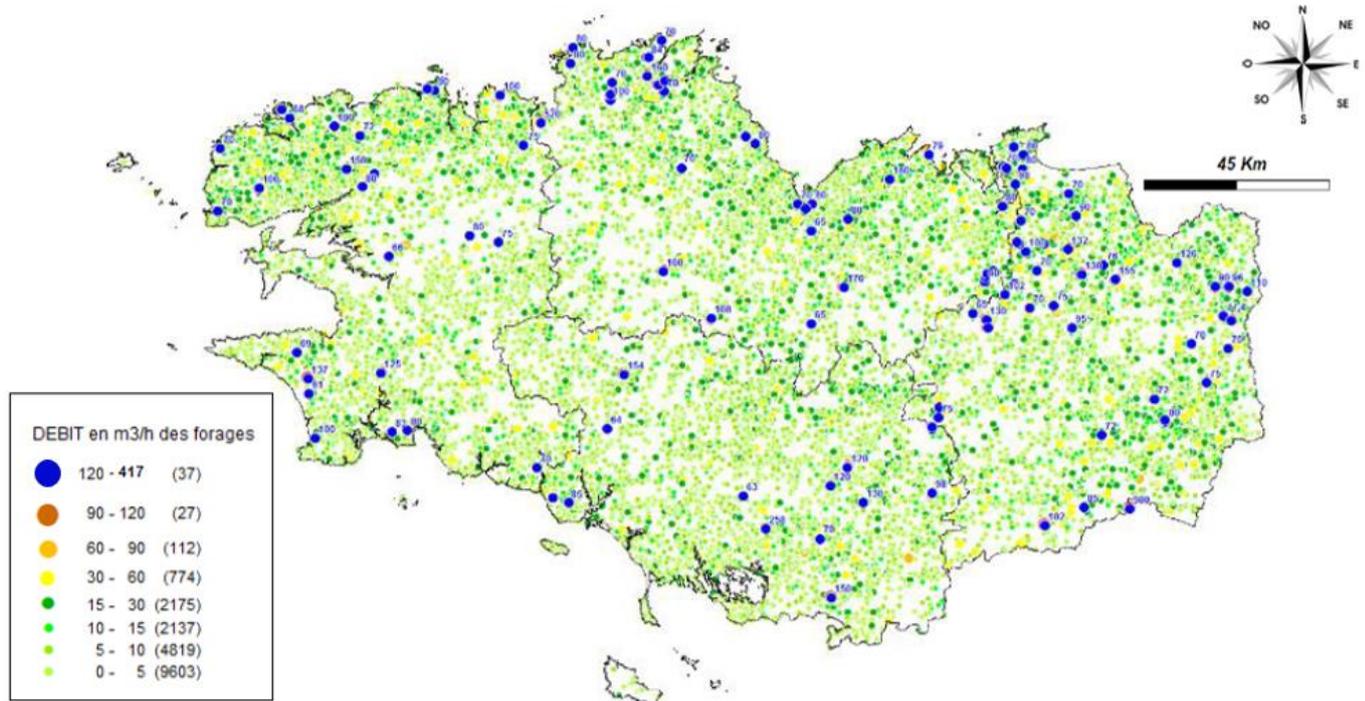


Illustration 10 : Débit instantanés mesurés à l'échelle de la Bretagne (Schroëtter *et al.*, 2020)

2.3.4 Densité de sources

Les sources sont des résurgences de nappes et sont donc des indicateurs de la présence de nappes. Pour estimer le lien entre géologie et présence de sources, une carte de densité a été produite à partir des sources référencées sur les cartes IGN. Les contours des principales formations géologiques issues de la carte au 1/1 000 000^{ème} sont surimposées (Illustration 11). Cette carte met en avant le lien entre densité de sources importantes (couleurs chaudes sur la carte) et roches plutoniques. Cet élément est un indicateur d'un potentiel plus important des roches plutoniques à constituer et restituer des ressources en eau.

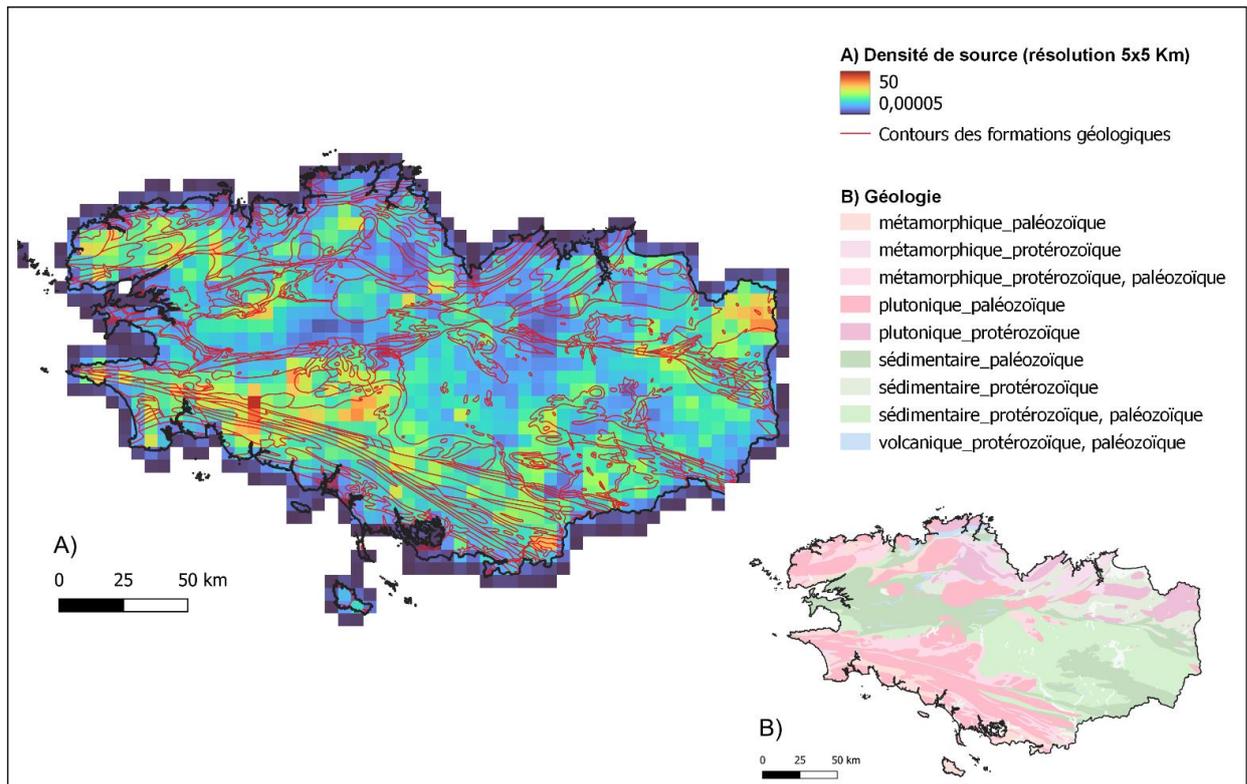


Illustration 11 : Densité de sources et contours des principales formations géologiques au 1/1 000 000.

2.3.5 Position des Périmètres de protection de captages (PPC)

Bien que minoritaire dans la production d'eau potable (~25 % de la production régionale), les eaux souterraines sont toutefois exploitées à l'échelle régionale. Les sites d'exploitation ont été implantés suite à des études hydrogéologiques dans les sites les plus favorables. Leur présence est donc un indicateur de la présence de ressources. Un exemple du positionnement des périmètres de protection de captages (PPC) sur le sud Finistère est fourni aux illustrations suivantes. Cet exemple montre que les PPC sont principalement situés sur les hauts reliefs, probablement en lien avec les sources et puits peu profonds utilisés pour l'exploitation AEP et met aussi en avant leur implantation sur les formations granitiques (en rose et violet sur la carte). Ces éléments illustrent à la fois le contrôle topographique et géologique des ressources.

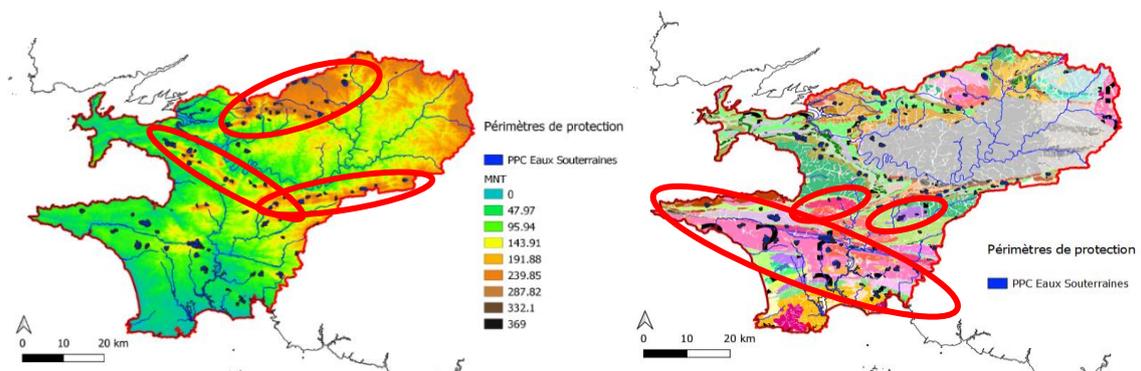


Illustration 12 : Positionnement des PPC dans le sud Finistère en lien avec la topographie et la géologie.

Basé sur ces observations, l'analyse des débits moyens par lithologie, réalisée par croisement SIG a été conduite à l'échelle régionale. Les données de 650 ouvrages AEP avec prélèvements d'eaux souterraines sur la région ont été utilisées. Leur positionnement géographique est fourni Illustration 13.

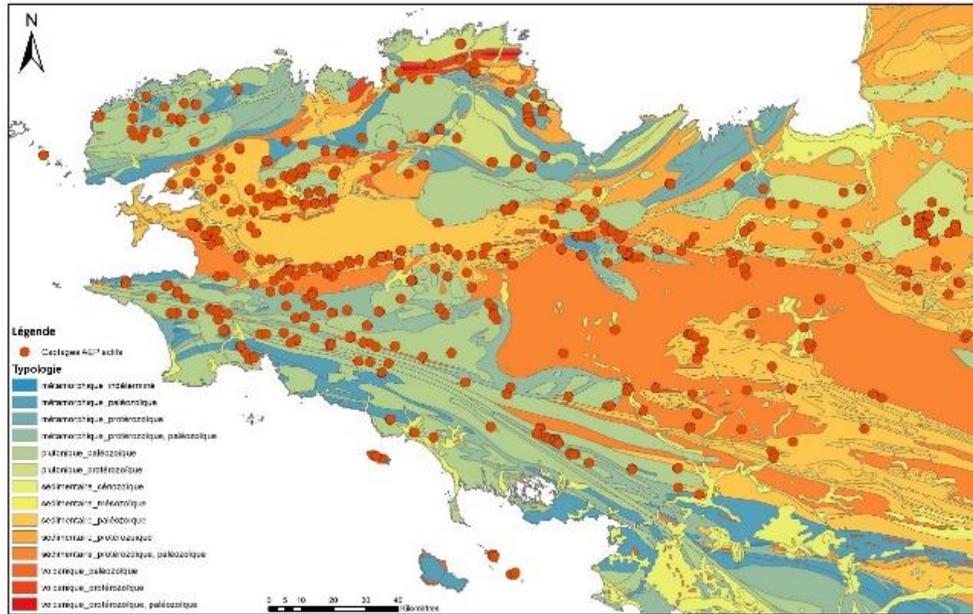


Illustration 13 : Position des captages d'eau souterraine en Bretagne.

Le bilan statistique est fourni Illustration 14. Le classement par lithologie des ouvrages AEP indique que les forages situés dans les formations sédimentaires récentes sont les plus productifs. Ce résultat est connu, et était attendu compte tenu de la forte productivité des bassins sédimentaires (cf : étude ICARE, Boisson *et al.*, 2021). Viennent ensuite les volcanites qui sont relativement peu présentes sur le territoire breton et les roches plutoniques. Bien que les valeurs médianes soient proches des roches métamorphiques et méta-sédimentaires, les gammes de valeurs des roches plutoniques tendent vers des valeurs plus élevées. Toutefois, cet élément n'est pas suffisant pour identifier des valeurs très différentes et ne met en avant qu'un potentiel de production.

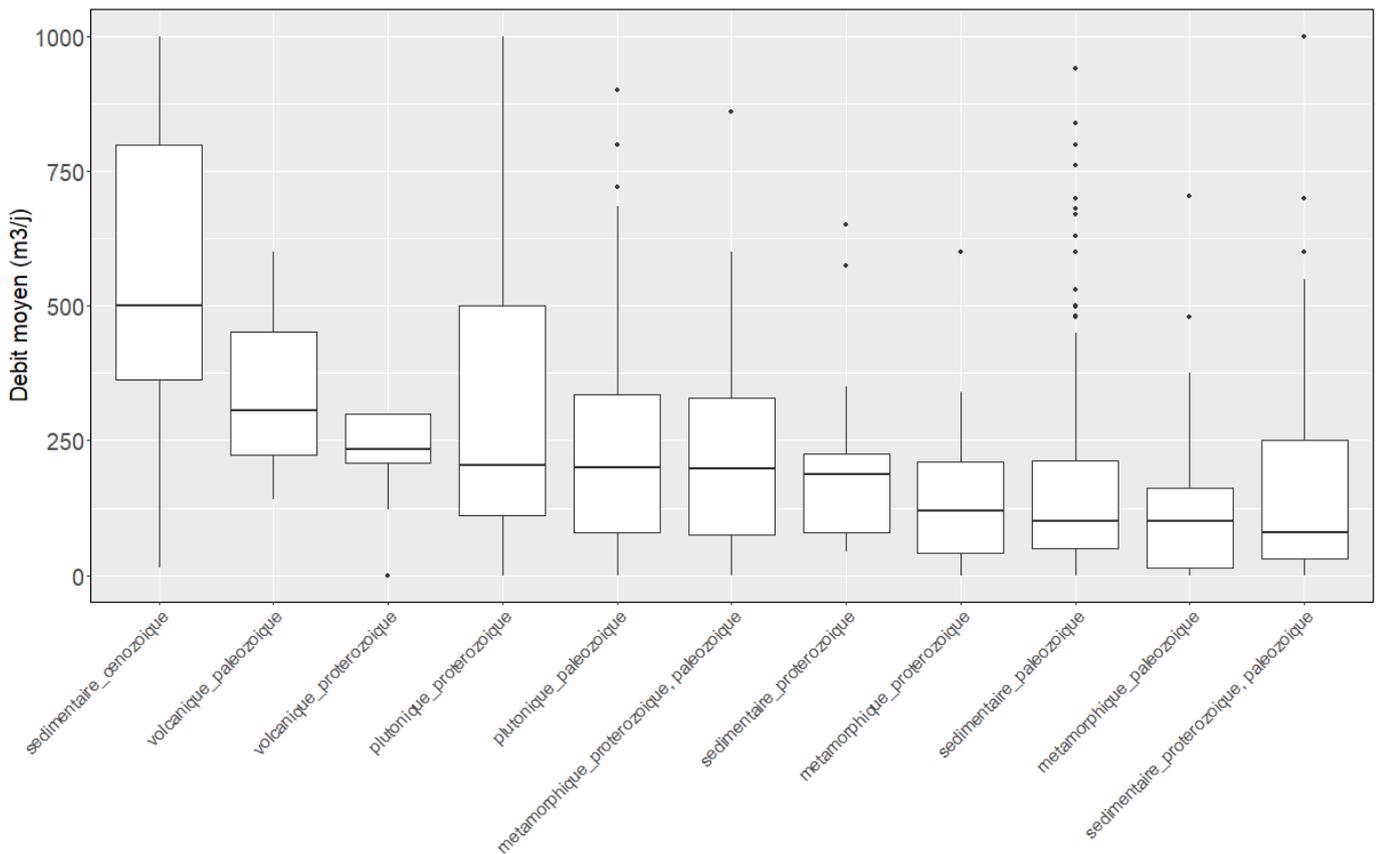


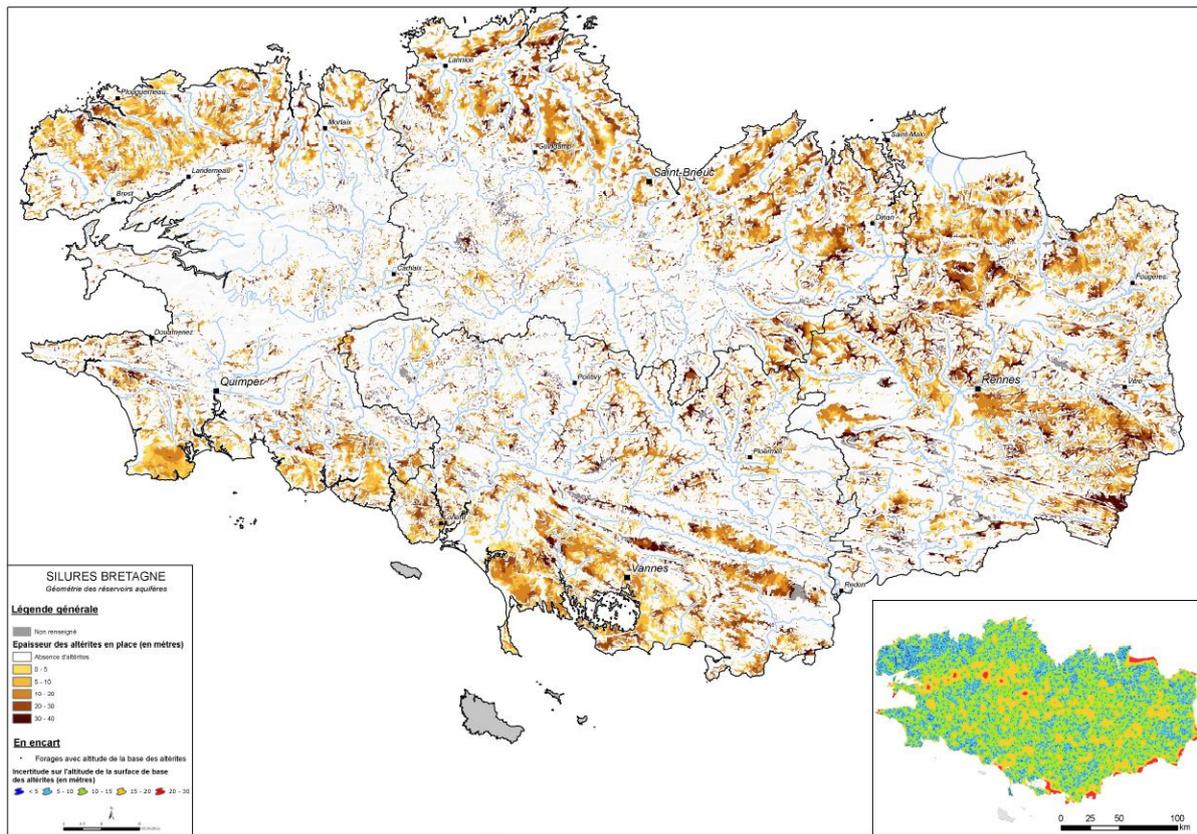
Illustration 14 : Débit moyen journalier des sites AEP par nature et âge.

2.4 CARTOGRAPHIE DE LA FAVORABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES – PROJET SILURES BRETAGNE

Une cartographie de la favorabilité de la présence d'eau souterraine exploitable a été réalisée dans le cadre du projet SILURES Bretagne (Mougin *et al.*, 2008).

SILURES Bretagne a permis de créer une base de données sur les eaux souterraines en Bretagne, à partir du croisement de plusieurs types d'informations disponibles : coupes géologiques et hydrogéologiques de 12 000 forages géoréférencés, données géophysiques aéroportées (magnétisme des roches et analyses spectrométriques), sondages complémentaires repérés sur le terrain, régime des rivières. L'objectif était de cartographier, à l'échelle du 1/250 000, les grands aquifères (épaisseur, débit exploitable) et connaître leur fonctionnement et leur inertie (relation avec les rivières, renouvellement).

En se basant sur les informations des épaisseurs d'altérites et la position du contact entre altérites/milieu fissuré issue de l'analyse de 6 089 logs de forages, une carte de l'épaisseur des altérites a été produite à l'échelle régionale Illustration 15. Cette carte informe sur le développement des profils d'altération et la capacité de stockage d'eau, les altérites étant considérées comme la fonction capacitive de l'horizon. Cependant des différences existent entre les géologies. En contexte schisteux, l'altérite est une argile faiblement perméable ; et en contexte granitique, il s'agit d'une arène sablo-argileuse plus ou moins perméable.



*Illustration 15 : Cartographie de l'épaisseur des altérites en place (m)
– Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)*

Une approche similaire a été menée pour définir l'épaisseur de l'horizon fissuré utile (Illustration 16). L'horizon fissuré utile correspond à une épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en terme de débit instantané (cf. explication détaillée dans le rapport final du projet SILURES Bretagne).

L'épaisseur du milieu fissuré utile a été calculée sur une quarantaine de formations géologiques, suffisamment renseignées par des forages d'eau assez profonds sous la base des altérites meubles.

Sur environ 80 formations géologiques, cette épaisseur du fissuré utile a été déduite à partir du rapport du débit du milieu fissuré utile (en m^3/h) et du débit du milieu fissuré utile rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles (en $m^3/h/m$).

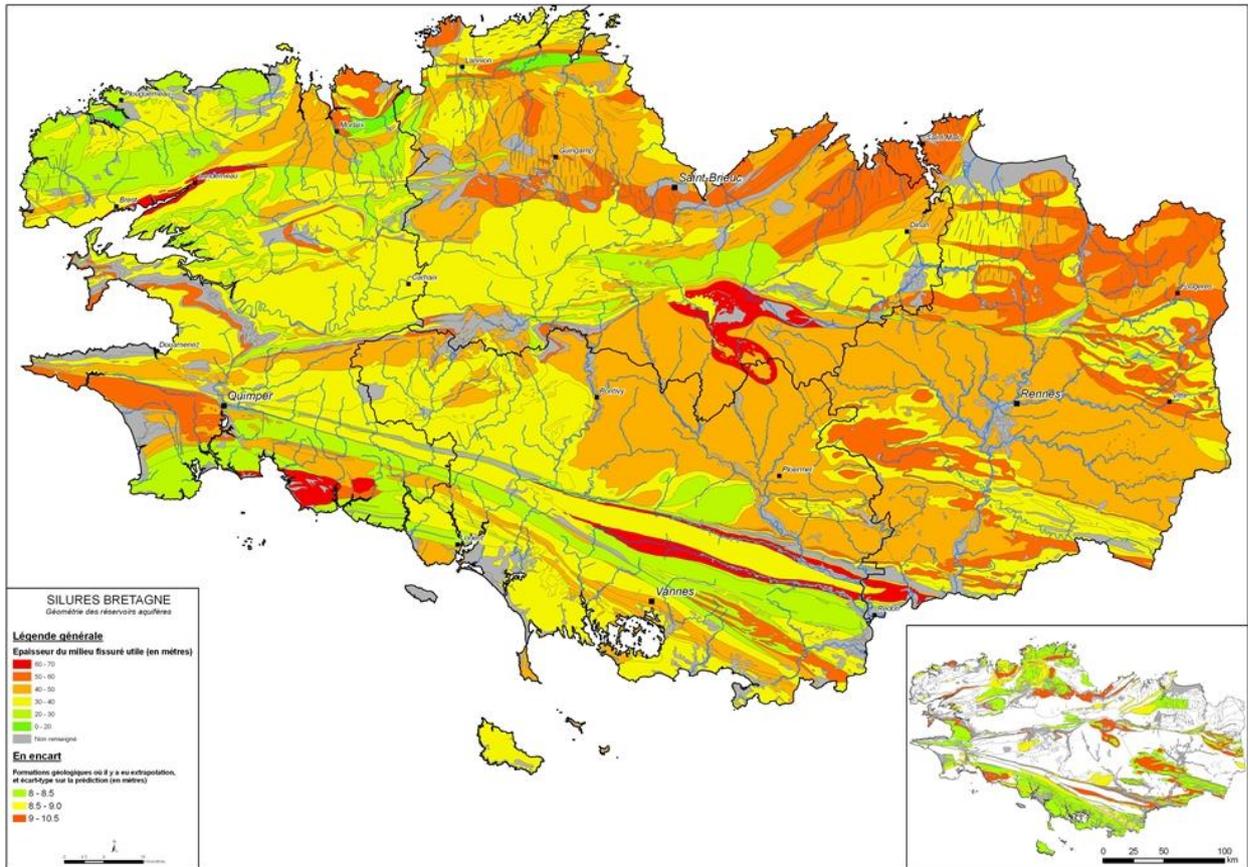


Illustration 16 : Épaisseur du milieu fissuré utile calculé par régressions successives (Mougin et al., 2008)

Cette approche a été complétée par une estimation du débit fissuré utile permettant de fournir une cartographie des zones où la recherche en eau peut être encouragée. Sur environ 80 formations géologiques, ce débit du fissuré utile a été déduit à partir du débit moyen du meilleur quartile (moyenne des débits du quart des meilleurs forages). La déduction s'est faite grâce à la relation existant entre ces deux paramètres (régression linéaire).

Les incertitudes (écart-type sur la prédiction) associées aux débits du milieu fissuré utile (en m³/h) ont été cartographiées (rapport final du projet SILURES Bretagne) au niveau des formations géologiques. Le débit du fissuré utile a été calculé sur une quarantaine de formations géologiques, suffisamment renseignées par des forages d'eau assez profonds sous la base des altérites meubles. Dans le rapport, il y a également une représentation, par formation géologique, du pourcentage de forages dont le débit obtenu en foration est inférieur à 10 m³/h (sorte de probabilité d'échec). La carte produite est fournie par l'illustration 17.

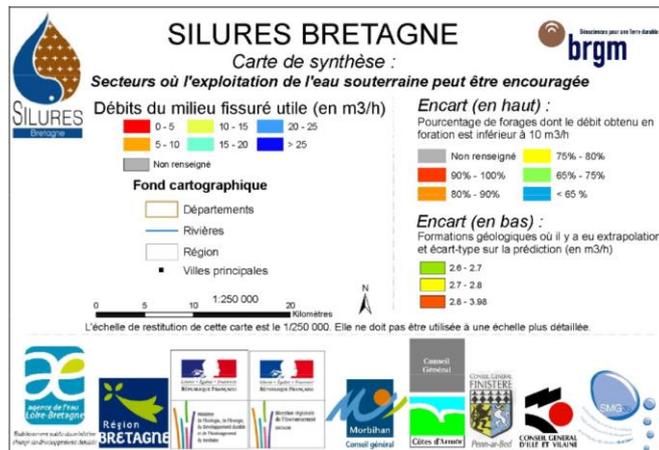
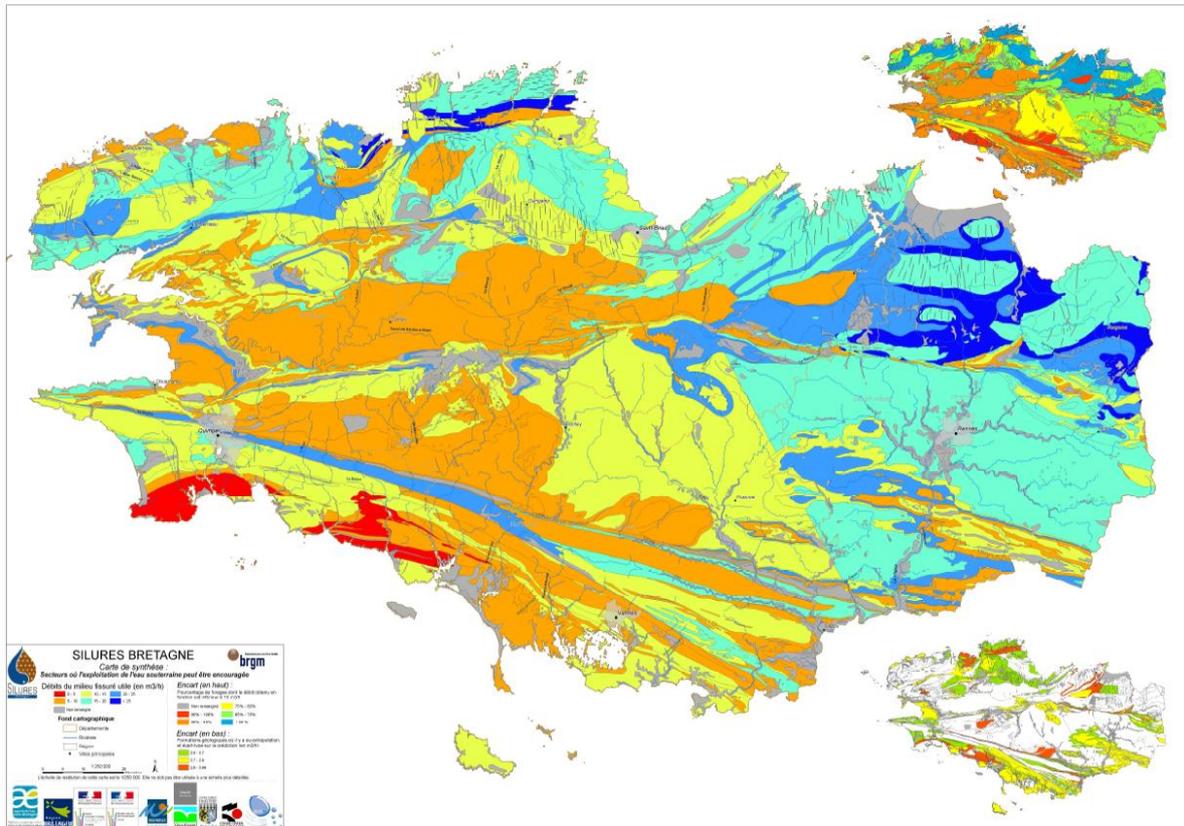


Illustration 17 : Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée. Carte principale : débit du milieu fissuré utile. En rouge orangé les secteurs défavorables et en bleu les secteurs les plus favorables – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008)

2.5 INERTIE DES AQUIFÈRES : ÉTUDES EXISTANTES

En complément de ces éléments statiques, nous nous sommes intéressés à la dynamique des aquifères qui reste peu étudiée à l'échelle de la région. La seule étude globale régionale sur cette dynamique à l'heure actuelle est issue du projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008). Les modélisations réalisées par des modèles globaux à réservoirs (GARDENIA, Thiéry, 2013) issues de ce projet ont montré l'importance du soutien annuel des cours d'eau par les eaux souterraines avec une variation importante entre bassins versants. La carte suivante (Illustration 18) illustre les résultats de cette étude.

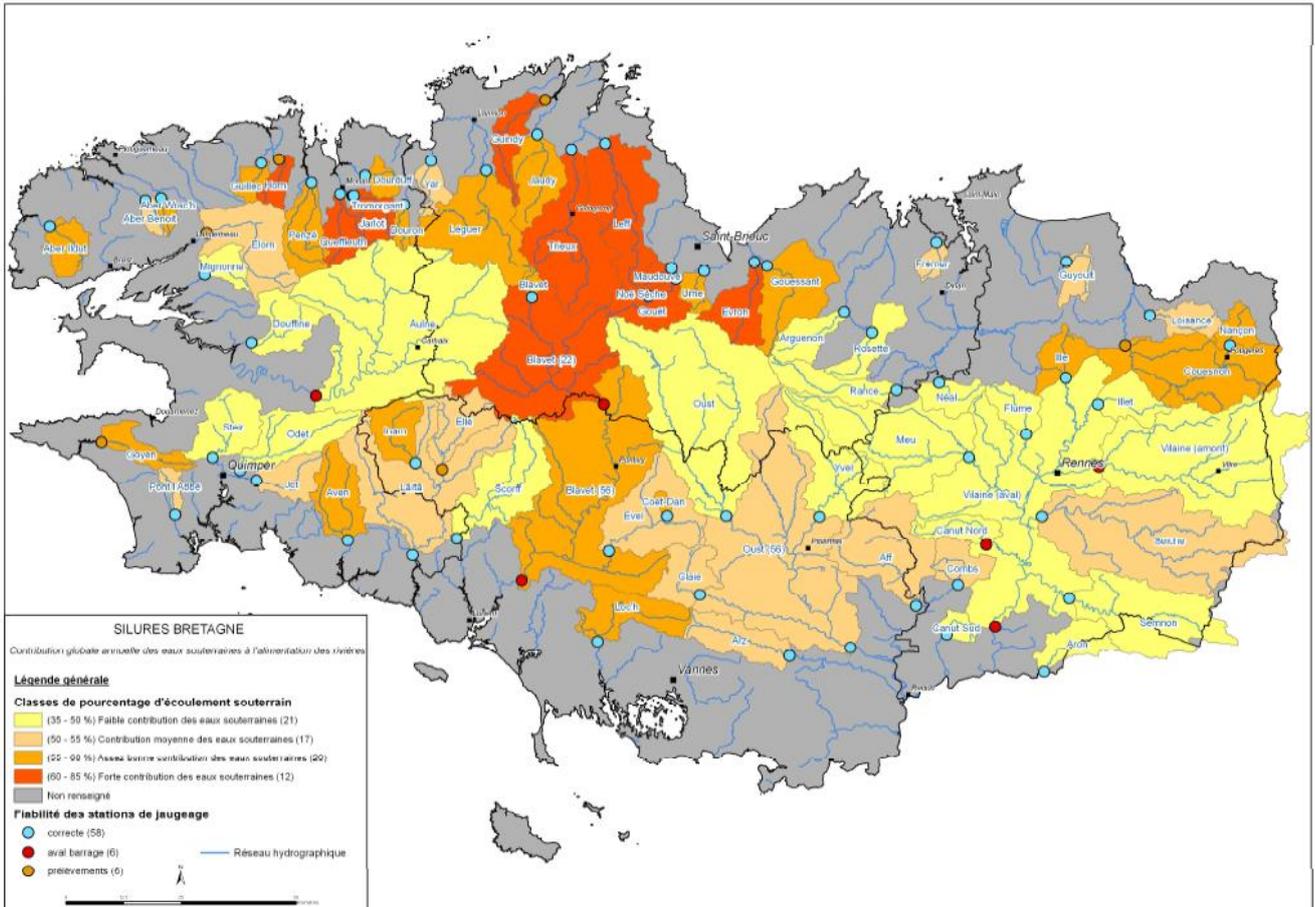


Illustration 18 : Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières –
Projet SILURES Bretagne (Mougin et al.,2008)

Ce travail a permis de quantifier la contribution des eaux souterraines au débit total des cours d'eau. Celle-ci varie de 38 % à 83 % (respectivement pour le bassin versant de la Rance et de la Noé-Sèche). La participation moyenne annuelle est de 55 %. Bien que les relations avec la géologie aient été investiguées dans le cadre de cette étude, en raison de l'approche bassin versant des modélisations effectuées, il n'est pas possible d'affiner les éléments au sein du bassin versant.

Une cartographie de l'inertie relative par bassin versant a aussi été produite :

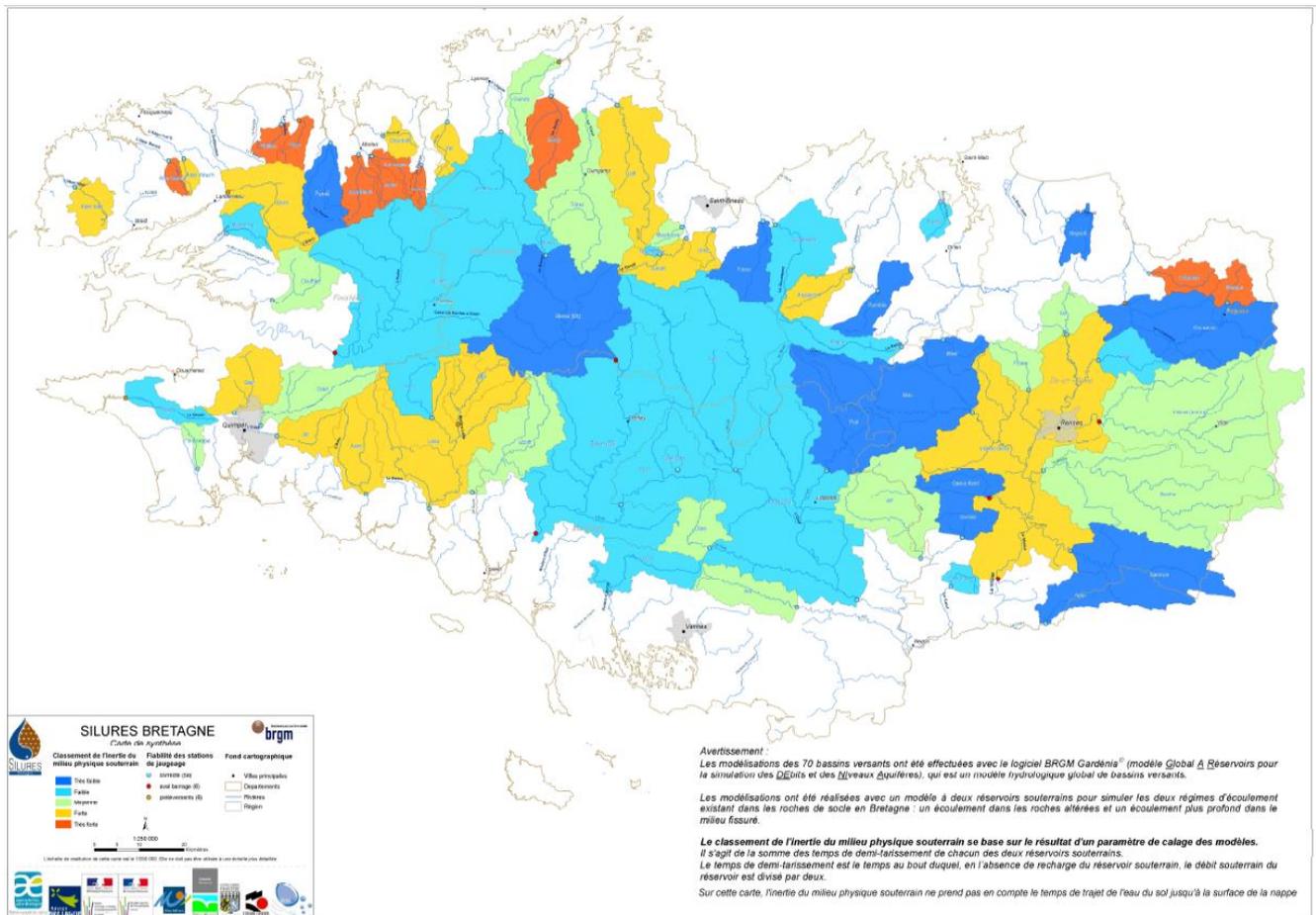


Illustration 19 : Cartographie de l'inertie du milieu physique souterrain, en bleu les secteurs où l'inertie est faible, en orange et rouge les secteurs où l'inertie est forte – Projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008)

2.6 RELATION ENTRE GÉOLOGIE ET SOUTIEN D'ÉTIAGE

2.6.1 Introduction

Les informations disponibles au travers des piézomètres du réseau piézométrique de Bretagne sont à elles seules insuffisantes pour qualifier la résilience des aquifères à l'échelle régionale en raison de leur nombre limité et de leur représentativité, notamment dans le cas de milieux hétérogènes. La disponibilité des ressources en eaux superficielles, notamment en période d'étiage est en partie contrôlée par les aquifères et donc la géologie (Mougin et al., 2008). De ce fait, les débits des cours d'eau peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur la disponibilité et la dynamique des ressources souterraines. De par leur côté intégrateur, à l'échelle du bassin versant, les débits des cours d'eau permettent une vision homogénéisée des propriétés des aquifères correspondants. Cependant, à l'échelle régionale les connaissances sur les propriétés hydrodynamiques des aquifères restent limitées. L'objectif est ici de quantifier les ressources en eau et leurs dynamiques en fonction de la géologie pour une meilleure compréhension des processus et développer des possibilités de généralisation des comportements.

Le soutien d'étiage des cours d'eau est un indicateur des stocks et de la perméabilité/diffusivité des aquifères. Du fait du lien important entre aquifères et cours d'eau à l'échelle régionale,

cette approche est particulièrement pertinente. Au contraire des paramètres hydrodynamiques des aquifères obtenus aux puits ou forages, les données issues des cours d'eau sont des données intégratives qui permettent de lisser les hétérogénéités locales au profit d'un comportement plus global et large échelle. Dans le cadre de cette étude, les contributions des eaux souterraines aux cours d'eau sont quantifiées via le BFI (pour Base Flow Index) qui est un indicateur couramment utilisé (Bloomfield *et al.*, 2009, 2021 ; Kelly *et al.*, 2019 ; Van Loon et Laaha, 2015...). Le BFI est le rapport entre le débit de base d'un cours d'eau et le débit total. Le débit de base est défini comme la partie du débit d'un cours d'eau qui provient essentiellement des nappes souterraines, mais aussi de la vidange des lacs et de la fonte des glaciers, durant des périodes suffisamment longues où il ne se produit ni précipitation, ni fonte des neiges. L'impact neigeux ou la fonte des glaciers pouvant être exclus ici, le débit de base est contrôlé par les aquifères.

2.6.2 Méthodologie

a) Calcul du BFI

Le BFI est calculé selon l'équation suivante :

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{b_i}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

Avec Q_i : écoulement journalier
 Q_{b_i} : écoulement de base

Les études réalisées avec le BFI montrent que cet indice varie de 0,15 pour les bassins très peu perméables avec des cours d'eau réagissant rapidement, à 0,95 pour les bassins à forte capacité d'infiltration et des régimes d'écoulement réguliers.

Les procédures de calculs sont décrites dans (Gustard and Demuth, 2008; Tallaksen and Lanen, 2004). Les procédures de calculs utilisées dans cette étude sont celles présentes dans le programme ESTHER du BRGM (Seguin *et al.*, 2018). Un exemple de décomposition est fourni en Illustration 20 pour un bassin à forte contribution souterraine avec en rouge l'estimation du débit de base.

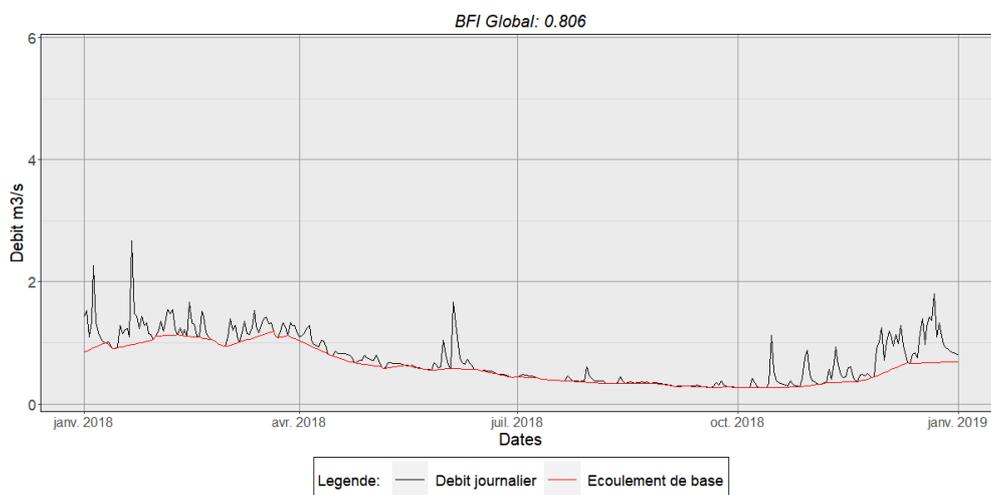


Illustration 20 : Calcul du BFI sur l'Horn (Année 2018)

Le BFI a été calculé pour chacune des stations hydrologiques « non influencées » (i.e. stations hydrométriques non situées à l'aval proche de grands barrages) de la région (106 points de mesures) couvrant une large portion du territoire régional. Les données sont issues de la base hydroportail en ne considérant que les stations référencées comme non influencées.

b) Regroupements géologiques

Afin de limiter le nombre de lithologies de socle, des regroupements ont été réalisés. Ces regroupements ont été effectués à partir de la carte géologique de la France au million (BRGM). Les regroupements ont été effectués en fonction de la nature des roches (plutonique / sédimentaire / métamorphique / volcanique) et de l'âge des formations (Protérozoïque / Paléozoïque, Protérozoïque / Paléozoïque / Cénozoïque) fournis dans les bases de données de la carte. Les regroupements sont cartographiés sur l'illustration suivante. Compte tenu de la faible proportion de volcanisme, les différents âges ont été regroupés au sein d'une unique catégorie. Au total 10 catégories ont été utilisées (Illustration 21).

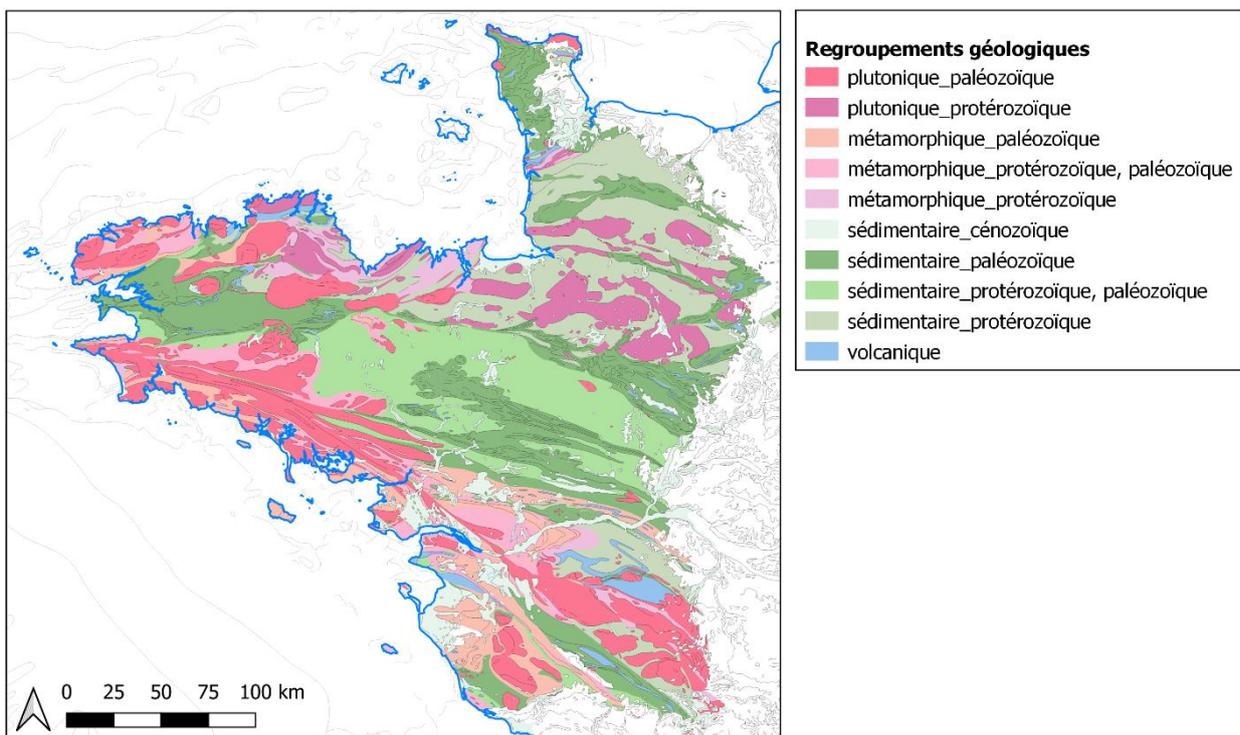


Illustration 21 : Regroupements lithologiques réalisés à partir la carte géologique de la France au millionième (BRGM)

Pour chaque station hydrologique, les pourcentages de surface du bassin présents dans les différentes classes lithologiques ont été évalués. Les surfaces de bassin versant en amont de la station ont été déterminées à partir du MNT à 25 m et les pourcentages de chacune des lithologies déterminés par croisement des différentes couches de données d'un Système d'Information Géographique (SIG).

2.6.3 Résultats

Les BFI calculés en région Bretagne sur l'ensemble des stations hydrologiques non influencées varient de 0,325 (Bassin de Careil) à 0,806 (Bassin de l'Horn). Les résultats sont cartographiés en Illustration 22. Cette répartition spatiale montre un gradient est-ouest avec des contributions des eaux souterraines au soutien d'étiage plus marquées à l'ouest qu'à l'est, à l'exception du bassin de Châteaulin. Les bassins les plus contributifs aux cours d'eau

semblent être localisés dans les massifs varisques du nord du Finistère. Les zones les moins contributives aux cours d'eau sont principalement localisées dans des environnements sédimentaires paléozoïques à l'est de la région.

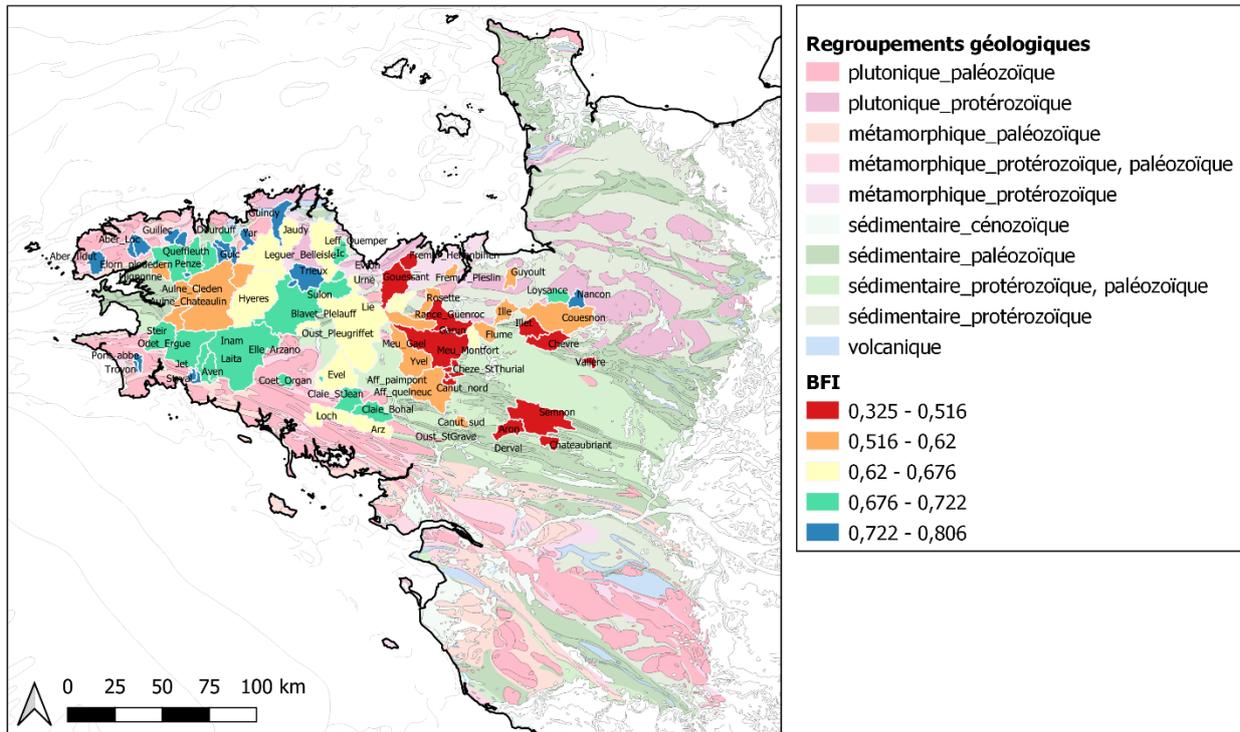


Illustration 22 : Spatialisation des BFI calculés

La représentation des lithologies des bassins classés par BFI confirme ces éléments (Illustration 23) et permet un détail par lithologie. D'une manière générale, les eaux souterraines des bassins à majorité méta-sédimentaires (schistes paléozoïques) ont une plus faible contribution aux débits des cours d'eau que les bassins à dominante métamorphique et plutonique. Cette représentation met en avant le fait que les bassins composés essentiellement de schistes paléozoïques ont de faibles contributions aux cours d'eau. Sur les bassins ayant les 12 plus faibles BFI, 10 sont à 80 % composés de formations sédimentaires paléozoïques. À l'inverse, les bassins dont les BFI sont les plus élevés sont à dominante plutonique paléozoïque.

Malgré ces grandes tendances des éléments spécifiques sont aussi mis en avant :

- dans le tiers des bassins les moins contributifs, de nombreux bassins ont tout de même des proportions importantes de plutonisme et de métamorphisme. Cependant, ces lithologies plutoniques sont principalement d'âge Protérozoïque. Seuls deux bassins, le Nançon et la Loisançe, ont des forts BFI en étant plutonique d'âge Protérozoïque ;
- des bassins sédimentaires paléozoïques peuvent avoir des BFI élevés. C'est notamment le cas de l'Elorn et du Mougau Bihan, deux bassins de faible surface entièrement entourés de plutons varisques, et du Tromorgant et du Sulon dont les parties amont sont composées de zones plutoniques dans les secteurs où le BFI est le plus important.

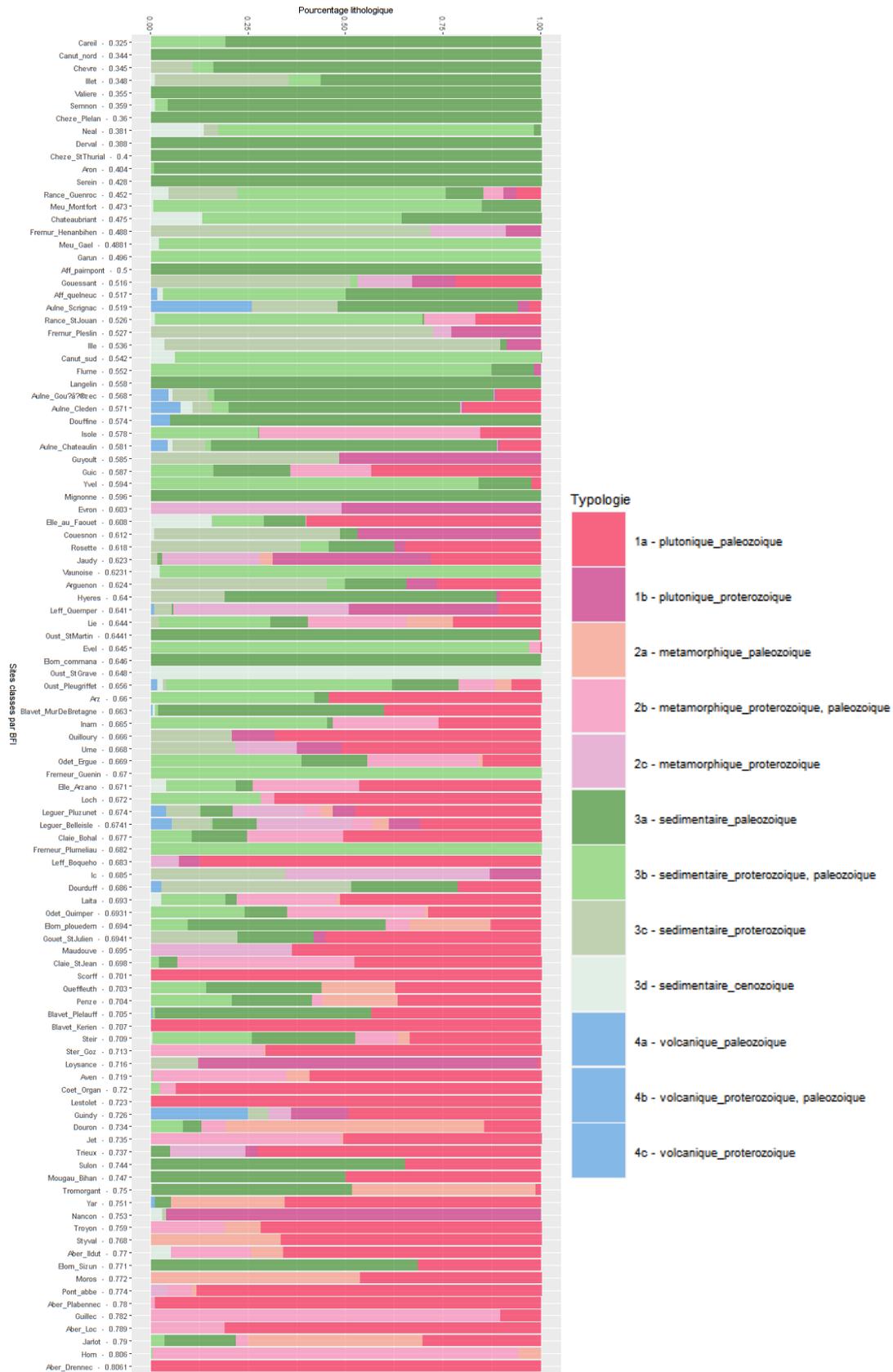


Illustration 23 : Bassins versants bretons classés par BFI et pourcentages des catégories géologiques associées

Les relations entre les proportions par regroupements géologiques et la valeur du BFI sont présentées pour les principales catégories de formations géologiques sur l'illustration 24.

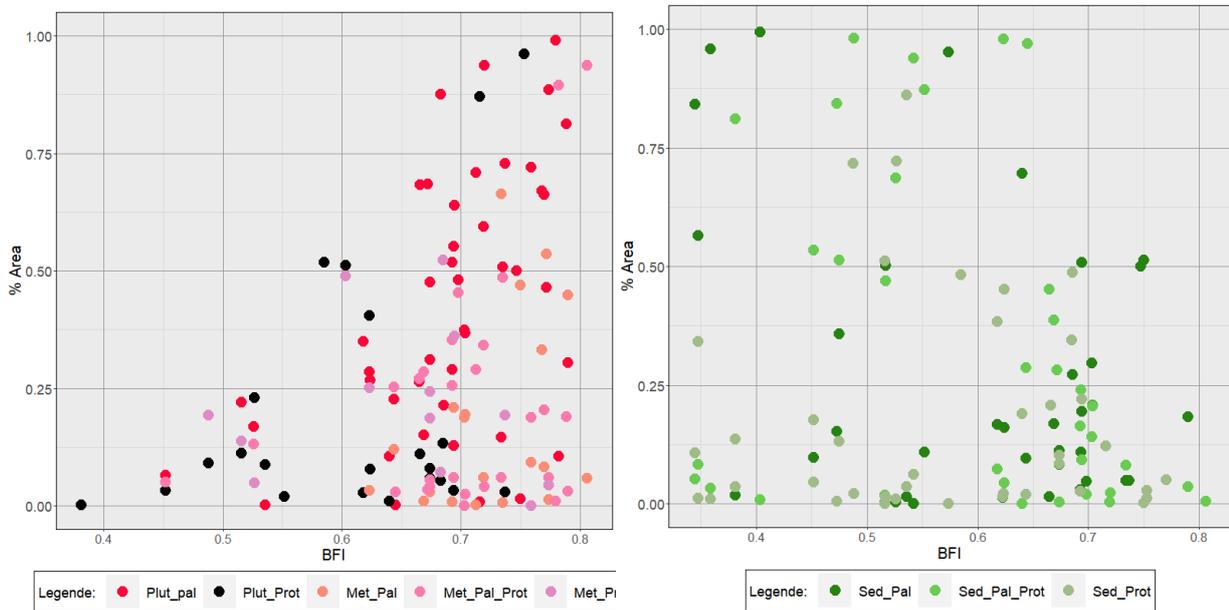


Illustration 24 : Relation entre BFI et % de lithologie

La forte dispersivité des points sur l'illustration 24 est en partie due au fait que pour les faibles pourcentages de surface, les valeurs sont influencées par les autres lithologies. En recentrant l'information sur les cas où les lithologies sont majoritaires et représentées à plus de 55 % sur le bassin versant (Illustration 25), on observe une claire différenciation par lithologie, avec des BFI strictement supérieurs à 0,65 pour les lithologies plutoniques et métasédimentaires et des BFI strictement inférieurs à 0.65 pour les lithologies sédimentaires.

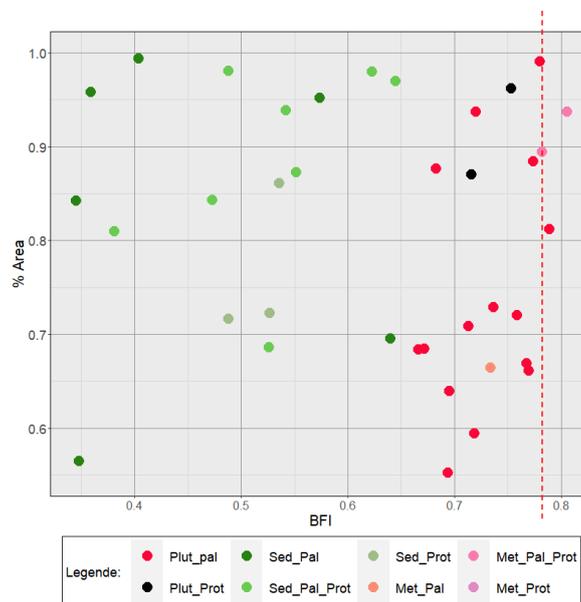


Illustration 25 : BFI par lithologie pour les lithologies couvrant plus de 55 % de la surface des bassins

2.6.4 Comparaison avec les études existantes

La répartition globale du BFI sur la région Bretagne est de manière qualitative en accord avec les études existantes tel que Snelder *et al.* (2013) qui ont quantifié l'intermittence des cours d'eau à l'échelle nationale sur un échantillon de stations pour produire des cartes de probabilité d'intermittence des cours d'eau. Au travers de leur étude, ils estiment que l'intermittence des cours d'eau est plus probable à l'est qu'à l'ouest de la Bretagne (Illustration 26). Cependant, l'étude menée à l'échelle nationale ne permet pas de faire le lien avec la géologie locale.

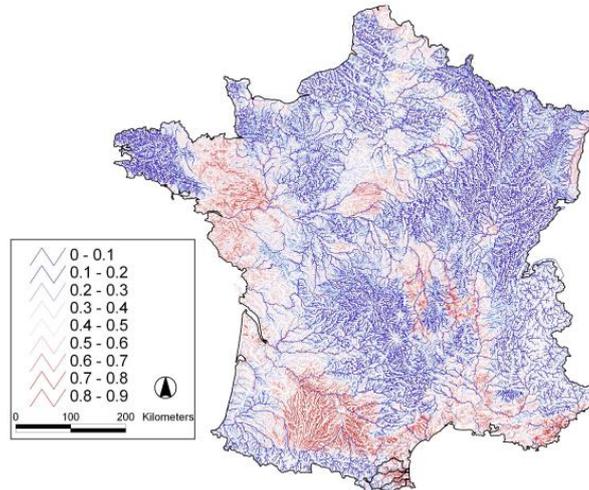


Illustration 26 : Prédications de probabilité d'intermittence des cours d'eau – Snelder *et al.*, 2013

2.6.5 Conclusions

L'analyse menée montre un fort lien entre la géologie des bassins versants (lithologie et âge) et les étiages des cours d'eau à l'échelle régionale et permet une différenciation des bassins.

La méthode d'analyse présente des limites, comme le fait qu'elle ne permet pas une prise en compte des variations climatiques et géomorphologiques à l'échelle régionale pouvant influencer les capacités de soutien d'étiage. De plus, le BFI est un indicateur et ne représente pas directement un paramètre physique utilisable dans des modèles d'écoulements. Des développements méthodologiques ont été menés dans le cadre de la thèse de Nicolas Cornette financée par la Région Bretagne et le BRGM et encadrée par l'observatoire des sciences de l'univers de Rennes (OSUR) et le BRGM pour prendre en compte ces éléments.

2.7 INERTIE DES AQUIFÈRES – FRÉQUENCE ANNUELLE

La gestion et la sécurisation des ressources en eau souterraine à l'échelle d'une année sur un territoire large nécessite une connaissance de la dynamique de ces ressources. Dans un système tel que la Bretagne où les stocks sont relativement limités et où les cycles des aquifères sont principalement dominés par des signaux annuels, la connaissance de l'hétérogénéité des temps de réponse des aquifères est un élément important et peut même être une opportunité pour la gestion (Hartmann *et al.*, 2017). Dans le cadre du présent projet, la dynamique annuelle relative des aquifères a été évaluée par les variations annuelles moyennes des piézomètres et leur répartition sur le territoire.

2.7.1 Piézométrie

Les variations piézométriques sont fonction de la recharge, au travers des précipitations efficaces et de la géologie, qui va contrôler la capacité du milieu souterrain à stocker l'eau et à l'évacuer. Un aquifère peu transmissif ne permettra qu'une faible recharge et vidangera lentement son stock alors qu'un aquifère plus perméable aura une bonne capacité de recharge mais une vidange rapide. Etant peu profonds, ces aquifères peuvent se vidanger de manière naturelle et ne sont pas des stocks fixes et stables dans le temps. Ces équilibres entre remplissage et vidange sont variables et induisent des états de stocks différents dans l'espace et au cours du temps. Deux chroniques piézométriques contrastées illustrant des dynamiques différentes sont fournies sur les illustrations suivantes :

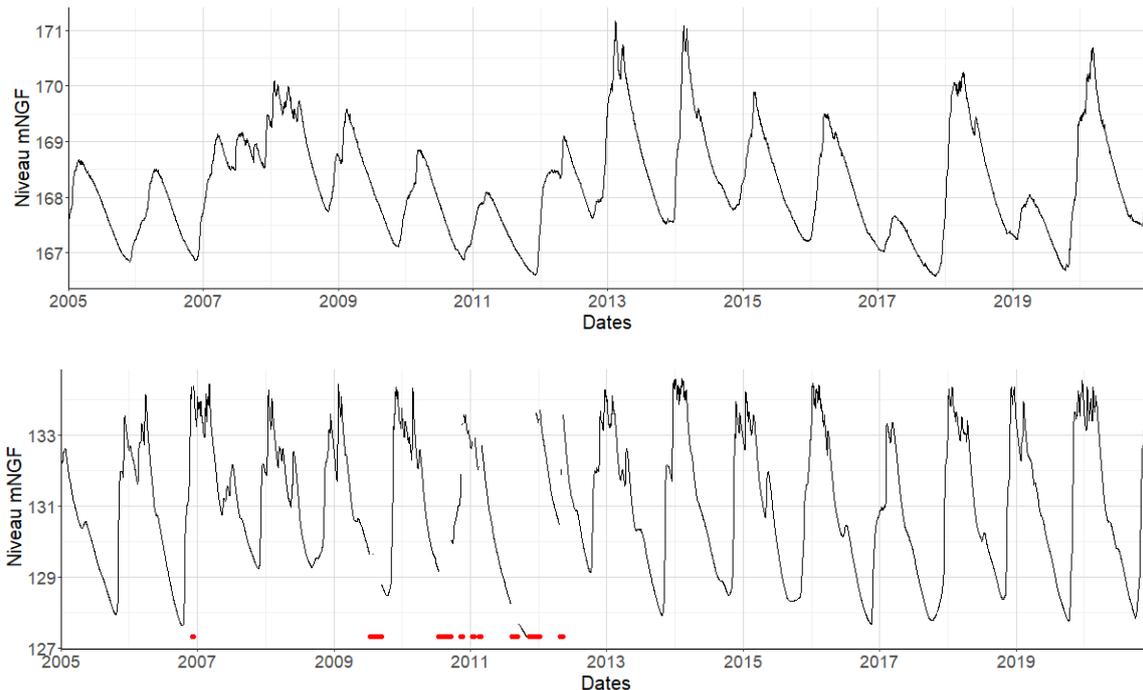


Illustration 27 : Variations piézométriques aux piézomètres de Louvigné-du-Désert - BSS000TRGE (en haut) et Spézet – BSS000XDRF (en bas)

À l'échelle d'un cycle de recharge-vidange, les différences de capacité de stockage et d'écoulement peuvent induire des amplitudes différentes et des décalages temporels. Un exemple à l'échelle de 2 ans est fourni Illustration 28 pour 5 piézomètres différents.

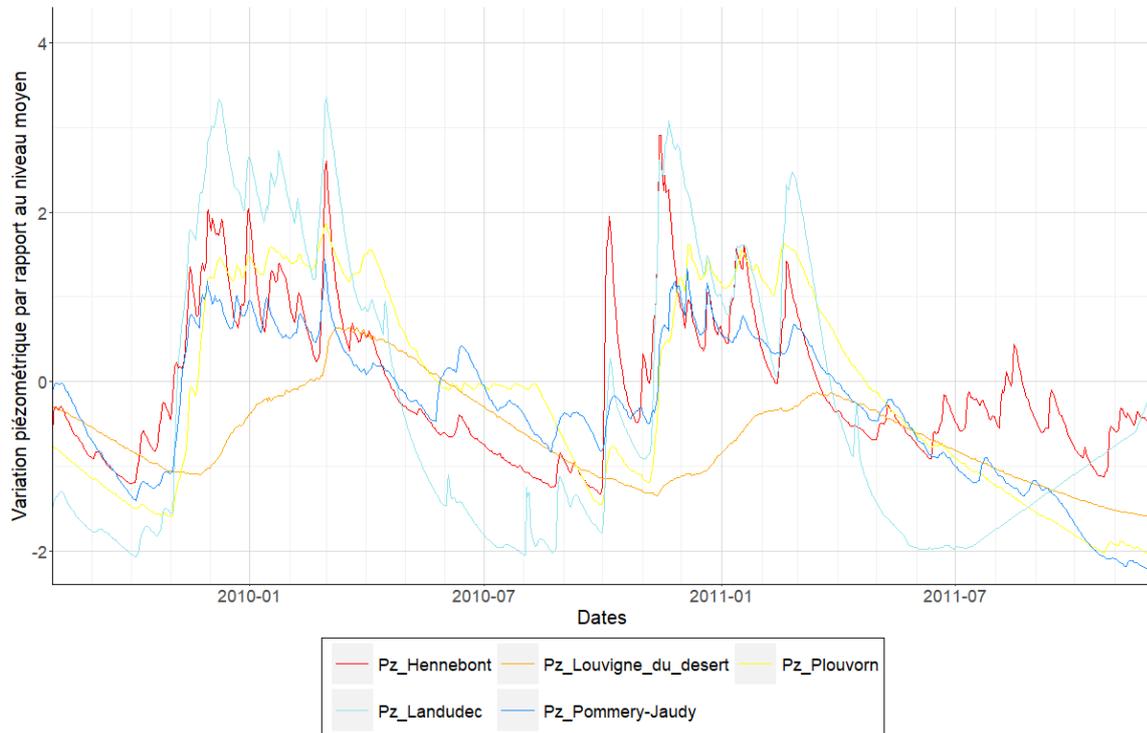


Illustration 28 : Comparaison des variations de niveau sur une sélection de piézomètres

La variabilité interannuelle peut aussi être importante pour un même site en fonction de la période de l'année et de l'intensité de la recharge. Un exemple pour le piézomètre de Landrévarzec est fourni en Illustration 29.

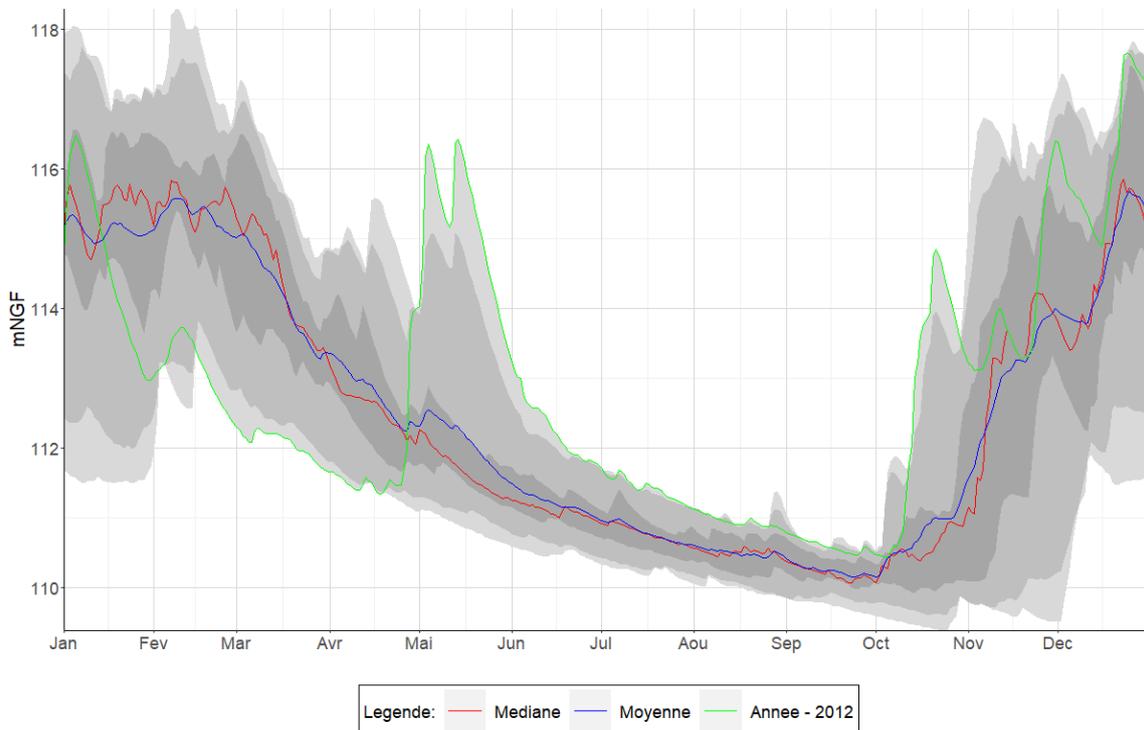


Illustration 29 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landrévarzec avec en rouge la médiane, en bleu la moyenne et en vert une année sélectionnée (2012). Les zones grises représentent les minimum et maximum et les quartiles des valeurs.

Pour évaluer la variabilité des périodes de recharge et de vidange à l'échelle régionale, les moyennes mensuelles des 52 piézomètres du réseau national ont été calculées et normalisées par l'écart type pour comparaison (valeurs centrées réduites). La comparaison (Illustration 30) montre qu'en moyenne les niveaux maximum sont atteints en février et le minimum en septembre. On note toutefois une certaine variabilité en fonction des piézomètres avec un étalement des maxima entre décembre et mars et des *minima* entre août et novembre. Bien que limitée dans le temps, cette variabilité peut être un atout de gestion avec une réserve disponible de façon différente sur le territoire.

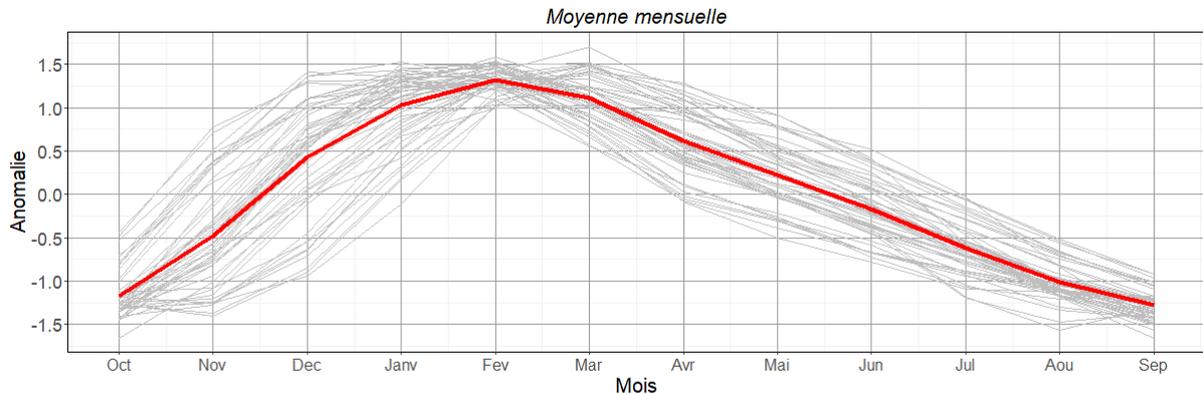


Illustration 30 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne. La moyenne de l'ensemble des piézomètres est présenté en rouge.

Afin d'identifier les éléments déterminants de cette variabilité, ces variations ont été confrontées à la position géographique des piézomètres, à leur profondeur et à la géologie des aquifères captés. Le premier élément de comparaison étudié est l'impact de la position géographique. Pour cette analyse, l'ensemble des 52 piézomètres a été identifié suivant un gradient Est-Ouest selon leurs coordonnées géographiques (Illustration 31) par un gradient de couleurs.

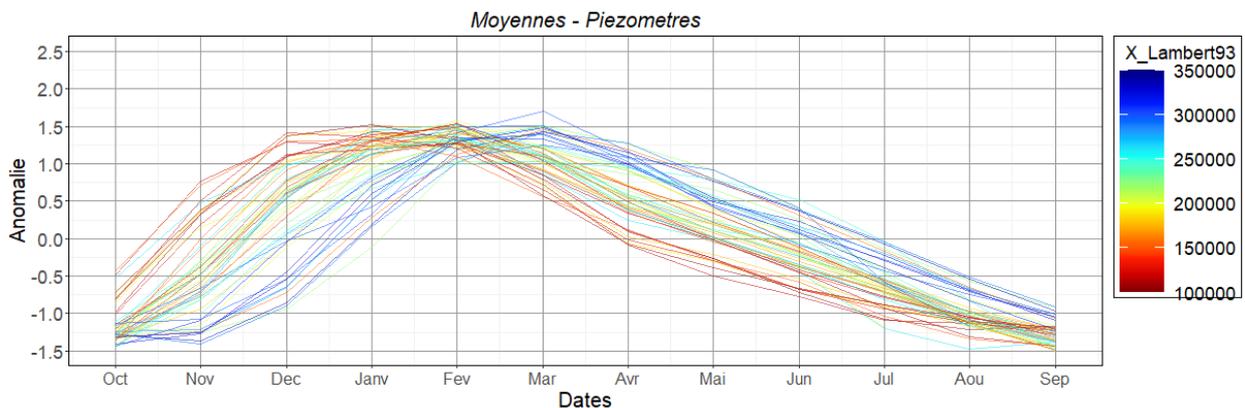


Illustration 31 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur (Est bleu – Ouest rouge)

Cette classification montre clairement un gradient du rouge (ouest) vers le bleu (est) en passant par le jaune et le vert. La décomposition des mêmes données permet plus clairement d'illustrer les résultats (Illustration 32).

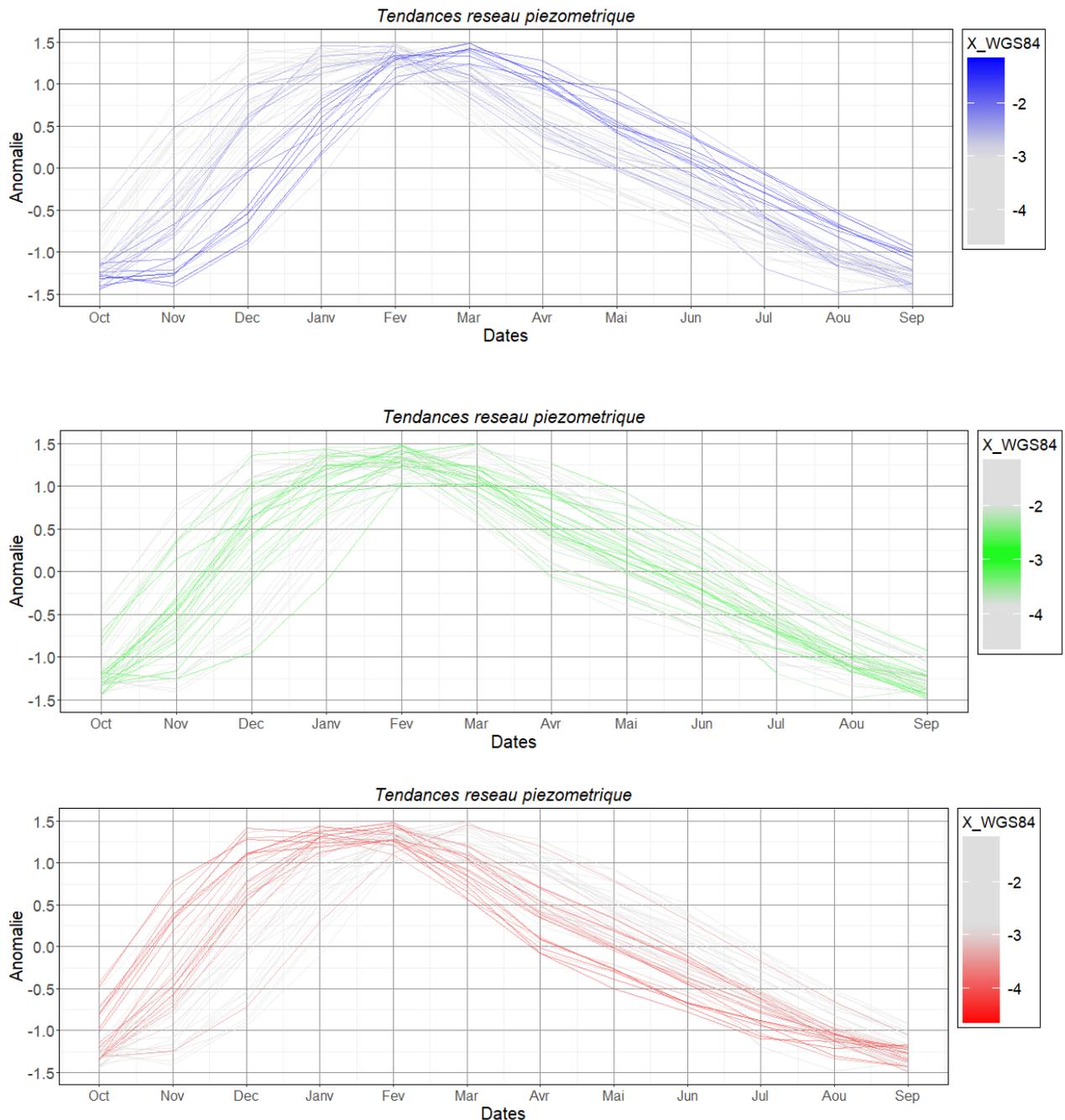


Illustration 32 : Décomposition des moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne. En haut (bleu) piézomètres de l'est Bretagne, au milieu (vert) piézomètres du centre et en bas (rouge) piézomètres de l'ouest.

Cette classification montre que la recharge tend à être plus précoce à l'ouest (courbes rouges) avec une hausse moyenne des niveaux plus rapide avec un maximum atteint entre décembre et février. À l'exception d'un piézomètre, tous les niveaux baissent à partir de février. À l'inverse, à l'est Bretagne (courbes bleues), la période de recharge ne débute pour certains piézomètres qu'en novembre et les maximums sont atteints en février/mars. Lors de la phase de vidange, la baisse relative des piézomètres semble plus rapide à l'ouest qu'à l'est. Entre ces deux extrêmes géographiques (courbes vertes), on observe des comportements moyens.

Afin d'apprécier le rôle de la répartition temporelle des précipitations sur le signal piézométrique, la même procédure a été appliquée pour les précipitations. Les stations utilisées sont celles rattachées à chaque point de suivi du réseau piézométrique national

servant notamment aux bulletins régionaux de situation des nappes. De ce fait, la répartition géographique des piézomètres et des stations météorologiques est similaire. Les périodes de relevés piézométriques et de précipitations sont identiques. Les résultats de la procédure figurent en Illustration 33. Les codes couleurs sont homogènes entre les différentes figures.

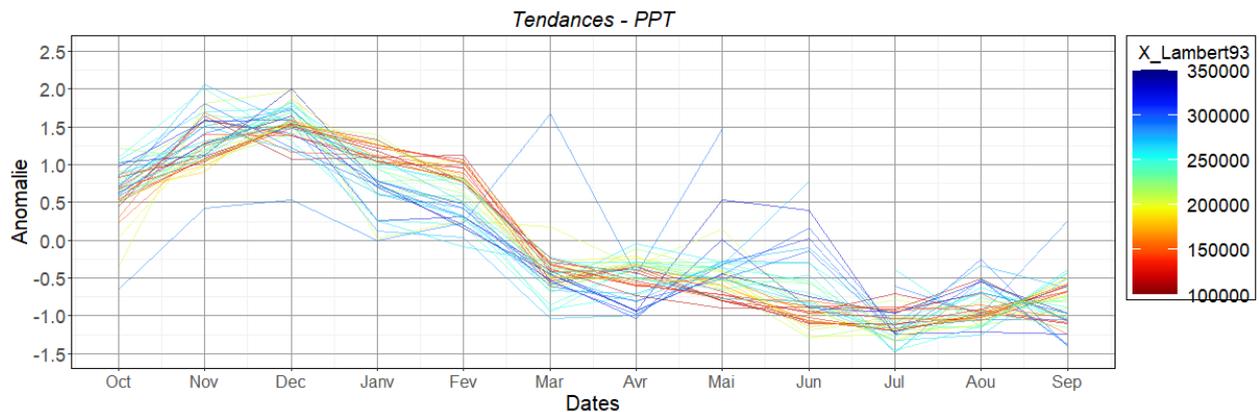


Illustration 33 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des précipitations (PPT) sur 52 stations de Bretagne classées d'est en ouest par code couleur (Est bleu – Ouest Rouge)

Bien que des différences existent aussi entre l'est et l'ouest sur les périodes de précipitations relatives, celles-ci n'expliquent pas directement les observations sur le réseau piézométrique. On constate même en moyenne une part des précipitations plus tardives en janvier-février pour la partie ouest. Du fait de la normalisation, cette procédure ne prend pas en compte les différences d'intensité de précipitations entre l'est et l'ouest de la région.

D'autres éléments explicatifs ont été recherchés. Les variations piézométriques ont été comparées à la profondeur des piézomètres (Illustration 34). La profondeur ne présente pas de tendance significative, avec des comportements variables quelle que soit la profondeur. Des analyses complémentaires ont été menées en prenant en compte la profondeur des crépines, l'épaisseur des altérites, l'altitudes des piézomètres. Les données pour ces analyses sont issues de l'atlas piézométrique de Bretagne (Mougin, 2006). Elles sont basées sur des données locales collectées sur les logs dressés lors de la réalisation des piézomètres. Ces éléments, qui sont présentés en annexe 2, ne semblent pas être des éléments discriminants sur la dynamique de recharge. Toutefois ayant été collectés au point de foration, elles peuvent ne pas être représentatives de la situation à l'échelle du versant suivi.

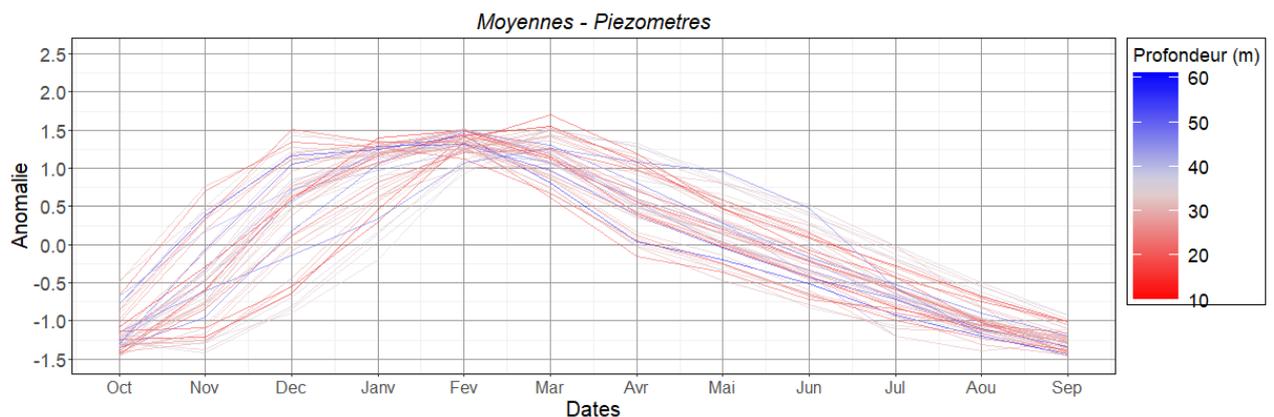
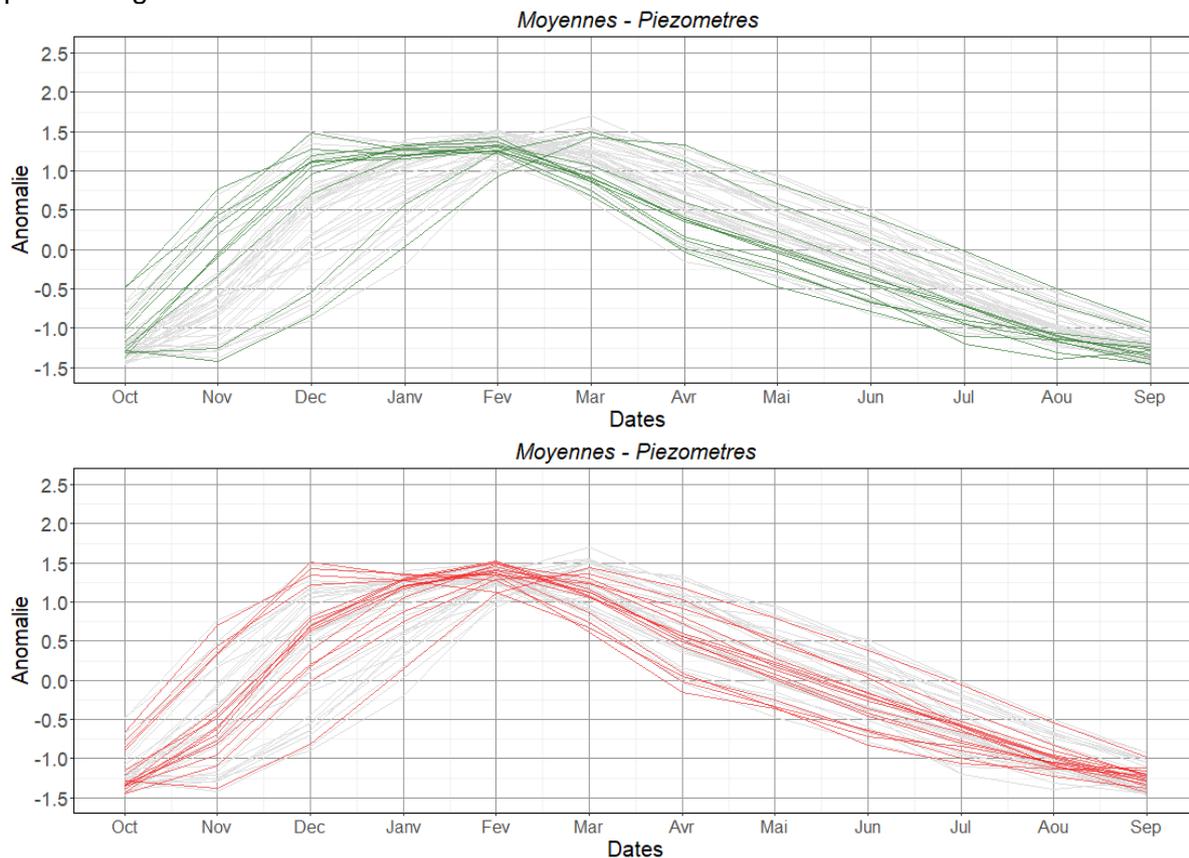


Illustration 34 : Moyennes mensuelles (centrée réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur (est bleu – ouest Rouge)

L'impact des différentes lithologies a aussi été évalué. Les catégories sont basées sur les éléments de l'Atlas piézométrique régional (Mougin, 2006). Certaines lithologies ont des comportements contrastés (Illustration 35). La catégorie schistes et grès présente des réponses rapides dans le Finistère et lentes en Ille-et-Vilaine. Les granites présentent plutôt des phases de recharge précoces et des récessions rapides. Les schistes briovériens ont des comportements très variables et les micaschistes ont une inertie plus importante avec une recharge tardive et une récession relative longue. Basé sur ces informations, la discrétisation par lithologie reste limitée.



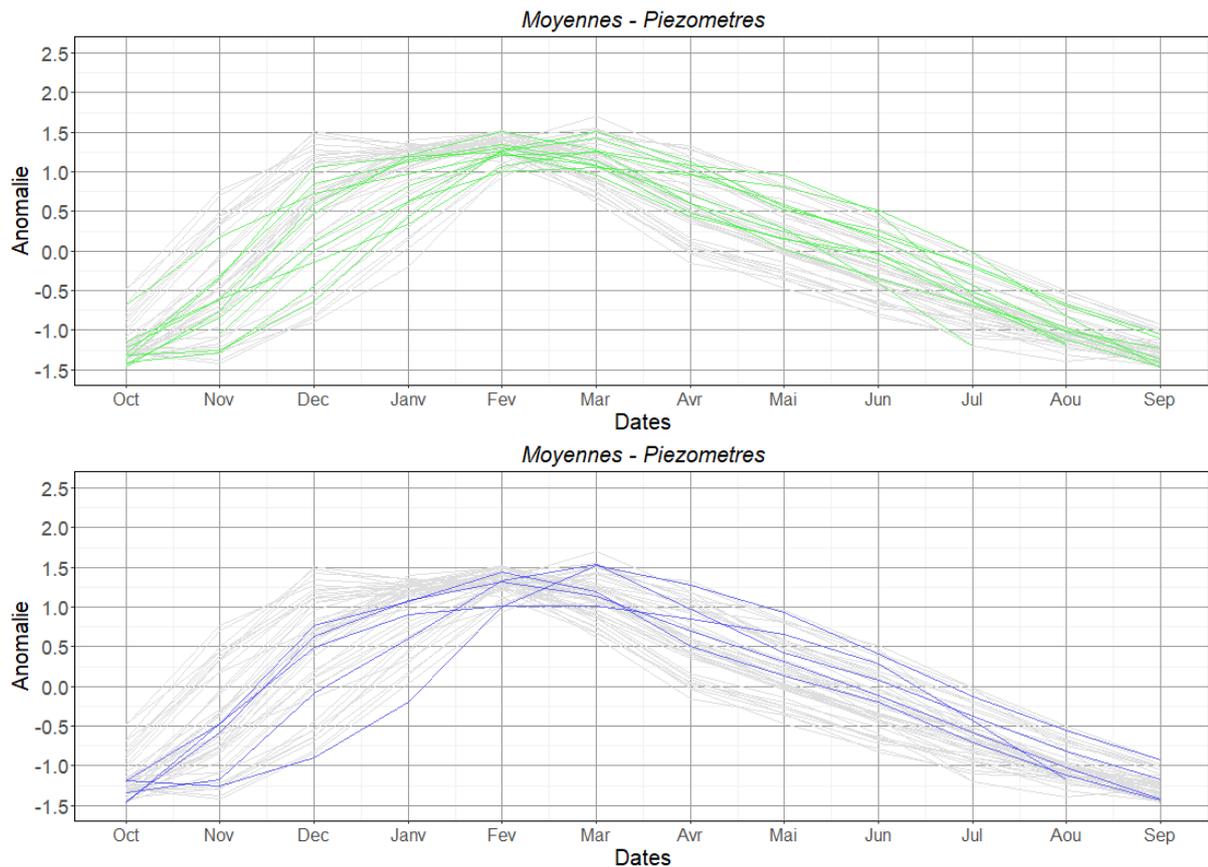


Illustration 35 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés par lithologie. De haut en bas : schistes et grès paléozoïques (vert foncé), granites (rouges), schistes briovériens (vert clair) et micaschistes (bleu).

Une seconde représentation prenant en compte la fois la lithologie dominante du bassin versant drainée et l'âge des formations a été réalisée à partir des informations de la carte géologique au 1/1 000 000^{ème}. Les codes suivants ont été attribués aux différents piézomètres : 1) Roches plutoniques Hercyniennes, 2) Schistes briovériens, 3) Schistes primaires et grès cadomiens en Ile-et-Vilaine, 4) Formations plutoniques cadomiennes, 5) Schistes primaires en Finistère, 6) Bassins tertiaires. Les points et lithologies attribués sont représentés sur la carte suivante (Illustration 36).

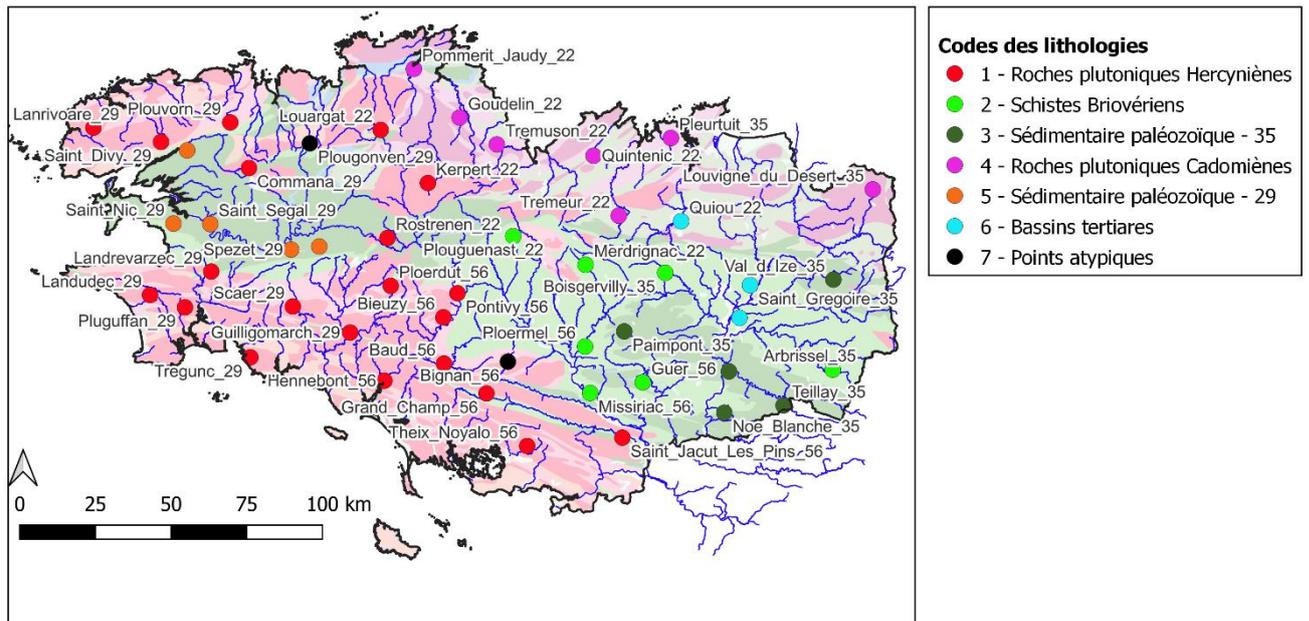


Illustration 36 : Localisation des piézomètres et codes de bassin associés

Cette classification par lithologie des bassins et représentation géographique est présentée Illustration 37 pour les roches plutoniques hercyniennes et les schistes paléozoïques du Finistère. Ces deux catégories représentent les zones de recharge les plus précoces et plus réactives et ont des comportements relativement homogènes. Les aquifères dans les schistes de cette zone sont peu profonds et connectés avec la surface. Seuls deux points ont des dynamiques lentes dans les granites hercyniens. Il s'agit des piézomètres de Bignan et Plougonven qui sont représentés en noir sur l'illustration 37.

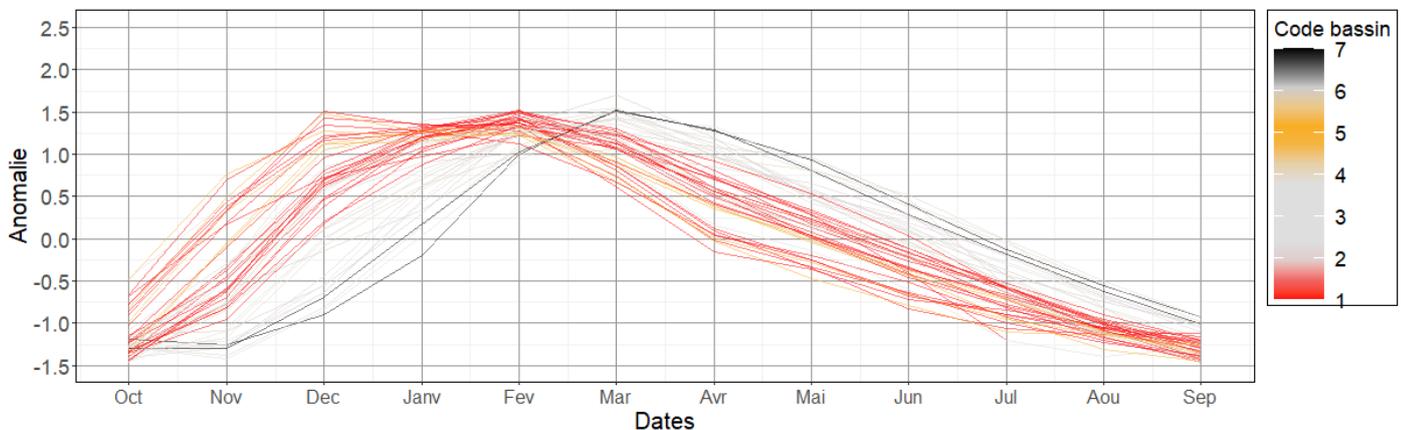


Illustration 37 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) de l'ensemble des piézomètres situés dans les formations des roches plutoniques hercyniennes (en rouge) et schistes paléozoïques du Finistère (en orange). Deux points aux dynamiques différentes dans les roches plutoniques hercyniennes (Bignan et Plougonven) sont isolées en noir.

Les moyennes des niveaux des formations plutoniques cadomiennes, schistes briovériens et schistes paléozoïques d'Ille-et-Vilaine sont présentés Illustration 38. Ces formations ont des dynamiques de recharge nettement plus lentes.

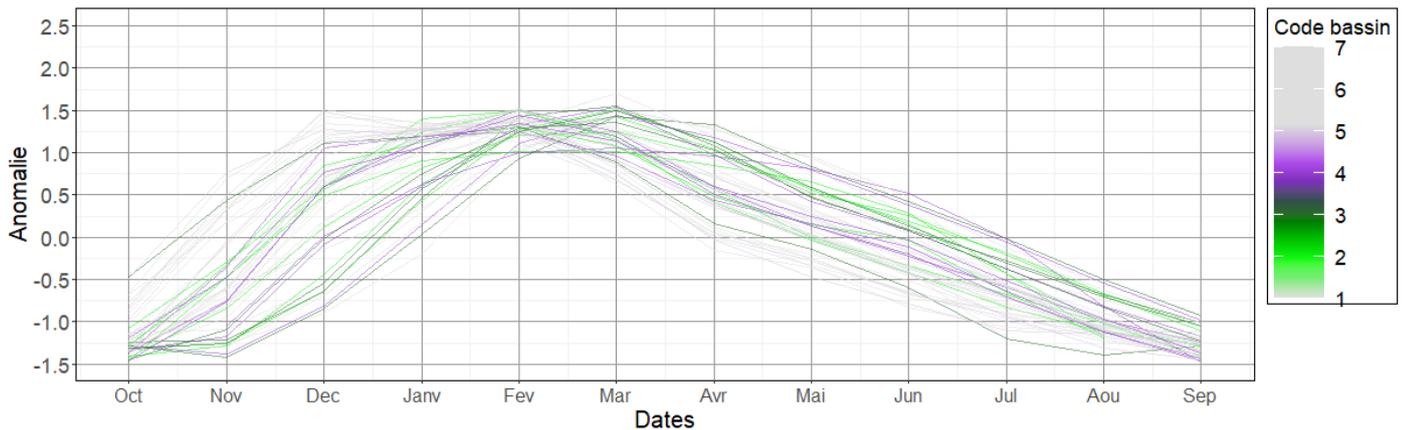


Illustration 38 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) de l'ensemble des piézomètres situés dans les formations des roches plutoniques cadomiennes (violet), schistes briovériens (vert clair) et schistes paléozoïques d'Ille-et-Vilaine.

Les trois points situés dans les bassins sédimentaires tertiaires ont des dynamiques plus lentes et sont présentés Illustration 39.

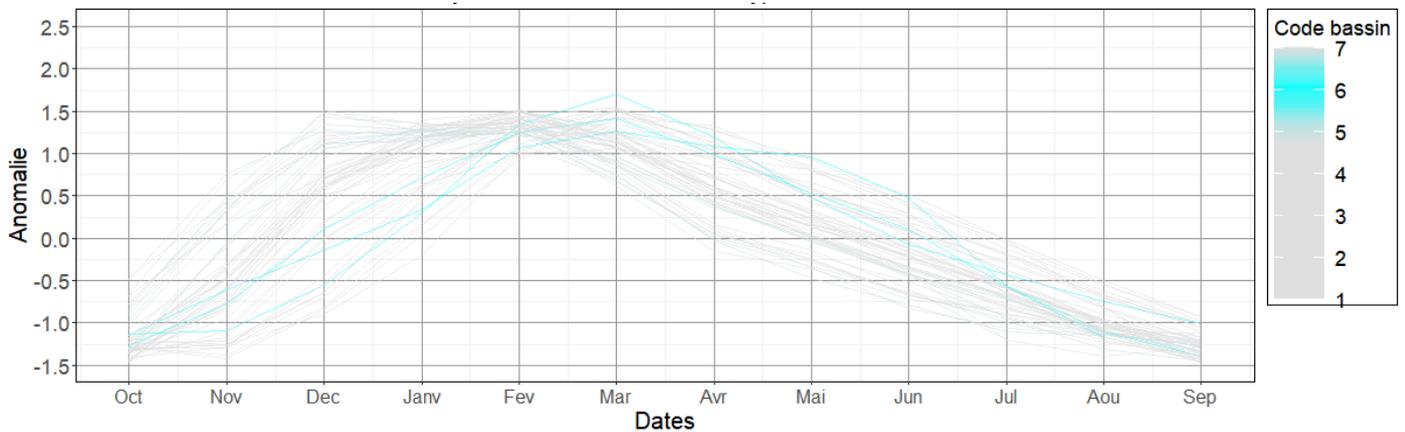


Illustration 39 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) des piézomètres situés dans les bassins tertiaires.

Cette prise en compte de l'âge des formations permet de différencier les dynamiques des piézomètres en fonction des lithologies et donc de mettre en avant leur rôle sur la dynamique des ressources en eau.

2.7.2 Débits des cours d'eau

Les piézomètres pouvant être représentatifs de conditions locales, l'analyse a aussi été conduite sur les cours d'eau avec une sélection de 105 stations hydrologiques classées comme non influencées dans la base données Hydroportail. Les stations utilisées sont localisées Illustration 40. Les moyennes de crues et récessions pour ces 105 points sont présentées en Illustration 41.

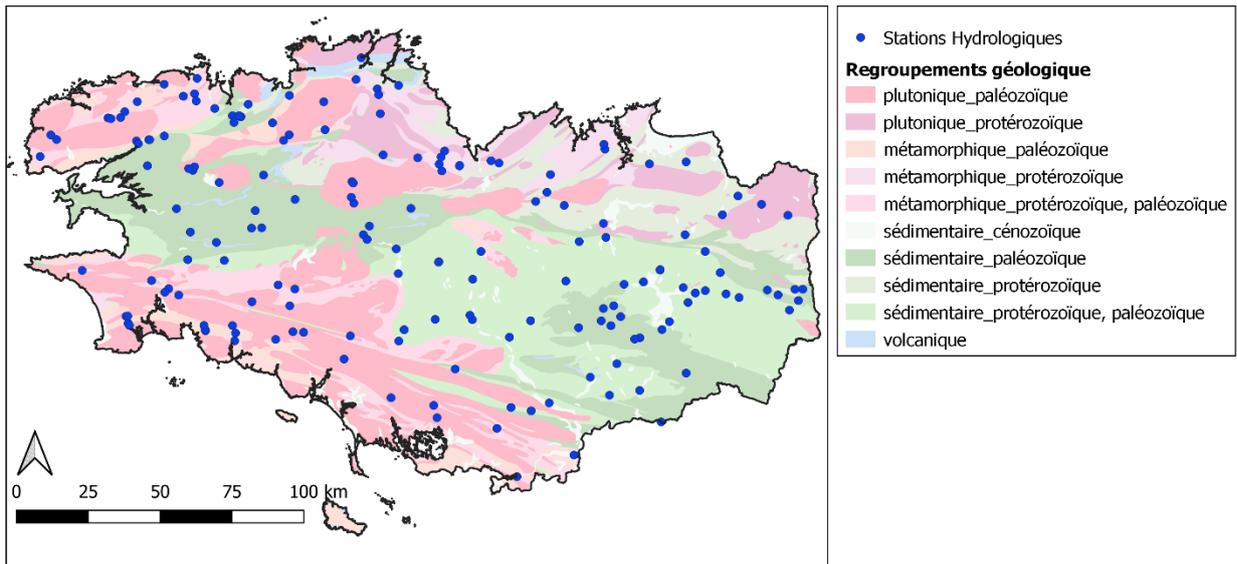


Illustration 40 : Localisation des stations hydrologiques utilisées

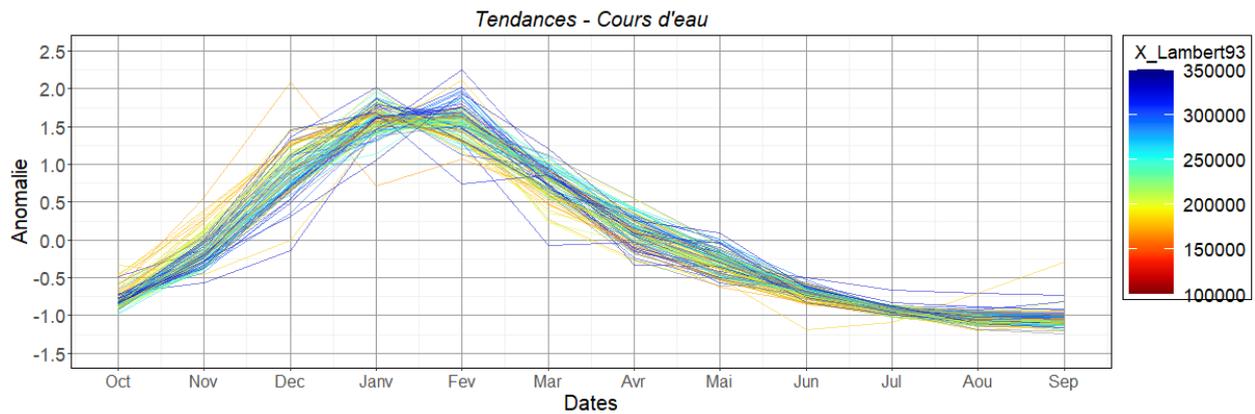


Illustration 41 : Moyennes mensuelles des débits (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne classés par position géographique (Est bleu – Ouest Rouge)).

Bien que les écarts soient moins marqués que pour les piézomètres, on note que les courbes bleues représentatives de la partie Est de la région ont une reprise des débits plus tardive que la partie Ouest. Le fait que les écarts soient moins marqués est lié au fait que les eaux souterraines ne représentent qu'une partie des écoulements (entre 38 et 83 % selon SILURES Bretagne, Mougin *et al.*, 2008) et que les écoulements de surface sont fortement contrôlés par des écoulements rapides suite aux précipitations en période de hautes eaux. Toutefois, l'écart observé sur les piézomètres reste observable sur les cours d'eau. Comme pour les piézomètres, différents facteurs ont été évalués en plus de la position géographique.

L'impact du soutien d'étiage est évalué grâce au BFI (Illustration 42). Cet indicateur d'étiage montre peu de différences lors de la phase d'augmentation des débits. Cependant, lors de la phase de récession, les cours d'eau avec un faible BFI (faible soutien d'étiage – courbes rouges) montrent une décroissance plus rapide finissant en juin-juillet alors que les cours d'eau au BFI important (courbes bleues) montrent une décroissance plus continue jusqu'en septembre.

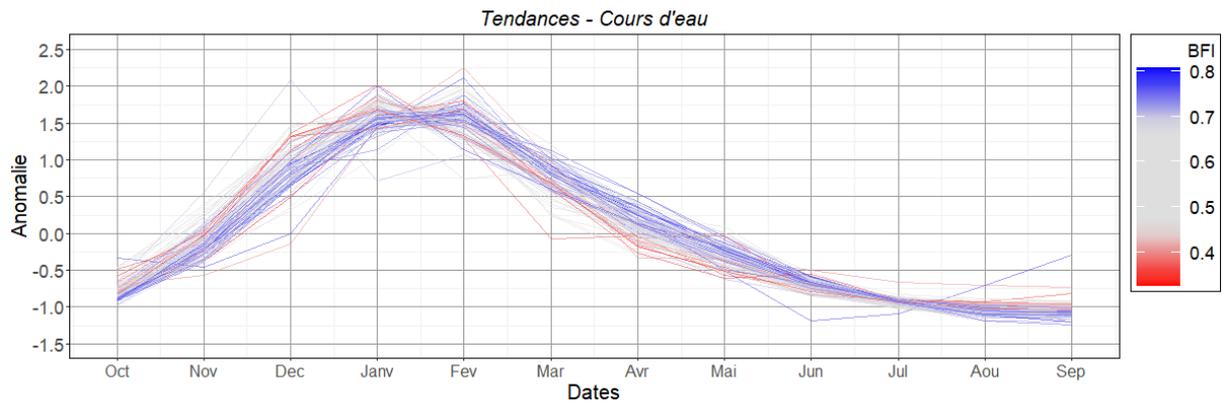


Illustration 42 : Moyennes mensuelles (centrées-réduites) des cours d'eau de Bretagne classés par BFI (en bleu BFI important – Fort soutien d'étiage ; en rouge BFI faible – Faible soutien d'étiage)

Pour relier ces comportements à la géologie, une différenciation basée sur les pourcentages lithologiques de chaque bassin a aussi été réalisée. Les classifications correspondent à celles définies en Illustration 21 avec les classes suivantes (sédimentaire, plutonique et métamorphique). Pour limiter le nombre de figures et maintenir un effectif suffisant dans chaque échantillon, un regroupement entre plutonique et métamorphique a été réalisé. Cette analyse montre que les classes plutoniques et métamorphiques ont des comportements plus homogènes que les classes sédimentaires.

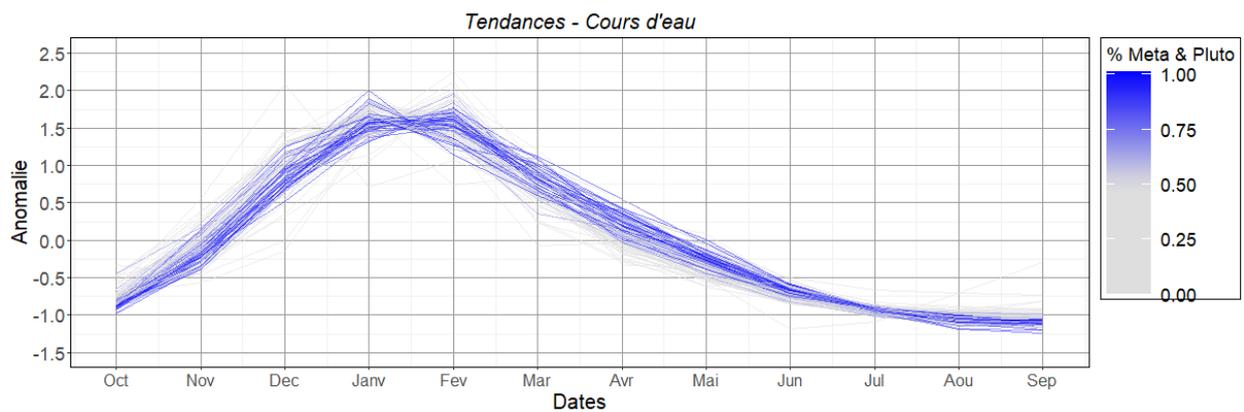


Illustration 43 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne décomposés par lithologie. Classe plutonique et métamorphique

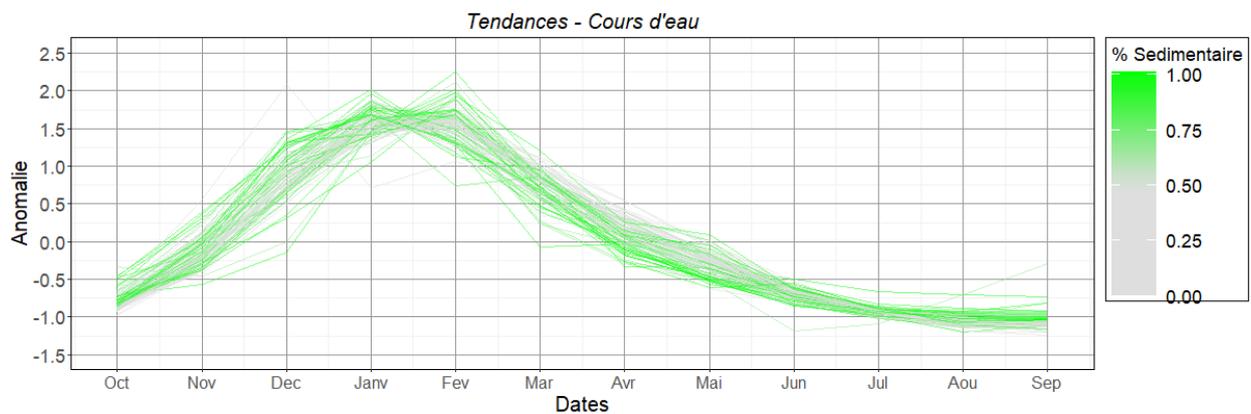


Illustration 44 : Moyennes mensuelles (centrées réduites) des cours d'eau de Bretagne décomposés par lithologie. Classe sédimentaire

2.8 QUANTIFICATION DE L'INERTIE PLURIANNUELLE DES AQUIFÈRES SUR LES SUIVIS PIÉZOMÉTRIQUES

La présence de cycles pluriannuels dans les variations piézométriques des points du réseau national a été évaluée par une analyse par périodogramme. Le périodogramme est une méthode d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal. C'est une décomposition harmonique de la variance de la série dans l'espace des fréquences. Elle permet de définir les fréquences qui contribuent le plus à la dynamique d'une série temporelle. Cette méthode permet d'identifier les périodes majeures d'une série temporelle. Ainsi plus l'intensité d'une période est forte, plus elle est une composante importante du signal.

Deux exemples sont fournis : pour un piézomètre à cycle uniquement annuel et pour un autre piézomètre avec un second cycle pluriannuel. Pour le premier cas, la densité spectrale est majoritairement d'une année, indiquant un cycle annuel. Dans le second cas, les densités les plus marquées sont 1 et 5,8 ans mettant en avant, en plus du signal annuel, une variation pluriannuelle de 5,8 ans.

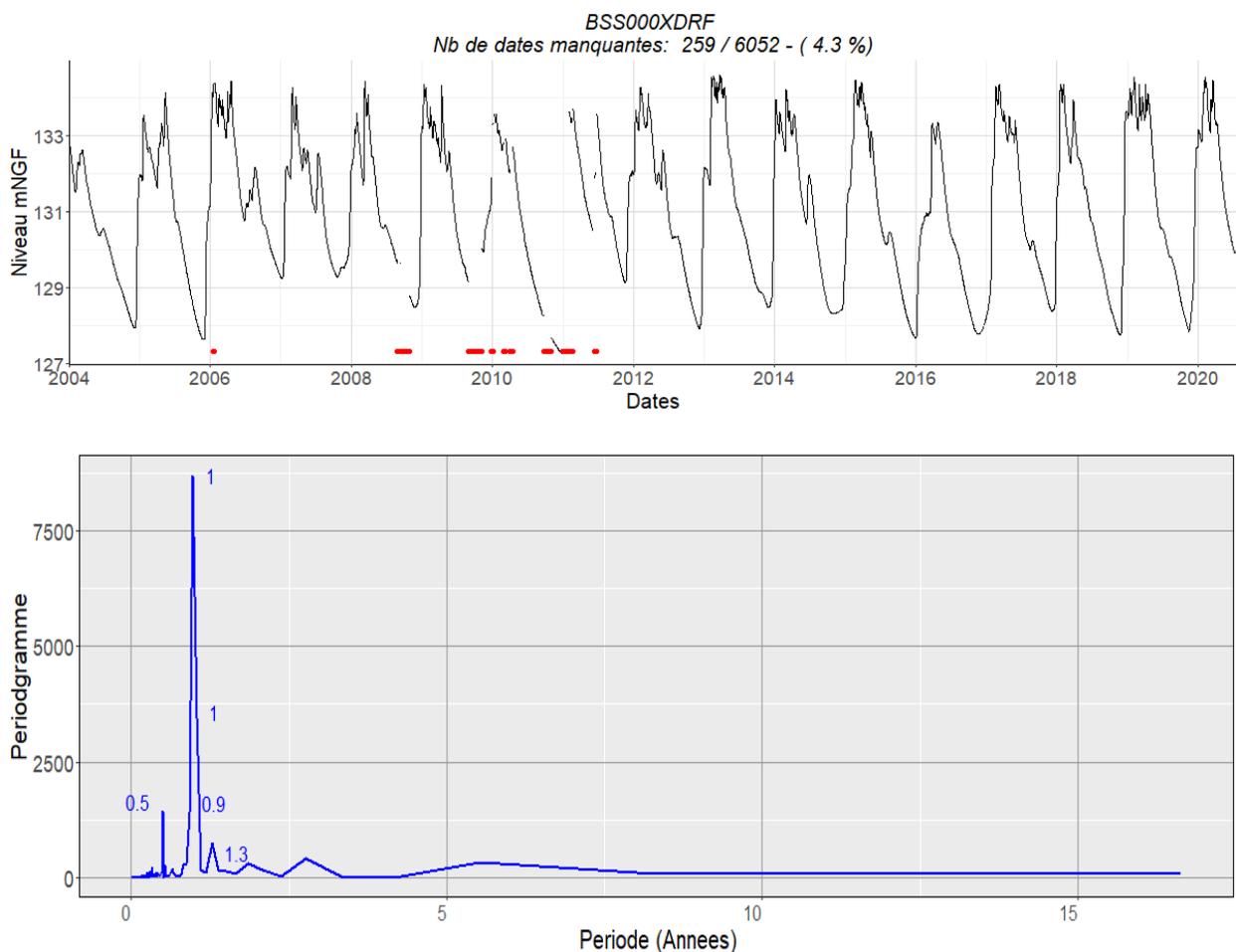


Illustration 45 : Chronique piézométrique (en haut) et périodogramme (en bas) pour le piézomètre de Spézet (29) présentant des cycles annuels

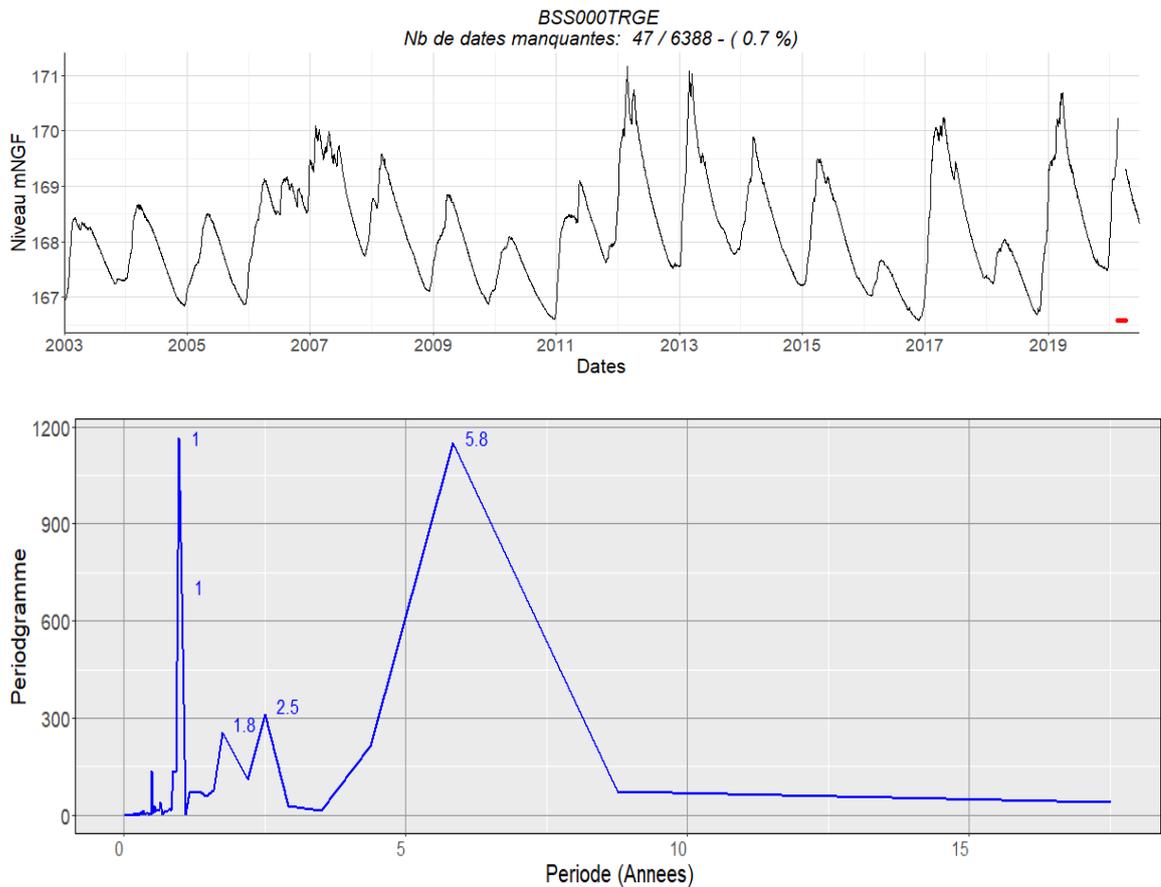


Illustration 46 : Chronique piézométrique (en haut) et périodogramme (en bas) pour le piézomètre de Louvigné-du-Désert (35) présentant des cycles pluriannuels

Tous les piézomètres bretons sont dominés par des cycles annuels (pic à 1 an sur le périodogramme), cependant des cycles pluriannuels sont présents pour certains piézomètres. Sur l'illustration 47 sont représentées par des couleurs, les périodes secondaires observées sur chacun des piézomètres. Sur cette représentation cartographique, les points bleus foncés indiquent des cycles purement annuels.

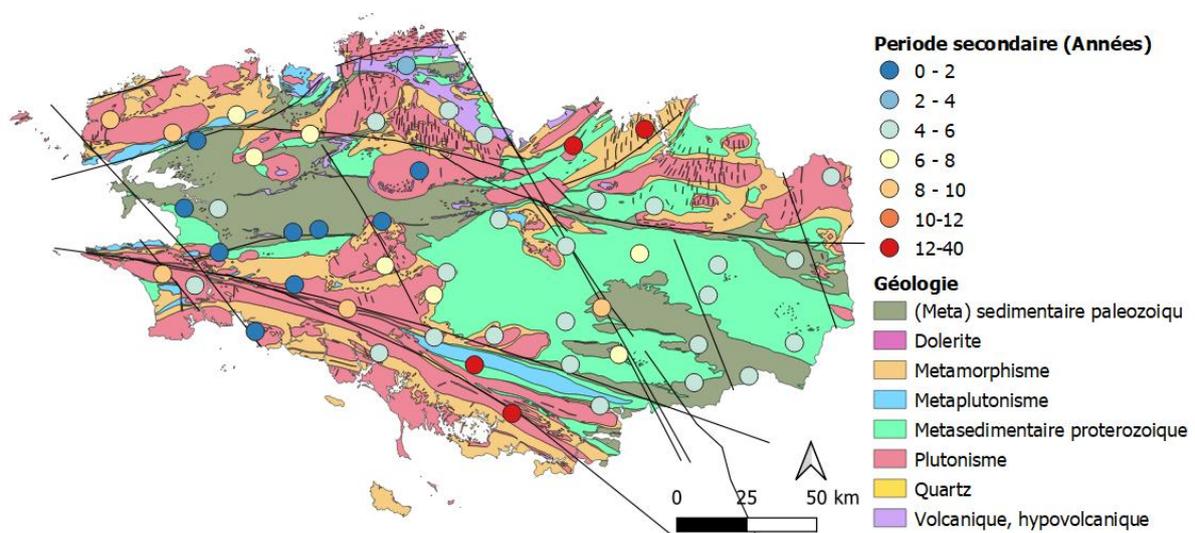


Illustration 47 : Cartographie des périodes secondaires observées sur les chroniques piézométriques sur fond de carte géologique simplifiée

Sur cette répartition spatiale, il est observé que les cycles annuels sont plutôt situés à l'ouest de la région dans le département du Finistère. Tous les cycles secondaires sont représentés même si leur intensité est faible. L'importance de la seconde période a été évaluée en calculant le ratio de la seconde période sur le cycle annuel. Il peut être proche de 1 si ces cycles sont marqués (ex : Louvigné-du-Désert - Illustration 46) ou proche de zéro si cette période est peu marquée (ex : Spézet - Illustration 45). L'Illustration 48 montre qu'une majorité des périodes secondaires est peu marquée à l'exception des périodes comprises entre 5-6 ans.

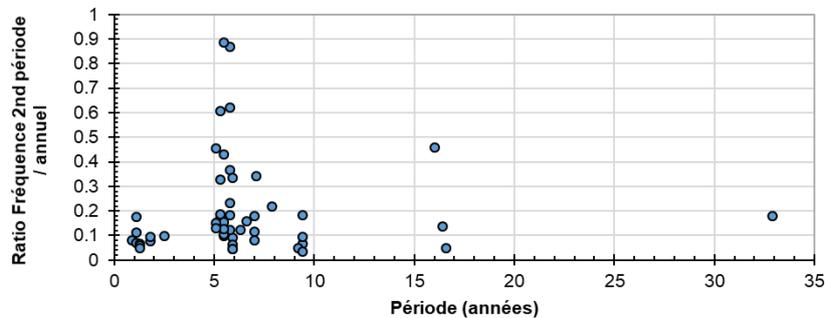


Illustration 48 : Ratio de l'intensité de la période secondaire sur le cycle annuel en fonction de la période

La répartition spatiale de ces intensités (Illustration 49 & Illustration 50) montre que les cycles pluriannuels sont marqués à l'est et peu marqués à l'ouest.

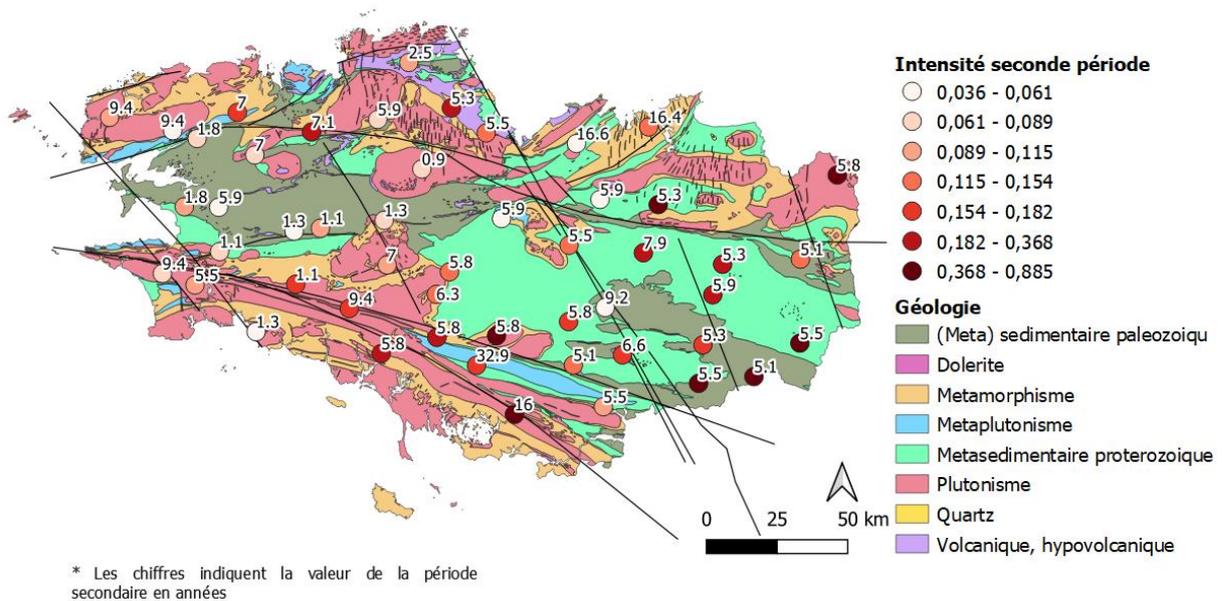


Illustration 49 : Intensité des cycles pluriannuels. Les chiffres en étiquettes indiquent la valeur de la période secondaire.

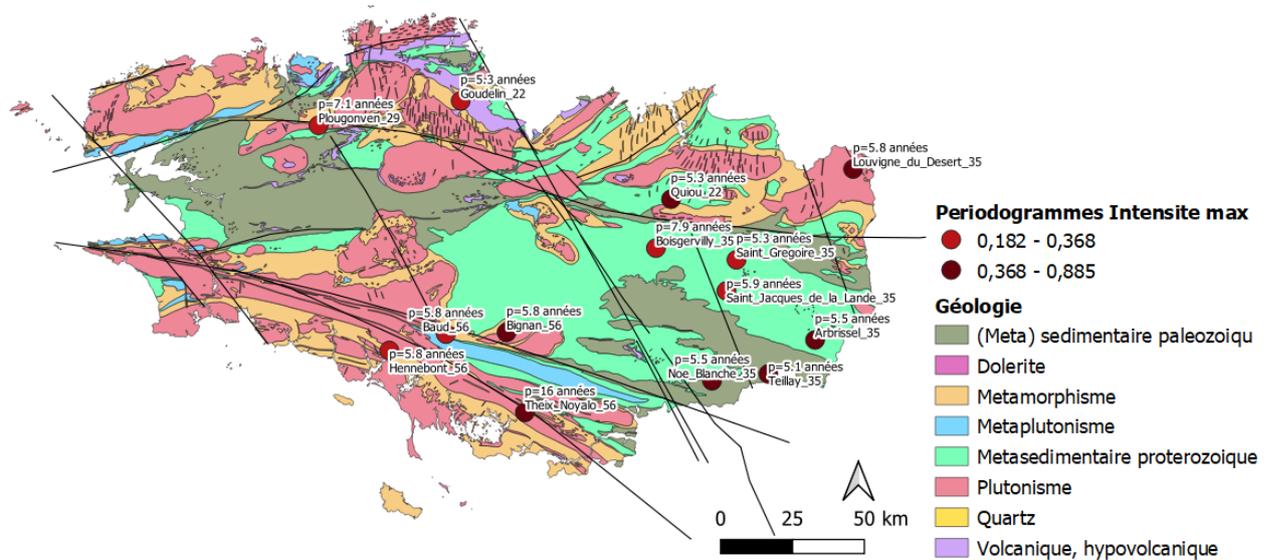


Illustration 50 : Sites où les cycles secondaires sont les plus marqués. Les valeurs du piézomètre de Thaix semblent être affectées par des éléments non naturels (pompages) et peut être exclu.

Ces résultats indiquent que la période secondaire principale représentée est proche de 5,5 années et que les cycles pluriannuels sont principalement présents à l'est de la région. Cette période est la seule nettement marquée sur les chroniques. Dans la partie ouest Bretagne et dans les Côtes-d'Armor à deux exceptions près, les cycles sont purement annuels. Les aquifères sont très peu affectés par des successions d'années pluvieuses ou sèches.

2.9 CONCLUSION CHAPITRE 2

Les analyses réalisées dans le cadre de cette étude montrent qu'il existe des différences de comportement des bassins versants selon leurs lithologies à l'échelle de la région. Ces différences n'étaient auparavant pas quantifiées. Ce manque de discrétisation entre les lithologies par analyse d'essais de pompage est en partie due au biais d'échantillonnage, et notamment lié au fait que les essais de pompages sont réalisés principalement pour des ouvrages productifs. De ce fait, les valeurs révélées ne sont pas toujours représentatives des propriétés médianes de la formation géologique. Pour ces raisons, dans ce projet, des analyses complémentaires ont été réalisées pour évaluer les différences de propriétés et dynamiques des eaux souterraines en fonction des lithologies.

Cette observation a été validée sur la base des éléments suivants :

- position géographique des sources et relation avec les lithologies ;
- paramètres hydrodynamiques ;
- productivité des champs captants ;
- contribution des différentes lithologies aux cours d'eau (BFI) ;
- temporalité des phases de recharge et d'étiage des piézomètres ;
- temporalité des phases de crue et récession des cours d'eau ;
- cyclicité des variations piézométriques.

Ces analyses permettent de faire les constats suivants :

L'analyse conjointe des contributions des différentes lithologies aux cours d'eau et la répartition des sources indiquent que les roches plutoniques tendent à avoir un soutien d'étiage plus marqué alors que les roches méta-sédimentaires ont des soutiens d'étiages plus faibles (et des propriétés hydrodynamiques des aquifères associés relativement plus limitées). Ces différences n'étaient que peu marquées par l'analyse des paramètres hydrodynamiques des aquifères. La présente étude montre des indicateurs de comportements et une dynamique générale mais ne fournit pas une quantification directe des propriétés hydrodynamiques. La quantification des différences hydrologiques des bassins versants en termes de propriétés hydrodynamiques des aquifères qui les composent (perméabilité et emmagasinement) a fait l'objet du projet de thèse de Nicolas Cornette (Co encadrement OSUR/BRGM) avec des financements de la Région Bretagne et du BRGM. Les travaux sont basés sur des modélisations à l'échelle du bassin versant. La méthodologie a été publiée dans un article (Cornette *et al.*, 2022).

Les analyses montrent aussi que l'inertie de la recharge et la vidange des aquifères sur le territoire présente une certaine hétérogénéité. Bien que les différences de comportements hydrodynamiques des aquifères et bassins versants de différentes lithologies soient limitées, elles permettent des soutiens d'étiages plus ou moins longs avec des différences de l'ordre du mois à trois mois. Bien que celles-ci puissent paraître faibles, à l'échelle régionale où la majorité des ressources en eau sont sur des roches de socle, cette différence peut permettre dans certains cas une gestion différenciée entre les territoires bretons. La capacité de recharge peut être plus limitée lors d'années où la période de recharge est concentrée et ainsi diminuer la résilience face à des successions de sécheresses.

Un clair gradient est-ouest est observable sur les piézomètres et reste visible sur les cours d'eau bien que nettement moins marqué. Le rôle de la géologie sur cette inertie est identifiable en prenant en compte l'âge des formations, en séparant notamment roches hercyniennes et cadomiennes. De même pour les schistes paléozoïques, une différence marquée existe entre le Finistère et l'Ille-et-Vilaine. Bien que ces formations soient des schistes d'âges similaires, ces formations ont des compositions très différentes qui se reflètent sur la dynamique des ressources en eaux.

Les analyses menées dans ce chapitre sont complémentaires et doivent être utilisées conjointement. En effet, en ne prenant en compte que la dynamique de recharge, les formations du Finistère (granites hercyniens et schistes paléozoïques) ont des comportements similaires. Hors ces formations ont des contributions très différentes aux cours d'eau avec une contribution forte pour les roches plutoniques et faible pour les schistes. Ceci met en avant une différence au niveau de leur capacité à stocker des ressources. Les schistes sont peu capacitifs et bien que les niveaux puissent remonter rapidement, les volumes stockés sont probablement faibles. À l'opposé, les granites hercyniens ont une perméabilité suffisamment importante pour permettre un remplissage relativement rapide et un emmagasinement permettant un stock et une restitution future aux cours d'eau. Les granites cadomiens semblent avoir une capacité de stockage importante mais une perméabilité plus faible que les granites hercyniens. Ces éléments sont mis en lumière, 1) par un BFI important et 2) une dynamique plus lente des phases de recharge et de vidange de la nappe et 3) des cycles pluriannuels plus marqués.

Il convient aussi de noter que les dynamiques de recharge comparées dans le cadre de la présente étude sont des données centrées réduites et que les variations comparées sont des valeurs relatives. De ce fait, des comportements contre-intuitifs peuvent apparaître. À titre d'exemple, pour les schistes d'Ille-et-Vilaine, pour lesquels la recharge est tardive et les phases de récession sont lentes, il peut être logique de penser que cela entrainerait une bonne résilience des cours d'eau pendant l'été, or ceux-ci sont souvent à sec. Cette dynamique doit

être analysée avec l'ensemble des données. Ces aquifères ont une faible contribution aux soutiens d'étiages des cours d'eau. La dynamique lente est donc le fait de formation peu perméables (rendant difficile la recharge, mais induisant une phase de vidange lente) mais aussi de faibles volumes concernés et pouvant être une des raisons d'assecs fréquents. De ce fait, ces formations ont aussi un effet mémoire et les successions d'années sèches (ou d'années humides) auront des effets cumulatifs (visible sur les périodogrammes). Les cycles pluri annuels sont ici le reflet d'une faible perméabilité. À l'inverse, concernant les granites hercyniens du nord Finistère (ex : Lanrivoare, Plouvorn), la présence de cycles pluriannuels serait plus liée à une capacité de stockage plus importante avec à la fois un BFI important, des cycles pluriannuels et des dynamiques de recharge rapides.

Bien que non quantifié dans cette étude, des résultats indiquent de manière qualitative qu'une intensification des précipitations (période de recharge réduite dans le temps) devrait induire une diminution de la recharge plus importante dans les aquifères peu perméables. Les dynamiques observées indiquent que l'Ille-et-Vilaine est plus vulnérable aux changements climatiques sur une majorité du territoire que le Finistère (les situations du Morbihan et Côtes d'Armor étant intermédiaires). Les points majeurs sont que des zones sont plus vulnérables à des successions de sécheresses que d'autres ; que les stocks sont plutôt dans les granites et qu'il y a de bonnes différences de propriétés hydrodynamiques entre les lithologies.

Dans la suite de cette étude (chapitre 4), il a été exploré comment les variations climatiques affectent et ont affecté les ressources en eau (superficielles et souterraines) notamment lors de sécheresses.

3. Croisement des informations disponibles sur la présence de ressources souterraines exploitables

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 Objectif

Différentes études ont cherché à caractériser les ressources en eaux souterraines à l'échelle régionale afin d'identifier des secteurs propices à de nouvelles recherches et notamment les possibilités d'exploitation pour faire face à des sécheresses.

Une ressource exploitable ou une zone favorable peut l'être selon différents critères. Pour être utilisable, une ressource souterraine doit posséder différentes qualités avec notamment :

- une capacité de stockage (volume) ;
- une capacité de remplissage (précipitations) ;
- un équilibre recharge/vidange (capacité d'écoulement/rétention dans le milieu) ;
- une capacité d'exploitation (structure favorable à l'implantation de forages).

Ces critères ont été recherchés au travers de différentes études régionales de manière individuelle mais les résultats de ces différentes études n'ont pas été confrontés.

L'étude SILURES Bretagne (Mougin *et al.*, 2008) s'est intéressée à la favorabilité des ressources en eaux en travaillant sur les capacités de stockage de l'horizon d'altération avec aussi une caractérisation de l'inertie des aquifères répartie par bassin versant. Cette étude est basée sur une régionalisation lithologique des qualités recherchées (épaisseur du milieu fissuré, débit fissuré utile...). Elle est complétée par une interpolation des épaisseurs d'altérites ainsi qu'une évaluation de l'inertie de 70 bassins versants. L'étude ANAFORE (Schorërter, *et al.*, 2020) s'est intéressée aux critères d'implantation de forages en se focalisant sur la capacité d'extraction d'eau via ces forages. Ces critères s'appuient sur une analyse structurale et notamment l'orientation des failles. Cette étude se base sur les relevés locaux et vise à fournir des informations à cette même échelle. Ces deux études ont été conduites à des échelles différentes. L'étude SILURES cherchait à définir à une échelle régionale, les propriétés des aquifères, alors que l'étude ANAFORE avait une vision ponctuelle de différents sites répartis sur toute la région.

Dans le cadre du projet « *De l'eau pour demain* », des compléments sur la contribution des aquifères aux cours d'eau avec un rattachement à la lithologie ont été réalisés afin de pouvoir extrapoler les résultats sur l'ensemble du territoire. Tout comme pour l'étude SILURES Bretagne, la régionalisation s'appuie sur des regroupements lithologiques. D'autres données telles que les sources et la pluviométrie ont aussi des représentations spatiales différentes, et nécessitent d'être homogénéisées pour une comparaison.

Une demande forte existe de la part de nombreux acteurs de l'eau pour une synthèse exhaustive de ces données/études. Cependant malgré la complémentarité des approches développées, cette synthèse reste difficilement réalisable et vérifiable. Ainsi, dans le présent chapitre, les informations disponibles dans le cadre des études précédemment citées ont été compilées dans une cartographie et une vérification de la véracité de l'information produite a été tentée.

3.1.2 Contraintes sur l'utilisation des données

Les critères nécessaires à une ressource abondante et exploitable présentés ci-dessus ont des natures différentes et sont donc estimés non seulement au travers de méthodes différentes mais aussi à des échelles différentes. De ce fait, leur homogénéisation et leur régionalisation sont complexes. À titre d'exemple, les données météorologiques sont des données ponctuelles mais présentes sur toute la région via les interpolations réalisées par Météo France au moyen de modèles. Les sources sont des données ponctuelles tout comme les mesures des paramètres hydrodynamiques en forages (transmissivité). Contrairement aux données météorologiques, il n'existe pas de modèle fiable pour une généralisation régionale de la transmissivité. Pour les sources, le relevé IGN peut être considéré comme exhaustif ou proche. Pour les transmissivités, le milieu est extrêmement sous-échantillonné et l'échantillon disponible peut être de plus affecté par un biais de mesure et d'interprétation. Les données de débits de cours d'eau, bien que mesurées ponctuellement, sont des données intégratives de leur bassin versant amont et couvrent donc des échelles variables de quelques km² à quelques centaines de km². Pour ces mesures, malgré un réseau dense à l'échelle régionale, l'ensemble du territoire n'est pas couvert (Illustration 18). La mise en parallèle et la comparaison des différentes données n'est donc pas triviale et induit donc des choix. Une majorité des études réalisant des croisements de données utilisent des pondérations de paramètres dont les poids sont peu documentés ou arbitraires.

Dans la présente analyse, aucune pondération pour les différents critères retenus n'a été réalisée. Ainsi, le même poids est attribué à chaque paramètre. En effet, la pondération des différents critères induit des choix, bien souvent subjectifs, qui peuvent varier en fonction de l'objectif recherché. La carte produite a pour vocation d'identifier la favorabilité des différentes zones, et dans le cadre de ce projet une orientation vers l'AEP. Cependant, elle peut avoir d'autres utilisations : modèles de prévision d'étiage des cours d'eau, modélisation hydrogéologique, structuration hydrologique d'un territoire, etc. Selon l'utilisation pouvant en être faite, l'importance des différents critères peut être différente.

Une vérification *in situ* au travers de mesures locales de terrain de la favorabilité de la présence d'eau souterraine exploitable n'a pas été réalisée dans le cadre du présent projet pour des raisons techniques et budgétaires. Si une telle carte a pour vocation à différencier des zones ou des géologies plus ou moins favorables à la présence de ressources en eau importantes, elle ne se substitue aucunement à une étude hydrogéologique locale qui reste essentielle pour la réalisation d'une exploitation d'eau. La validation ou non de la présence d'une ressource exploitable est un processus nécessitant une analyse détaillée pouvant comprendre une analyse géologique à la fois sur les lithologies présentes mais aussi sur les aspects structuraux tels que les failles, de la géophysique, des sondages etc... Dans un contexte d'aquifères de socle, l'hétérogénéité du milieu peut développer des conditions spécifiques pouvant être particulièrement propices à l'exploitation d'eau. L'identification de ces conditions locales ne peut donc pas être visible à l'échelle de la région en ne considérant que des données disponibles à cette large échelle.

L'objectif est ici de synthétiser les résultats des différentes études existantes pour fournir à la fois une information condensée mais aussi l'accès aux informations individuelles, afin que le lecteur puisse effectuer, selon ses propres critères, une pondération de l'information.

La cohérence de la cartographie de favorabilité produite dans le cadre de la présente étude a été confrontée à l'exploitation AEP actuelle.

3.2 MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ÉLABORATION DES CRITÈRES

L'élaboration de critères pour chaque source de données a été réalisée selon une méthode uniforme basée sur un classement statistique relatif. Qu'il s'agisse de données ponctuelles ou « raster », une analyse statistique basée sur la carte géologique au 1/250 000 a été effectuée sur l'ensemble du jeu de données. La médiane des valeurs pour chaque unité géologique (213 polygones au total) a été calculée. La médiane et le troisième quartile ont été calculés pour l'ensemble des valeurs de chaque couche. Les données ont ensuite été réparties en quatre catégories possibles. Les valeurs peuvent être nulles, si peu ou pas de données sont disponibles, toutes les valeurs inférieures à la médiane ont été assignées à 0, celles supérieures à la médiane et inférieures au troisième quartile ont été assignées à 0,5, et celles supérieures au troisième quartile ont été assignées à 1. Cette classification statistique fournit donc un classement relatif d'une valeur face à son échantillon de données.

La carte de critères contient 9 critères pouvant avoir 4 valeurs :

- #N/A : Valeurs nulles, absence de données ;
- 0 : valeurs < médiane ;
- 0,5 : > médiane mais < 3^{ème} quartile ;
- 1 : > 3^{ème} quartile.

L'ensemble des données présentées a été découpé et organisé en fonction de la carte géologique au 1/250 000. Le croisement des 9 cartes de critères a été réalisé en sommant les valeurs définies sur chaque unité géologique.

3.3 CRITÈRES UTILISÉS

3.3.1 Transmissivité

Le critère de transmissivité provient des données ponctuelles recensées par le BRGM (Illustration 5). Après découpage selon la géologie, seules les formations géologiques contenant plus de 3 valeurs ont été retenues, soit un total de 60/213 formations pour 472/523 données de transmissivité. Pour chaque formation géologique, la médiane a été déterminée. Ensuite, la médiane des médianes a été utilisée comme seuil de 0,5 et le 3^{ème} quartile comme seuil de 1, soit Seuil 0,5 > $5 \cdot 10^{-4}$ m²/s et Seuil 1 > 10^{-3} m²/s).

3.3.2 Épaisseur d'altérites

L'épaisseur des altérites est issue de la couche raster provenant du projet SILURES Bretagne au 1/250 000 (Illustration 15). Un outil de statistiques pour raster a permis de déterminer la médiane de l'épaisseur par rapport au découpage géologique au 1/250 000. La médiane et le 3^{ème} quartile ont été utilisés, donnant : Seuil 0,5 > 0,0 ; Seuil 1 > 0,87 m.

3.3.3 Débit fissuré utile et Épaisseur fissurée utile

Ces deux critères proviennent des données du projet SILURES et étaient déjà agrégées par la géologie au 1/250 000. Parmi les 213 formations géologiques renseignées, 42 ont été calculées et 171 extrapolées. La médiane et le 3^{ème} quartile ont été utilisés, donnant pour le Débit fissuré utile : Seuil 0,5 > 12,2 m³/h ; Seuil 1 > 17,3 m³/h et pour l'Épaisseur fissurée utile : Seuil 0,5 > 37 m ; Seuil 1 > 47 m (Illustration 16).

3.3.4 L'IDPR

L'IDPR est un indicateur géomorphologique spatial créé par le BRGM pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des nappes aux pollutions diffuses. Il traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Plus l'IDPR est faible plus le sous-sol est infiltrant, plus il est fort plus il est ruisselant. L'IDPR est issu d'une couche raster au 1 : 50 000 couvrant toute la France disponible sur les sites internet Infoterre (<https://infoterre.brgm.fr/>) et SIGES Bretagne (<https://sigesbre.brgm.fr/>). Un outil de statistiques pour raster a permis de déterminer la médiane par rapport au découpage géologique au 1/250 000. La médiane et le 3^{ème} quartile ont été utilisés, donnant : Seuil 0,5 < 799 ; Seuil 1 < 633.

3.3.5 Sources

Les sources proviennent de données ponctuelles du référentiel de l'IGN au 50 000^{ème} avec un total de 16 229 sources relevées en Bretagne. Après classification de ces sources par la géologie au 1/250 000, une densité par formation géologique a été effectuée (Illustration 11). C'est sur cette densité que la médiane et le calcul du 3^{ème} quartile ont été effectués, fournissant les critères : Seuil 0,5 > 0,54 ; Seuil 1 > 0,68, exprimés en sources au km².

3.3.6 BFI

Le BFI (Base Flow Index) est une mesure qui représente la proportion d'écoulement fluvial provenant des sources souterraines ou de l'infiltration, par rapport à l'écoulement total d'une rivière ou d'un cours d'eau. Le BFI a été calculé lors du présent projet (Illustration 22) sur un ensemble de 74 bassins versants. Une classification des BFI par recouvrement des différentes formations géologiques de chaque bassin versant a révélé un lien important entre la géologie et le BFI. Ainsi, à partir de ces données, il a été possible de calculer la valeur du BFI pour les différents grands ensembles géologiques afin d'étendre les valeurs du BFI à toute la Bretagne. Un modèle a été élaboré pour prédire le BFI selon les caractéristiques géologiques des bassins. Pour évaluer la robustesse du modèle, une validation croisée a été effectuée, avec division des données en sous-ensembles. Les prédictions du modèle ont été comparées aux valeurs réelles pour évaluer son exactitude, ce qui a permis d'exclure 12 géologies volcaniques du jeu de données (le modèle donne des valeurs aberrantes pour des géologies ne représentant que de faibles superficies). En utilisant ce modèle, il est possible d'extrapoler le BFI sur toute la Bretagne, basé sur la composition géologique. La médiane et le 3^{ème} quartile ont donné les seuils suivants : Seuil 0,5 > 0,6 ; Seuil 1 > 0,74.

3.3.7 Failles

L'utilisation de la cartographie des failles est complexe à l'échelle régionale. Les deux sources d'information géologiques les plus utilisées (carte géologique de la France au 1 000 000^{ème} et cartes géologiques au 50 000^{ème}) présentent des limitations. La carte nationale ne représente que les grandes structures, alors que les cartes au 50 000^{ème} peuvent être hétérogènes entre elles du fait de levés à des périodes différentes, par des géologues différents. Cette hétérogénéité limite leur utilisation dans des projets à l'échelle régionale. Pour ces raisons, une couche de failles au 1/250 000 disponible au BRGM mais non publiée a été choisie pour son homogénéité en Bretagne. À partir de ces failles, une zone tampon de 300 m a été créée. Une fois la zone tampon autour des failles découpées par la géologie au 1/250 000, le pourcentage de recouvrement de chaque formation géologique a été calculé. La médiane et le 3^{ème} quartile ont donné les seuils suivants : Seuil 0,5 > 0,14 ; Seuil 1 > 0,26.

3.3.8 Pluviométrie

La pluviométrie provient d'une couche classant les valeurs de pluie efficace médiane par commune issues des données du ministère de l'environnement sur la période 1946-2001. Pour reporter les valeurs des communes sur les formations géologiques au 1/250 000, celles-ci ont été découpées par la géologie. Dans cet ensemble de données, chaque valeur de pluviométrie possède une surface associée servant de poids. La médiane pondérée a été déterminée en triant les pluviométries et en calculant les surfaces cumulées. La médiane et le 3^{ème} quartile des médianes pondérées ont permis de définir les seuils des critères : Seuil 0,5 > 373 ; Seuil 1 > 505 mm/an.

Une synthèse des données utilisées est fournie dans le tableau suivant :

Critère	Nombre de données ponctuelles et pourcentage de couverture de la Bretagne	Nombre de géologies non nulles (sur un total de 213)	Source
Transmissivité	472 transmissivités classées par géologie couvrant 45% de la Bretagne	60	Base de données BSS (BRGM)
Altérite	6 089 valeurs ont été interpolées par krigeage, couvrant 100% de la Bretagne.	213	Rapport SILURES Bretagne (BRGM)
Débit fissuré utile	6 089 valeurs ont été interpolées par krigeage, couvrant 67% de la Bretagne.	123	Rapport SILURES Bretagne (BRGM)
Epaisseur fissuré utile	3836 valeurs ont été interpolées par krigeage, couvrant 67% de la Bretagne.	123	Rapport SILURES Bretagne (BRGM)
IDPR	Raster couvrant 100% de la Bretagne	213	Base de données BRGM
Source	16229 sources classées par géologie couvrant 100% de la Bretagne	213	Base de données IGN
BFI	Le BFI de 74 bassins versants a été calculé, couvrant 34% de la Bretagne. Le BFI a ensuite été étendu à l'ensemble de la région par harmonisation lithologique.	201	Rapport Eau Pour Demain (BRGM)
Faille	Couche de failles homogénéisée à l'échelle 1/250 000, couvrant 96% de la Bretagne	192	Base de données BRGM
Pluviométrie	Polygones de pluie efficace par commune, couvrant 100% de la Bretagne	212	Ministère de l'écologie et du développement durable

Illustration 51 : Données utilisées pour la réalisation de la cartographie de critères

3.4 RÉSULTATS

3.4.1 Cartographie des critères

La méthode utilisée permet de réaliser la carte suivante (Illustration 52). Cette carte met en avant par des tons plus foncés les zones où le nombre de critères plutôt positifs est le plus important. En encart, en vert, sont représentés le nombre de critères disponibles par unité géologique. Cette carte fait notamment ressortir les massifs granitiques du nord et du sud de la Bretagne, les zones telles que le bassin versant du Nançon au nord de Fougères ou le nord de Brest. À l'inverse, des zones où les ressources en eau sont connues pour être limitées telles que le bassin de Carhaix apparaissent en tons plus clairs.

Cependant une telle carte doit être interprétée en tenant compte des éléments suivants : l'ensemble de la région n'est pas couvert spatialement par l'ensemble des données (61 % de la superficie avec 9/9 critères). Différentes combinaisons de critères permettent d'aboutir à la même valeur d'indice (par exemple: 4 critères à 1 ou 8 à 0,5). L'absence de pondération entre les critères, choix méthodologique exprimé précédemment, donne la même valeur à chacun et avec ces classes de discrétisation statistiques dont la représentativité physique est contestable. Une pondération des paramètres aurait pu permettre d'aboutir à une autre carte, possiblement plus représentative mais avec des choix tout aussi contestables.

En annexe 3 sont présentés les cartographies de paramètres individuels afin d'avoir une vision du rôle de chaque paramètre. Elles permettent d'avoir une vision plus détaillée et moins simpliste de la situation. De plus, l'importance relative des critères peut varier en fonction des besoins d'une étude. Ces cartes individuelles sont donc très complémentaires et permettent de faire un bilan des données disponibles et de leur répartition.

Ce type d'approches par croisement de paramètres multiples fournit souvent des résultats cohérents qui sont cependant peu vérifiés par des données indépendantes.

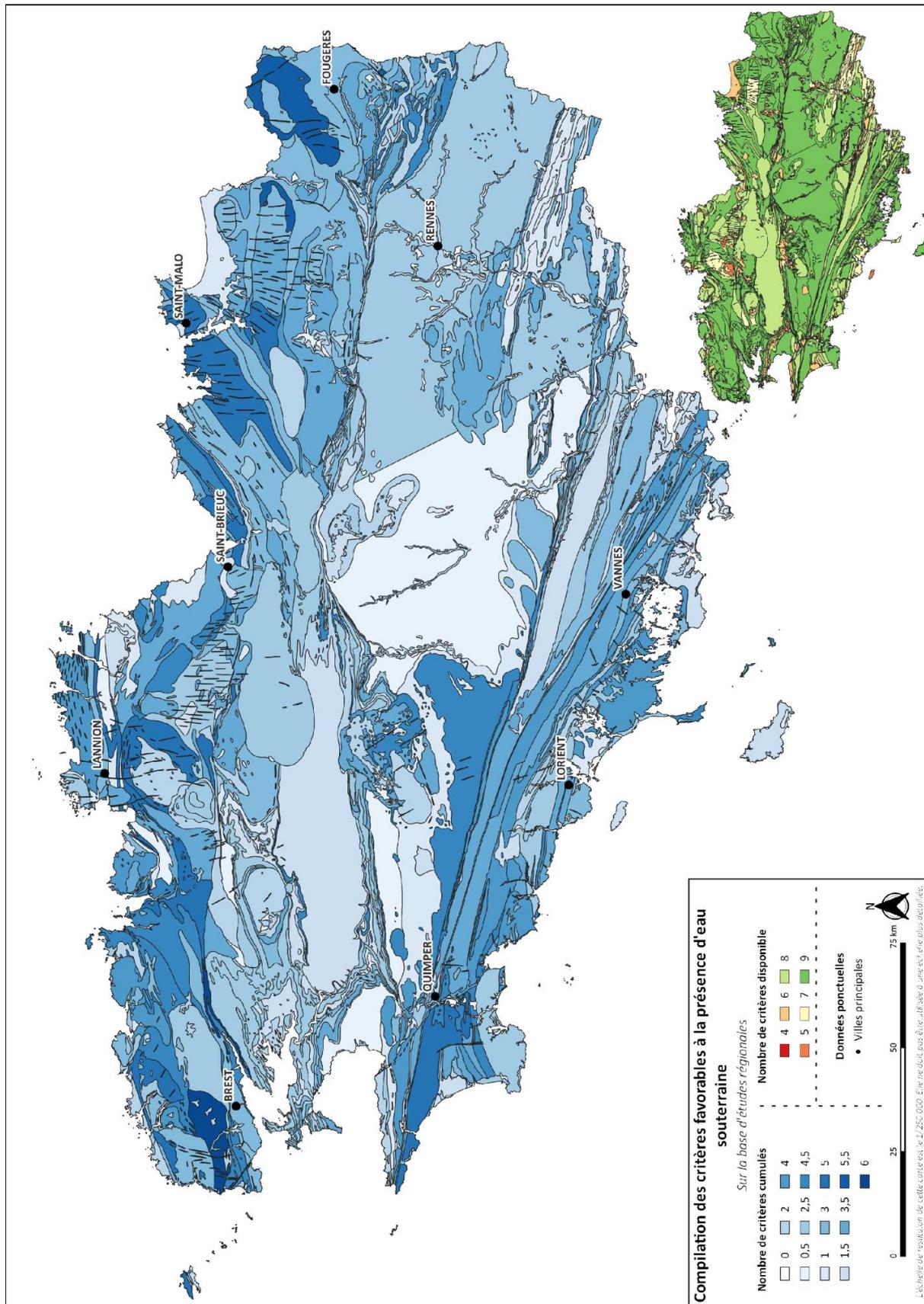


Illustration 52 : Cartographie de la compilation des critères cumulés favorables à la présence d'eau souterraine. Le nombre de critères disponibles est présenté sur l'encart.

3.4.2 Validation des résultats

Afin de tester la qualité prédictive de la cartographie produite, celle-ci a été comparée à des données indépendantes. La carte de critères a été évaluée face aux données de positionnement des captages AEP souterrains. Bien que le positionnement des AEP ait été réalisé indépendamment des études utilisées pour la cartographie présentée, un biais existe pour la couche de transmissivité dont de nombreuses valeurs sont issues de mesures sur ces captages AEP. Toutefois, les données n'ayant pas été pondérées, le biais reste limité (1 paramètre sur 9). La représentation spatiale est fournie illustration suivante (Illustration 53).

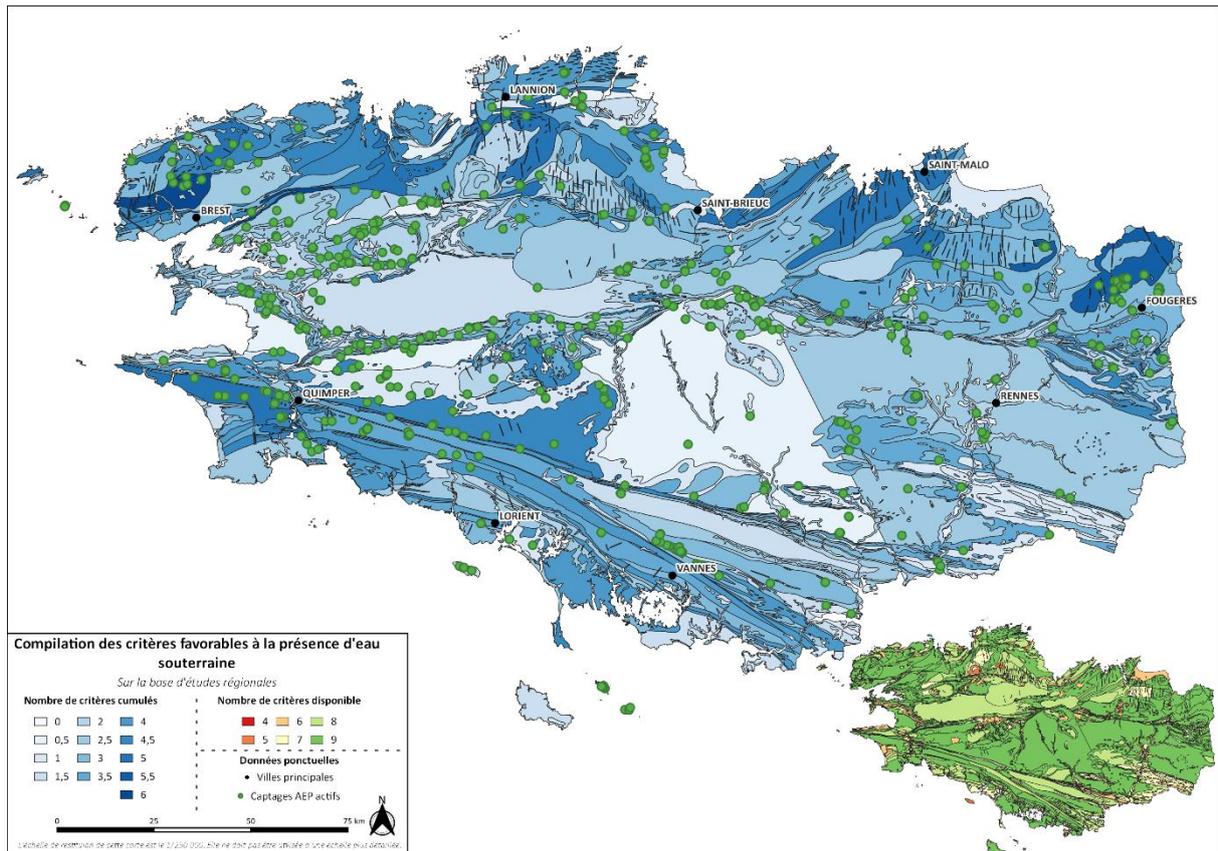


Illustration 53 : Comparaison de la cartographie de critères avec les positionnements des captages AEP souterrains

Au premier ordre, cette comparaison de la cartographie avec les positionnements des captages AEP fait apparaître deux choses :

- une majorité des captages AEP sont situés dans les zones où un score minimum de 4 a été atteint. Les zones où peu de critères positifs existent ne comportent que très peu d'AEP. Ceci montre donc une bonne cohérence au premier ordre ;
- toutefois cette carte montre aussi des éléments étonnants comme des zones où de nombreux critères sont réunis et où il n'existe pas ou peu de captages AEP souterrains ainsi que la présence de captages AEP dans des zones où peu de critères *a priori* favorables sont présents.

Les scores des captages AEP souterrains (nombre de critères positifs) sont comparés aux scores des unités géologiques par rapport à leur surface illustration 54 :

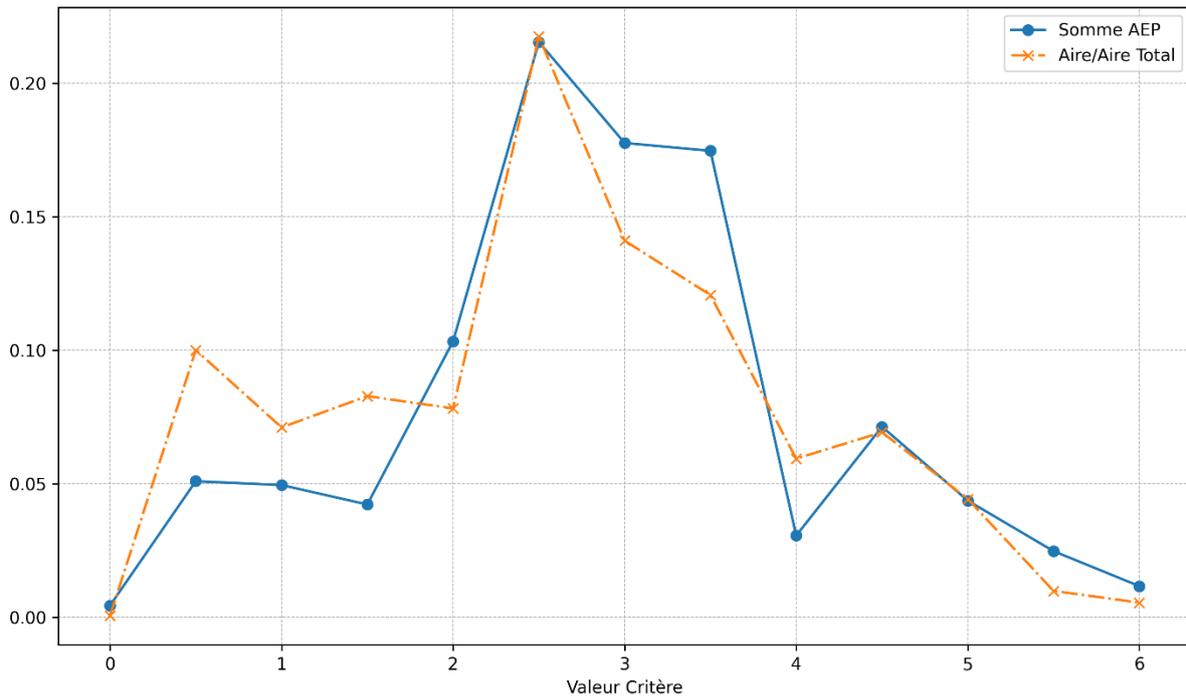


Illustration 54 : Ratio de distribution des captages AEP et des surfaces des formations géologiques par critères (Données normalisées par le nombre total d'AEP et la superficie de la région).

Les deux distributions sont proches malgré une distribution plus orientée vers un nombre de critères plus importants pour les AEP. Cette similitude des distributions montre que les paramètres retenus ne sont pas suffisants pour une application locale et montre les limites de la méthode et de l'échelle de travail. La faible qualité de la validation de la cartographie par des données AEP peut être expliquée par différents facteurs présentés ci-après.

Le choix d'utilisation des eaux souterraines pour l'AEP est lié à la présence de ressources exploitables mais aussi des choix politiques et économiques lié à l'activité économique, à la population occupant la zone et à la présence ou non d'une réserve d'eau de surface (barrage, rivière importante). Un second élément est aussi que la méthode utilisée généralise à l'échelle d'une formation géologique des informations initialement ponctuelles. La comparaison de la carte avec les AEP a été réalisée en prenant en compte uniquement la position des ouvrages et non pas leurs périmètres de protection indicatifs de l'aire d'alimentation, ce qui aurait pu induire une légère différence.

Toutefois, si ces éléments induisent des approximations, ils n'expliquent pas à eux seuls la similitude des distributions qui montre qu'il existe des AEP dans tout type de formation géologique. **Si certains secteurs peuvent effectivement être plus propices que d'autres, cela montre qu'il est possible d'obtenir de l'eau souterraine dans pratiquement tous les secteurs à la faveur de contextes locaux favorables, en quantité variable.**

Comme l'a montré l'étude ANAFORE (Schroëtter *et al.*, 2020), l'implantation locale des forages et leur capacité de production sont liées à des éléments structuraux locaux non représentés à cette échelle et donc mal représentés sur cette carte (malgré la tentative de prise en compte des failles dans cette cartographie). Face à cette lecture plus détaillée, il apparaît que la carte (illustration 53), qui a le mérite de synthétiser de nombreuses données, peut être utilisée comme un indicateur du potentiel de certaines zones mais n'est pas une garantie de succès ou d'échec pour la recherche d'eau souterraine à des fins d'exploitation. Ceci confirme l'importance et la nécessité des études locales pour la recherche en eau.

3.5 CONCLUSION CHAPITRE 3

Les traitements réalisés montrent qu'il est possible de construire une cartographie cohérente du potentiel de ressources en eau à l'échelle régionale à partir de données issues de différentes études précédemment réalisées. Cependant en raison de la forte influence de facteurs locaux non représentables à cette échelle, l'information reste générale et présente de fortes limitations pour une utilisation locale.

L'analyse de la représentativité des données montre que les facteurs retenus dans le cadre de l'étude SILURES Bretagne (Mougin *et al.*, 2008) restent les plus pertinents à cette échelle. Les données proposées dans le cadre de la présente étude permettent d'apporter de l'information complémentaire mais doivent être interprétées avec une expertise permettant de faire des choix circonstanciés. Toutefois, elles présentent les mêmes limitations spatiales et ne peuvent être utilisées à une échelle plus fine que le 250 000^{ème} non adaptée à la recherche d'eau souterraine et donc l'implantation d'un forage.

Pour un travail à l'échelle d'un territoire telle que la commune ou le bassin versant, une analyse régionale permet de fournir une information globale, permettant de cibler des bassins versants ou des lithologies favorables mais ne pourra se substituer à une analyse locale. Malgré les avancées sur les modèles conceptuels et la quantification des ressources en eau, il n'est actuellement pas possible de fournir à une échelle régionale, une cartographie opérationnelle directement exploitable sans un certain degré d'expertise dans le domaine. Cela vaut, bien évidemment pour la recherche de ressources en eau à des fins d'exploitation de l'eau potable mais aussi pour les travaux d'aménagement du territoire, de reconquête des milieux qui nécessitent toujours la prise de mesures locales, des analyses et interprétations adaptées au contexte local et des avis d'experts (géologues, hydrogéologues, hydrologues). Les cartes peuvent aider pour localiser une zone d'intérêt sur laquelle, études géologiques, géophysiques, hydrogéologiques détaillées à l'échelle locale doivent être menées pour par exemple implanter un forage.

4. Sécheresses : historique, impacts et évolutions

4.1 ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES

Les études sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau sont nombreuses, mais la plupart d'entre elles abordent la question par des modélisations prédictives (ex : Thodsen 2007 ; Brouyère *et al.*, 2004). Les études cherchant à évaluer les variations observables imputables au changement climatique sont nettement moins nombreuses. À une échelle mondiale, Gudmundsson *et al.* (2021) montrent cependant que les variations climatiques sont importantes à prendre en compte pour reproduire les tendances d'évolution du débit des rivières à l'échelle globale et que les changements d'utilisation des sols ne sont pas suffisants pour reproduire les observations. À l'échelle de l'Europe, Gudmundsson and Seneviratne (2015) sur une étude basée sur l'évolution du SPI (Standardized Precipitation Index) montrent que les sécheresses ont tendance à diminuer dans le nord de l'Europe alors qu'elles augmentent dans le sud. Cette étude sur des échelles de temps multiples montre que les sécheresses sont plus prononcées sur des échelles de temps annuelles ou plus. Le fait que les tendances du SPI deviennent plus significatives avec une augmentation des échelles de temps suggère que les changements sur le long terme des sécheresses européennes peuvent être masqués par l'importante variabilité des précipitations mensuelles sur les courtes périodes de temps. Dans les résultats présentés dans la présente étude, la Bretagne se situe sur la ligne de transition entre le nord et le sud où des changements systématiques ne sont pas observés.

4.1.1 Objectifs

L'objectif de ce chapitre est, à partir de données historiques, d'observer l'évolution temporelle des ressources en eau et éventuellement de déceler si l'effet du changement climatique, observable sur les variables climatiques a d'ores et déjà des répercussions sur les ressources en eaux bretonnes. Ceci est réalisé en retraçant les variations de stocks des ressources en eaux souterraines et superficielles.

En documentant les liens entre les différents éléments du cycle de l'eau de manière homogène sur l'ensemble de la région, afin d'évaluer leur dynamique temporelle, la présente étude cherche à répondre à deux objectifs : (1) définir si les sécheresses observées ont des impacts homogènes ou différents à l'échelle du territoire et (2) ces différences, si elles existent, peuvent-elles être mises à profit pour une meilleure gestion des ressources en eau ? L'objectif est de se concentrer sur les extrêmes de sécheresses et pas sur l'ensemble des chroniques.

4.1.2 Méthodologie

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de pouvoir comparer, un ensemble important de données de différents types dans un cadre relativement simple. Pour cela, il a été choisi de faire une analyse de tendances sur des séries normalisées en évaluant leur écart aux normales. Cette normalisation permet la comparaison de données de différents types et permet d'évaluer comment ces anomalies climatiques se répercutent sur les ressources en eau.

L'analyse de la dynamique, climat, ressources et prélèvements a été effectuée au travers de l'analyse d'anomalies normalisées. La procédure utilisée est proche de celle présentée par (Boutt, 2018; Weider and Boutt, 2010).

Les données observées par ces auteurs sont utilisées pour calculer les anomalies de température, précipitations, débits de cours d'eau et de niveau d'eau souterraine. Ces anomalies sont calculées suivant l'équation suivante :

$$A_i = \frac{m_i - \bar{m}}{\sigma_m}$$

Avec m_i la valeur moyenne mensuelle, \bar{m} la moyenne de ce mois sur l'ensemble de la série et σ_m l'écart type de cette dernière moyenne. Une moyenne mobile sur 12 mois est ensuite appliquée sur les anomalies mensuelles A_i . Cette technique atténue les fluctuations court terme et accentue les fluctuations long terme. Elle permet de comparer entre elles les données d'un type différent pour comparer leurs tendances relatives. Si $A_i < 0$, cela indique que les valeurs du paramètre sont inférieures aux normales, alors que si $A_i > 0$, les valeurs sont supérieures. Ainsi, pour les ressources en eau, les anomalies négatives représentent les périodes de sécheresses et les anomalies positives, les périodes humides.

Les analyses sont réalisées à partir de données journalières si les données sont disponibles (niveaux piézométriques, données climatiques). Les données de prélèvements et les niveaux des forages pompés pour l'eau potable étant disponibles au pas de temps mensuel, le pas de temps mensuel a été utilisé pour les calculs.

Un exemple de calcul d'anomalie est présenté Illustration 55 avec le signal brut en haut ; en bas les anomalies mensuelles (en noir) et leur lissage sur 12 mois (en rouge). Les moyennes des différentes données (anomalies lissées) sont ensuite comparées qualitativement pour les sites.

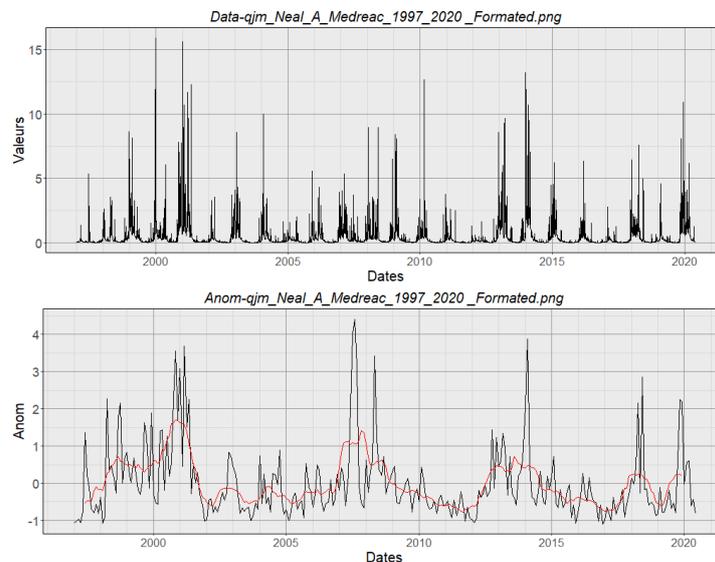


Illustration 55 : Décomposition des chroniques de débit du Néal à Médréac (J0626610) avec en haut les données brutes journalières (en m³/s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge).

Les variations climatiques (précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP)) sont les entrées de l'hydrologie et hydrogéologie de la région. Ces variations climatiques sont ensuite modulées au travers du ruissellement, des sols, des cours d'eau et des aquifères. Lors de leur transition d'un compartiment hydrologique à un autre, ces variations sont bien souvent atténuées par sol et le milieu souterrain et décalées dans le temps. Ces éléments ont été illustrés par Van Loon, 2015 (Illustration 56). Ces décalages temporels et leurs atténuations sont des indicateurs de la capacité du milieu à faire face à des variations climatiques courtes et intenses ou à emmagasiner des tendances d'évolution plus longues et continues.

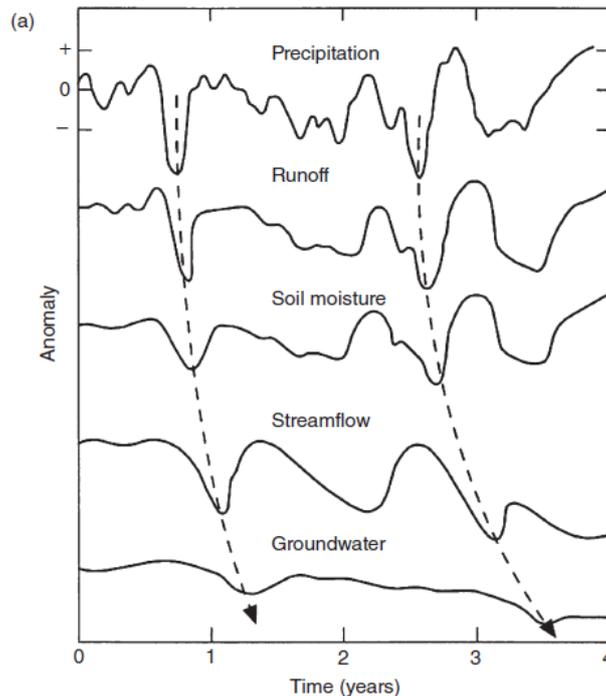


Illustration 56 : Propagation des anomalies de précipitations dans le cycle hydrologique (de haut en bas : Précipitations, ruissellement, humidité du sol, débit des cours d'eau et niveaux piézométriques). Extrait de Van Loon, 2015

4.1.3 Résultats – Climat

À l'échelle de la région Bretagne il est admis que l'on assiste comme à l'échelle nationale à une augmentation des températures. Pour les précipitations régionales, une forte variabilité existe mais il ne semble pas se dégager à l'heure actuelle de tendance à la hausse ou à la baisse (Belleguic *et al.*, 2012).

L'analyse réalisée dans le cadre du présent projet permet d'illustrer ces éléments à partir de données météorologiques. Les résultats sont dans un premier temps présentés à l'échelle de deux zones géographiques aux extrémités de la région (Finistère et Ile-et-Vilaine), avant une généralisation à l'échelle régionale.

a) L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Les tendances d'évolution de l'ETP ont été calculées sur différents sites de la région et sont présentées en Illustration 57 ci-dessous pour les stations de Landivisiau (29264001) et Louvigné-Du-Désert (35162003).

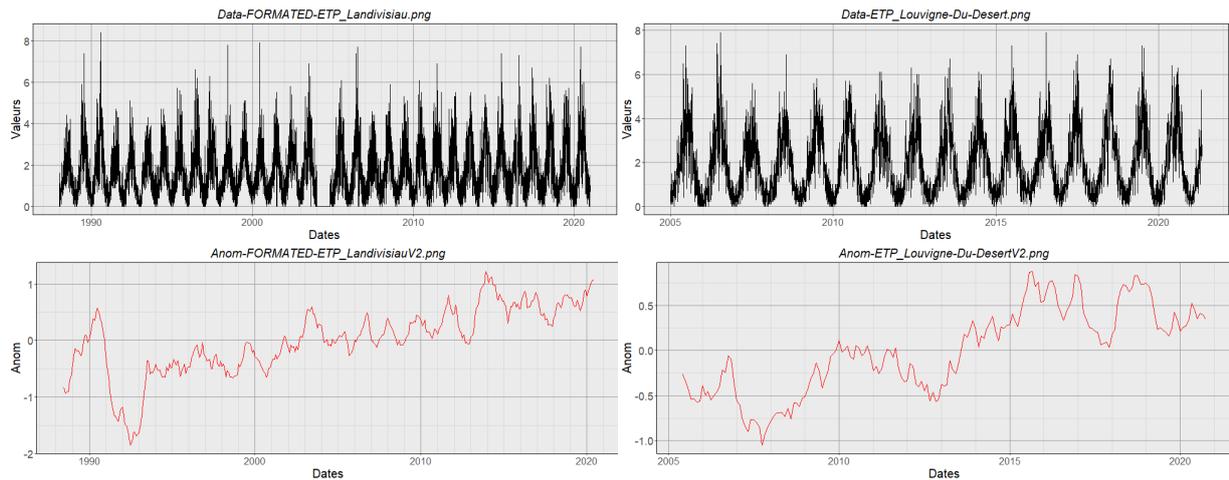


Illustration 57 : Évolution de l'ETP à Landivisiau (1989 - 2020) et Louvigné-du-Désert (2005-2020). En haut en noir les données brutes (en mm/jour) ; en bas en rouge les tendances calculées à partir de ces données.

Les tendances d'évolution de l'ETP à Landivisiau (1989 - 2020) et Louvigné-Du-Désert (2005-2020) montrent une hausse et une cyclicité pluriannuelle.

Les augmentations de l'ETP ne semblent pas homogènes à l'échelle du territoire breton et semblent plus marquées dans les terres que sur la côte. Un exemple pour les sites de Quimper, Brest, Landivisiau et Louvigné-du-Désert est fourni en illustration suivante (Illustration 58). Les calculs ont été effectués sur la même période (01/01/2005 au 31/12/2020). La chronique de Quimper ne présente pas de tendance à la hausse contrairement à celle de Louvigné-du-Désert. Il en est de même pour celle de Brest-Guipavas avec une hausse moins marquée. La variabilité à l'échelle régionale sera présentée dans la suite du document.

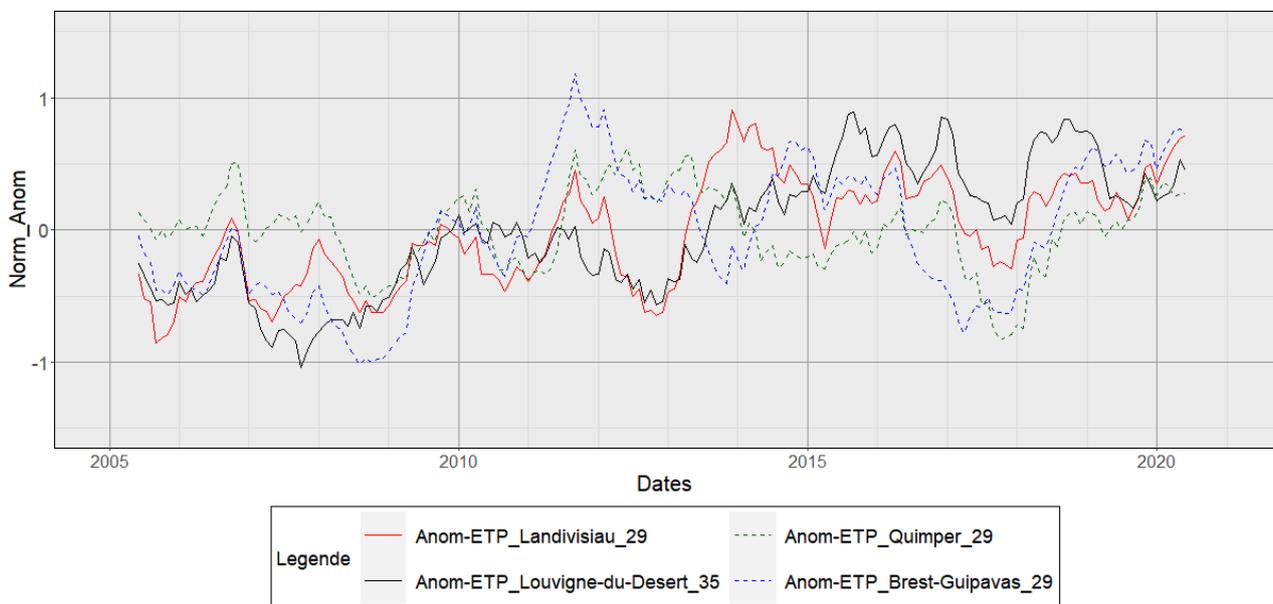


Illustration 58 : Tendances d'évolution de l'ETP à Landivisiau, Quimper, Brest et Louvigné-du-Désert (période 2005 -2020). Les courbes en pointillées représentent les stations proches de la côte.

b) Précipitations

La même analyse a été réalisée pour les précipitations, elle ne présente pas de tendance.

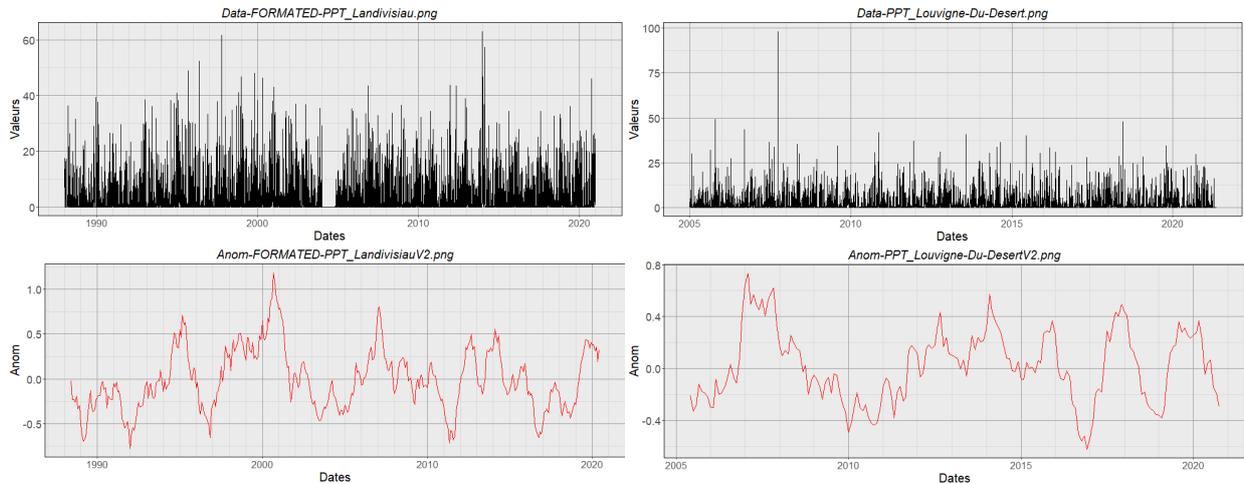


Illustration 59 : Évolution des précipitations à Landivisiau (1989 - 2020) et Louvigné-du-Désert (2005-2020). En haut en noir les données brutes (en mm/jour) ; en bas en rouge les tendances calculées à partir de ces données.

Aucune des chroniques analysées (sur 50 chroniques) ne présente de tendances marquées à la hausse ou à la baisse des précipitations. La comparaison entre les sites de Quimper et Louvigné-du-Désert pour les précipitations ne montre pas de tendance d'évolution avec une variation de la cyclicité dans des proportions identiques (Illustration 60).

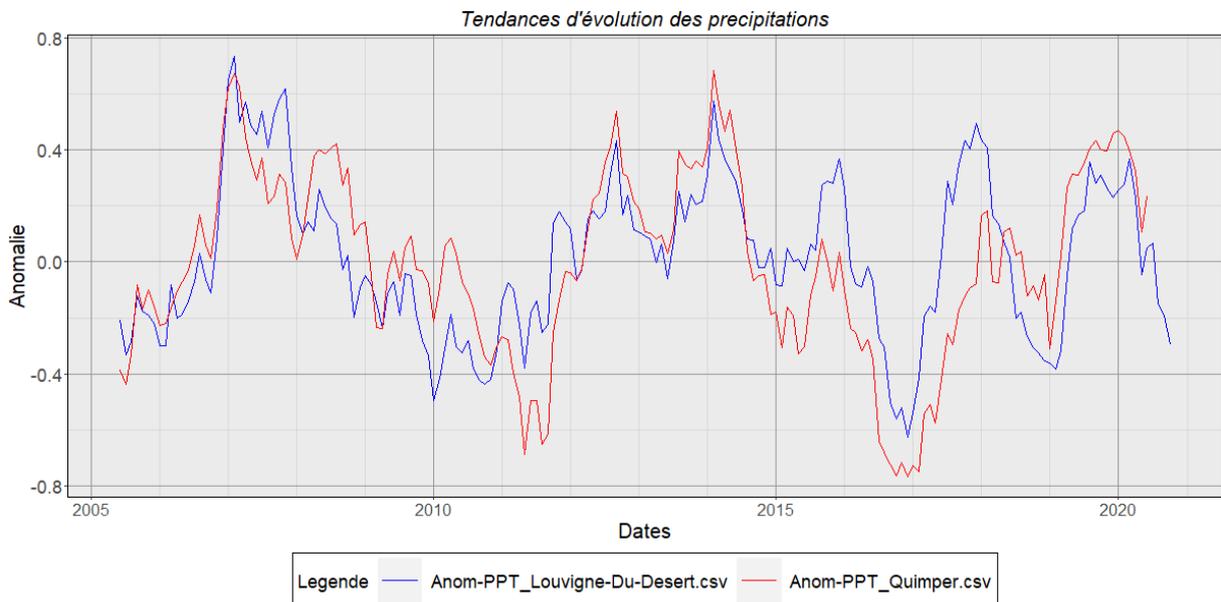


Illustration 60 : Tendances d'évolution des précipitations à Quimper et Louvigné-du-Désert (période 2005 -2020)

4.1.4 Facteurs explicatifs des oscillations de précipitations

Les cycles observés sur les variations de précipitations et de niveaux piézométriques peuvent être corrélés partiellement à des signaux climatiques larges (indices de téléconnexions) tels que l'oscillation nord Atlantique (NAO) ou Est Atlantique (EA) et scandinave (SCAND) (Holman *et al.*, 2011; Neves *et al.*, 2019). Les études climatologiques ont établi l'influence de la NAO

notamment sur le climat européen (Hurrell and Van Loon, 1997) et particulièrement sur l'ouest de la Bretagne (Baulon *et al.*, 2022). La synthèse réalisée par Rust *et al.*, (2018) montre que d'une manière générale des corrélations positives sont trouvées entre la NAO (en tant qu'influence dominante) et les précipitations en Europe du Nord, indiquant un fort contrôle sur l'eau disponible pour la recharge des eaux souterraines. Dans le sud de l'Europe en revanche le signal serait plutôt opposé. La Bretagne se situe entre ces deux tendances.

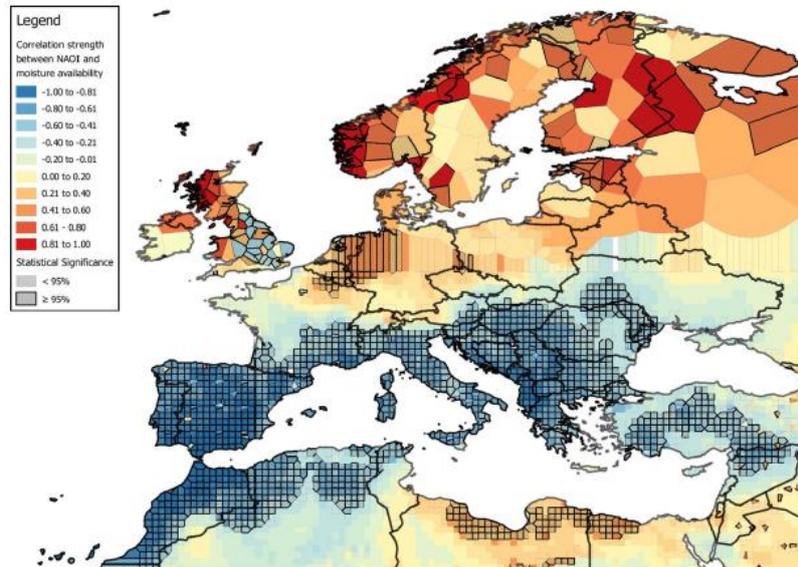


Illustration 61 : Corrélation entre NAO Hivernale précipitations et indices de sécheresse (Rust *et al.*, 2018). Les couleurs chaudes indiquent une corrélation ; les couleurs froides, une anti-corrélation.

Actuellement, il n'existe pas de modèle conceptuel qui décrit comment ces signaux périodiques extra-annuels sont propagés et transformés par les processus météorologiques et hydrogéologiques. Ainsi, la variabilité spatiale et temporelle de l'intensité des signaux basse fréquence trouvés dans les données sur les eaux souterraines, ne peut être à l'heure actuelle, systématiquement expliquée.

Peu de recherches ont été entreprises pour évaluer directement la propagation mécaniste des signaux climatiques à la variabilité spatiale et temporelle du débit de base et du débit de printemps des cours d'eau. À titre d'exemple, une comparaison entre anomalie de NAO (www.noaa.gov) et le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (29) est présenté Illustration 62 mais ne montre pas de corrélation claire.

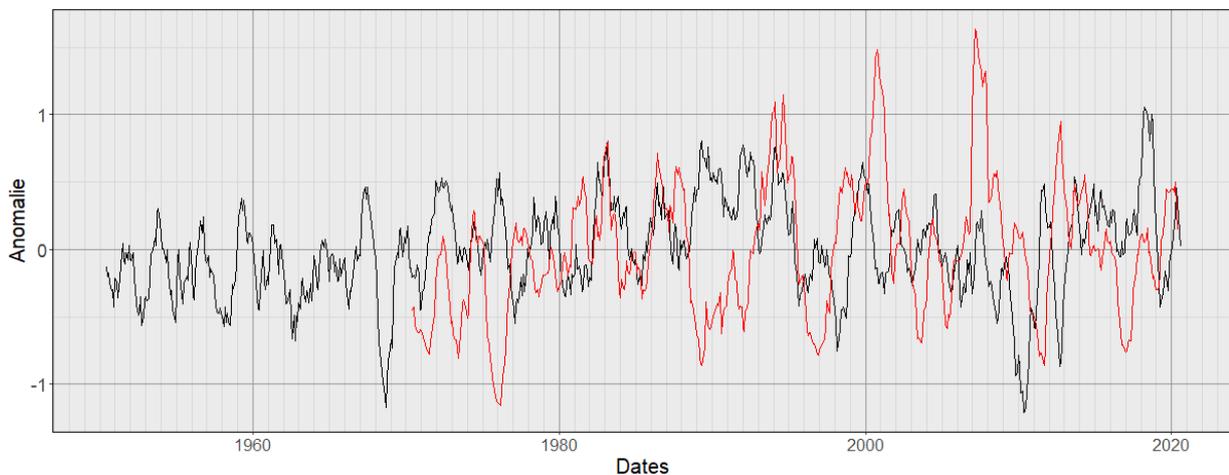


Illustration 62 : Comparaison entre anomalie de NAO (en noir) et Débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (en rouge)

4.1.5 Résultats – eaux souterraines – Échelle locale

La présente étude s'intéresse ici aux minimums piézométriques représentatifs des sécheresses. Dans un contexte d'aquifère de socle de faible capacité, les variations climatiques ont un impact direct sur les ressources en eaux souterraines bretonnes. En analysant d'une façon similaire l'évolution des variations piézométriques, il est possible d'évaluer l'impact de ces cycles de précipitation sur les ressources en eaux souterraines. L'exemple suivant est réalisé à partir des données des piézomètres de Landudec, situé à proximité de Quimper (29), et de Louvigné-du-Désert situé près de Fougères (35).

Les résultats des comparaisons entre les tendances d'évolution des précipitations (notées PPT sur les figures) et de la piézométrie (notées Pz sur les figures) sont présentés sur les illustrations suivantes pour Landudec et Louvigné-du-Désert. Sur les figures, les *minima* représentent les périodes de déficit en eau (sécheresses).

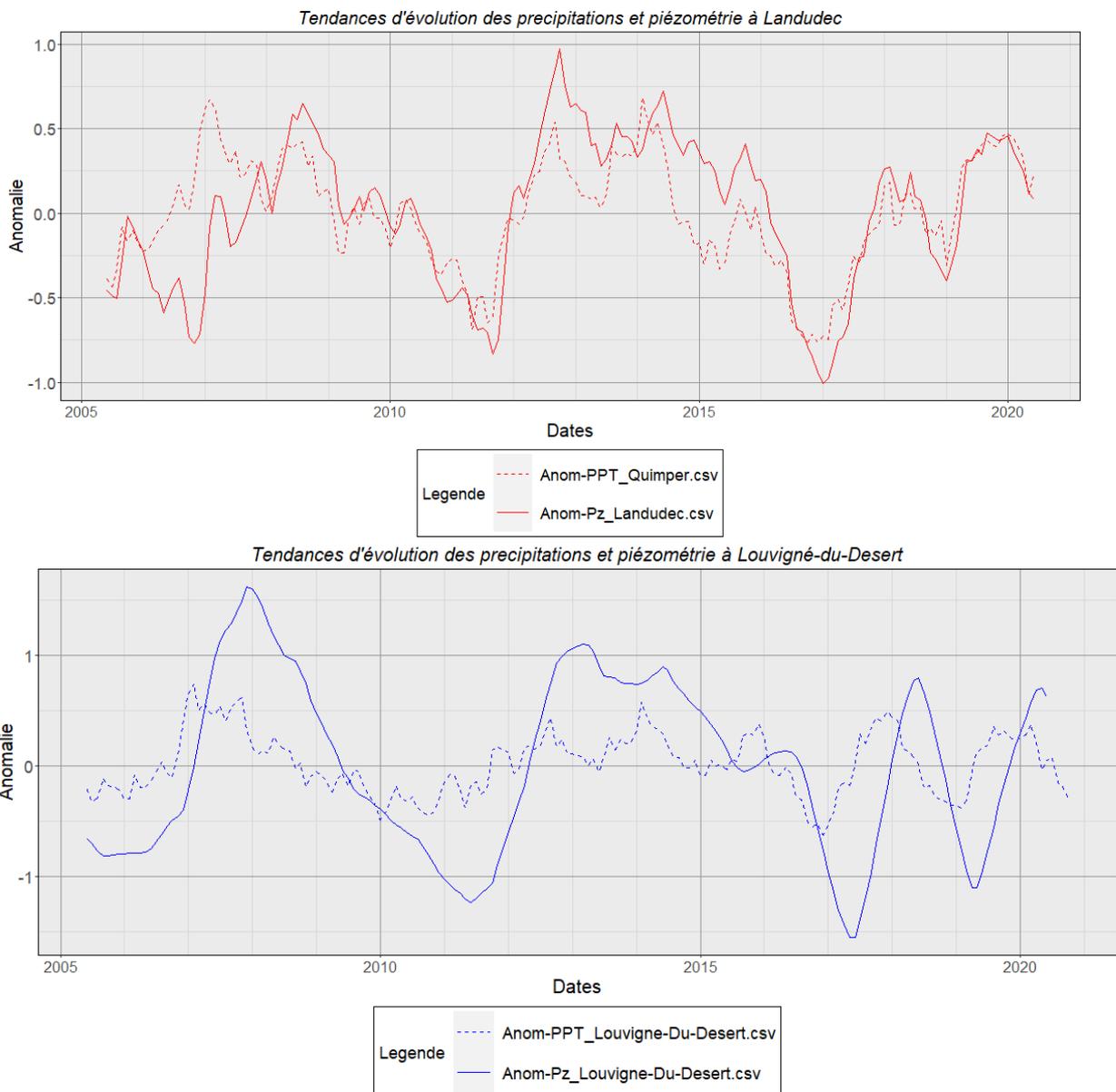


Illustration 63 : Comparaison des tendances d'évolution des précipitations (en pointillés) et de la piézométrie (traits pleins) à Landudec (en rouge en haut) et Louvigné-du-Désert (en bleu en bas)

Sur le site de Landudec, les variations des anomalies de précipitations et piézométriques sont quasiment confondues en termes d'amplitude et de phase. Un léger décalage temporel est observable. Pour le site de Louvigné-du-Désert, les variations sont en revanche très différentes en termes d'amplitude avec un décalage de phase plus prononcé. Ces comportements montrent une augmentation de l'amplitude des eaux souterraines en opposition au modèle conceptuel Illustration 56.

Ces deux exemples illustrent que les variations climatiques relatives n'ont pas les mêmes impacts sur les aquifères sur l'ensemble du territoire. Il faut noter que les analyses temporelles présentées ici sont réalisées sur des données normalisées, donc les volumes de variation d'une même anomalie peuvent être différents.

Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces différences :

- 1) L'écart est lié à l'inertie de l'aquifère ;
- 2) L'écart observé est lié à l'impact de l'évaporation sur la recharge.

L'inertie des aquifères observable via les évolutions de niveaux piézométriques induit des dynamiques de recharge différentes qui peuvent être mises en parallèle d'anomalies long terme. Les chroniques piézométriques 2005-2020 de ces deux piézomètres sont fournies en illustrations suivantes (Illustrations 64 et 65).

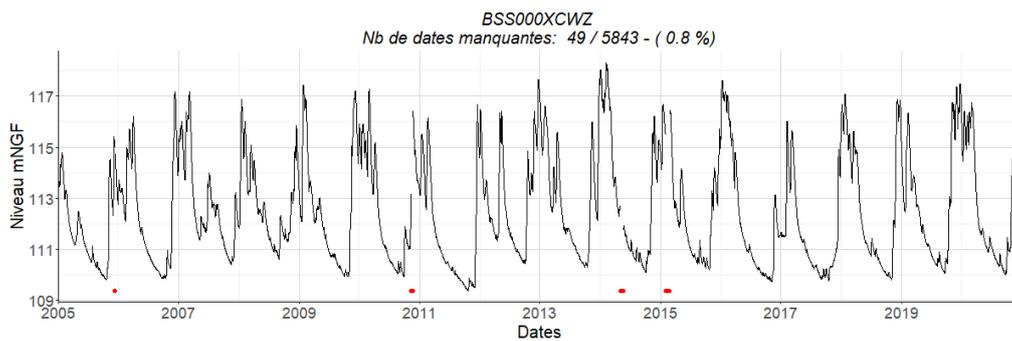


Illustration 64 : Chronique piézométrique de Landudec (29)

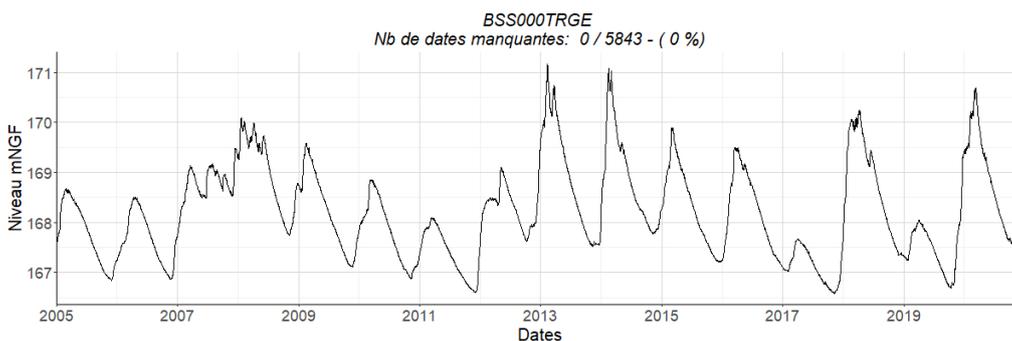


Illustration 65 : Chronique piézométrique de Louvigné-du-Désert (35)

Ces différences induisent aussi des dynamiques annuelles différentes telles qu'observables sur les hydrographes unitaires (Illustration 66).

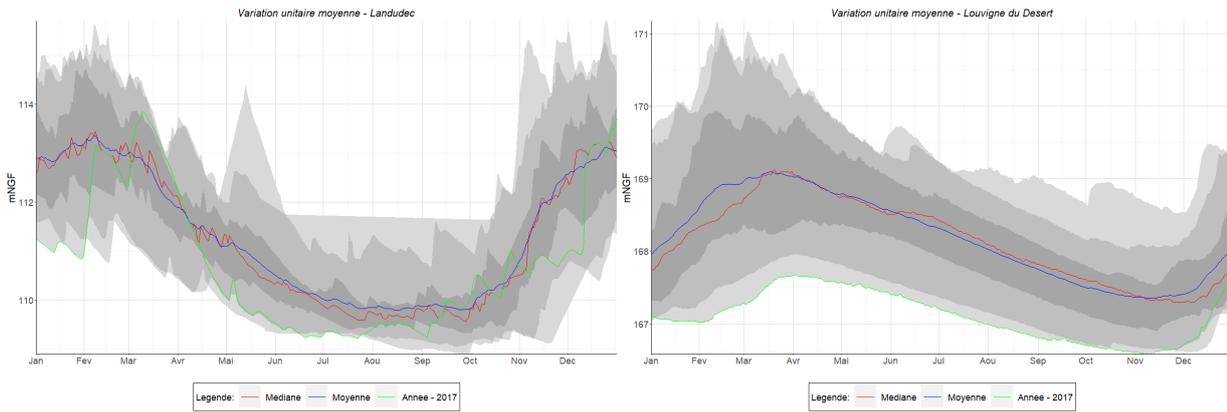
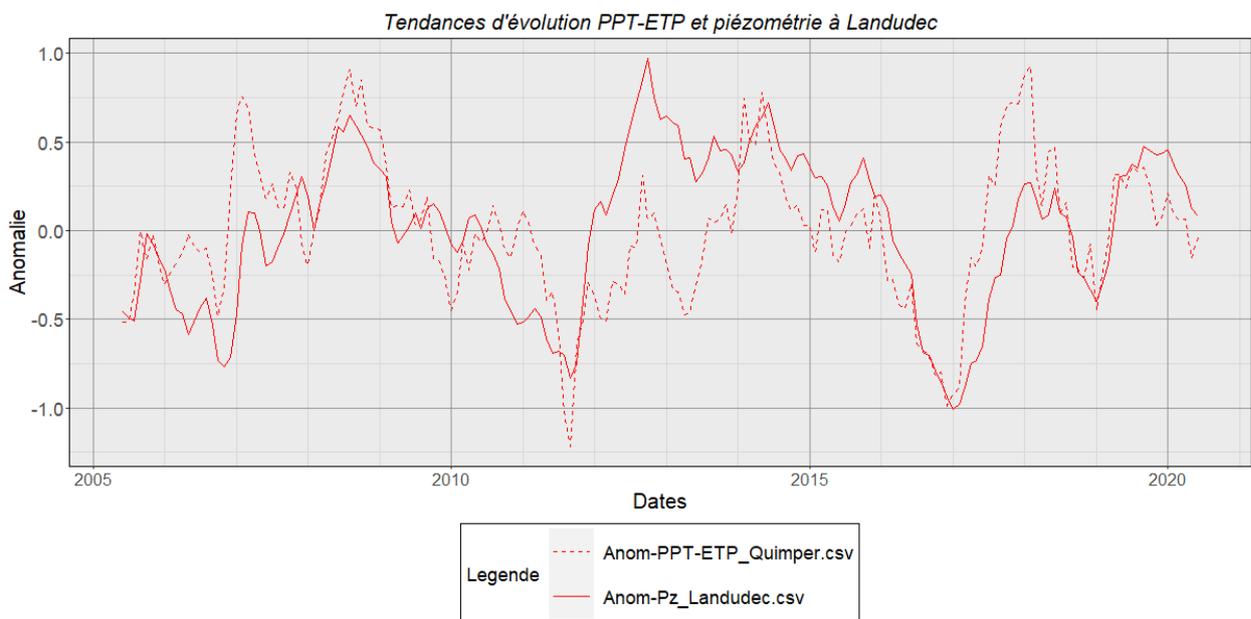


Illustration 66 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landudec et Louvigné-du-Désert. Les dégradés gris représentent les maximums et minimums ainsi que les quartiles. Les lignes rouges et bleues représentent respectivement les médianes et moyennes mensuelles et les lignes vertes les mesures piézométriques de l'année 2017

Bien que toutes deux dominées par des cycles annuels, ces chroniques piézométriques sont assez contrastées. Le piézomètre de Landudec est très réactif, avec des pics importants liés aux précipitations et une quasi absence de cycles pluriannuels. À l'opposé, le piézomètre de Louvigné-du-Désert présente un signal plus lissé et des cycles pluriannuels. Cette inertie supplémentaire pourrait induire un décalage des signaux tels qu'observé pour le piézomètre de Louvigné-du-Désert. Elle pourrait aussi avoir un impact sur l'amplitude des pics.

Comme montré en Illustration 58, les variations d'ETP sont aussi très différentes entre zones climatiques de la région (plutôt climat océanique à Quimper et plus continental à Louvigné-du-Désert), ce qui peut avoir un impact sur les amplitudes de variations piézométriques. En soustrayant l'anomalie d'ETP à celle des précipitations, l'amplitude des minima peut être évaluée.



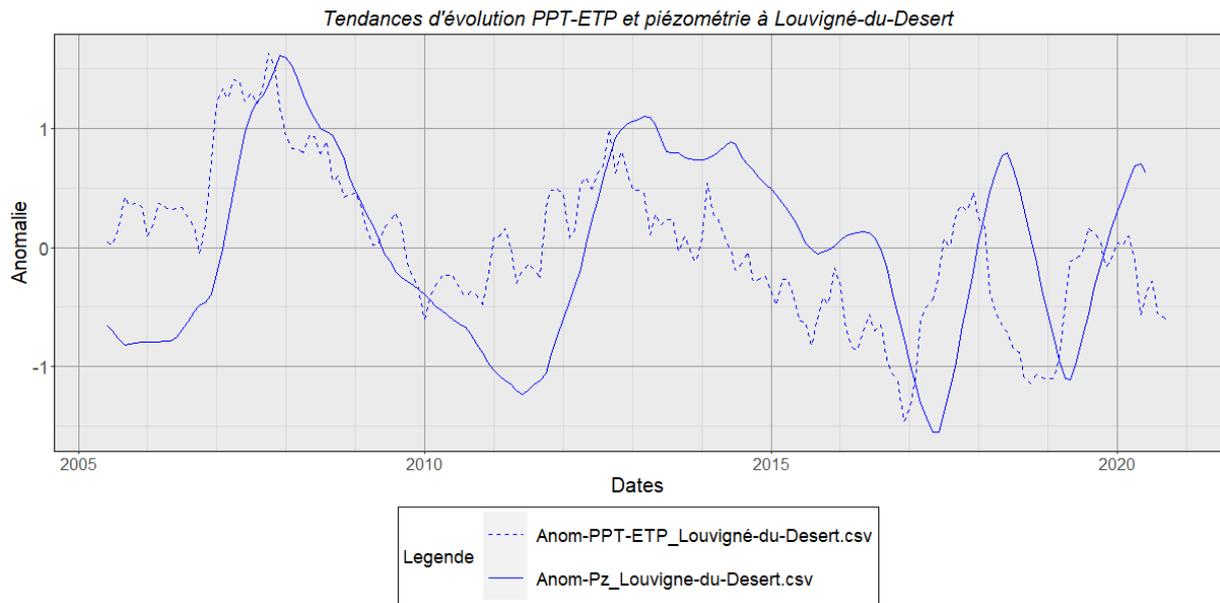


Illustration 67 : Comparaison des tendances d'évolution des précipitations-ETP (en pointillés) et de la piézométrie (traits pleins) à Landudec (en rouge en haut) et Louvigné-du-Désert (en bleu en bas)

Cette nouvelle comparaison permet de capter l'amplitude des variations piézométriques à Landudec mais ne compense pas le décalage de phase observé. L'ETP, par son impact sur les pluies efficaces semble donc avoir un impact majeur sur l'amplitude des variations observées. Les minima plus marqués en 2017 et en 2019 à Louvigné-du-Désert pour des déficits de précipitations peu marqués (cf. Illustration 63) pourraient indiquer que, si l'augmentation de l'ETP continue (cf. Illustration 58), un même déficit de précipitations induira plus facilement des sécheresses dans le futur. Ce phénomène est déjà observable.

Ces anomalies de précipitations modulées par les propriétés des aquifères sont aussi visibles sur les eaux de surface. Un exemple est présenté en Illustration 68 pour Louvigné-du-Désert et le cours d'eau du Nançon à Lécousse. Cette représentation permet de comparer pour un territoire l'évolution des différents compartiments du cycle de l'eau (Précipitations, ETP, Débit des cours d'eau, niveaux piézométriques).

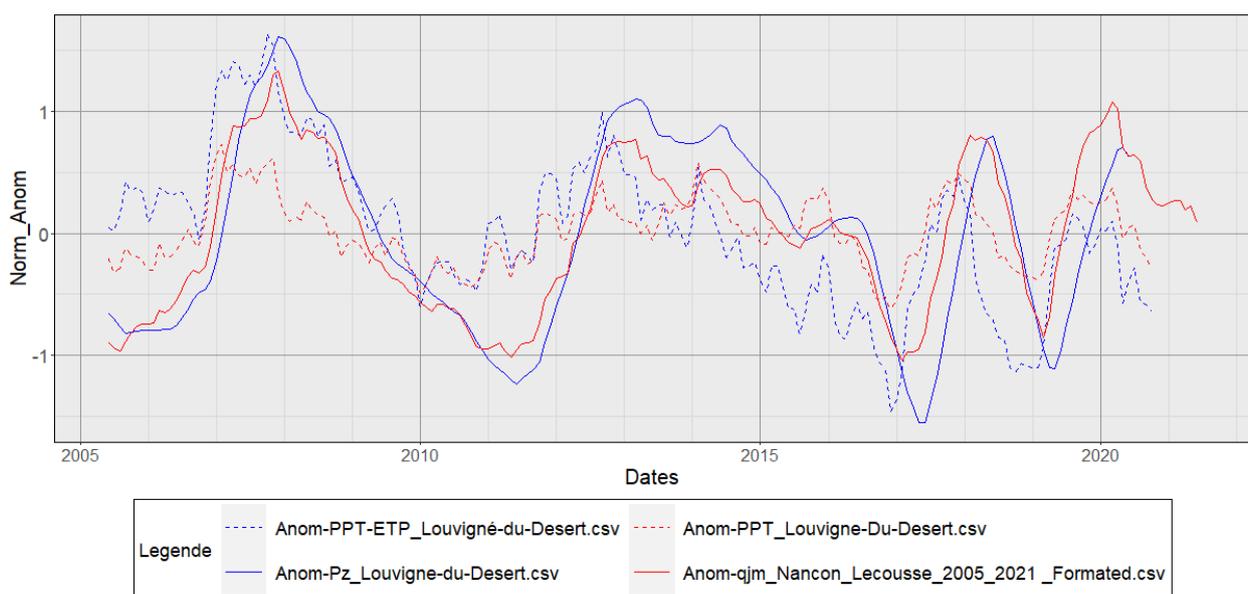


Illustration 68 : Comparaison des anomalies de précipitations, précipitation et ETP cumulées, anomalies piézométriques et de débit du cours d'eau.

Cet exemple montre que les anomalies observées sur le cours d'eau sont liées d'une part aux anomalies de précipitations mais aussi probablement impactées par les anomalies observables sur les niveaux piézométriques. En effet, les eaux souterraines qui alimentent les cours d'eau tamponnent et décalent dans le temps le report de ces anomalies.

4.1.6 Résultats – eaux souterraines – Échelle régionale

Les variations par rapport à la normale sont évaluées sur l'ensemble du réseau piézométrique de Bretagne (52 points). L'ensemble des données est normalisé sur une période identique (2005-2020) pour éviter les biais en raison de longueurs de chroniques différentes. Le piézomètre de Mézières-sur-Couesnon a été exclu en raison d'un comportement non représentatif de la dynamique régionale (probable influence anthropique ou d'aménagement tel qu'un étang).

Les objectifs sont :

- évaluer la tendance d'évolution des ressources souterraines ;
- évaluer si des évolutions de tendance ont une logique spatiale ;
- évaluer si les observations des liens entre précipitation, ETP et piézométrie sur les sites de Landudec et Louvigné-du-Désert sont généralisables à l'échelle régionale.

La normalisation sur l'ensemble du réseau piézométrique sur la période 2005-2020 est fournie sur l'illustration 69, avec en rouge la moyenne régionale et en gris la courbe de chacun des piézomètres.

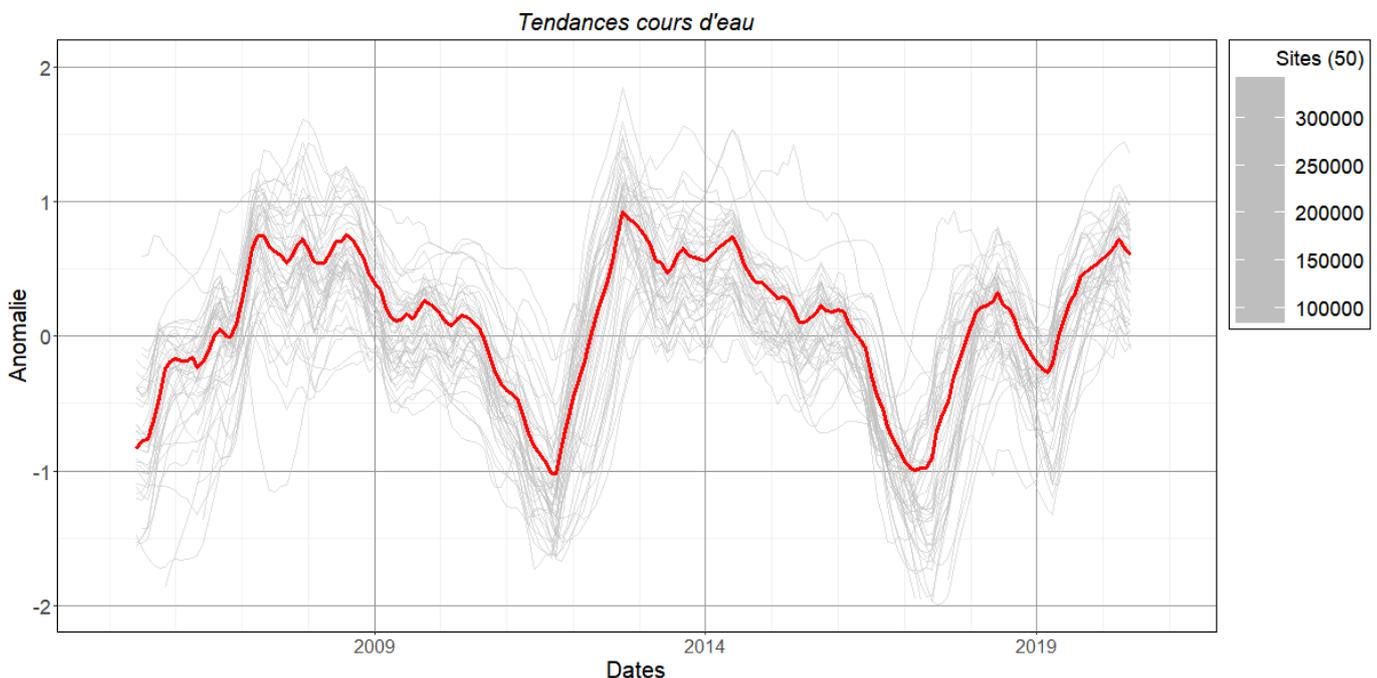


Illustration 69 : Anomalies des variations piézométriques sur 50 piézomètres du réseau.

Cette représentation montre des cycles pluriannuels avec une variabilité relativement limitée compte tenu de la variabilité des contextes géologiques des 52 piézomètres.

Pour évaluer si cette variabilité suit une logique spatiale, les chroniques ont été classées d'est en ouest en fonction de leurs coordonnées géographiques (en Lambert93) représentées selon un dégradé de couleurs (est bleu – ouest rouge), ce qui permet d'obtenir la représentation suivante (Illustration 70).

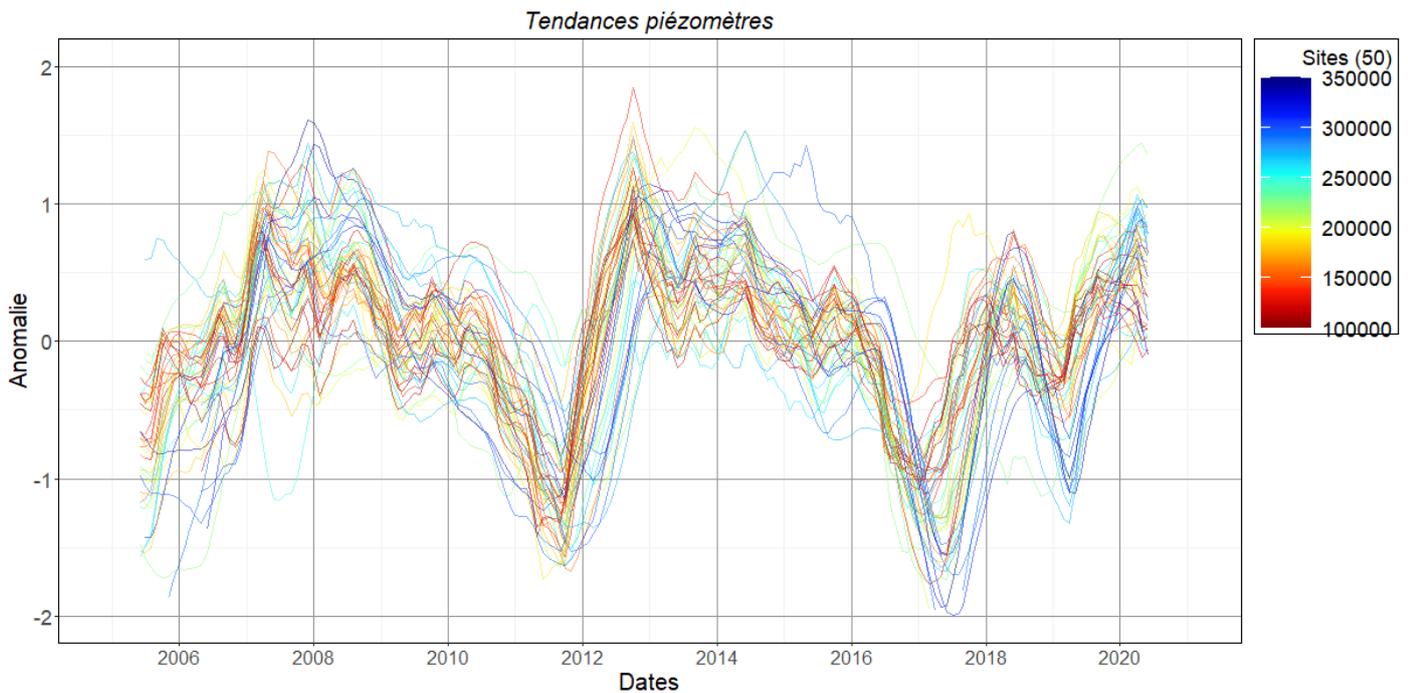


Illustration 70 : Chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (Est bleu – Ouest rouge)

Cette représentation montre que sur la période 2006-2016, il ne semble pas apparaître d'organisation liée à la longitude des sites. Cependant, en 2017 et 2019, on remarque que les *minima* sont plus marqués à l'est qu'à l'ouest. On remarque que les points à l'est (en bleu) présentent des atteintes des *minima* et des remontées plus tardives. Ceci est aussi observable lors de la sécheresse de 2011, malgré une différenciation plus faible que pour les années suivantes. Pour plus de lisibilité ces éléments sont représentés par catégorie sur les 2 figures suivantes (Illustration 71).

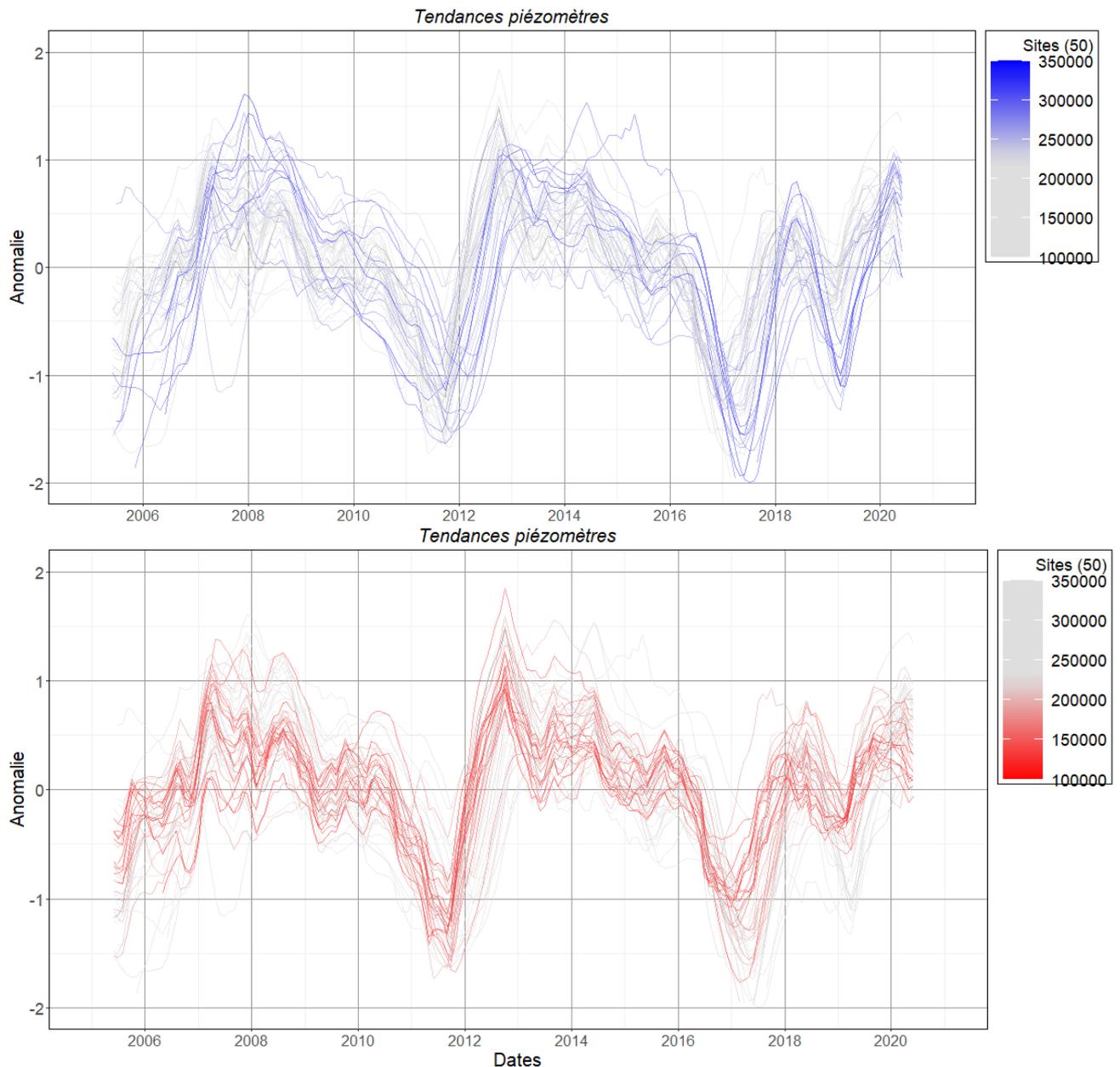


Illustration 71 : Différenciation des chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu (en haut) – ouest rouge (en bas))

Les cycles observés proviennent des écarts aux normales de précipitations. Cependant, la même procédure appliquée aux précipitations enregistrées aux différentes stations météorologiques ne présentent pas le même décalage spatial, ni le même décalage temporel. Les résultats de cette procédure sont fournis en Illustration 72. Les précipitations ne peuvent donc pas expliquer à elles seules les différences observées sur les chroniques piézométriques.

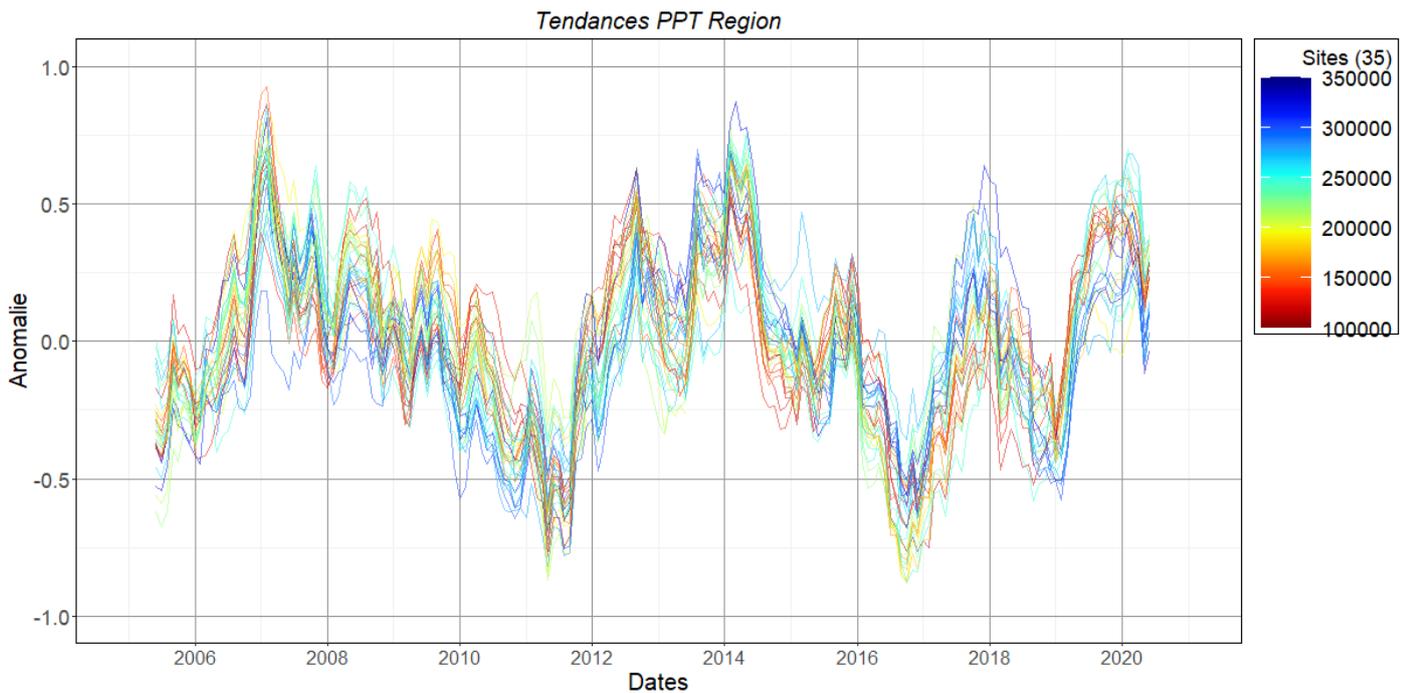


Illustration 72 : Chroniques de précipitations normalisées (postes associés aux piézomètres de Bretagne) classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu – ouest rouge)

4.1.7 Résultats – ressources superficielles

Le comportement des cours d'eau a aussi été étudié. Les mêmes analyses ont été conduites sur 105 stations hydrologiques de cours d'eau au travers de l'analyse du débit journalier. Les données sont issues de la base de données hydroportail. Les 105 stations de mesure de débit de cours d'eau (Illustration 40) sont référencées comme non influencées, signifiant qu'elles ne sont pas en aval direct des barrages et donc que leur dynamique est peu influencée par les actions anthropiques. Les résultats sont présentés Illustration 73. Les anomalies sont affectées à la fois par les cycles de précipitations et un décalage lié à l'influence des aquifères. L'impact de la position géographique est cependant moins marqué que pour les piézomètres et est plus proche des évolutions de précipitations (Illustration 72).

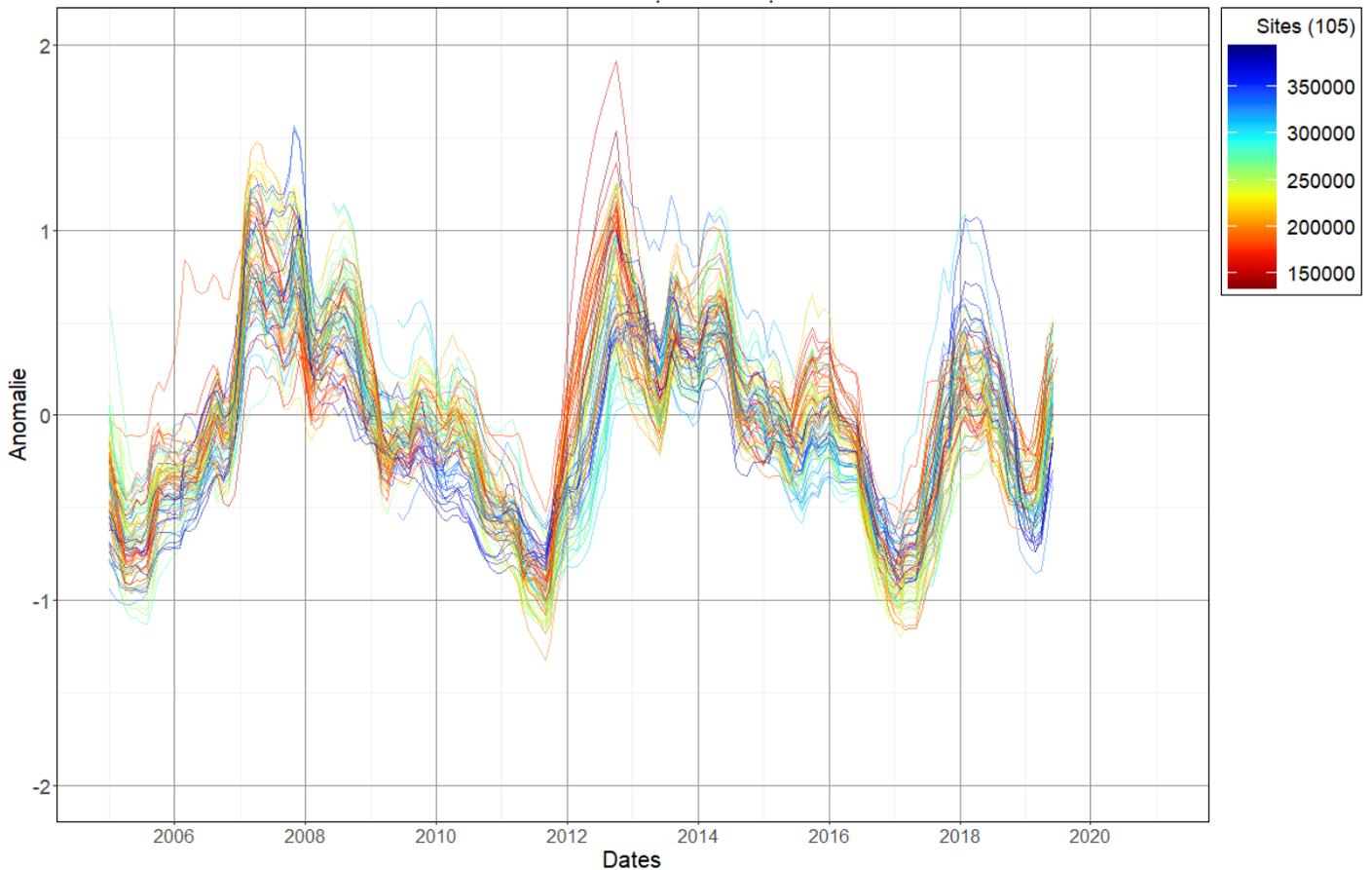


Illustration 73 : Chroniques de débits des cours d'eau normalisées des stations hydrologiques de Bretagne classées d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (est bleu – ouest rouge)

4.1.8 Limites de la méthodologie mise en œuvre

La quantification de la variabilité des stocks d'eau souterraine sur une échelle longue reste limitée à l'échelle régionale en raison de la relative jeunesse du réseau piézométrique. Celui-ci a majoritairement été mis en place entre 2003 et 2005 et bien que présentant dorénavant plus de 15 ans de données, il reste limité pour les analyses climatiques sur le long terme. Certains piézomètres possédaient toutefois des données antérieures. Quatorze piézomètres présentent des données depuis 1993 mais ces piézomètres sont situés majoritairement dans le Finistère (4 dans le Morbihan) ce qui limite les analyses spatiales et leurs relations avec la géologie. Une majorité du réseau piézométrique de Mayenne et de la Manche, qui aurait pu aussi compléter cette analyse, est aussi récent. À titre d'information, ces variations pour l'ensemble des piézomètres de la région Bretagne est fournie en Illustration 74. Sur cette figure, les dates des débuts de chronique sont différentes et donc la comparaison est imprécise (en raison de moyennes calculées sur des périodes différentes) et elle donne uniquement des grandes variations individuelles. Les chroniques plus longues ne semblent pas tendre vers plus d'anomalies négatives.

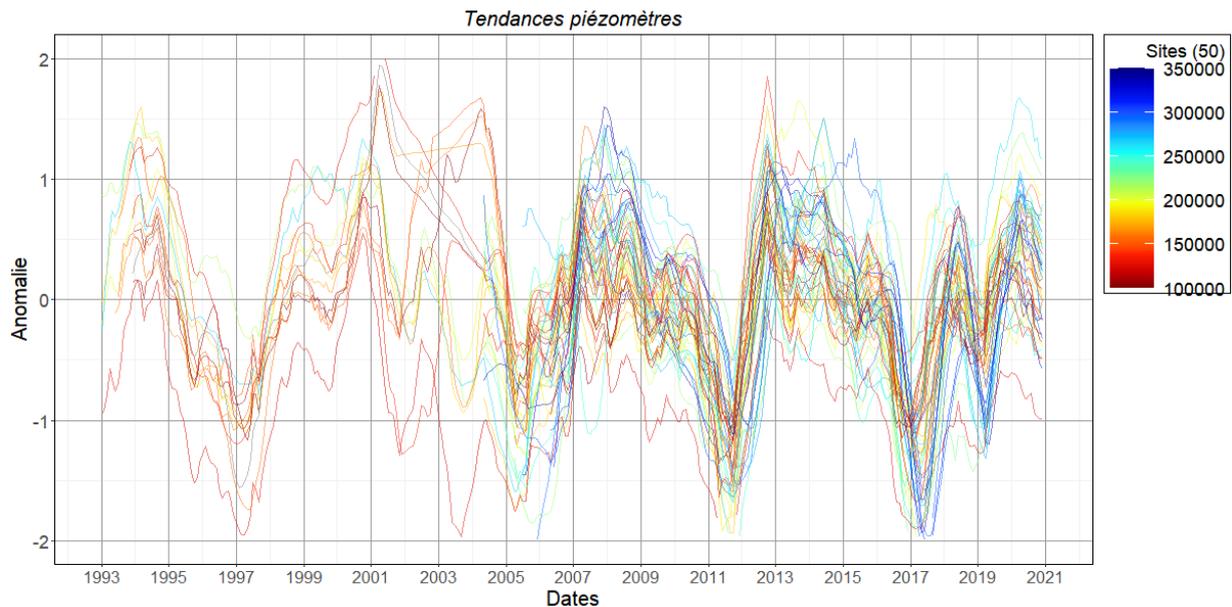


Illustration 74 : Chroniques piézométriques normalisées de l'ensemble des piézomètres de Bretagne sur leur chronique complète classés d'est en ouest par code couleur selon leurs coordonnées en Lambert93 (Est bleu – Ouest rouge)

4.2 RECONSTRUCTION LONG TERME DE L'ÉVOLUTION DES RESSOURCES - CONSTRUCTION D'UNE CHRONIQUE DE RÉFÉRENCE

Pour reconstituer les variations des ressources en eau à l'échelle régionale sur le long terme, les chroniques piézométriques étant courtes, les chroniques de débit des cours d'eau ont été utilisées. Ces chroniques ont des comportements cycliques similaires mais sont suivies depuis beaucoup plus longtemps. Des exemples de cours d'eau individuels suivis depuis les années 70 sont ici analysés avant de réaliser une analyse régionale globale.

4.2.1 Cas de l'Aulne

La première chronique étudiée est celle de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (station : J3811810) (29) suivie depuis 1970, qui fournit une chronique de plus de 50 ans. Les anomalies calculées ne montrent pas de tendances nettes à la hausse ou la baisse mais des cycles relativement réguliers. Le cours d'eau peut, en été, profiter du soutien d'étiage via la retenue de Saint-Michel sur la commune de Brennilis et peut donc être influencée en période d'étiage.

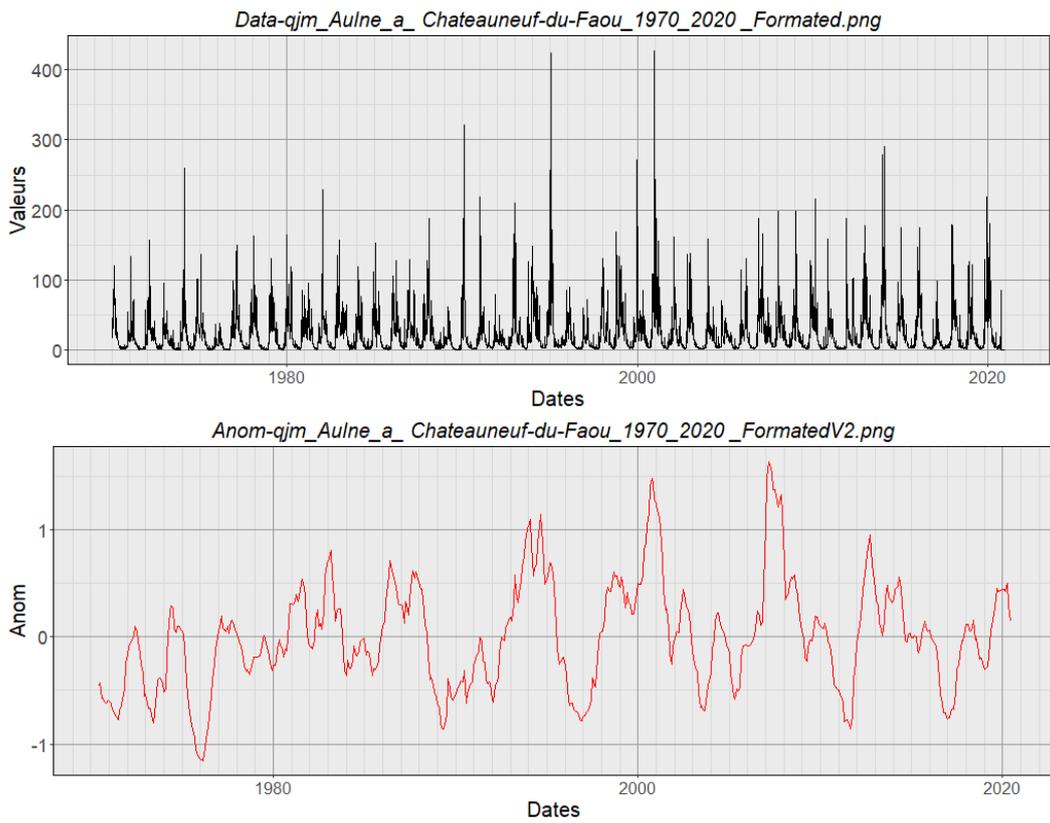


Illustration 75 : Décomposition des chroniques de débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (J3811810) (29) avec en haut les données brutes journalières et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).

Les dates des maxima et minima sont identifiées sur la figure en Illustration 76, ce qui permet d'identifier les principales sécheresses.

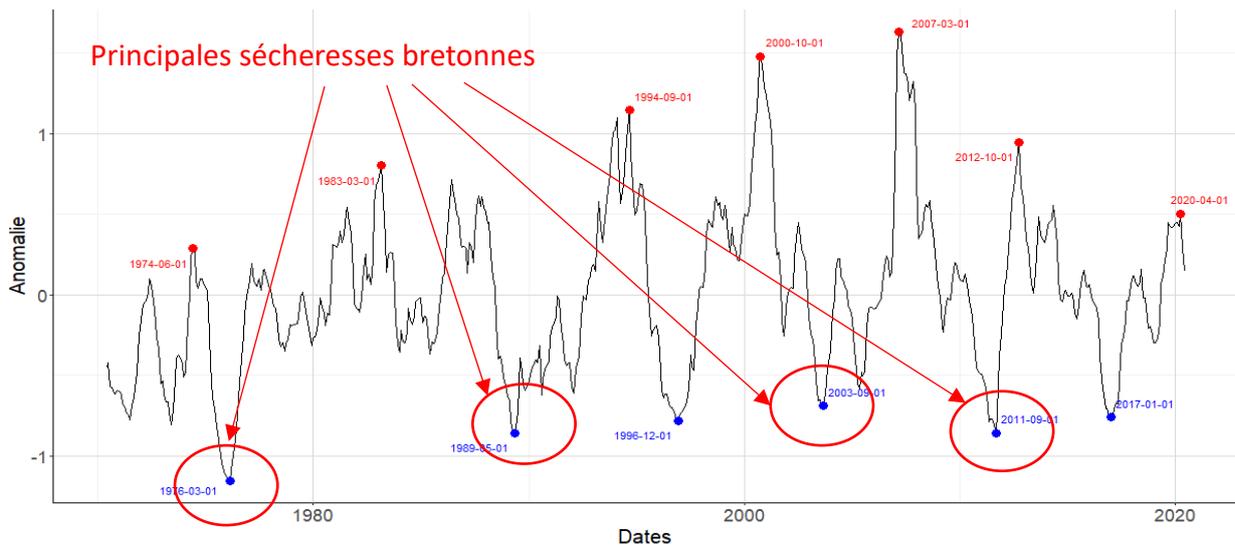


Illustration 76 : Identification des périodes de sécheresses sur la chronique de débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (29).

La méthode permet bien d'observer, à la fois les durées et intensités des sécheresses sur les chroniques. On peut notamment remarquer, par une anomalie plus négative que la sécheresse de 1976 reste la plus intense et que celle de 1989 reste la plus longue période de déficit.

Par ailleurs, les typologies des sécheresses sont différentes :

- 1976 : exceptionnelle sur une échelle de temps court en terme de déficit de précipitations ;
- 1989/1990 : sécheresse longue et intense ;
- 2003 : canicule et sécheresse ;
- 2011: sécheresse précoce ;
- 2017 : déficit hivernal des précipitations de 2016.

La comparaison détaillée des sécheresses peut être réalisée via les hydrogrammes unitaires de la chronique de débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou et confirme les observations des tendances. Les années 2003 et 2011 n'ont pas eu des impacts extrêmes sur les débits.

Cette illustration 77 montre que les sécheresses récentes 2017, 2011 souvent utilisées actuellement comme références car plus récentes et mieux documentées, ne sont pas si extrêmes en comparaison de certains évènements historiques. De ce fait, même sans les augmentations observées des températures (encore amenées à augmenter), des sécheresses plus importantes que 2011 et 2017 sont probables.

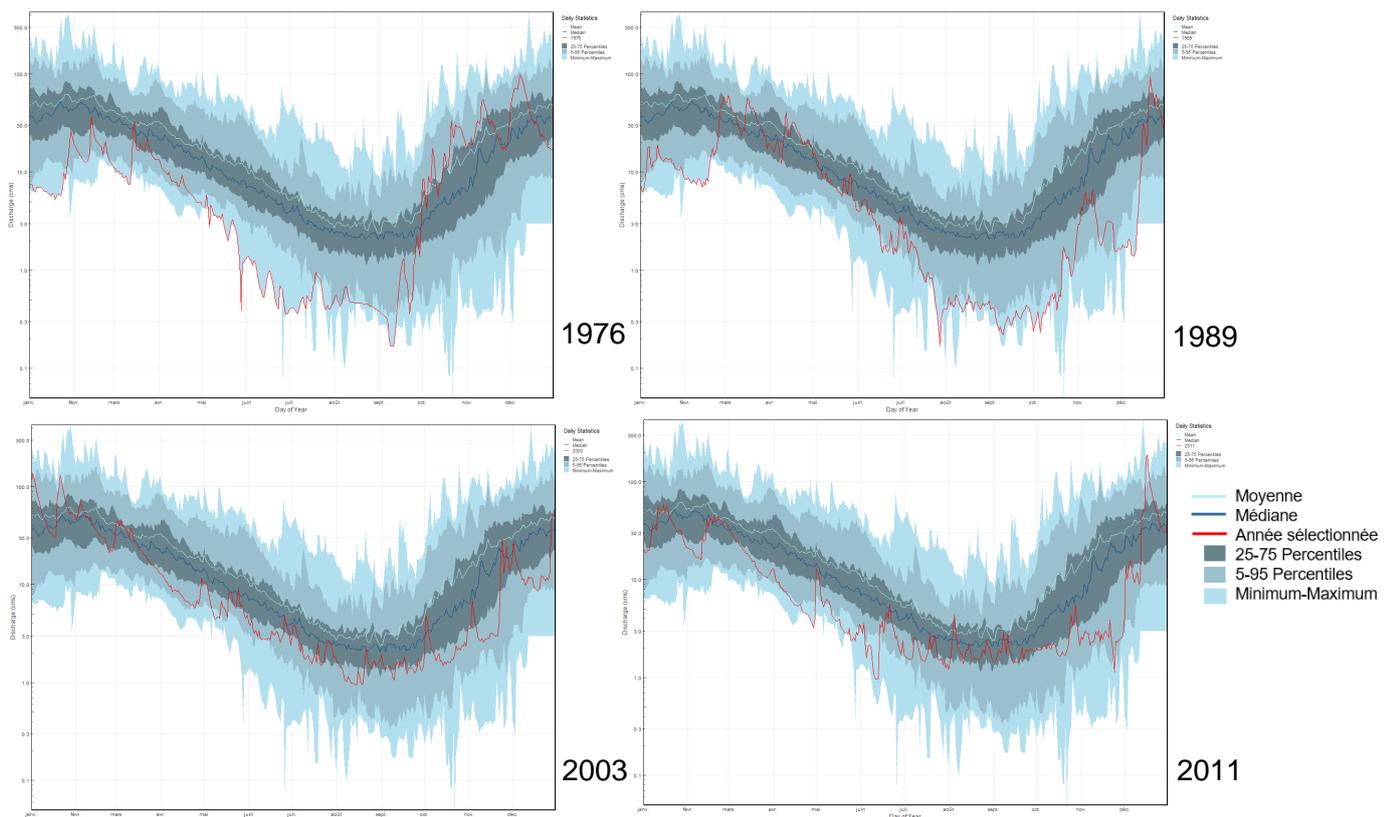


Illustration 77 : Hydrographes unitaires de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou pour les années 1976, 1989, 2003, 2011. Le débit a pu être influencé par le soutien d'étiage opéré par le réservoir Saint-Michel

4.2.2 Cas de l'Arguenon

La même méthodologie est appliquée au cas de l'Arguenon à la station de Jugon-les-Lacs (J1103010) (22) et montre des comportements similaires au débit de l'Aulne avec toutefois des différences notables. L'évolution des débits sur l'Arguenon montre que les périodes où les valeurs sont au-dessus des normales ont été très limitées dans le temps depuis 2001 (période d'analyse 1977-2021) et les cycles plus atténués ce qui peut indiquer une tendance à la baisse.

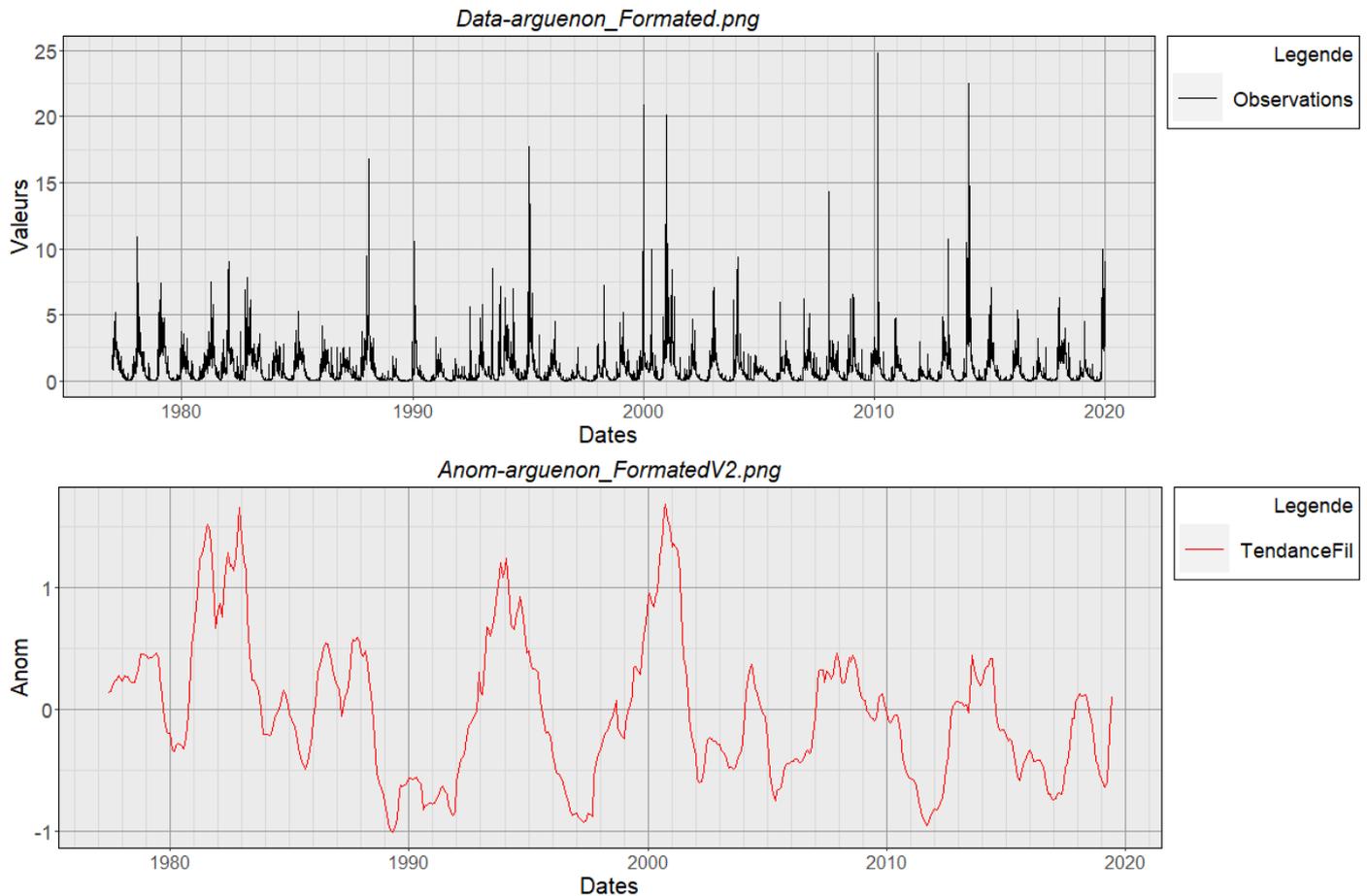


Illustration 78 : Décomposition des chroniques journalières de débit de l'Arguenon avec en haut les données brutes et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).

4.2.3 Cas de la Vilaine

Dans le cas de la Vilaine, à la station de Vitré (J7010610) (35), les données de débits journaliers sont aussi disponibles de 1970 à 2021. Comme pour l'Aulne, la sécheresse la plus intense est celle de 1976, suivie de celle de 1989-1990 dont le déficit s'est poursuivi jusqu'en 1991-1992. On remarque aussi que sur cette chronique, contrairement à celle de l'Aulne, la canicule de 2003 ne semble pas avoir eu d'impact majeur. On peut aussi noter que sur la période considérée (50 ans) une succession de sécheresses aussi rapprochées que 2017, 2019 (auxquelles il faut ajouter celle de 2022) n'ont pas eu lieu auparavant.

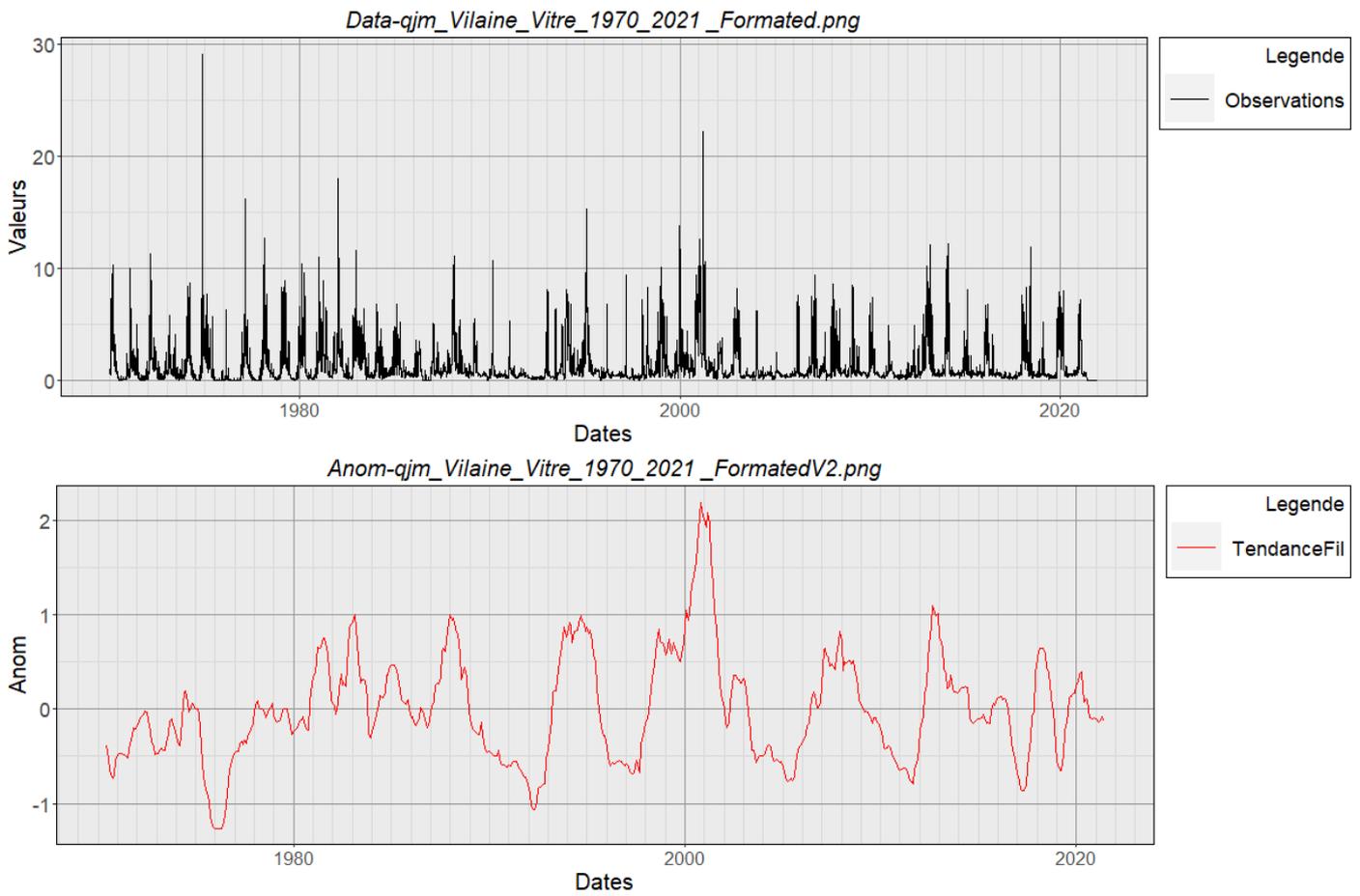


Illustration 79 : Décomposition des chroniques journalières de débit de la Vilaine à Vitre avec en haut les données brutes et en bas les anomalies mensuelles lissées sur 12 mois (en rouge).

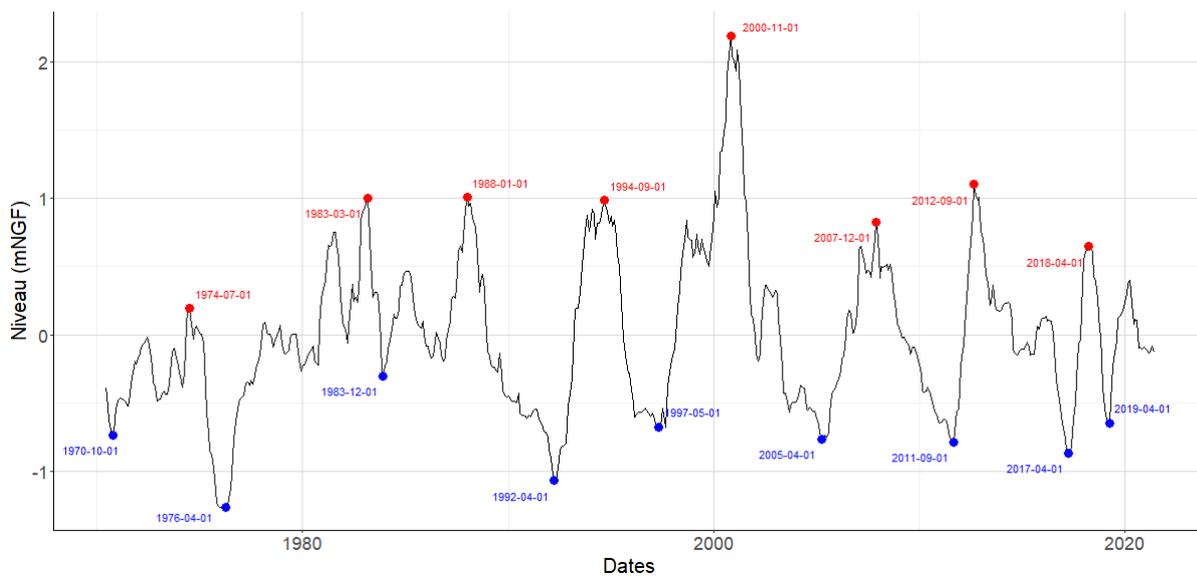


Illustration 80 : Identification des périodes de sécheresses et des périodes humides sur la chronique de la Vilaine à Vitre.

4.2.4 Comparaison des variations d'anomalies des cours d'eau

Pour évaluer les différences de variations historiques de débits entre trois des cours d'eau majeurs de la région (l'Aulne, l'Arguenon et la Vilaine), les anomalies sont reportées sur une figure unique (Illustration 81). En raison de la normalisation des données, les comparaisons doivent être effectuées de manière relative et pas absolue (il n'y a pas d'indication sur les valeurs brutes de débit). Si pour tous les cours d'eau, les grands cycles sont relativement similaires avec 1976, qui reste la sécheresse la plus intense, des différences peuvent être mentionnées pour certaines périodes. La dynamique de la période 1989-1991 est notamment différente avec une augmentation du déficit sur l'ensemble de la période et une remontée plus tardive pour la Vilaine contre une stabilisation pour les autres. De même, l'inertie semble plus importante pour la Vilaine pour la période 2003-2005. Ces éléments plaident pour une inertie plus importante de ce territoire en lien avec une inertie plus importante des aquifères en accord avec les observations sur les piézomètres. La sécheresse de 2019 est aussi relativement plus marquée pour le bassin de la Vilaine. Cet élément est en accord avec les observations réalisées sur les niveaux piézométriques (Illustration 70) et qui n'était pas visible sur les précipitations (Illustration 72).

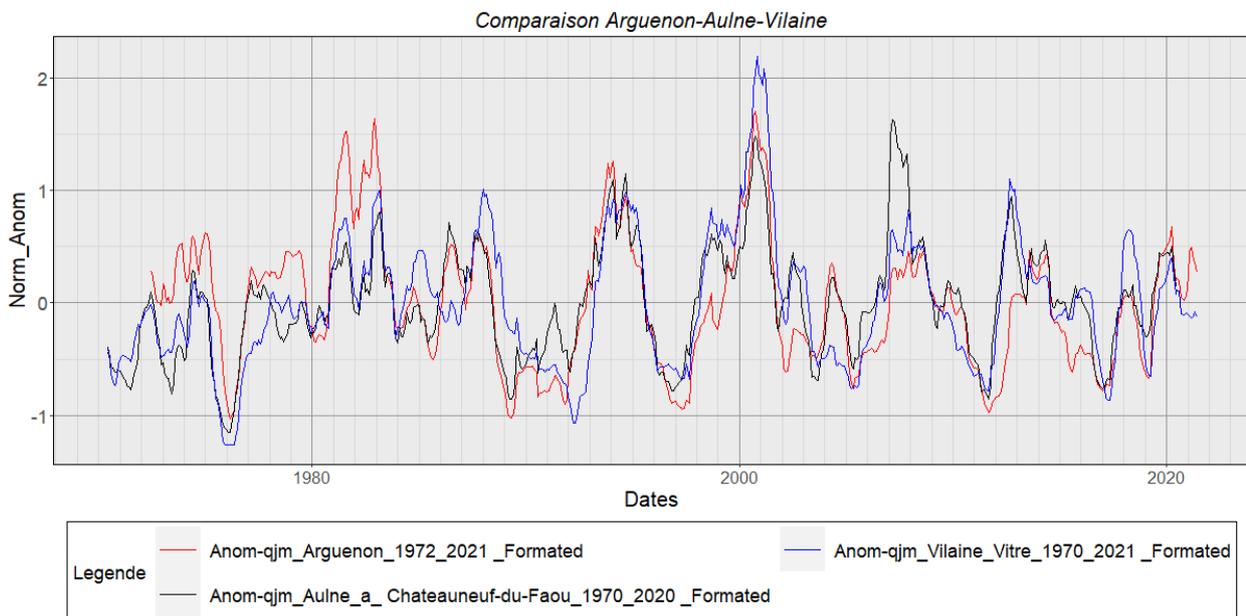


Illustration 81 : Comparaison des anomalies des chroniques journalières de débit de L'Aulne, L'Arguenon et la Vilaine

4.2.5 Analyse à l'échelle régionale des évolutions des ressources superficielles

Pour généraliser ce comportement et identifier des facteurs explicatifs, l'analyse des évolutions des ressources en eau superficielle a été conduite à l'échelle régionale sur un échantillon de 104 chroniques de suivi de débit de cours d'eau. Les données sélectionnées correspondent aux stations dites non influencées de la base de données Hydroportail. Les données utilisées sont cartographiées Illustration 40. Les chroniques ayant des longueurs différentes, les valeurs calculées sont affectées par des moyennes et écarts types impactés par des périodes différentes. Toutefois le comportement global à l'échelle régionale peut être représenté en Illustration 82. L'analyse homogénéisée sur les longueurs de chronique a été réalisée en Illustration 73 pour la période 2005-2020.

Les variations sur les cours d'eau étant très liées aux précipitations directes, les variations sont relativement homogènes sur l'ensemble du territoire. En moyenne à l'échelle régionale, les événements de 2011 et 2017 ont créé des écarts à la normale de la même amplitude que

celle de 1976 mais sont documentés par davantage de points de mesure. La période 2001-2006 a été globalement en-dessous des normales. La période 1989-1991 est la plus longue période de déficit et 2000-2001 la période des maximums enregistrés (périodes très humides).

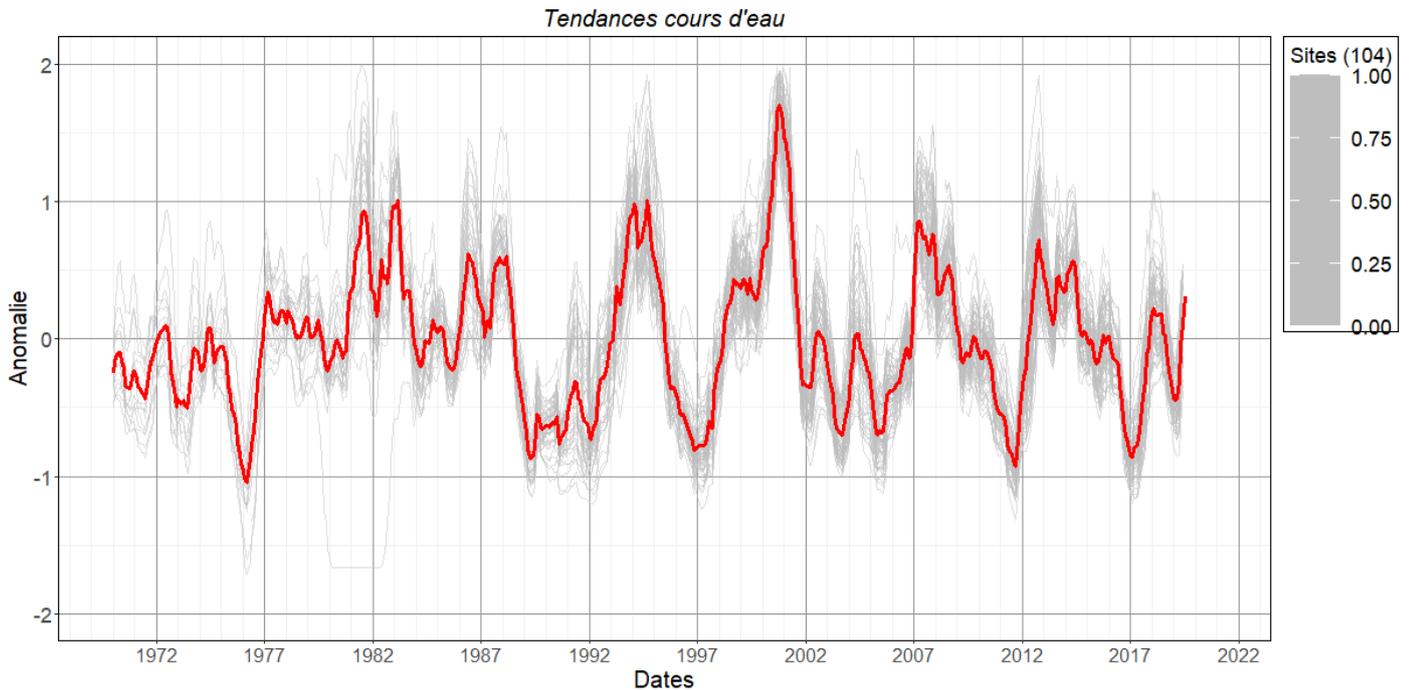


Illustration 82 : Tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région. Les traits gris correspondent à chacune des chroniques individuelles. La courbe rouge représente la moyenne des 104 points de mesure.

Pour évaluer les facteurs pouvant expliquer les différences entre les cours d'eau, les chroniques ont été classées par position géographique, par contribution des aquifères aux cours d'eau (via le BFI – Voir section 2.6) et par les lithologies présentes sur les bassins versants.

a) Comparaison par position géographique

Les courbes ont été classées par un gradient de couleur est (en bleu) – ouest (en rouge) par les coordonnées des stations de jaugeages en Lambert93 (Illustration 83).

Cette répartition n'est pas homogène à l'échelle du territoire mais les différences restent peu marquées. Une comparaison entre les extrêmes du territoire en Illustration 84 montre globalement des cycles plus lissés à l'est et plus rapides à l'ouest.

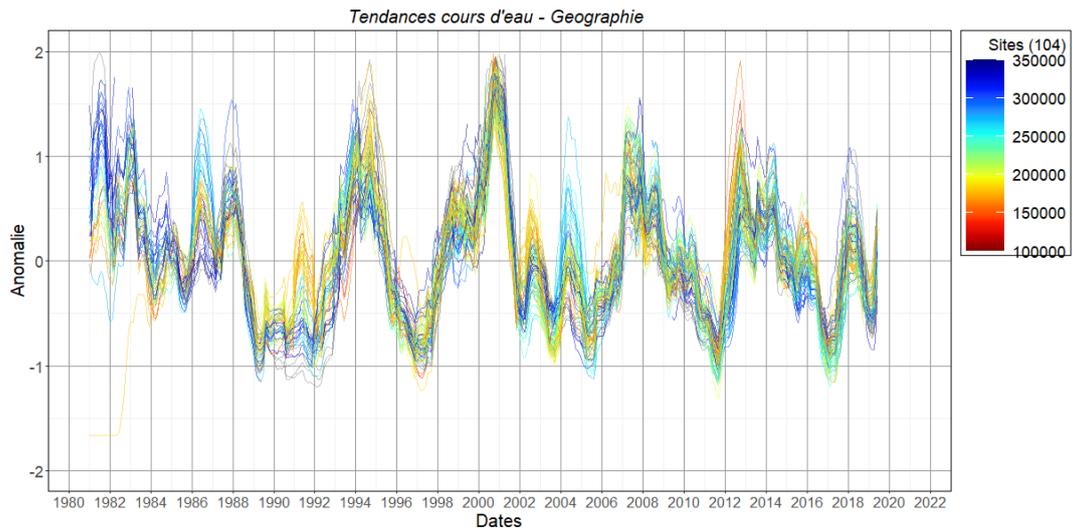


Illustration 83 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région d'est (bleu) en ouest (rouge)

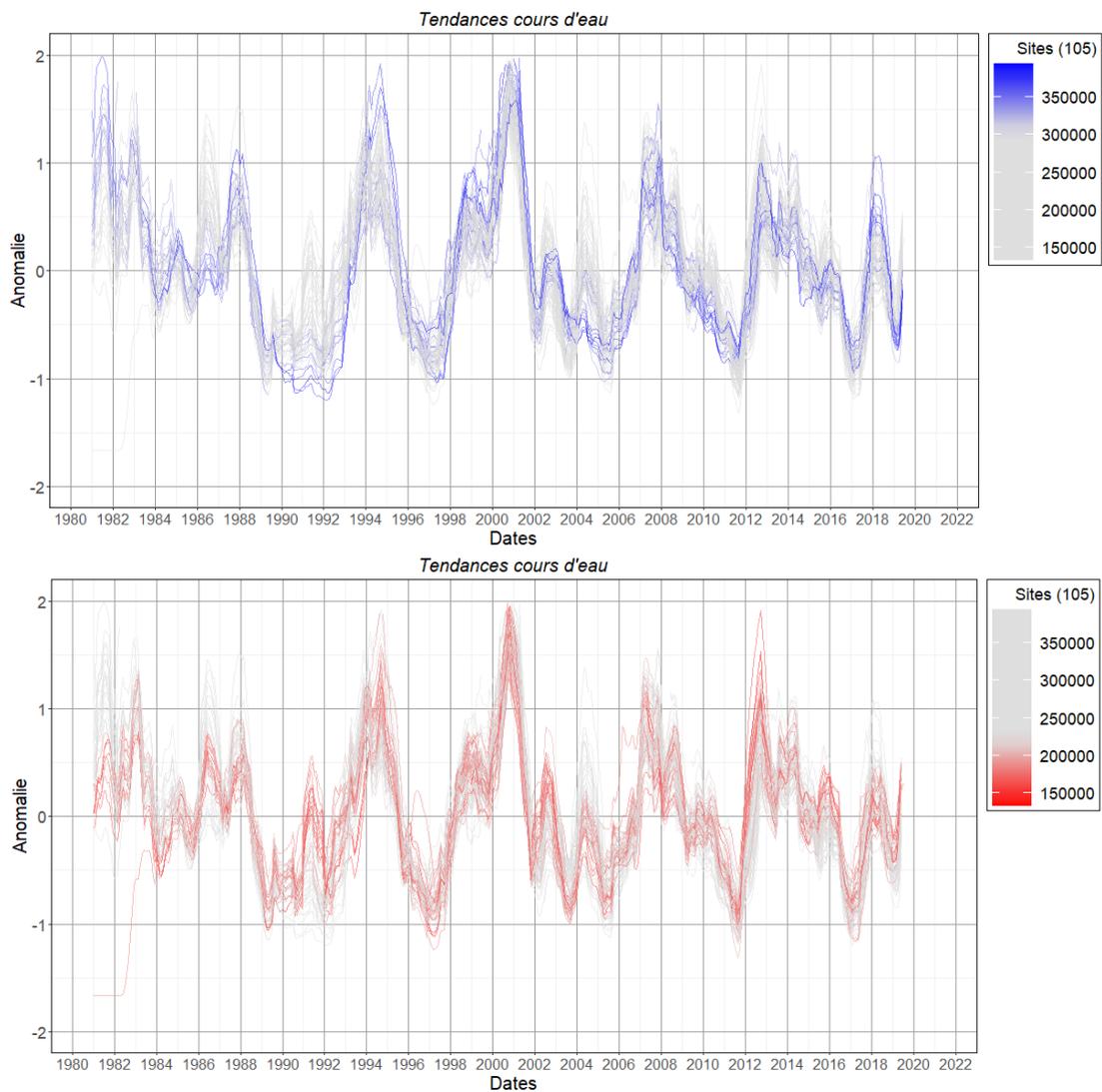


Illustration 84 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région d'est (bleu) en ouest (rouge) – Positions extrêmes

b) *Comparaison par BFI*

L'estimation de la contribution des eaux souterraines par la valeur du BFI estimée pour chaque cours d'eau a aussi été utilisée pour justifier les écarts de comportement. Les courbes sont ainsi classées selon leur BFI sur l'illustration 85. Les BFI faibles (faible contribution des eaux souterraines) ont des signaux plus lissés et sont moins affectés par les variations de quelques années. À l'inverse, les BFI forts (0,7-0,8) montrent des cycles plus rapides. Toutefois, les différences sont très peu marquées et ne peuvent être considérées comme absolues. Ces phénomènes peuvent s'expliquer par une perméabilité plus faible des aquifères dans le cas des BFI faibles. À l'échelle annuelle, les précipitations sur ces territoires à faible perméabilité ont une propension plus importante à ruisseler, mais cette information est lissée dans cette méthode d'analyse et n'apparaît pas. De ce fait, les cycles dans les cas de BFI faibles sont plus lissés que pour les BFI forts.

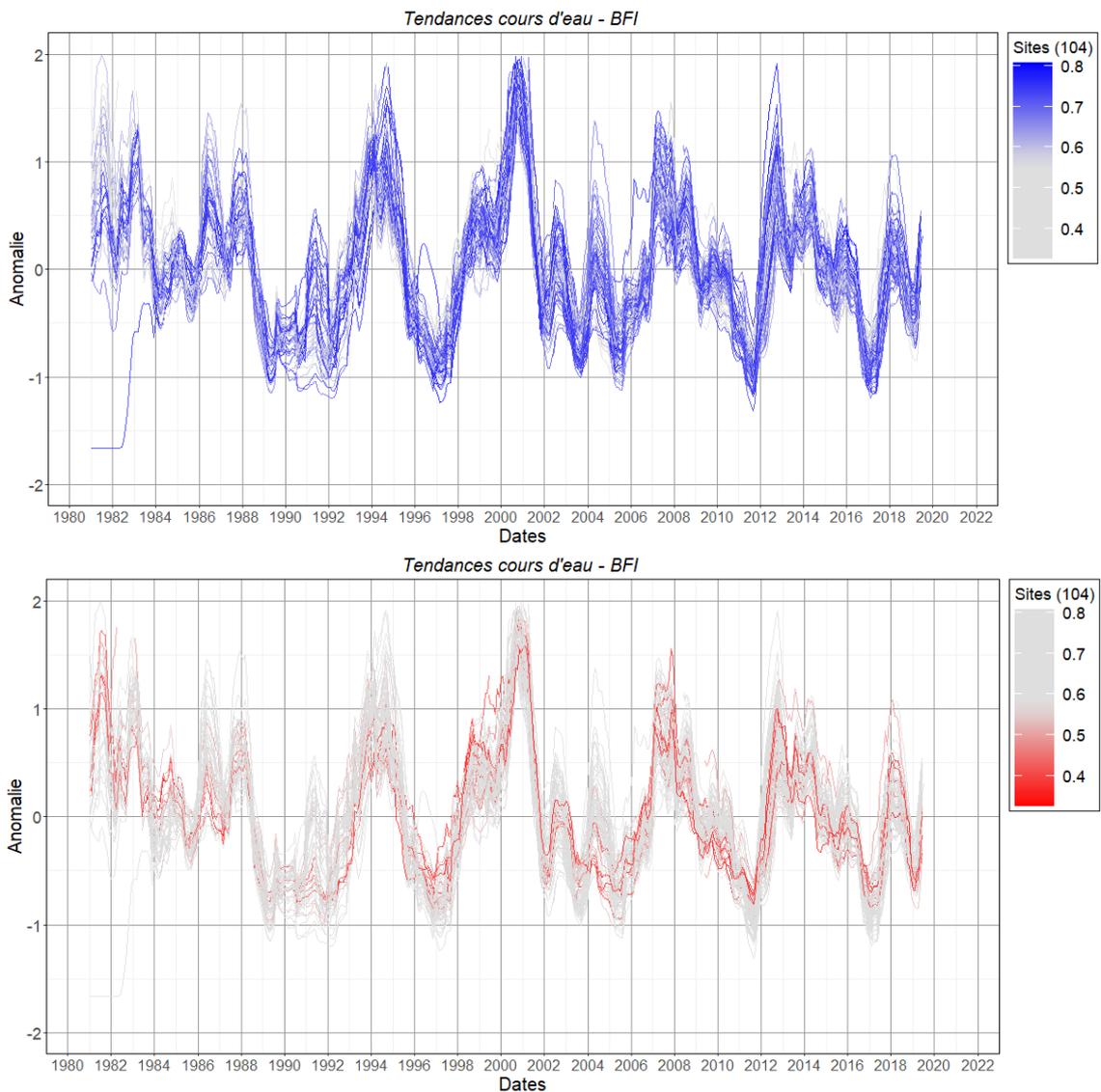


Illustration 85 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région en fonction du BFI (bleu, BFI important ; rouge, BFI faible)

b) Comparaison par géologie

Une analyse similaire a été conduite pour différentes classes géologiques. La représentation par grands ensembles (sédimentaire et plutonique métamorphique) est présentée en Illustration 86. Cette observation ne permet pas de conclure à des différences majeures. Une différenciation par âge a aussi été conduite mais le faible nombre de sites pour certaines catégories limite les interprétations. Les résultats détaillés sont fournis en annexe 4.

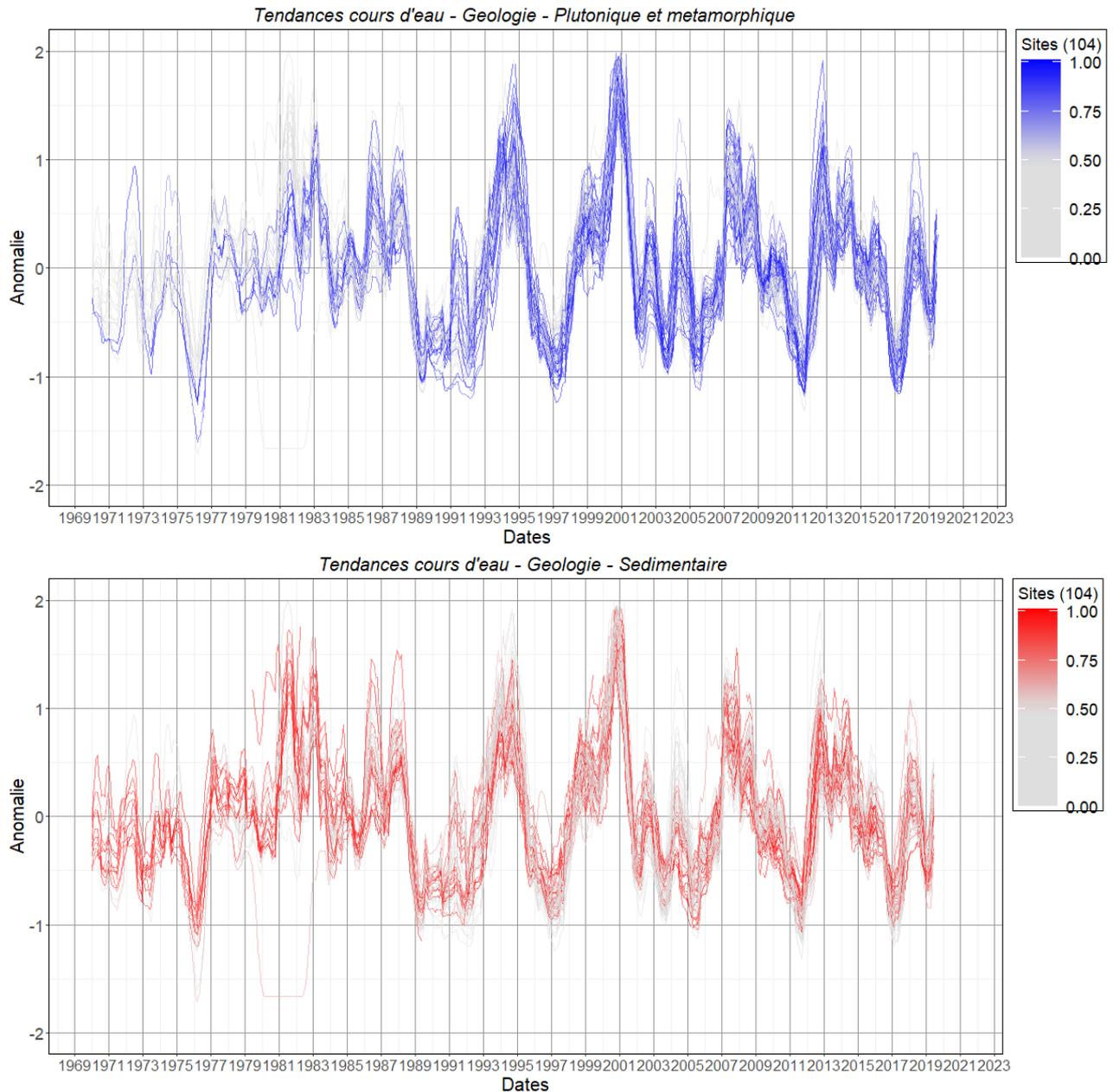


Illustration 86 : Classement des tendances calculées sur 104 chroniques journalières de débit des cours d'eau de la région en fonction de grands ensembles géologiques (bleu, proportion de roches plutoniques et métamorphiques importante ; rouge, proportion de roches sédimentaires importante)

4.3 COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS TYPES DE RESSOURCES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Compte tenu du nombre important de données de types différents sur un large territoire et une large échelle de temps, la comparaison de l'ensemble des données peut être complexe. La démarche adoptée a en partie pour but de synthétiser l'évolution des différents compartiments hydrologiques sur le territoire. Les figures suivantes représentent les données compilées de 50 stations météorologiques (Précipitations (PPT) et ETP), 104 cours d'eau et 50 piézomètres. Elles compilent la majeure partie des données hydrologiques utilisées à l'échelle régionale. Pour une homogénéité des résultats et éviter les biais liés à des périodes d'échantillonnage différentes, les anomalies de plus de 250 chroniques de 4 types différents ont été calculées sur la période 2005-2021. Ces figures compilent donc plus de 1,5 million de mesures journalières sur le territoire sur 17 ans. Sur l'illustration 87, l'anomalie des précipitations est présentée en rouge, celle de l'ETP en noir et les courbes vertes et bleues représentent respectivement les rivières et les piézomètres.

À l'exception de l'ETP qui présente une tendance à augmentation générale, les autres courbes n'ont pas de tendance à la hausse ou à la baisse mais présentent des oscillations. Contrairement au modèle conceptuel général présenté Illustration 56, les anomalies de précipitations ne sont pas atténuées pour les rivières et les piézomètres mais le signal relatif est au contraire amplifié. Cela montre la faible capacité du milieu à tamponner les variations climatiques. On note aussi un décalage de plusieurs mois dans le report des anomalies de précipitations sur les rivières et les piézomètres.

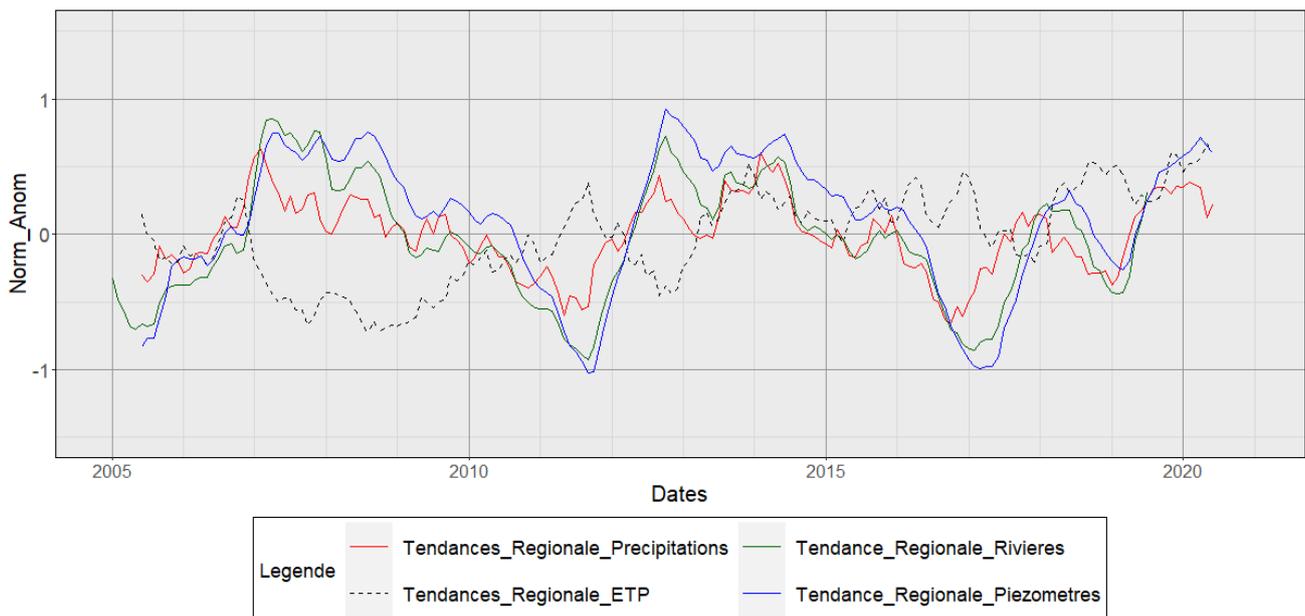


Illustration 87 : Compilation des anomalies des données moyennes de 50 stations météorologiques (PPT et ETP), 104 cours d'eau et 50 piézomètres sur la Bretagne sur la période 2005-2021.

Sur l'illustration 88, la chronique d'ETP, qui suivait une dynamique différente a été remplacée par l'anomalie de précipitation à laquelle a été soustraite l'anomalie d'ETP (PPT-ETP). La corrélation entre cette chronique fictive et les chroniques mesurées est bonne jusqu'en 2018, puis diverge en 2019. Contrairement à la chronique de précipitations, cette chronique a les mêmes amplitudes que les piézomètres notamment lors des périodes de déficits (2011, 2016-2017). Ces deux périodes correspondent à des sécheresses hivernales en Bretagne. En 2019, le comportement des courbes est différent et ne correspond plus aux variations piézométriques (encart bleu). Cette période correspond au divergences observées Illustration 70.

Deux éléments peuvent expliquer ces divergences 1) une typologie de sécheresse différente, induisant des réponses différentes en différents points du territoire ou 2) une variation sur le territoire qui n'est pas homogène tel que le gradient observé entre l'est et l'ouest (cf : Illustration 71). Dans ce second cas la moyenne de comportements différents induirait cette divergence. Les évolutions d'anomalies locales entre précipitations locales, cours d'eau et niveaux piézométriques a été évalué sur 50 sites. Si la corrélation est bonne dans certains cas, il n'a pas été possible de complètement généraliser cette tendance.

Même si la méthode n'est pas suffisante pour projeter le devenir des ressources en eau et le rôle de l'ETP sur les sécheresses sur le territoire, le fort lien entre cette chronique fictive et les niveaux piézométriques pose question. Compte tenu de la tendance à l'augmentation de l'ETP et des oscillations des précipitations, les sécheresses sur les cours d'eau et les piézomètres seront probablement plus forts dans le futur si l'ETP continue à suivre cette tendance.

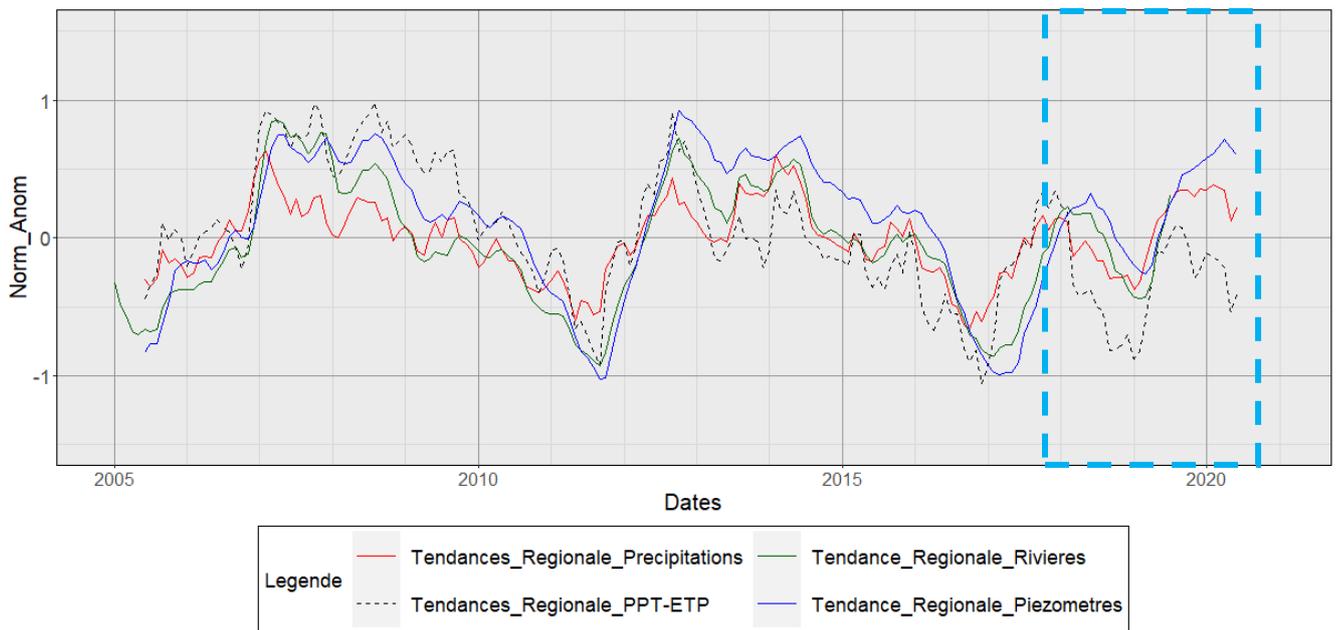


Illustration 88 : Compilation des anomalies des données de 50 stations météorologiques (PPT et ETP), 104 cours d'eau et 50 piézomètres sur la Bretagne sur la période 2005-2021.

4.4 AMPLITUDE DE LA RECHARGE

Afin de quantifier l'évolution des minima, maxima et battements des nappes (période 2006 - 2021), les données de l'ensemble des piézomètres ont été compilées et les régressions linéaires pour chacun de ces paramètres calculés. Les battements de nappe annuels représentent la différence entre le plus haut niveau enregistré et le plus bas. Les piézomètres de Theix (56), Paimpont (35) sont exclus de l'analyse. En effet, pour ces deux piézomètres des modifications d'emplacements ou des modifications sur l'ouvrage induisent des variations dans les suivis qui ne sont pas uniquement dus à des actions naturelles. Deux autres piézomètres, celui de Mezières-sur-Couesnon (35) qui a des variations piézométriques très atypique et Bonnemain (35) ont aussi été exclus. Deux exemples sont fournis ci-dessous pour les piézomètres de Spézet et Louvigné-du-Desert.

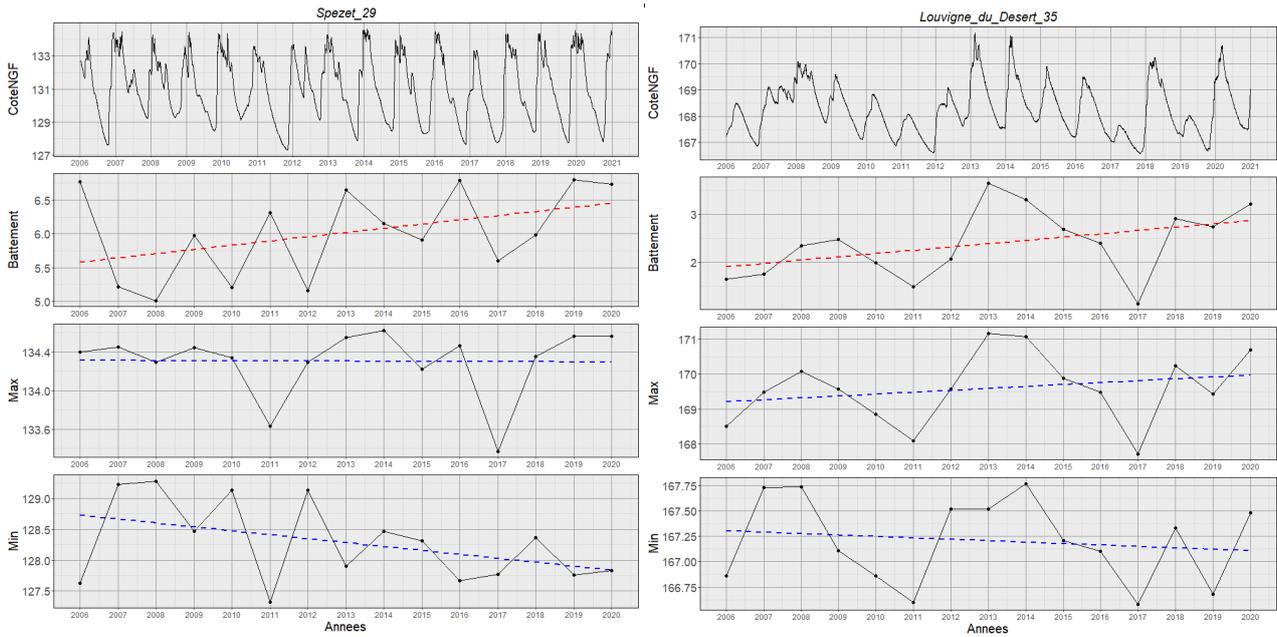


Illustration 89 : Évolution du battement de nappe, des maxima et minima annuels

Les pentes des courbes sont ensuite reportées pour chacun des sites et rassemblées Illustration 90. Ces coefficients calculés sont dépendants des propriétés du sous-sol (capacité d'emmagasinement notamment) et ils sont indicatifs à l'échelle d'un site mais ne peuvent pas directement être comparés entre eux.

Le nombre de sites présentant des baisses ou augmentations pour les différents coefficients est compilé dans le tableau (Illustration 91).

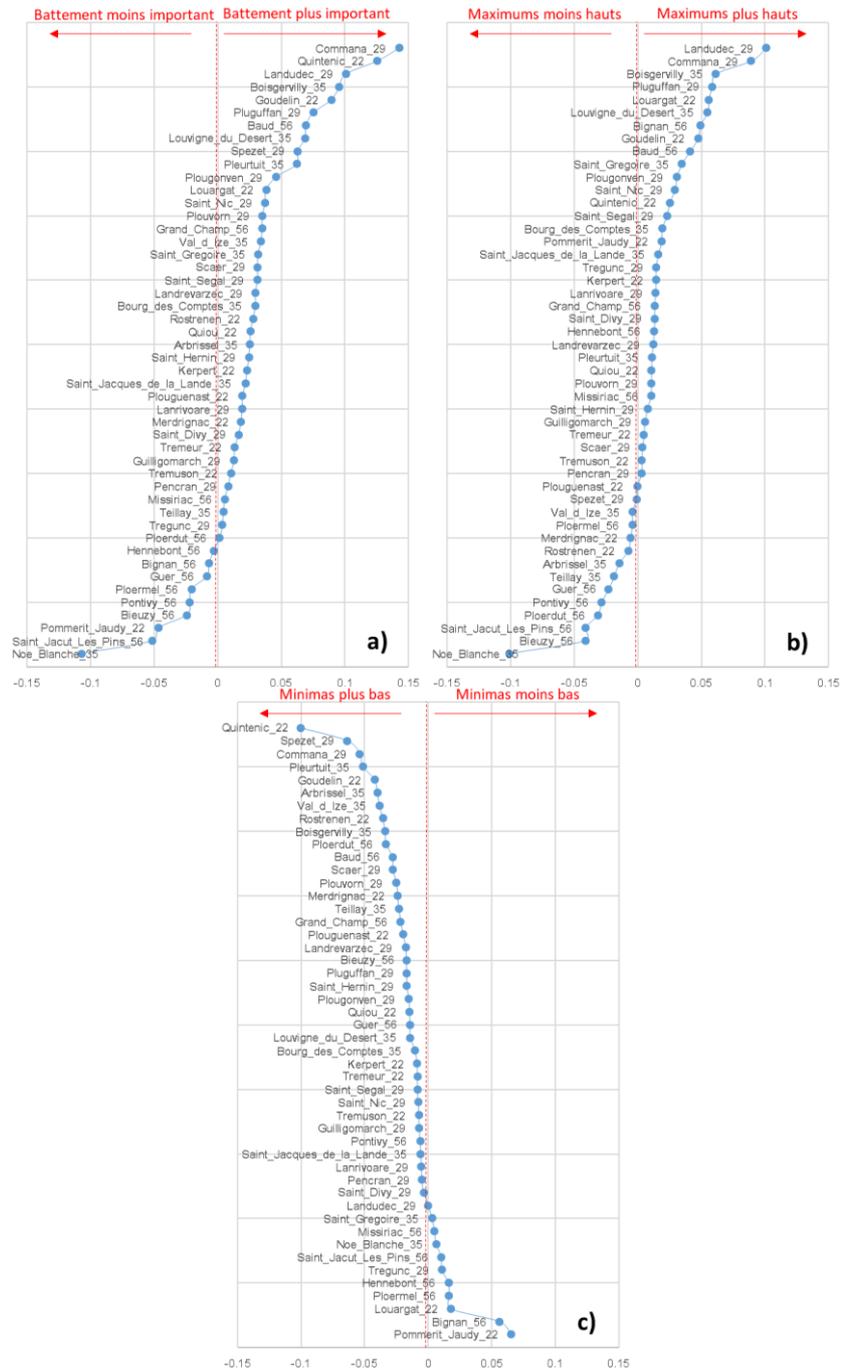


Illustration 90 : Pentes de régressions linéaires pour les évolutions du battement de nappe et les maxima et minima annuels par site

	Battement de nappe		Maxima annuels		Minima annuels	
	Augmentation	Diminution	Augmentation	Diminution	Augmentation	Diminution
Nombre de sites (48)	39	9	34	14	10	38
Pourcentage (%)	81,3	18,8	70,8	29,2	20,8	79,2

Illustration 91 : Effectifs présentant des hausses ou des baisses du battement de nappe, des maxima et minima annuels.

Le relevé des coefficients (Illustration 91) indique que pour une majorité de piézomètres, le battement de nappe tend à une augmentation. Cette évolution est liée à la fois à une tendance à l'augmentation des maximaux annuels et à une diminution des minima. Ces évolutions sont plus ou moins marquées entre les sites.

4.5 DÉCALAGE TEMPOREL

4.5.1 Objectif

En complément de l'estimation de l'évolution du battement de nappe, le décalage temporel de la recharge été évalué sur les piézomètres du réseau régional. Le sentiment d'une recharge devenant de plus en plus tardive est partagé par les syndicats d'eau potable. Un tel décalage temporel de la recharge qui induit des périodes d'étiages plus longues est une des craintes majeures pour la gestion de l'eau potable. Ce décalage peut retarder le remplissage des barrages et étendre la période de basses eaux.

4.5.2 Méthodologie

Le possible décalage de la recharge est évalué sur les chroniques piézométriques du réseau régional. Les chroniques sont analysées par identification des minima et maxima. La tendance d'évolution de la date des minima annuels est calculée par régression linéaire pour chacun des piézomètres.

4.5.3 Résultats

Exemple sur le piézomètre de Pleurtuit (35) avec l'identification des minima sur la chronique et la tendance d'évolution estimée:

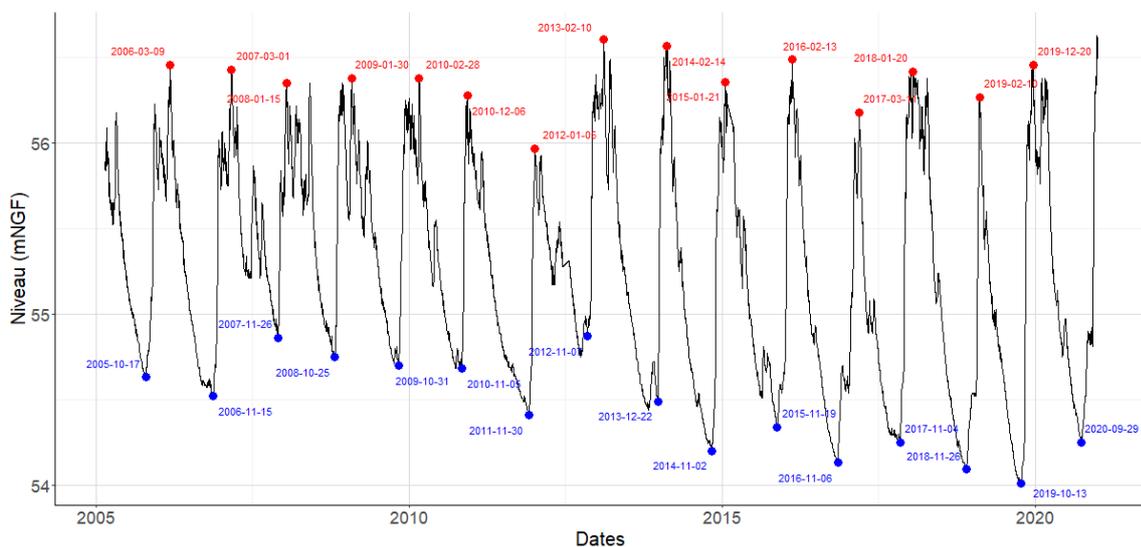


Illustration 92 : Identification des dates de début de recharge (point bleu) sur le piézomètre de Pleurtuit (35)

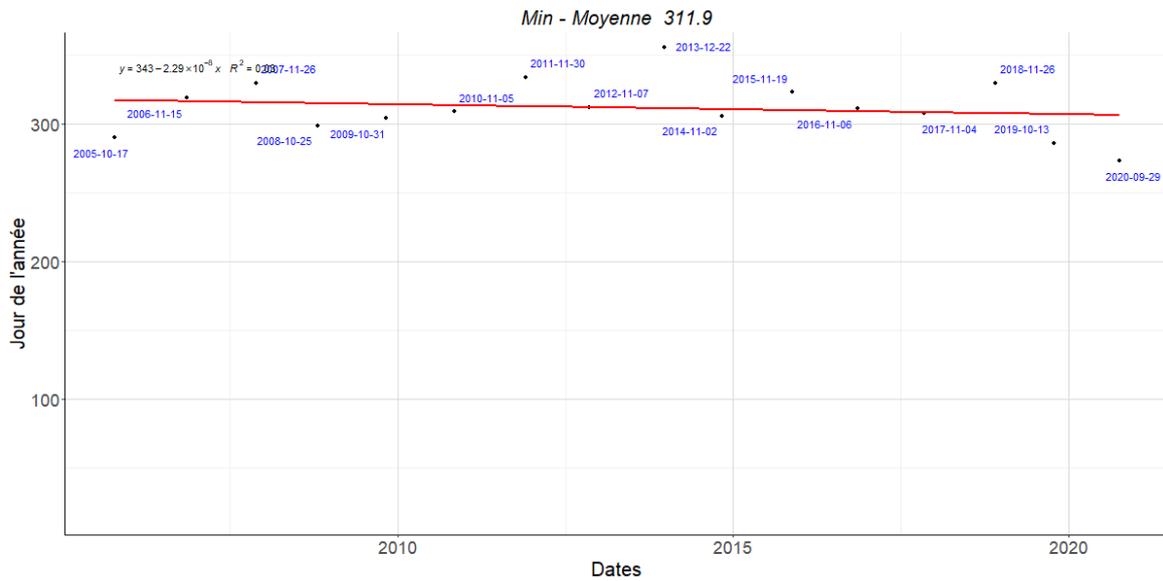


Illustration 93 : Tendence d'évolution des dates de début de recharge sur le piézomètre de Pleurtuit (35)

Les données montrent une variabilité importante entre les années. Pour ce piézomètre, la remontée du niveau de nappe commence en moyenne début novembre (312^{ème} jour de l'année) avec des années plus tardives telles que 2013 (décembre) et plus précoces telles que 2020 (septembre). La tendance d'évolution reste peu marquée et est inférieure à la variabilité interannuelle.

La compilation des coefficients directeurs de ces tendances a été réalisée sur l'ensemble des piézomètres du réseau et est représenté en Illustration 94.

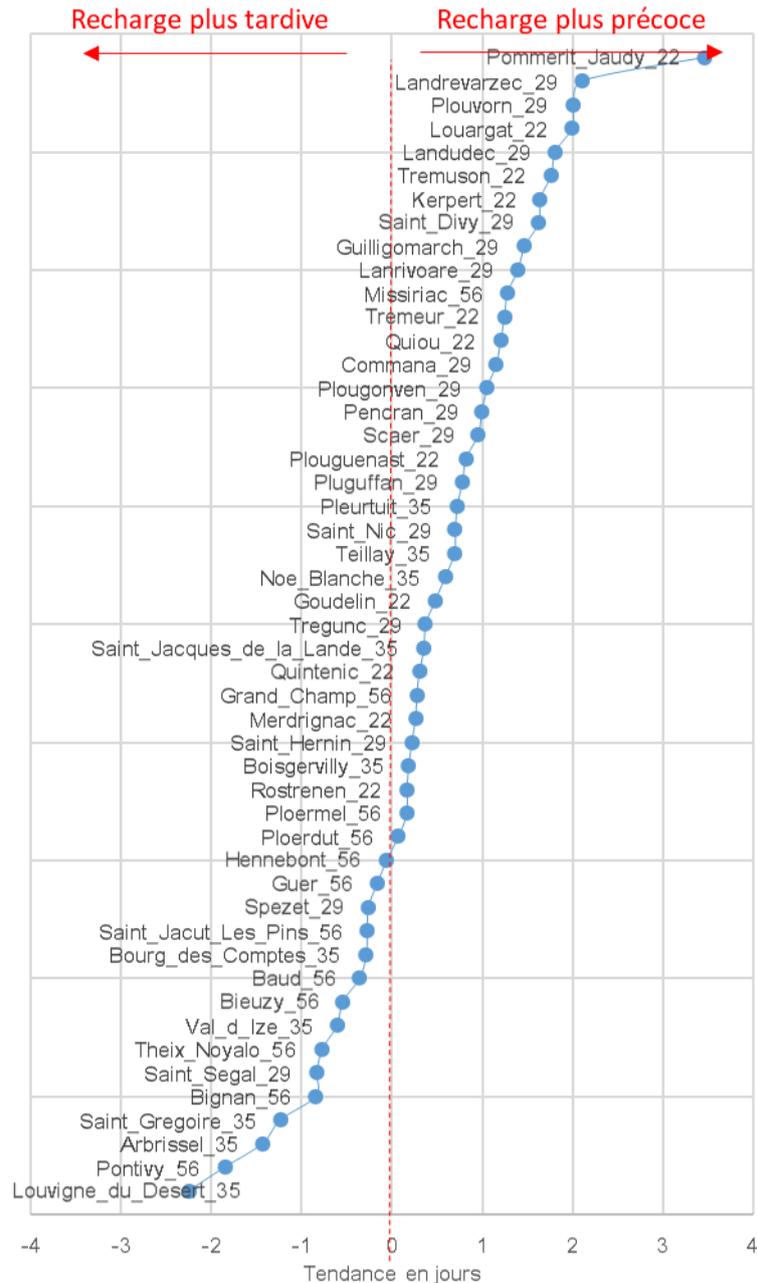


Illustration 94 : Tendence d'évolution des dates de recharges estimées

Afin d'évaluer si la variabilité entre les piézomètres avait une organisation géographique liée au gradient climatique et à l'inertie des aquifères, les tendances d'évolution des dates de recharge en jours sont représentées en Illustration 95. La représentation cartographique est fournie Illustration 96. Compte tenu de la forte variabilité interannuelle, les estimations sont peu significatives et doivent juste être utilisées comme indicateurs.

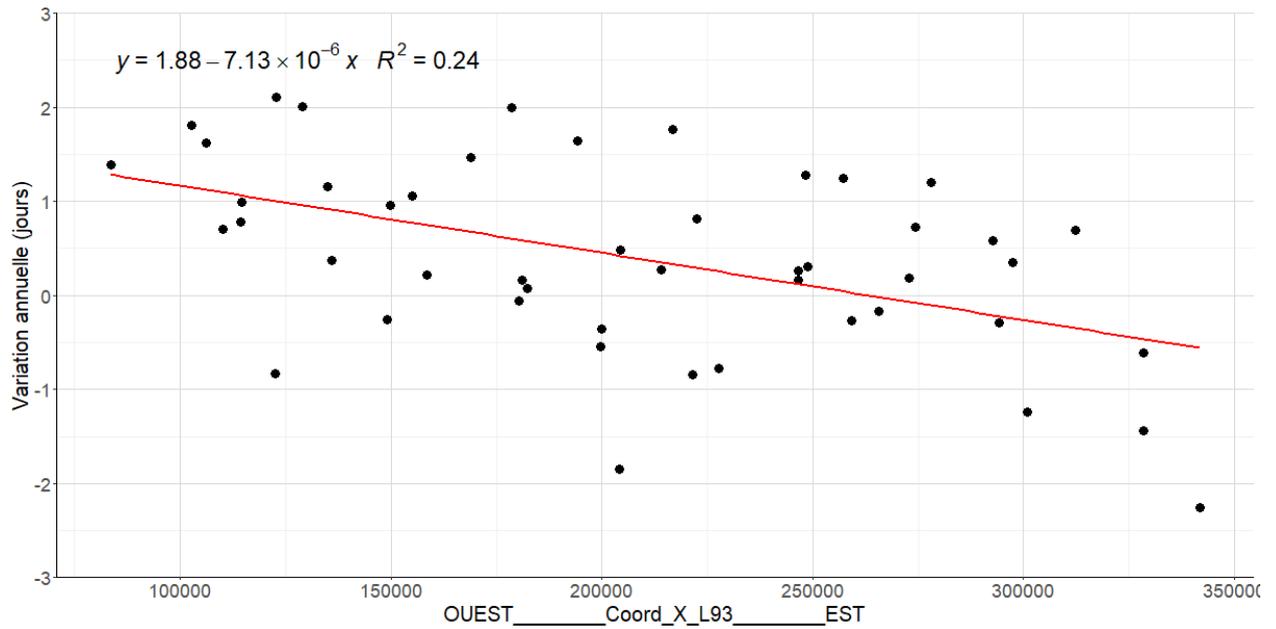


Illustration 95 : Tendances d'évolution des dates de recharge en fonction d'un gradient est-ouest.

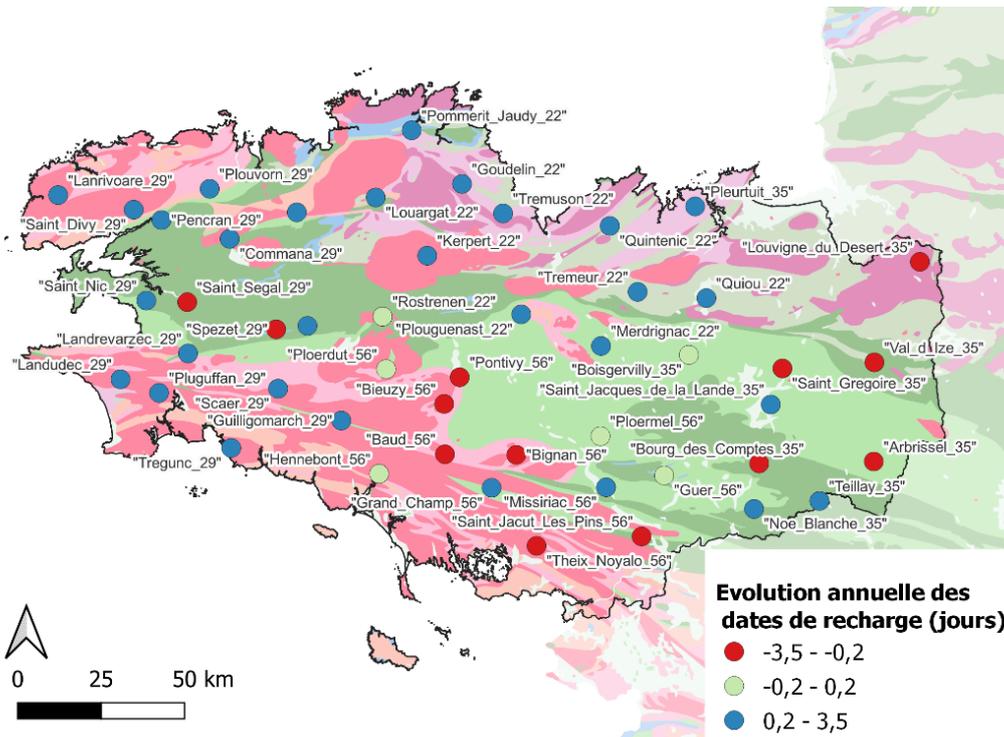


Illustration 96 : Représentation cartographique des tendances d'évolution des dates de début de recharge (en bleu recharge plus précoce en rouge plus tardive)

4.6 CONCLUSIONS CHAPITRE 4

Les travaux de ce chapitre avaient pour but de reconstituer les tendances d'évolution des ressources en eaux à l'échelle de la région en intégrant à la fois des variables climatiques (précipitations et ETP), hydrologiques (débit des cours d'eau) et hydrogéologiques (niveaux piézométriques). Les résultats montrent que si l'évolution de l'ETP est en hausse sur toute la région, les précipitations comme les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques présentent des oscillations mais restent relativement stables.

Les ressources en eau souterraine à l'ouest de la région ont des cycles purement annuels et leurs anomalies sont extrêmement corrélées aux anomalies de précipitations annuelles. À l'inverse, sur l'est de la région, il existe un décalage temporel entre les anomalies de précipitations et les anomalies des ressources souterraines. Ce décalage semble s'accroître sur les dernières années. Ces ressources souterraines, globalement moins perméables et avec une inertie plus grande (Cf Chapitre 2) peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresses que les ressources souterraines de l'ouest qui vont avoir tendance à se vidanger naturellement chaque année. En raison de l'effet mémoire pouvant perdurer sur plusieurs cycles hydrologiques, ces ressources peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresses ou à des recharges faibles en hiver (sécheresse hivernale). Ces éléments s'observent aussi sur les cours d'eau dans une amplitude moindre. L'impact des sécheresses hivernales semble plus marqué à l'est qu'à l'ouest, et l'est est globalement plus vulnérable.

Les anomalies d'évolution des ressources souterraines ou sur des périodes plus longues de cours d'eau permet de reconstituer l'historique jusqu'aux années 1970. Ces reconstitutions très semblables sur tout le territoire montrent que la sécheresse de 1976 reste la plus intense et que la période 1989-1991 reste la période de déficit la plus longue. Si les sécheresses récentes de 2011, 2016, 2019 et 2022 sont moins intenses, leur fréquence semble augmenter. Ces successions et alternances de sécheresses rapides, sur la Vilaine notamment, n'ont pas été observées par le passé.

L'ETP qui présente une augmentation sur l'ensemble de la région ne semble pas avoir un impact direct systématique sur les ressources en eau à l'heure actuelle en induisant une tendance à la baisse pour les cours d'eau et piézomètres. Cependant, les anomalies d'ETP peuvent avoir un lien et prendre de l'importance lors de certains événements tels que les sécheresses. Les comparaisons des chroniques réalisées montrant une bonne corrélation entre les anomalies chroniques de précipitations et d'ETP semble indiquer une amplification du risque de sécheresses par rapport à un apport de précipitations identique dans le passé.

Les évaluations sur les dates de début de recharge et l'amplitude des battements de nappe ont montré des résultats variables entre les différents points du territoire et de faibles amplitudes de variations. Si de légères tendances semblent ressortir, celles-ci ne sont pas marquées et sont à prendre avec précaution.

5. Influence du climat et de la disponibilité de la ressource sur la répartition spatiale et temporelle des prélèvements

5.1 INTRODUCTION

L'évolution de la demande en eau est au cœur des préoccupations des gestionnaires en raison de l'évolution démographique, de l'évolution économique de la région Bretagne et des variations climatiques à venir. Le climat et notamment les périodes de sécheresse ont un impact sur la demande en eau. Néanmoins, les mécanismes entre climat et ressources exploitées restent encore peu quantifiés.

Les problèmes liés à la gestion de l'eau sont complexes et les paramètres à prendre en compte sont nombreux incluant : des facteurs climatiques, géologiques, géomorphologiques (Price, 2011; Taylor *et al.*, 2013), économiques et humains (Rinaudo *et al.*, 2012; Scanlon *et al.*, 2007), mais aussi techniques tels que l'interconnexion des réseaux AEP avec une temporalité et des incertitudes importantes.

Les méthodes de prévision se concentrent sur les évolutions des consommations en fonction du type d'usagers (domestique, industriel, agricole), en prenant en compte de multiples paramètres tels que les revenus, types de logements, types d'exploitation... Les approches les plus communément utilisées sont basées sur des analyses bottom-up où les comportements des différents types d'usagers sont évalués sur des groupes restreints (panels d'utilisateurs) avant une extrapolation/agrégation plus générale. Ce type d'approche nécessite l'analyse de quantités importantes de données et de facteurs, et fait face à la question de la représentativité des échantillons choisis et de la complétude des bases de données. Ces contraintes opérationnelles limitent les possibilités d'application sur des échantillons plus larges (échelle de la région par exemple). Cette demande en eau est généralement étudiée sur une base annuelle (évolution des consommations annuelles) mais assez peu mensuellement et encore moins sur des bases pluriannuelles dépassant 2-3 ans.

Les évolutions de consommation sont ensuite comparées à des évolutions climatiques (exemples : températures, précipitations) à travers des analyses statistiques prospectives. Cependant, les évolutions historiques sont dans une majorité des cas peu documentées limitant l'analyse de la variabilité interannuelle et les possibilités de validation.

Une seconde limitation des scénarios prospectifs issus de ces analyses est qu'ils sont souvent utilisés par la suite en considérant une ressource en eau correspondant au maximum des capacités de production. Or cette ressource est particulièrement limitée dans le temps et l'espace. Les aquifères de socle développent leurs capacités aquifères par l'altération des roches initialement peu perméables (Dewandel *et al.*, 2006; Wyns *et al.*, 2004). Les aquifères de socle sont typiquement composés de la surface vers la profondeur 1) d'altérites, 2) d'un horizon fissuré et 3) de roche saine. Il est considéré au sein de cette structure que les altérites représentent l'aspect capacitif de l'aquifère, l'horizon fissuré son aspect transmissif et que la roche saine est imperméable à l'exception de la présence de fractures tectoniques localisées et perméables. En raison de cette structure, on observe une baisse de la productivité en forage avec la profondeur pouvant aller jusqu'à un assèchement brutal des puits ou forages lorsque les arrivées d'eau principales sont asséchées. Dans ce type de milieu, la baisse saisonnière des niveaux des nappes induit donc une baisse de la productivité voire un assèchement de la ressource exploitée. Ces mécanismes nécessitent d'être intégrés pour une gestion départementale et régionale de la ressource tout particulièrement dans un contexte de changement climatique. Ils sont actuellement peu quantifiés.

La diversité et complexité des facteurs humains, géologiques et climatiques, combinés à leurs éventuelles inter-relations et aux impératifs opérationnels des réseaux d'eau potable, rend leur gestion complexe et les événements, tels que les sécheresses difficiles à appréhender à une échelle globale. Pour une prise en compte de ces paramètres, des modèles de gestion et d'optimisation sont actuellement développés. Les prises de décisions devenant de plus en plus complexes, des outils doivent être développés pour aider à la prise de décision (Dobson *et al.*, 2020; Girard *et al.*, 2015; Harou *et al.*, 2009; Lanini *et al.*, 2004; Neverre *et al.*, 2016) tout en maintenant une interaction forte entre les différents acteurs (Montginoul and Rinaudo, 2009; Rinaudo and Garin, 2005).

Du fait de leur complexité, de leur temps et coût de mise en place, ces modèles ne peuvent être développés de manière systématique sur de larges territoires. Le choix des territoires pour la réalisation de ce type de modèles est effectué en raison de problèmes locaux identifiés mais aussi, pour une part importante, de la volonté des acteurs locaux. Dans un contexte d'évolution climatique, il n'existe pas à l'heure actuelle de cadre homogène et d'objectif permettant une synthèse de la dépendance des ressources au climat, pouvant orienter le choix des zones où le développement de ce type de modèle est essentiel.

Les objectifs sont donc ici de :

- 1) développer une méthode permettant de fournir de manière synthétique les informations nécessaires pour identifier et quantifier, sur des zones relativement larges, la dépendance de la demande en eau et de la ressource à des pressions climatiques.
- 2) aborder la question de la résilience de la ressource en eau sous l'angle de la vulnérabilité de la ressource exploitée (prise en compte du mode d'exploitation tel que l'assèchement des ouvrages et report sur d'autres éléments du réseau AEP ; report des consommations depuis les forages particuliers vers le réseau public lorsque ces ressources ont vu leur productivité baisser).
- 3) documenter les variations pluriannuelles de productivité et de sollicitation des ressources en eau exploitées et d'identifier leurs relations au climat.

Les résultats permettront de :

- 1) Documenter la relation entre utilisation de la ressource et les larges variations climatiques,
- 2) Documenter la pression sur la ressource pour différents types de sécheresses,
- 3) Réaliser une cartographie de la vulnérabilité opérationnelle des ressources en relation avec le climat à l'échelle d'un territoire.

La méthodologie utilisée et l'évaluation de la dépendance des territoires aux variations climatiques est aussi un indicateur des risques de report des agriculteurs sur le réseau AEP (quand leurs forages sont secs) ; ce phénomène étant une crainte importante des gestionnaires d'eau potable dans certains départements.

La méthodologie développée ici pourrait permettre à termes, de réaliser à l'échelle régionale :

- une cartographie de la vulnérabilité de la ressource exploitée ;
- une vision de la dépendance des principales ressources en eau aux variations climatiques ;
- proposer des solutions pour une sécurisation supplémentaire des ressources en eau ;

- une aide à la validation des estimations réalisées dans les autres tâches du projet « *De l'Eau Pour Demain* » portant sur les consommations en eau réalisées à des échelles locales.

Ces éléments sont actuellement connus localement de manière qualitative (exemple : au sein des syndicats d'eau ou à l'échelle de communautés de communes), cependant ils ne semblent que rarement quantifiés. Sur certains territoires tels que le Syndicat Mixte de l'Aulne (SMA) - étudié dans le cadre du présent projet - cette vision semble absente. De plus, aucune vision régionale homogénéisée n'est disponible. Cette vision régionale semble cependant particulièrement importante pour la gestion d'un réseau AEP aux interconnexions complexes. Les informations issues de ces travaux fournissent aussi des informations complémentaires pour l'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères.

5.2 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée se base sur l'analyse des productions, achats et ventes d'eau potable des collectivités et leur comparaison avec les variations climatiques et la disponibilité de la ressource. Les comparaisons sont menées à l'échelle pluriannuelle et annuelle.

5.2.1 Relations entre climat et sollicitation de la ressource

L'analyse de la dynamique, climat, ressources et prélèvements a été effectuée à travers l'analyse d'écart aux normales mensuelles normalisées. La procédure utilisée est proche de celle présentée par Weider et Boutt 2010 et Boutt, 2016 présentées au chapitre 3 de ce rapport.

Les analyses sont réalisées à partir de données journalières si les données sont disponibles (niveaux piézométriques, données climatiques). Les données de prélèvements et niveaux des forages étant disponibles au pas de temps mensuel sur le territoire du SMA, le pas de temps mensuel a été utilisé pour les calculs pour ce territoire.

5.2.2 Dynamique annuelle de la ressource

L'analyse de la dynamique annuelle de la ressource est basée sur les moyennes et médianes mensuelles des volumes produits pour chaque ouvrage AEP. Les séries temporelles utilisées étant longues, cette moyenne permet en partie de filtrer les variations interannuelles liées à des événements climatiques extrêmes ou des demandes en eau atypiques (exemple : forte augmentation temporaire de la demande d'un industriel ou d'un agriculteur).

5.2.3 Données nécessaires

Les données nécessaires qui ont été utilisées pour cette tâche sont les suivantes :

- chroniques mensuelles sur plusieurs années de distribution/production/import/exports de chaque ressource individuelle (eau souterraine et eau de surface) ;
- positionnement des ouvrages dans le réseau d'interconnexions ;
- mode de fonctionnement des ouvrages ;
- types d'ouvrages (profondeur) ;
- données de niveau des nappes ;
- identification de la ressource de sécurisation (exemple : la rivière de l'Aulne pour la zone sécurisée par le Syndicat Mixte de l'Aulne (SMA)).

5.2.4 Site d'étude

Dans le cadre de ce rapport, l'analyse a été conduite à l'échelle d'un territoire de plus de 1 500 km² représentant près d'un quart du Finistère. Néanmoins, la présente méthodologie peut être appliquée à différentes échelles opérationnelles. En complément, l'analyse a été conduite à l'échelle d'un champ captant avec une analyse par forage individuel sur le site de Beignon dans le Morbihan. Les résultats pour cette seconde zone sont présentés en annexe 6.

Le territoire du Syndicat Mixte de l'Aulne (SMA) comprend 6 communautés de communes possédant pour la plupart des ressources propres. La ressource propre du SMA est une prise d'eau en rivière effectuée dans la rivière de l'Aulne. Les volumes distribués par le SMA comprennent donc les besoins des communes ne possédant pas de ressources propres (dont la demande est répartie toute l'année) et les demandes des communautés de communes dont les ressources propres sont temporairement insuffisantes (en général pendant l'été). Celles-ci se reportent sur la ressource du SMA, considérée comme la ressource de sécurisation. Le territoire compte 180 000 habitants. La cartographie de la zone d'étude est fournie en Illustration 97.

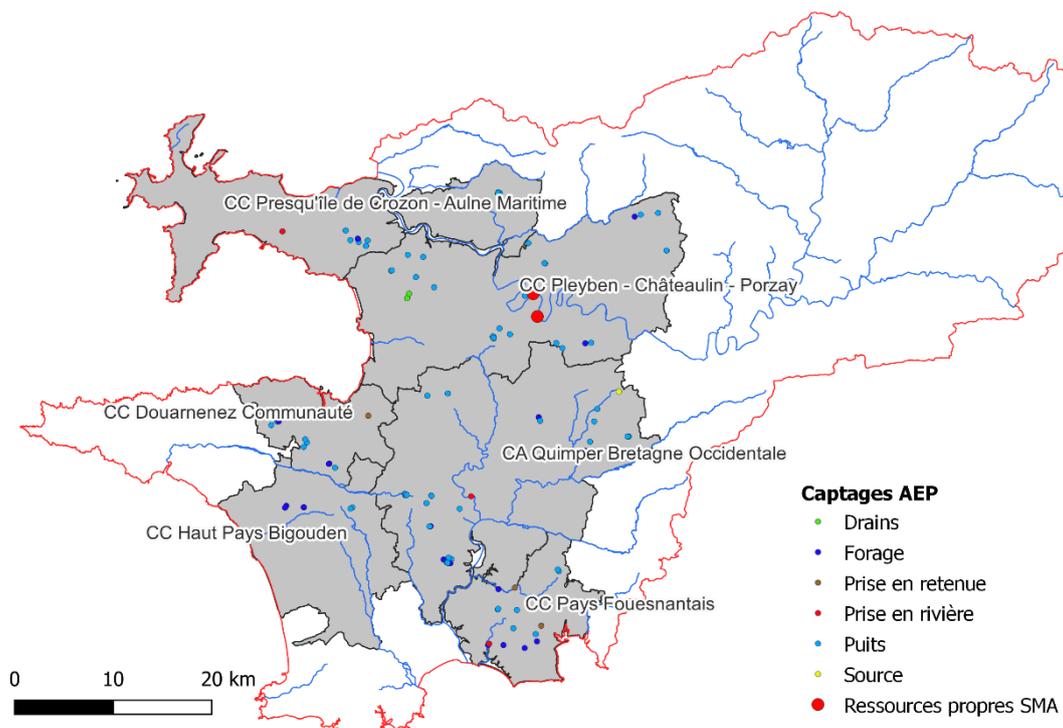


Illustration 97 : Cartographie de la zone d'étude des 6 communautés de communes et identification des ressources. Les ressources propres du SMA sont identifiées par des points de plus gros diamètre.

5.3 RÉSULTATS – DYNAMIQUE PLURIANNUELLE DES PRÉLÈVEMENTS ET RELATIONS AVEC LE CLIMAT

Pour quantifier l'évolution des volumes distribués par le SMA, les tendances ont été calculées sur la période 1973-2020. Le nombre de communes reliées au SMA ayant évolué, celui-ci est aussi pris en compte. L'illustration 98 suivante donne les volumes distribués mensuels, les tendances d'évolution et le nombre de communes reliées au SMA.

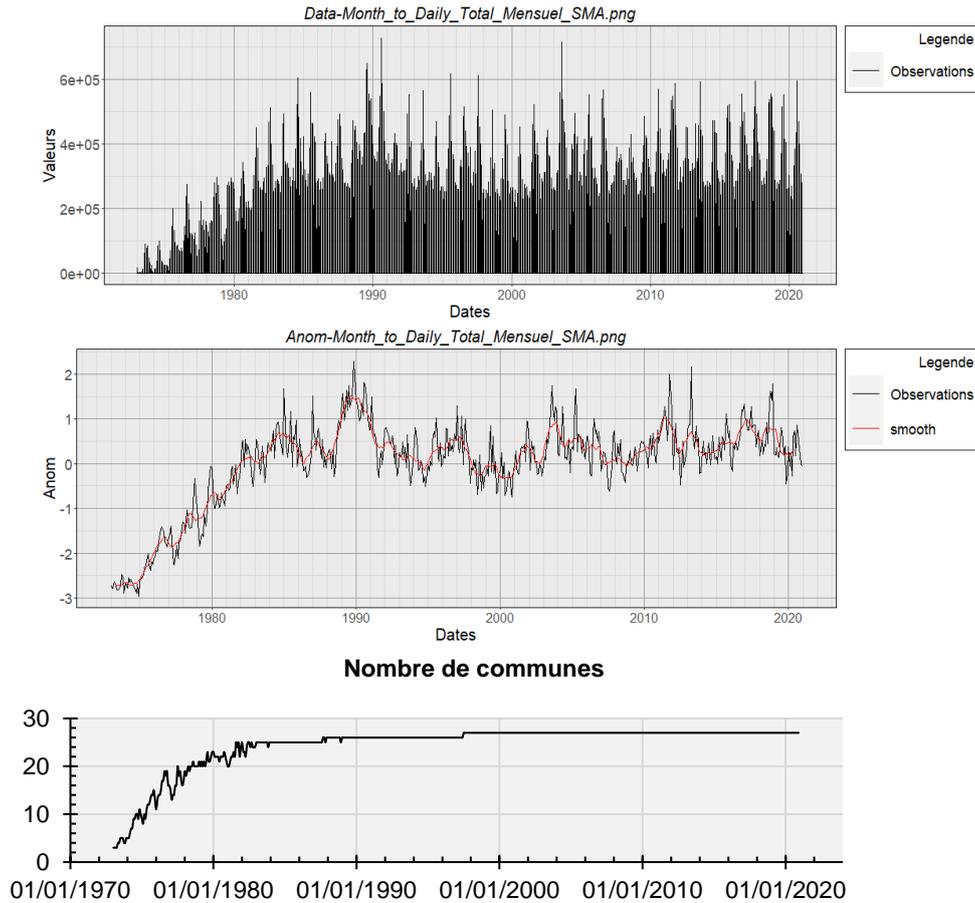


Illustration 98 : Évolution temporelle des volumes mis en distribution par le SMA sur la période 1973-2020. En Haut : Volumes mensuels distribués ; Centre : en noir anomalie mensuelle et en rouge anomalie mensuelle lissée. Bas : Evolution du nombre de communes connectées.

Au premier ordre, il est observé une augmentation de la distribution avec le nombre de communes, puis des oscillations (Illustration 98). Pour éviter le biais induit par l'augmentation du nombre de communes desservies, les données ont été interprétées sur la période 1983-2020 qui comprend entre 25 et 27 communes (Illustration 99).

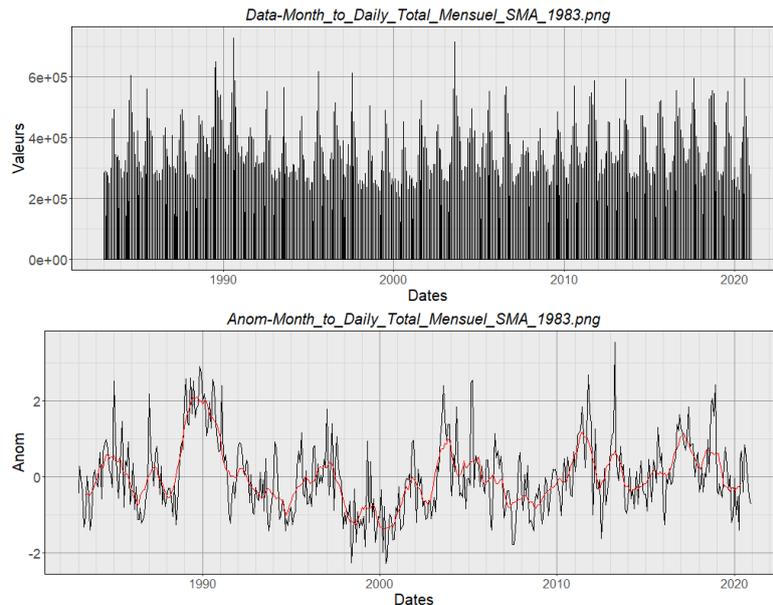


Illustration 99 : Évolution temporelle des volumes mis en distribution par le SMA sur la période 1983-2020. En Haut : Volumes mensuels distribués ; Centre : en noir anomalie mensuelle et en rouge anomalie mensuelle lissée (sur 12 mois).

Il est retrouvé sur l'illustration 99 précédente, les cycles liés aux variations de précipitations et évapotranspirations présentées dans le chapitre précédent (chapitre 4).

Les dates des minima et maxima, sur la base de l'anomalie mensuelle lissée de l'illustration 99b sont présentées sur l'illustration 100. Les dates des pics des maxima correspondent aux sécheresses passées (1989, 2003, 2011, 2017) et les *minima* aux périodes humides (2000-2001 notamment) (Illustration 100). De plus, une hausse générale de la production du SMA est observée depuis 2000. Ces variations, pouvant être mises en relation avec les variations climatiques, illustrent la dépendance des volumes prélevés au climat.

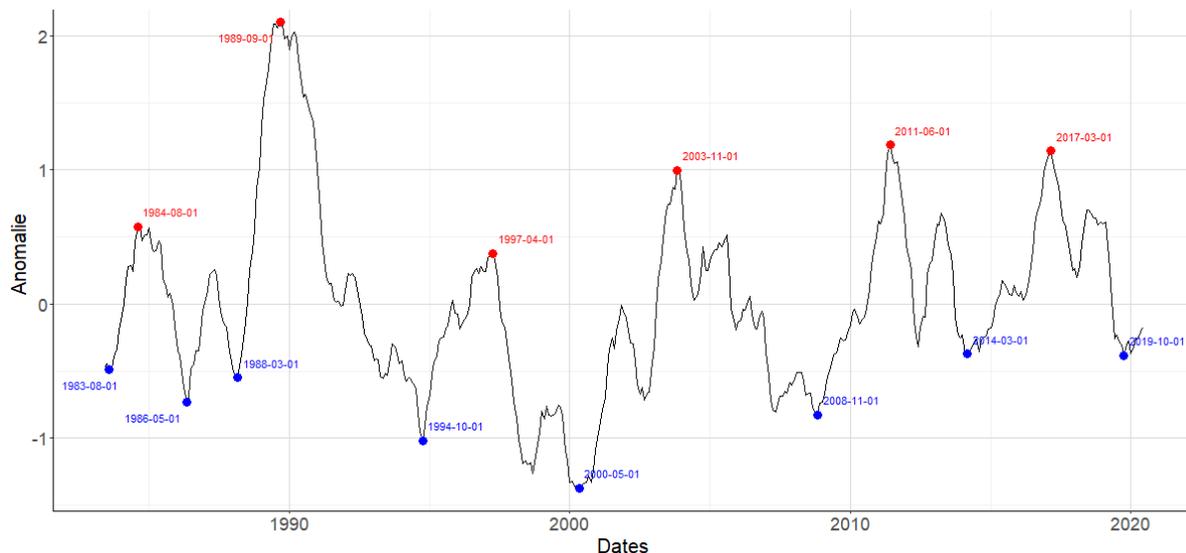


Illustration 100 : Dates des minima et maxima sur les volumes distribués par le SMA (Période 1983-2021)

Ces anomalies de production sont comparées aux anomalies de précipitations de la station de Brest-Guipavas (Station 29075001) (29) en l'illustration 101 (les prélèvements ont été inversés par rapport à l'illustration 100 pour être dans le même sens (vers le bas : prélèvements les plus importants).

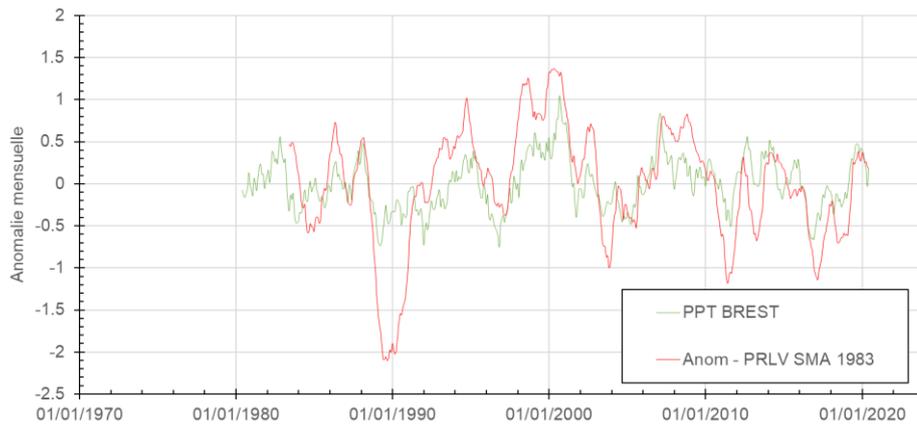


Illustration 101 : Anomalies de distribution d'eau par le SMA et précipitations à la station de Brest Guipavas (29) (Sur cette figure, les volumes distribués les plus importants sont les anomalies négatives).

Sur cette figure 101, on observe un lien fort entre les deux variables avec des cyclicités similaires mais aussi des divergences d'amplitudes, notamment sur les minima.

Afin d'apprécier le lien avec la disponibilité de la ressource, les données de distribution du SMA sont comparées aux anomalies du débit de l'Aulne (Station J3811810) sur les figures suivantes (sur la seconde, en bas les anomalies de prélèvement (en bleu) sont inversées pour être dans le même sens que les faibles débits et ainsi permettre une comparaison plus aisée des amplitudes).

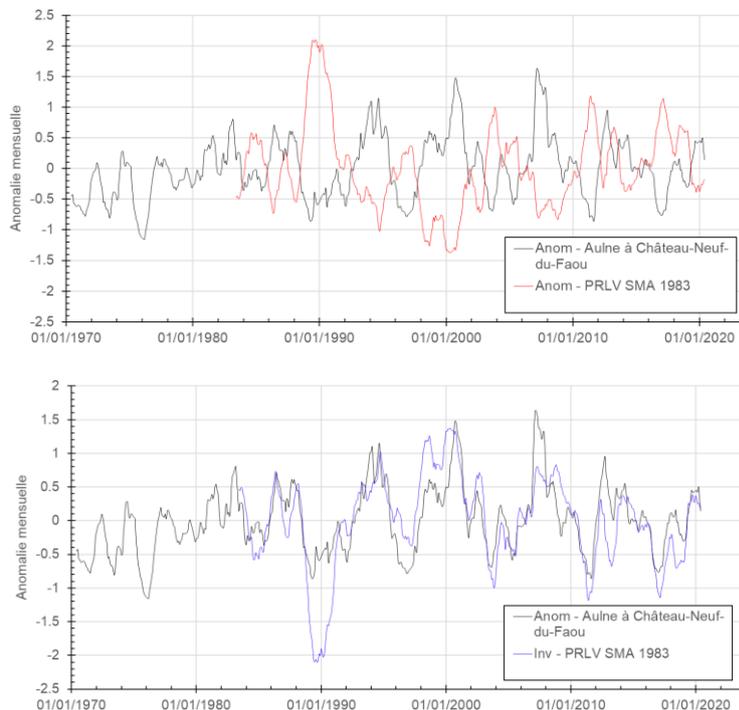


Illustration 102 : Anomalies calculées sur le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (J3811810) et distribution d'eau par le SMA. En haut : Les anomalies positives représentent pour le débit de l'Aulne les débits forts et les volumes distribués les plus importants et inversement. En bas : les anomalies positives représentent pour le débit de l'Aulne les débits forts et les volumes distribués les plus faibles et inversement.

On remarque bien sur ces courbes que l'amplitude et les phases sont similaires. Les volumes distribués sont plus importants quand les débits de l'Aulne sont les plus faibles. Les oscillations ne sont pas liées aux prélèvements dans l'Aulne par le SMA, la prise d'eau AEP étant située en aval de la station de mesure du débit de l'Aulne. Ces oscillations sont en lien avec les oscillations climatiques et sont observables sur l'ensemble des cours d'eau de la zone (Illustration 103). De plus, on peut noter (Illustration 102b) que depuis 2010, la courbe bleue des anomalies de prélèvements est sous la courbe noire ce qui pourrait signifier que la pression sur la ressource augmente. De plus, alors que les minima de débit de l'Aulne et les prélèvements du SMA sont corrélés sur toute la chronique, la sécheresse longue de 1989 a induit une demande en eau très nettement supérieure. Ceci peut provenir de besoins plus importants pour l'agriculture ou d'un manque de capacité des ressources (éventuellement de ressources individuelles) en raison de la longueur de la période de déficit (Cf. Chapitre précédent).

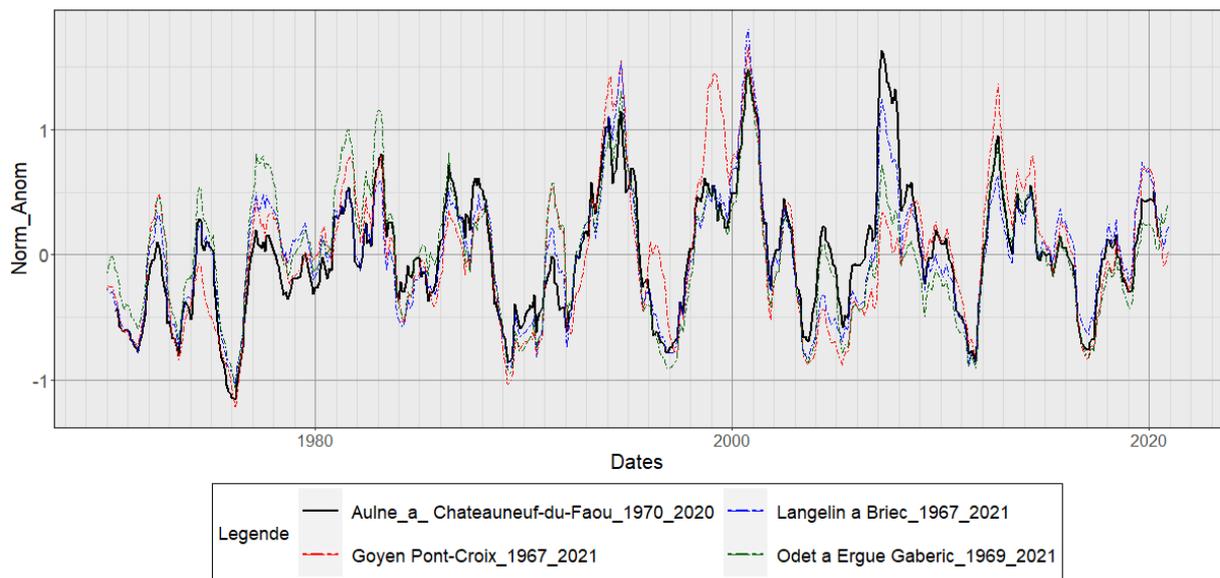


Illustration 103 : Comparaison des anomalies de débit journalier sur les principaux cours d'eau de la zone étudiée (Aulne, Odet, Langelin et Goyen)

La corrélation entre les prélèvements et les débits journaliers de l'Aulne a été évaluée par corrélogramme croisé (Illustration 104). Cette représentation donne l'intensité de corrélation en fonction du déphasage des deux séries temporelles. L'amplitude, qui est de -0,73 sans déphasage (lag =0), montre une forte anti-corrélation, mais pas de décalage temporel entre les 2 signaux (calculs effectués au pas de temps mensuel).

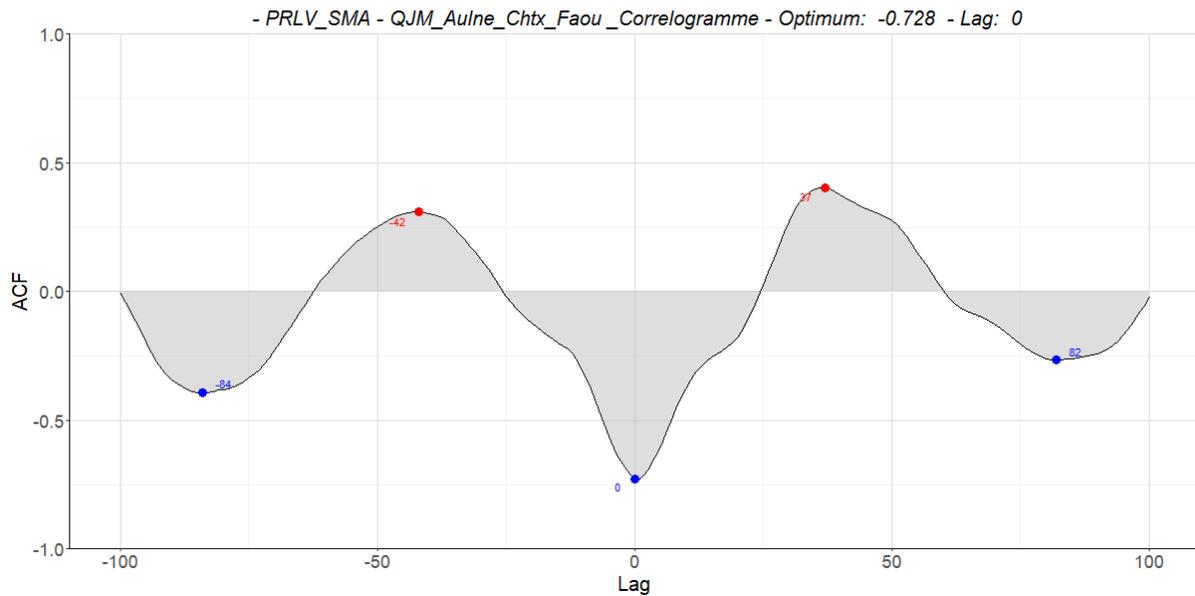


Illustration 104 : Corrélogramme entre prélèvements du SMA et débit de l'Aulne. Les abscisses représentent le décalage temporel et les ordonnées la valeur de corrélation. Les points rouges indiquent les plus fortes corrélations et les points bleus les plus fortes anti-corrélation

Pour quantifier les volumes que représentent ces oscillations des anomalies, les volumes distribués par le SMA sont traités par une décomposition saisonnière additive permettant la représentation du signal en composantes saisonnière, tendancielle et aléatoire. Les tendances et cycles obtenus sont les mêmes qu'avec la méthode précédente pour la composante tendancielle. Les calculs sont effectués sur la période 1983 – 2021. Les résultats de la décomposition sont fournis en Illustration 105.

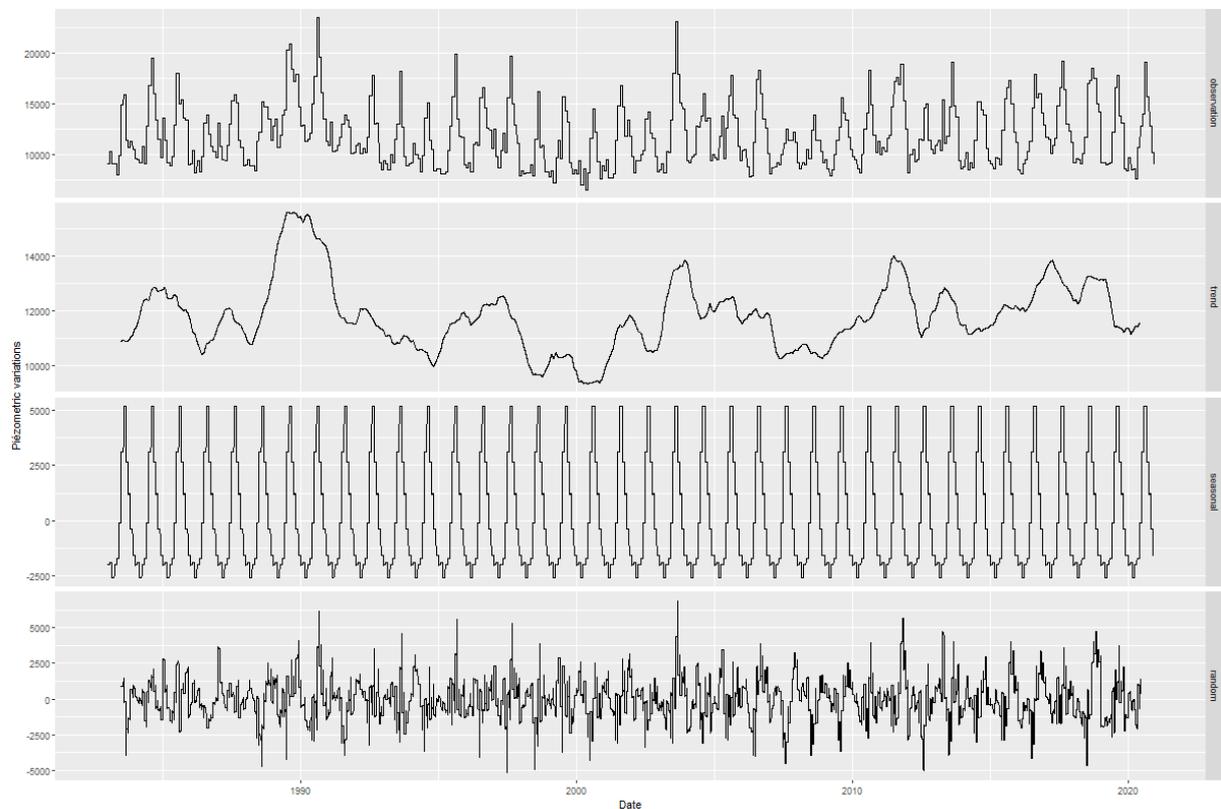


Illustration 105 : Résultats de la décomposition saisonnière additive pour les volumes distribués par le SMA. De haut en bas : Signal brut, composante tendancielle, composante saisonnière, part aléatoire.

Afin de quantifier plus précisément la partie du signal pouvant être corrélée aux variations climatiques, seule la composante tendancielle est extraite de cette décomposition. Les oscillations tendancielle (« trend » sur l'illustration 105) sont à nouveau décomposées en soustrayant le minimum du signal « trend » (~9 500 m³) qui est nommé base. Donc, cette base est une constante qui représente le volume minimum produit. Ceci permet de recomposer le signal initial duquel les oscillations de la composante tendancielle, pouvant être mise en relation avec les variations climatiques ont été extraites et d'évaluer l'importance de cette composante sur le signal total (Illustration 106). En faisant ensuite le ratio (tendance / observation), on obtient environ 20 % des volumes qui sont captés par cette tendance. Ceci montre un impact important de la variabilité climatique long terme sur les volumes distribués par le SMA. Bien que le lien entre variations climatiques et augmentation de la demande en eau soit connu, et bien que rarement quantifié, cette variation est ici particulièrement importante. Les explications de ce fort lien ont été recherchées en analysant les variations de production des ressources individuelles présentes sur le territoire et leur capacité à faire face aux sécheresses via l'analyse de leurs variations de productions annuelles et interannuelles. Pour les années de référence 2000 (année humide) et 2011 (année sèche – Cf. Illustration 100), les volumes distribués par le SMA sont respectivement de 3,4 Mm³/an et 5,1 Mm³/an, soit une augmentation de 50 %.

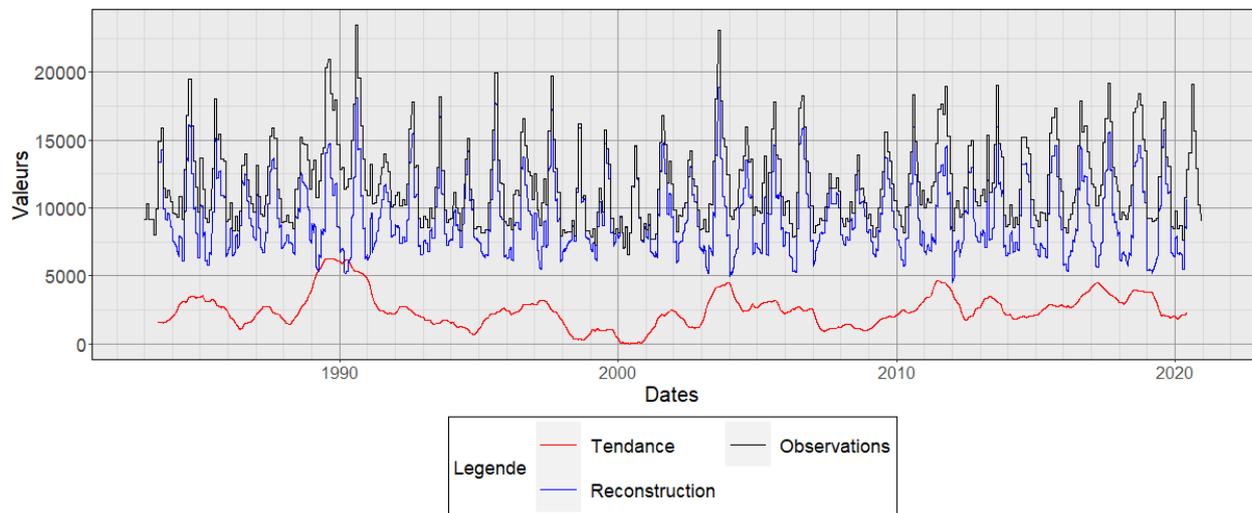


Illustration 106 : Importance de la composante tendancielle sur les volumes distribués par le SMA.

5.4 VULNÉRABILITÉ DE LA RESSOURCE EXPLOITÉE EN FONCTION DE LA DISPONIBILITÉ DE LA RESSOURCE NATURELLE

5.4.1 Objectifs

La démarche d'exploitation actuelle de la ressource en eau menée sur les différentes ressources individuelles consiste à exploiter au maximum la ressource disponible localement, et en cas de déficience, se reporter sur le SMA pour répondre à la demande. Ce constat a été réalisé lors des échanges avec les acteurs locaux lors des ateliers (en juin 2021 et janvier, mai et octobre 2022). Ce constat, et le fait qu'un lien fort existe entre variations climatiques et volumes distribués par le SMA, montre la nécessité de comprendre et quantifier les variations de ressources individuelles à l'échelle d'un territoire pour mettre en place une démarche de sécurisation et augmenter la résilience des ressources actuellement exploitées.

Cette phase de l'étude cherche à :

- évaluer et quantifier la dépendance de différents types de ressources exploitées aux variations climatiques ;

- généraliser le comportement des différents types de ressources pour permettre par la suite des analyses macroscopiques à l'échelle du territoire ;
- proposer des solutions de sécurisation et de gestion de la ressource.

5.4.2 Méthodologie

La méthode d'analyse repose sur la comparaison de la production des ressources individuelles (à l'échelle du champ captant AEP ou de l'ouvrage si les données sont disponibles) et du niveau des nappes.

Cependant, dans le cas des ressources individuelles, la collecte de données physiques telles que les niveaux des nappes (statiques et dynamiques) ont mené au constat suivant :

- les suivis sont limités sur une majorité des sites ;
- les données collectées sont très hétérogènes ;
- l'ancienneté des données est très variable ;
- certaines données sont non accessibles ;
- il y a un manque de suivi des débits par ouvrage ;
- il y a des doutes sur la fiabilité des données lorsque celles-ci existent (ex : niveaux de nappe).

Ce constat montre qu'il n'est pas possible de mener ce type d'étude sur de larges territoires en se basant sur des données physiques. La seule donnée ayant pu être collectée sur un grand nombre de sites, sur des périodes longues et de manière homogène correspond aux volumes distribués fournis dans les Rapports Annuels du Délégué (RAD). Il a donc été choisi dans le cadre de ce projet d'effectuer l'analyse sur ces volumes, bien documentés car liés à de la facturation.

La méthodologie utilisée met en relation les variations climatiques (annuelles et pluriannuelles) aux niveaux piézométriques et la variabilité des volumes distribués et produits aux ressources documentées. Ceci est réalisé à :

- une échelle annuelle pour évaluer les variations de production saisonnière,
- une échelle pluriannuelle pour évaluer l'impact des sécheresses.

La méthodologie a été développée en se basant sur les informations disponibles sur le territoire du SMA. Deux exemples sont ici présentés : celui de la Communauté de communes Douarnenez communauté (CCDzCO) et celui de la Communauté de communes du Haut Pays Bigouden (CCHPB). La même démarche a été appliquée sur la Communauté de commune du pays Fouesnantais (CCPF) et la Communauté de commune Presqu'île de Crozon – Aulne maritime, toutes deux dans le département du Finistère. Les résultats de ces deux communautés de communes sont intégrés dans la synthèse des résultats et présentés en annexes. Pour les autres communes sur le territoire du SMA, les informations disponibles n'étaient pas suffisantes pour mener à bien cette démarche.

a) *Choix du piézomètre de référence*

Les données de production sont comparées aux niveaux piézométriques des ouvrages suivis par le BRGM. A proximité des sites étudiés, 3 piézomètres peuvent être représentatifs (Pluguffan (BSS000ZDJV), Landudec (BSS000ZCUJ) et Landrévarzec (BSS000XCWZ)). Le piézomètre de Landudec est présent sur le territoire de la CCHPB mais présente des lacunes dans les données notamment pour les années sèches (ex : 2011) ce qui ne permet pas de comparaison sur ces années d'importance. Le piézomètre de Pluguffan est plus inertiel et peut

ne pas être représentatif des ressources exploitées. Le piézomètre de Landrévarzec a donc été sélectionné.

5.4.3 Variabilité des niveaux piézométriques

Les ressources en eau souterraine sur le territoire du SMA sont de faibles profondeurs avec une forte dynamique annuelle et une très faible dynamique pluriannuelle (pas de cycles pluriannuels) mais présente tout de même, en fonction de la pluviométrie, des variations de stock et de disponibilité de la ressource importante. Ces éléments induisent un possible assèchement de la ressource lors des périodes de fortes demandes qu'il convient de prendre en compte pour l'optimisation d'un modèle de gestion à l'échelle du territoire, tel que celui développé en collaboration avec le projet Water for Tomorrow (Bourgeois *et al.*, 2023). Sur les piézomètres présents sur la zone du SMA, tous ont des dynamiques très similaires, à l'exception du piézomètre de Pluguffan qui a une variation de ses niveaux de nappe plus inertielle. Un exemple de chronique est fourni en illustration suivante (Illustration 107).

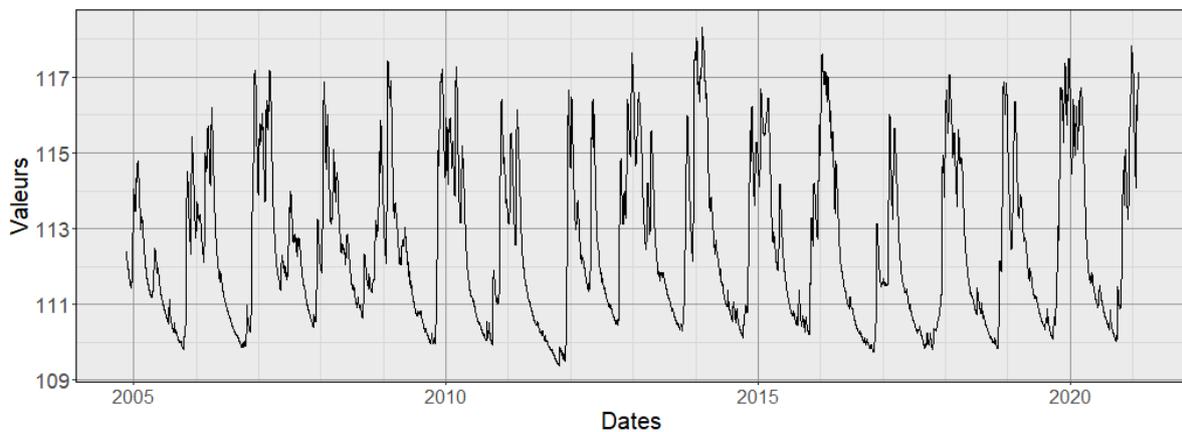


Illustration 107 : Variations de niveau piézométrique (en m NGF) au piézomètre de Landrévarzec (Source : ADES)

Le drainage naturel de la nappe induit une vidange de celle-ci au cours de l'année et une baisse des niveaux qui est représentée en moyenne mensuelle sur la figure suivante (Illustration 108). Une hausse des niveaux est observée d'octobre à février (période de recharge) et une baisse de mars à septembre (période de décharge/vidange).

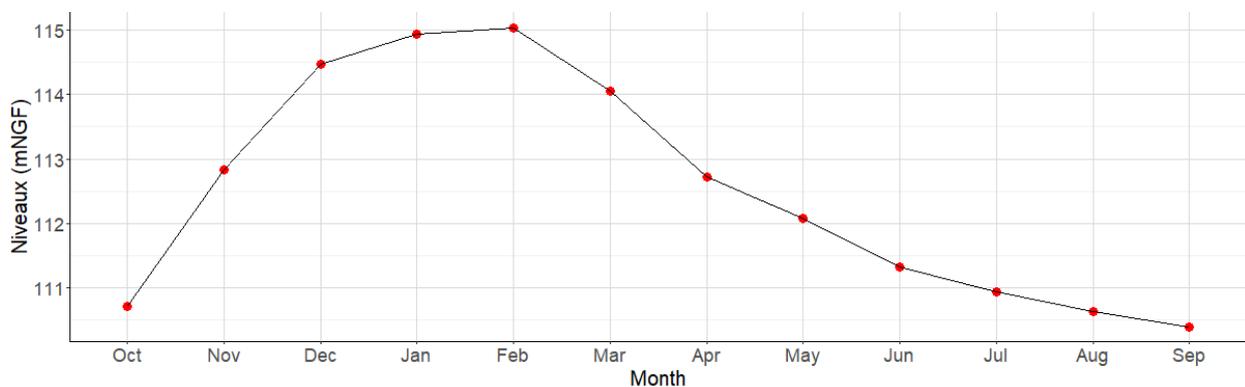


Illustration 108 : Variations mensuelles moyennes de niveau au piézomètre de Landrévarzec (BSS000XCWZ)

En fonction des précipitations, des variations de niveau de nappe sont observées sur le piézomètre de Landrévarzec entre au cours de l'année et entre les années. Ces variations sont limitées en termes de hauteur (Illustration 109) mais peuvent impliquer des volumes disponibles utilisables très différents.

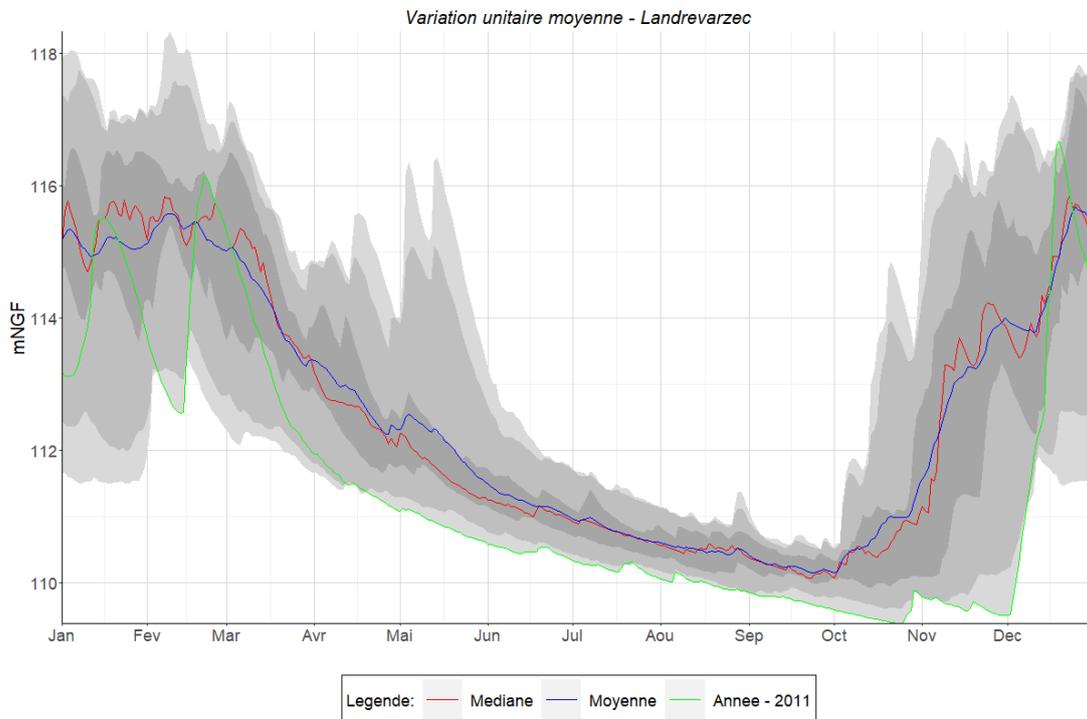


Illustration 109 : Hydrographe unitaire sur le piézomètre de Landrévarzec (2005-2020)

Les variations temporelles interannuelles relatives de stock d'eau souterraine peuvent être évaluées par les écarts mensuels à la normale (calculs sur des moyennes mensuelles lissées sur 12 mois ; Boutt (2018; Weider and Boutt, (2010)). Les variations interannuelles de stock sont principalement contrôlées par le climat. Une comparaison entre écarts à la normale pour la pluviométrie (à Quimper - 29216001) et les écarts piézométriques pour le piézomètre de Landrévarzec sont fournis en Illustration 110.

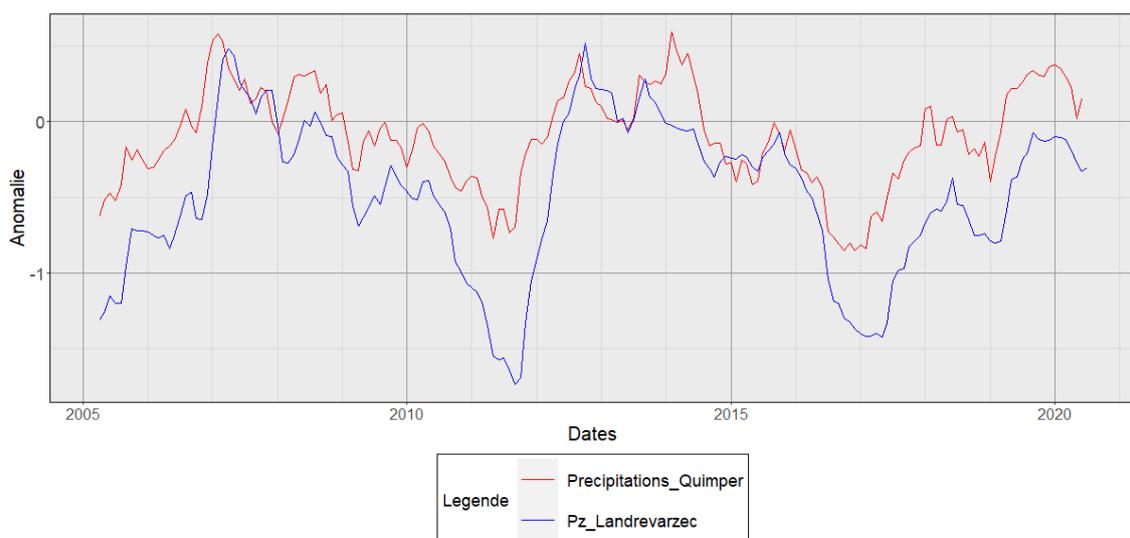


Illustration 110 : Anomalie mensuelle lissée calculée pour la piézométrie à Landrévarzec et les précipitations à Quimper

5.4.4 Variation des volumes distribués sur la ressource de sécurisation du SMA

Les informations concernant la disponibilité de la ressource à l'échelle des ouvrages AEP (débits journaliers prélevés, niveaux statiques et dynamiques) étant limitées, il n'est pas possible d'utiliser de données physiques en tous points à l'échelle du territoire du SMA. De plus, peu de données long terme liées à l'exploitation directe de la ressource (débit, niveau...) pouvant permettre une analyse de la variabilité pluriannuelle sont disponibles. Les capacités de production sont donc évaluées au travers des données de production/distribution et imports-exports issues des Rapports Annuels du Délégué (RAD) pour les différentes ressources (eau souterraine et eau de surface). Les analyses sont conduites à l'échelle annuelle et pluriannuelle.

Sur le secteur d'étude, la ressource principale est celle du SMA (prise d'eau superficielle sur l'Aulne) qui sert de sécurisation pour tout le secteur. Les volumes distribués à partir de cette ressource peuvent donc être représentatifs et intégrateurs de la zone. Les variations de demandes sont liées à la variabilité de population, d'activité économique, des variations climatiques mais aussi au report de demandes habituellement pourvues par des ressources secondaires (forages et puits) sur différents champs captants AEP.

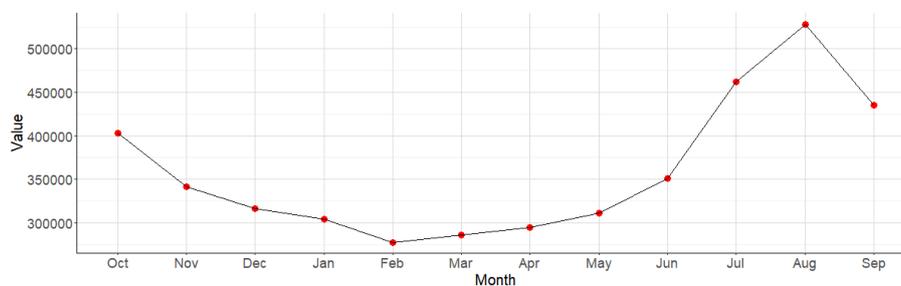


Illustration 111 : Moyenne mensuelle de production pour le SMA en m³ (Données 1983-2020)

La variation annuelle de production du SMA présente un minimum en février et un maximum en août. La différence moyenne de production entre février (27 700 m³) et août (52 800 m³) représente presque un doublement de la production (calcul sur la période 1983 – 2020).

En fonction des années, des variations climatiques et de pluviométrie, les demandes en eau et la distribution peuvent varier. Ceci est montré sur l'illustration 100 représentant les anomalies mensuelles de la production du SMA par rapport à la moyenne.

Ces variations montrent que les années 2003, 2011 et 2017 présentaient des anomalies associées à des prélèvements importants alors que les années 2000, 2008, 2014 et 2019 des minima. Les années 2015 et 2016 sont proches des normales.

5.4.5 Lien entre production et disponibilité des ressources – Fonctionnement par type de ressources - Cas de la CCDzCO

La Communauté de communes Douarnenez Communauté (CCDzCO) exploite 3 types de ressources différentes dont le suivi long terme permet d'évaluer leur variabilité de production face aux variations climatiques annuelles et pluriannuelles. Les ressources dans le secteur de CCDzCO Kervignac-Nankou sont composées de ressources superficielles (plan d'eau de Keratry), de puits (Kergaouelédan et Keryanes) et de 2 forages (Botcarn F1 & F2). Le champ captant de Keryanes semble servir principalement d'appoint.

En comparant la production mensuelle de chacune de ces ressources, il est possible de définir un comportement annuel moyen par typologie (Illustration 112). Les prélèvements ont été compilés sur la période 2011-2020. Cette longue période de données permet de s'affranchir

de possibles comportement exceptionnels (arrêt de production lié à des problèmes techniques ; hausse exceptionnelle des besoins d'un industriel, etc.). Les ressources de proche sub-surface (puits) sont exploitées en hiver et connaissent une forte baisse de production l'été. À l'inverse, la production sur la ressource superficielle de Keratry est importante l'été. Les deux ressources se compensent au cours de l'année. Les productions des forages (profondeur 50 m) restent constantes au cours de l'année et sont peu impactées lors des périodes de sécheresse. La somme des productions des sites de Keratry et Kergaoulédan montre une production relativement constante toute l'année et illustre la compensation de la perte de productivité de Kergaoulédan par la ressource de Keratry.

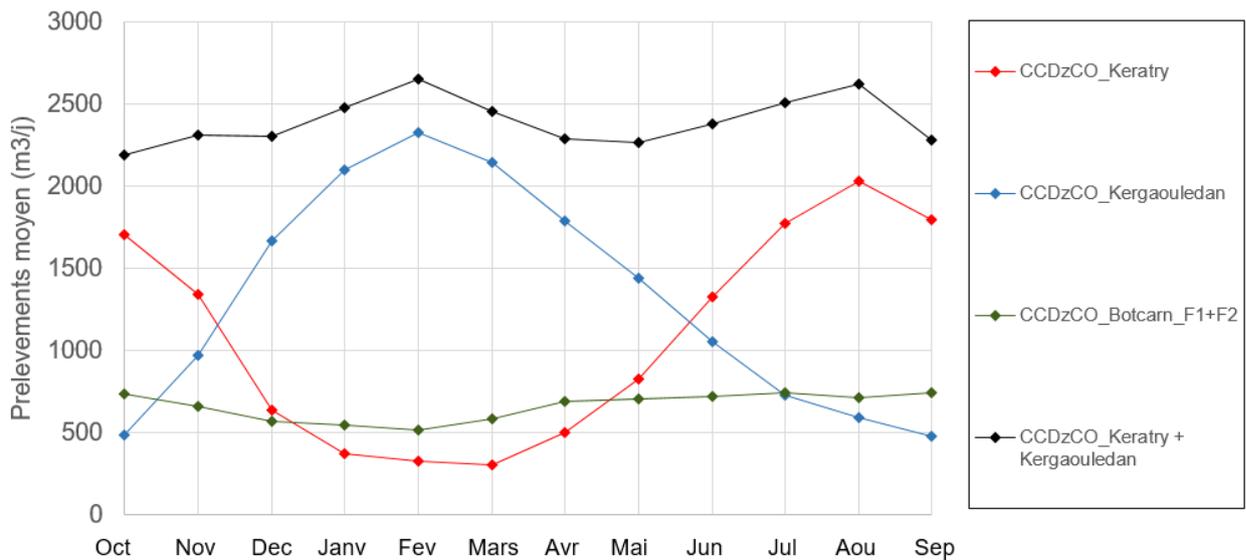


Illustration 112 : Prélèvements moyens par ressources sur la CCDzCo (Données 2011-2020)

En plus de la variabilité annuelle des capacités d'exploitations, celle pluriannuelle peut amplifier les baisses de production. Sur la période 2011-2020, l'année la plus sèche, en se basant sur les niveaux piézométriques de Landréarzac, a été 2011 et l'année la plus humide a été 2012 (Illustration 113). Afin d'évaluer l'impact de cette variabilité climatique, les productions de ces deux années ont été comparées au niveau des nappes pour chacune des ressources. Ceci est représenté sur les figures suivantes (illustration 113) pour chacune des ressources individuelles. Sur ces figures, les niveaux de gris représentent du plus foncé au plus clair les 25-75 percentiles, 5-95 percentiles, les minima et maxima. La courbe bleue représente la moyenne et la rouge la médiane. La courbe verte représente l'année sélectionnée. Les interprétations sont focalisées sur la période juillet-septembre.

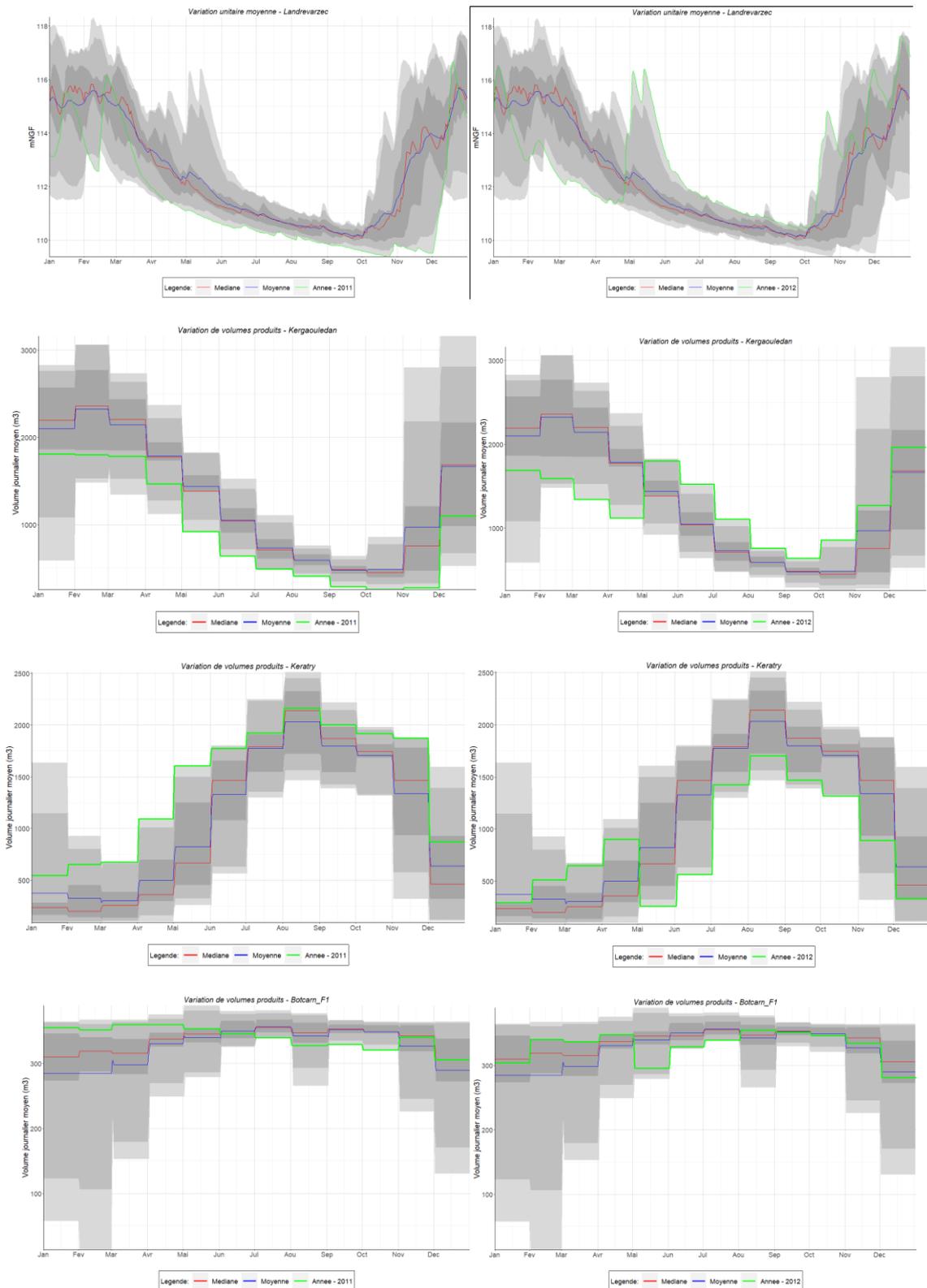


Illustration 113 : Comparaison entre les niveaux piézométriques annuels et les productions par site de différents types. L'année 2011 représente l'année la plus sèche de la série temporelle (2011-2020) et l'année 2012 l'année la plus humide. De haut en bas sont présentés : les niveaux au piézomètre de Landrévarzec, la production de Kergaouledan (puits), de Keratry (superficielle) et de Botcarin F1 (forage). Les lignes rouges et bleues représentent respectivement les médianes et moyennes mensuelles et les lignes vertes la production de l'année mentionnée

Cette comparaison (Illustration 113) montre que les variations de production sont en fort lien avec la ressource disponible dans les puits. L'été 2011 durant lequel les niveaux de nappe étaient les plus bas correspond à la plus faible production des puits de Kergaoulédan et *a contrario* l'été 2012, année la plus humide, correspond à la plus forte production. Ce comportement est à l'opposé pour la ressource superficielle de Keratry du fait d'une compensation de la perte de productivité des puits. Les variations climatiques interannuelles semblent en revanche avoir peu d'impact sur les forages plus profonds de (Botcarn F1 et F2).

Le lien sur plusieurs années entre les précipitations et l'exploitation des différentes ressources est fourni en Illustration 114. Cette illustration montre que les périodes de faibles précipitations (en noir) induisent des baisses de production sur les puits (site de Kergaoulédan en bleu) qui est compensé par les prélèvements sur la ressource superficielle (Keratry en rouge). Les forages (Botcarn en vert) ont un comportement indépendant des autres ressources qui est moins impacté par les variations climatiques.

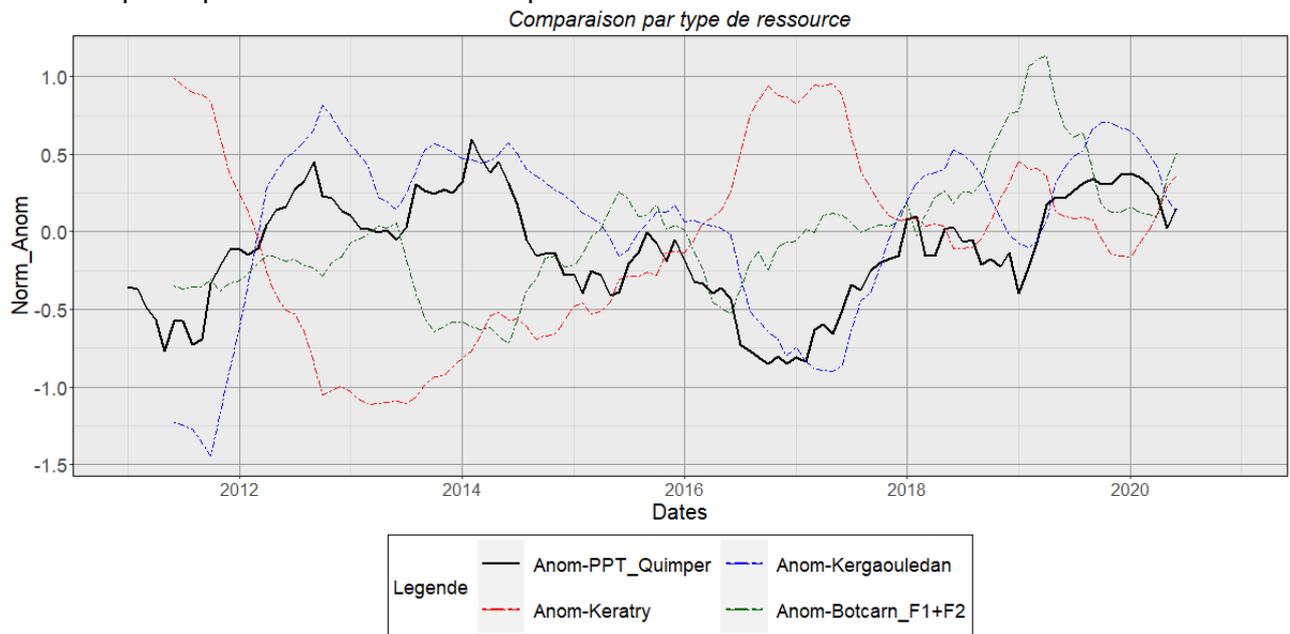


Illustration 114 : Écart par rapport aux normales lissées sur 12 mois des précipitations (en noir), d'une ressource de type puits (bleu), d'une ressource superficielle (rouge) et de la ressource souterraine profonde de type forage (vert).

Pour plus de clarté, le phénomène de compensation de la perte de productivité de la ressource de proche sub-surface (Kergaouledan) par une augmentation de la sollicitation de la ressource superficielle (Keratry) est indiqué en Illustration 115.

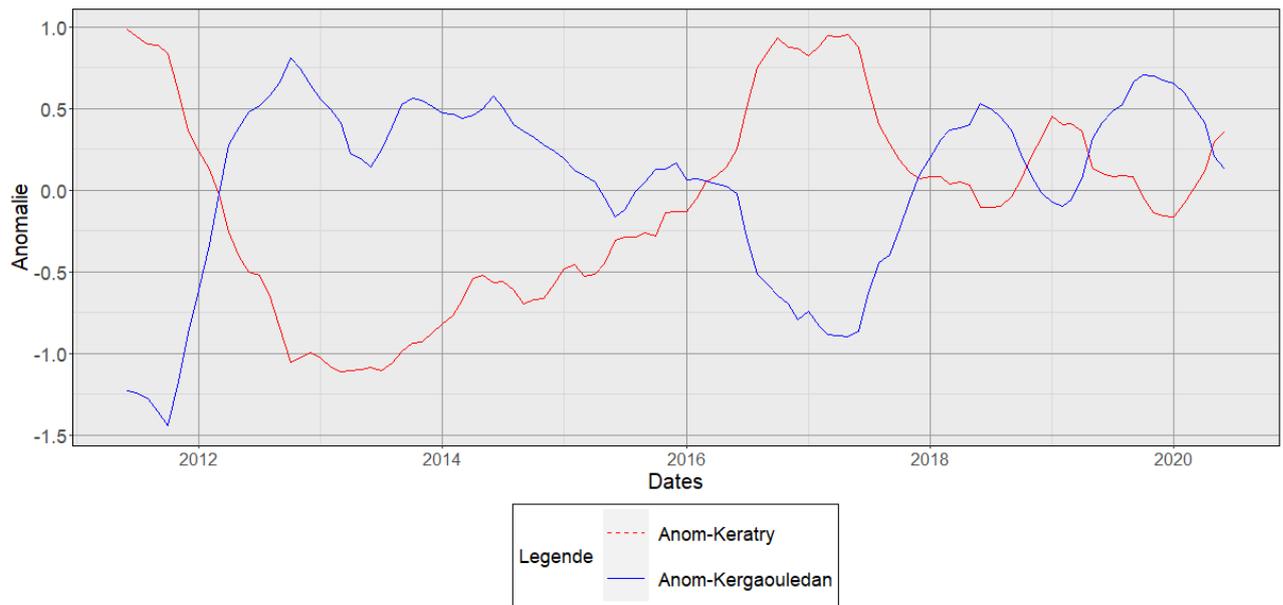
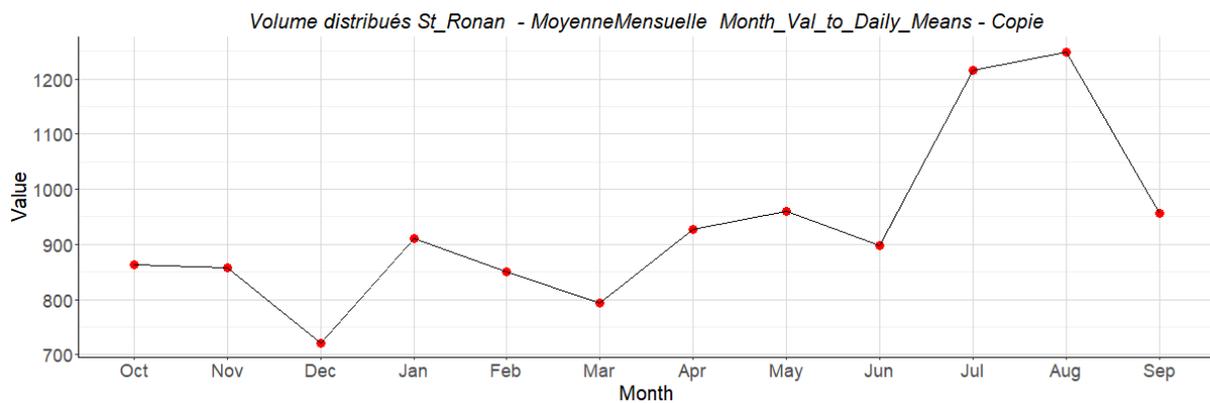


Illustration 115 : Écart par rapport aux normales lissées sur 12 mois d'une ressource de type puits (bleu) et d'une ressource superficielle (rouge).

5.4.6 Lien entre production des ressources et disponibilité – Cas des ressources mixtes - CCHPB

a) Évolution annuelle

La Communauté de Communes du Haut Pays Bigouden (CCHPB) possède 3 sites de production d'eau potable indépendants les uns des autres (Saint-Ronan, Kergamet et Saint Avé). Ils sont chacun composés d'un ouvrage souterrain peu profond et d'un forage. Les variations moyennes annuelles de distribution, production et importation d'eau sur le site de St Ronan sont fournies sur l'illustration 116. La répartition montre une augmentation de la demande sur les mois de juillet et août, ainsi qu'une augmentation des importations en août, ce qui illustre l'impossibilité de la production à répondre à la demande.



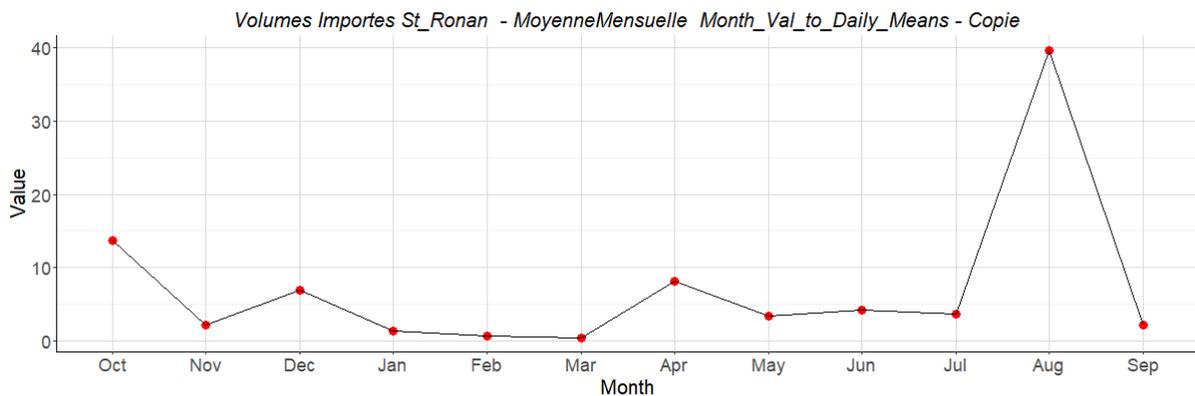
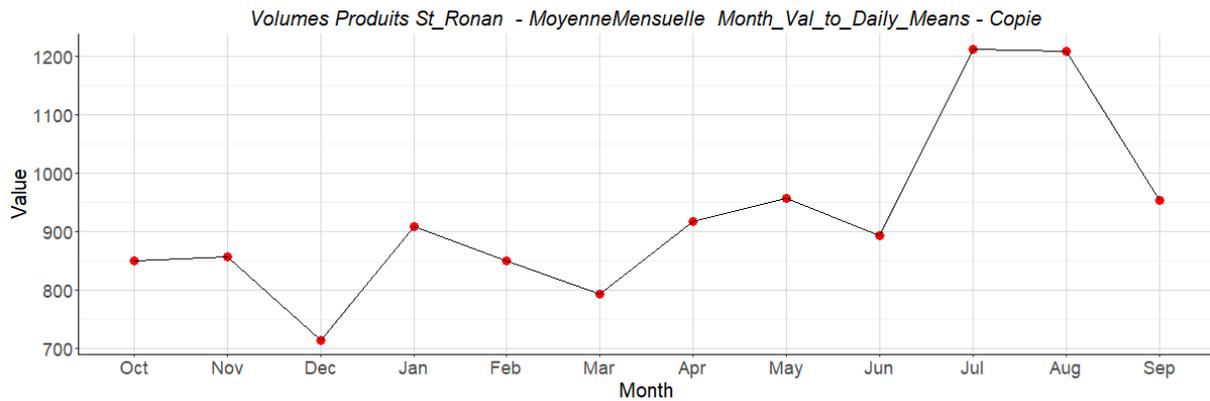


Illustration 116 : Variations annuelles des volumes distribués (en haut), produits (au milieu) et importés (en bas) sur le site de Saint Ronan. Échelle verticale en m³/jour.

Les variations de production sur le site de Kergamet sont fournies en Illustration 117 et elles présentent globalement la même distribution.

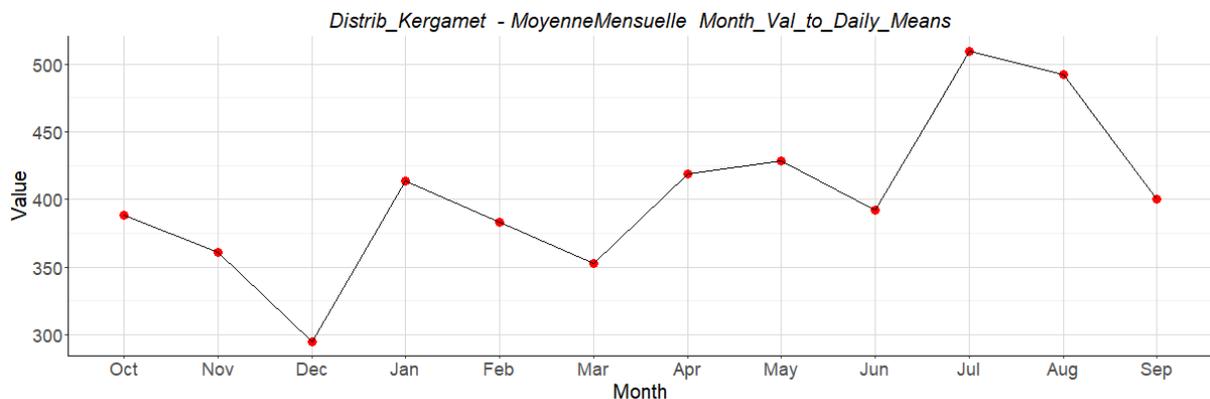


Illustration 117 : Variations annuelles des volumes distribués sur le site de Kergamet.

b) Évolution pluriannuelle

La variabilité de la production du site de Saint Ronan par rapport à la disponibilité de la ressource en eau souterraine est fournie en Illustration 118. L'année 2011 représente une année de sécheresse importante pour la région avec une hausse importante des volumes distribués par le SMA (Illustration 100). Sur le site de St Ronan durant cette période, les volumes distribués sont au minimum en août. Cette production historiquement faible pour une période de demande historiquement élevée montre une rupture de la capacité de production de la ressource. Les niveaux de nappe sur cette période sont au minimum enregistrés sur la période 2005-2020 ce qui, en raison du modèle conceptuel précédemment défini, met en avant un assèchement de la ressource eau souterraine de la CCHPB. Inversement l'année 2016 est

l'année où la distribution à partir des ouvrages de St Ronan a été la plus élevée, correspondant à une forte demande (Illustration 100), mais avec des niveaux de nappe dans la moyenne permettant de répondre à la demande. 2014 correspond à une année hydrogéologique moyenne. Durant l'été 2014, les niveaux de distribution sont dans la moyenne en juillet et en août. Les niveaux de nappe étant élevés pendant l'été 2014, ce faible volume distribué correspond à une baisse de la demande en raison de pluies début août (épisode de recharge visible sur la courbe de Landrévarzec en août) et une anomalie négative de la demande de secours au SMA (Illustration 100).

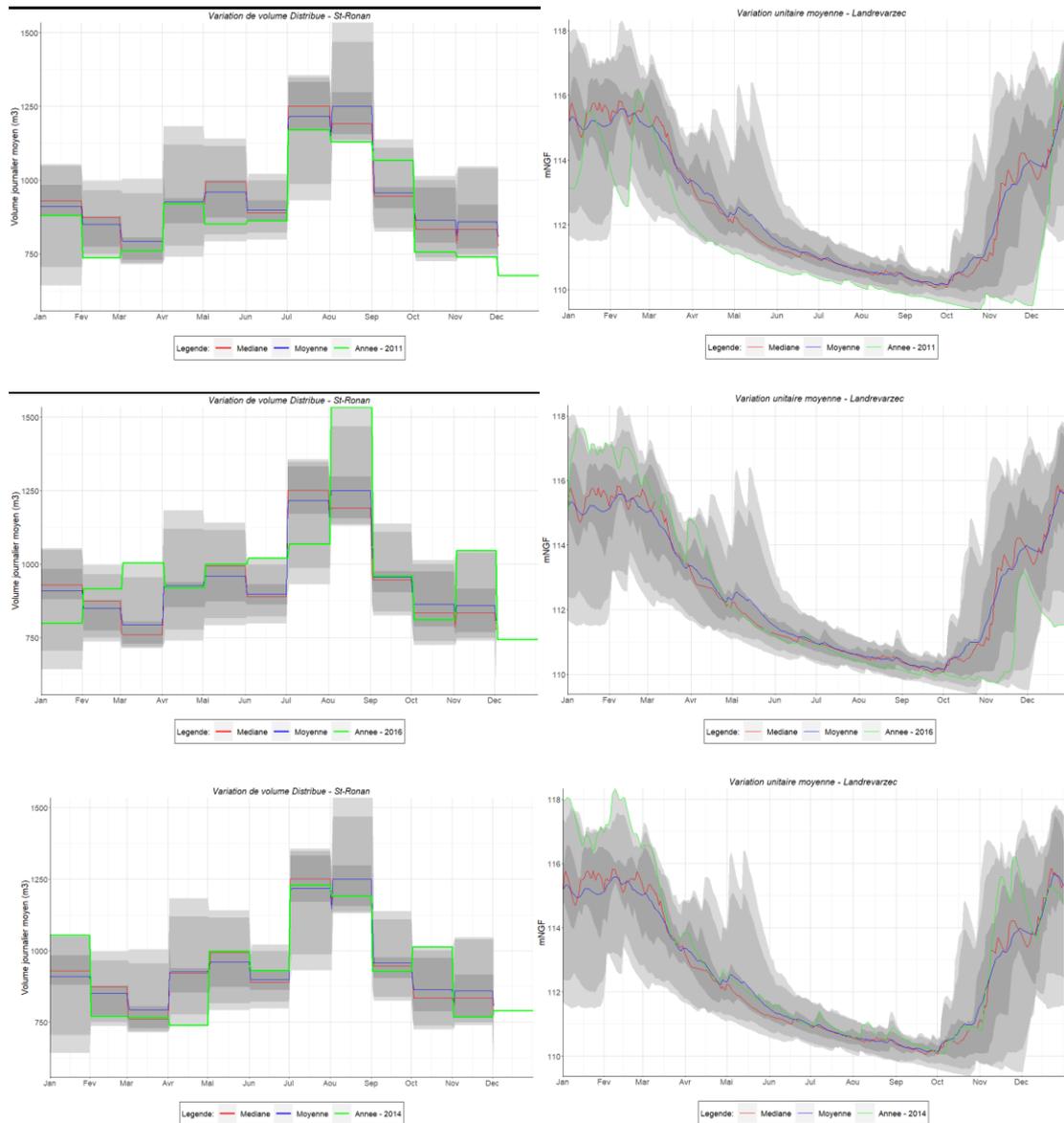


Illustration 118 : Comparaison entre la production du site de Saint Ronan et les niveaux piézométriques annuels à Landrévarzec. De haut en bas : année 2011, 2016, 2014

c) Fonctionnement à l'échelle des ouvrages

Le fonctionnement à l'échelle des ouvrages ne peut être évalué que sur la période 2018-2020 où les données sont disponibles. Ce type de données n'est pas accessible pour l'ensemble des sites. La répartition entre les ouvrages des 3 sites est fournie sur les figures suivantes pour l'année 2020 (Illustration 119). Le détail par ouvrage n'est pas disponible pour le site de Saint Ronan.

Pour les deux sites documentés (Kergamet et Saint Avé), il est observé que le captage plus superficiel (en rouge) est sollicité l'hiver et que lorsque la production diminue, le forage vient en complément pour maintenir une production totale globalement constante sur l'année, voire une augmentation pendant l'été pour les sites de Kergamet et Saint Ronan.

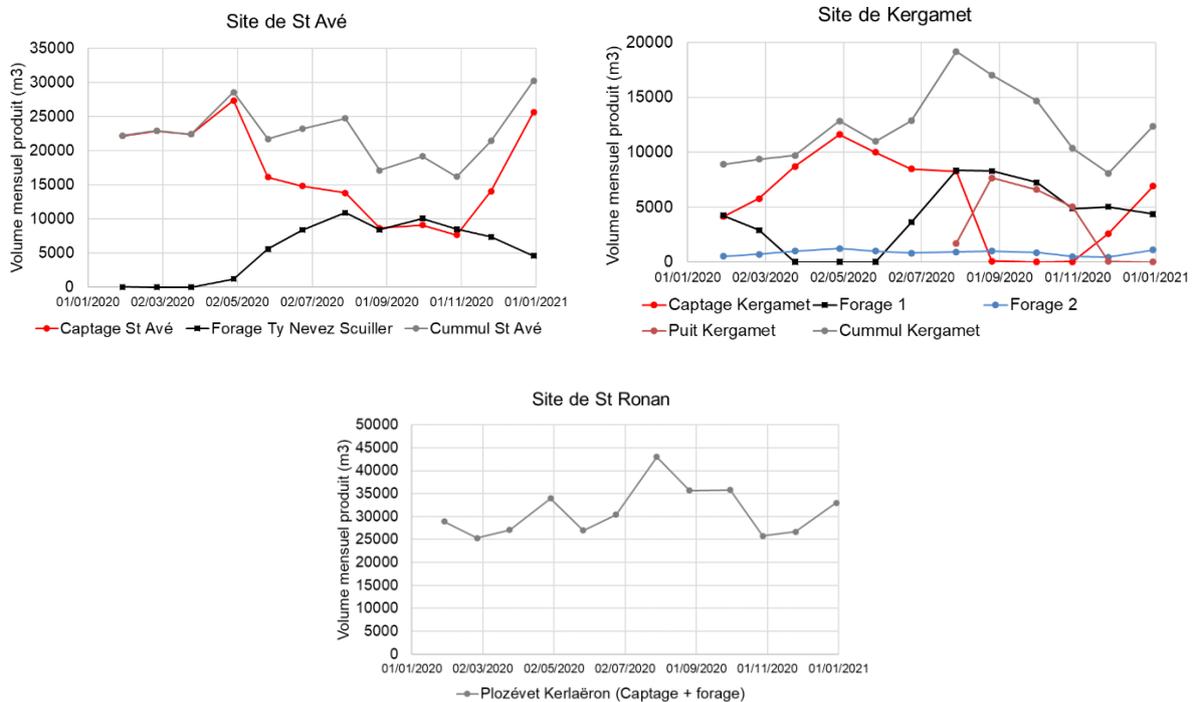


Illustration 119 : Variation de volumes produits mensuels à l'échelle de chaque ouvrage des 3 sites AEP de la CCHPB. Exemples des champs captants de Saint Avé et Kergamet (uniquement cumul des ouvrages pour Saint Ronan).

5.4.7 Vulnérabilité des ressources par typologies

a) Dynamiques annuelles

Sur la zone d'étude du SMA, la disponibilité de la ressource est un élément important de gestion. Les manques de disponibilité se reportent sur les achats au SMA qui sécurise la zone. Les liens forts observés entre les variations climatiques, disponibilité de la ressource et achats au SMA attestent de cette dépendance.

La quantification de la relation directe entre capacité de production et niveau de la ressource est complexe à mettre en œuvre et à analyser. La démarche décrite ci-dessous a pour but de permettre une généralisation des fonctionnements en fonction de la typologie de la ressource exploitée.

Afin de déterminer un comportement généralisable par type de ressource (eau souterraine et eau superficielle), les données des différents sites disponibles ont été compilées afin de quantifier leur variabilité annuelle et interannuelle de production.

Quatre typologies de ressources ont été définies :

- ressources superficielles (prises d'eau en rivière, barrages) ;
- champ captant composé de puits (eau souterraine de proche sub-surface) ;
- champ captant composé de forages (ressources en eau souterraine profondes) ;

- champ captant composé de puits de sub-surface avec soutien estival par forage profond (ressources mixtes).

Sur le secteur du SMA, les données utilisées sont les suivantes :

CC	Site	Commune	Nom ouvrage	Type de ressource	Debit autorisé	Profondeur	Données utilisées
CCHPB	Site de Saint Ronan	Plozévet	Saint Ronan	Puits	75 m ³ /h - 1300 m ³ /j	-	2010 -2018
			Kerlosquet	Forage	18 m ³ /h - 90 m ³ /j	125 m	
	Site de Kergamet	Landudec	Captage Kermaget	Puits	35 m ³ /h	< 5m	2010-2018
			F1 Kermaget	Forage	18 m ³ /h - 90 m ³ /j	30 m	
			F2 Kermaget	Forage	5 m ³ /h	53 m	
	Site de Saint Avé	Plogastel- Saint Germain	Saint Ave	Puits			2017 -2020
Ty Nevez			Forage	12-14 m ³ /h	130 m	2017 -2020	
CC_Crozon	Argol	Kernagoff		6 puits + 1 Forage	2400 m ³ /j		2010 - 2020
	Poraon			Superficielle	2000 m ³ /j		2010 - 2020
	Le Pouldu	Le Pouldu			400 m ³ /j	5 m	Pas de données
	Goastallan	Goastallan			400 m ³ /j	7 m	Pas de données
	Pen a Vern	Rozvalen			400 m ³ /j	5.2 m	Pas de données
PF	Cheffontaine			Puits	480 m ³ /j	-	2019-2020
	Keraven			Superficielle	2000 m ³ /j	-	2019-2020
	Lanveron		Trouarn	Puits	2000 m ³ /j	7 m	2019-2020
	Round Gwen			Puits (2)	800 m ³ /j	-	2019-2020
	Kerourgue		Kerasploch	Forage	4000 m ³ /j	85 m	2019-2020
	Creach Queta			Superficielle	1800 m ³ /j	-	2019-2020
	Pen Al Len			Superficielle	4000 m ³ /j (Creach +Pen Al Len)	-	2019-2020
	Botcarn F1			Forage	400 m ³ /j	50 m	2011 - 2020
CCDzCO	Botcarn F2			Forage	400 m ³ /j	?	2012 - 2020
	Keratry			Superficielle	2500 m ³ /j	-	2013 - 2020
	Kergaoulen			Puits	3000 m ³ /j	4-5 m	2014 - 2020
	Keryanes			Superficielle	500 m ³ /j	-	2015 - 2020

Illustration 120 : Données utilisées

Afin de prendre en compte la variabilité de production pouvant avoir lieu entre les sites, notamment en fonction de leur nombre variable d'ouvrages AEP, la dynamique des ressources par typologie a été normalisée par les volumes autorisés par la DUP (Déclaration d'utilité publique). Elle est présentée sur les figures suivantes pour les ressources superficielles (Illustration 121), les ressources de proche sub-surface (Illustration 122), les forages (Illustration 123) et les ressources mixtes (Illustration 124).

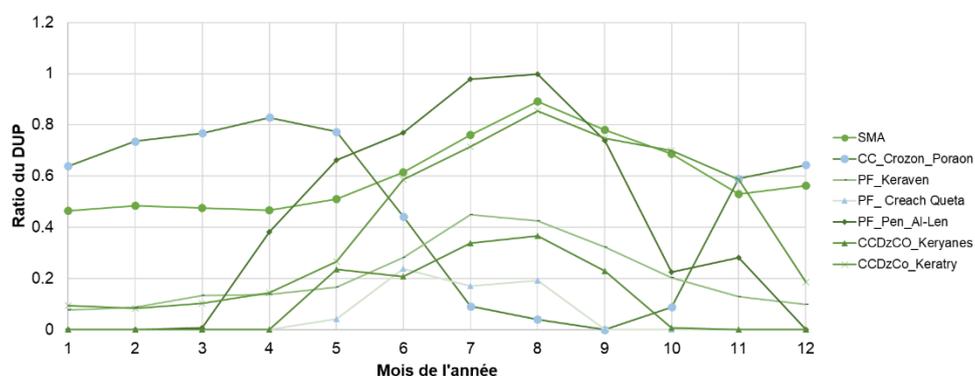


Illustration 121 : Évolution annuelle de la production des ressources superficielles

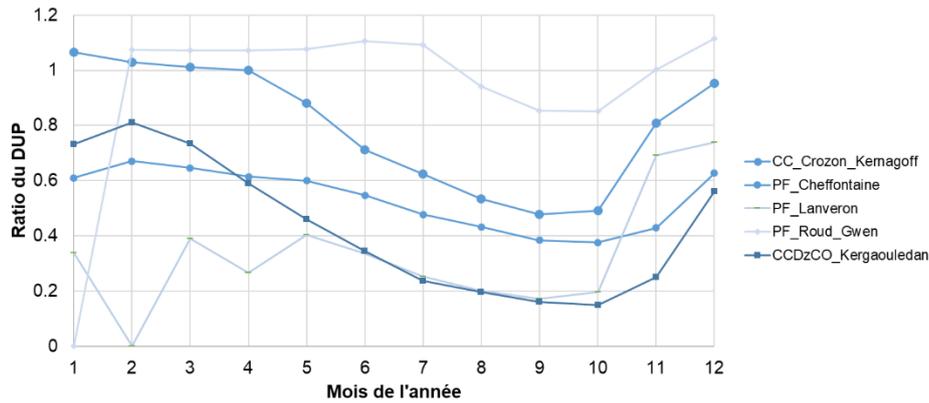


Illustration 122 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine de sub-surface (puits)

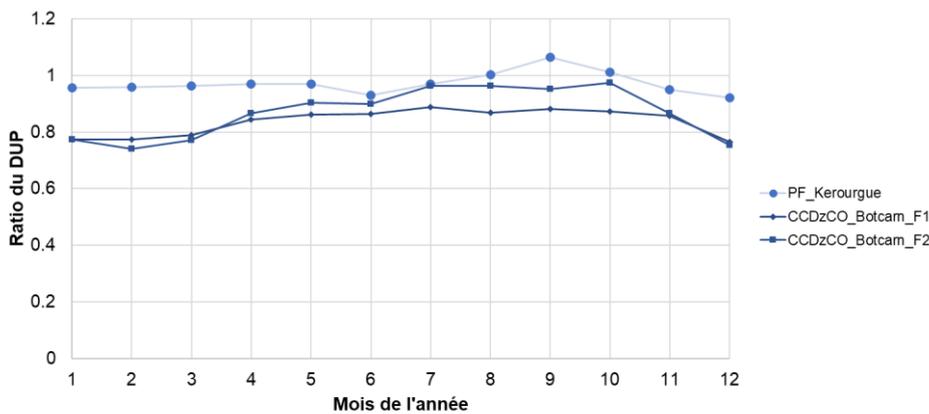


Illustration 123 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine profondes (forages)

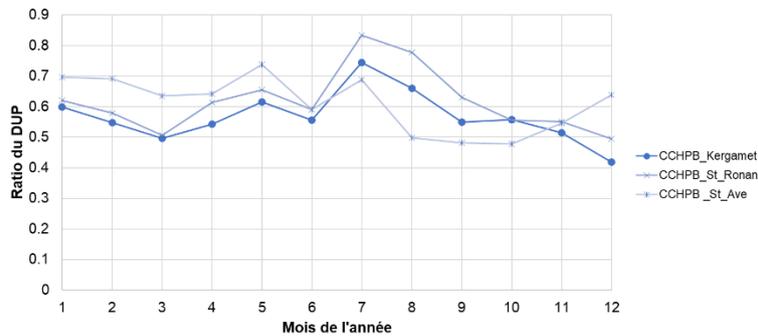


Illustration 124 : Évolution annuelle de la production des ressources en eau souterraine mixtes (surface + forage)

Ces représentations montrent :

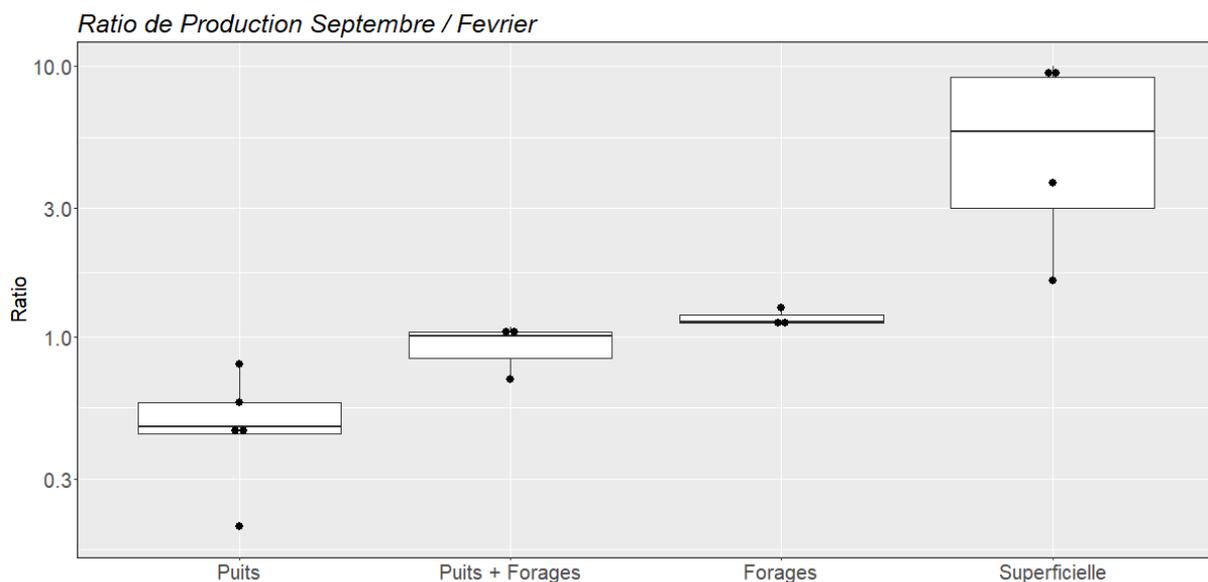
- que l'utilisation des ressources superficielles tend à augmenter l'été à l'exception de Poraon (Illustration 121) ;
- que les ressources de sub-surface (puits) tendent à baisser l'été (baisse de l'ordre de 50 % – Illustration 122) ;
- que les ressources profondes ne connaissent pas de diminution annuelle et présentent même une légère augmentation de production en été (Illustration 123) ;

- que les ressources mixtes (sites avec un puits de sub-surface et un forage profond) maintiennent une production relativement constante. En pratique, pour ces ressources, lorsque le puits de sub-surface est à sec, le forage prend le relais (cf. Illustration 124).

Contrairement à l'ensemble des ressources en eau souterraine de sub-surface (puits) qui semblent principalement régulées par la disponibilité de la ressource, les ressources superficielles obéissent aussi à des règles de gestion. Ainsi dans le cas de Poraon, la diminution des prélèvements en été est liée au maintien du soutien d'étiage et au débit réservé de la rivière. Cependant, dans le cas de sécheresse ou de défaillance des autres ressources, la production à partir de ces ressources superficielles peut augmenter via des dérogations sur le maintien des débits minimums.

b) Perte de productivité estivale par type de ressources.

La perte de productivité estivale a été estimée par comparaison des ratios de productivité entre février (période de recharge) et septembre (fin de la période d'étiage). Les ratios sont présentés sur l'illustration 125. Sur les données utilisées, les puits ont une baisse de productivité moyenne de 50 % alors que les sites avec puits et forages maintiennent une productivité constante (ratio proche de 1) et les forages ont une légère augmentation (ratio 1,2). Aucun des puits ne présente d'augmentation de la productivité. Les augmentations de production des ressources superficielles vont de 0 à $+\infty$ étant donné que certains sites n'ont aucune production en février. Sur la figure ci-dessous, cette borne maximum a été tronquée à 10 pour des raisons de lisibilité de la représentation graphique.



Utilisation	NbMesures	Moyenne	Mediane	Max	Min
Puits	5	0.49	0.46	0.80	0.20
Puits + Forages	3	0.93	1.01	1.09	0.70
Forages	3	1.18	1.14	1.29	1.11
Superficielle	5	4.84	3.70	$+\infty$	0.00

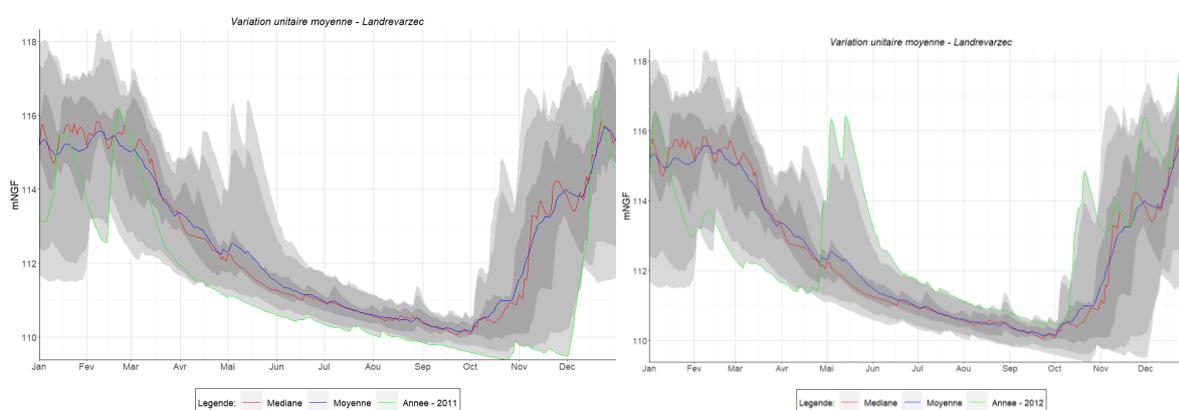
Illustration 125 : Ratios de production en septembre par rapport à la production de février et valeurs calculées. Les valeurs sont présentées sur une échelle logarithmique.

b) Variabilité interannuelle

La variabilité interannuelle des ressources a été réalisée en comparant les productions des sites disposant de données entre août 2011 (année la plus sèche sur la période 2010-2020)

et août 2012 (année avec des niveaux piézométriques hauts - Illustration 126 - haut). Peu de sites possèdent des données sur cette période (2 sites par catégorie). Sur l'échantillon disponible, on observe une forte baisse de production en année sèche pour les puits de subsurface (0,54 à 0,63 de la production par rapport à 2012), une baisse plus faible pour les ressources mixtes (puits + forages) de 0,8, un maintien de la production pour les forages (0,96 et 0,92) et une augmentation de la production pour les ressources de surface. Cette augmentation est liée au besoin de compenser une demande plus importante et les défaillances des autres ressources en eau souterraine. Les données sont fournies dans le tableau suivant (Illustration 126).

Sur ces sites et ces deux années, la production globale du mois d'août est relativement constante (200 942 m³ en 2011 et 208 836 m³ en 2012) mais la répartition est différente avec notamment près de 20 000 m³ produits en 2011 à partir du site de Poraon, généralement arrêté l'été pour maintenir un débit réservé de la rivière. Pour un site composé de puits, tel que Kergaouledan, la production d'octobre et septembre 2011 ne représente que 10 % du volume autorisé par la DUP.



Type	Site	Prod Aout 2011	Prod Aout 2012	Ratio
Puits	CCDzCO_Kergaouledan	12643	23610	0.54
Puits	CCCAM_Kernagoff	32067	50614	0.63
Forage	CCDzCo_Botcarn_F1	10152	10986	0.92
Forage	CCDzCo_Botcarn_F2	11041	11477	0.96
Mixte	CCHPB_Kergamet	13683	16841	0.81
Mixte	CCHPB_St Ronan	34826	42500	0.82
Surface	CCCAM_Poraon	19570	0	-
Surface	CCDzCO_Keratry	66960	52808	1.27

Illustration 126 : Haut : niveaux piézométriques à Landrévarzec des années 2011 et 2012 par rapport à l'historique des mesures ; Bas : Comparaison des productions par type de ressource en 2011 et 2012

5.5 CARTOGRAPHIE DU LIEN ENTRE ACHAT AU SMA ET CYCLES CLIMATIQUES

Afin de fournir sur le territoire étudié une cartographie de la dépendance des achats au SMA en relation avec les évolutions climatiques long terme, les corrélations entre les chroniques d'achat par communes et syndicats (disponibles sur la période 1973-2017) et le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou (Station J3811810) considéré comme représentatif de la disponibilité de la ressource ont été étudiées. L'analyse menée initialement sur la période 1973-2017 a montré des comportements liés aux développements économiques et démographiques sur de nombreuses communes. Pour limiter l'impact de ces développements

dans l'analyse et être plus représentatif du comportement actuel, les corrélations présentées ici ont été réalisées sur la période 2000-2017.

La corrélation entre les débits de l'Aulne et les volumes distribués par le SMA est fournie en Illustration 127. Elle montre un fort lien entre les variations climatiques et les volumes distribués sur le long terme avec une anti-corrélation sur les tendances calculées de -0,72.

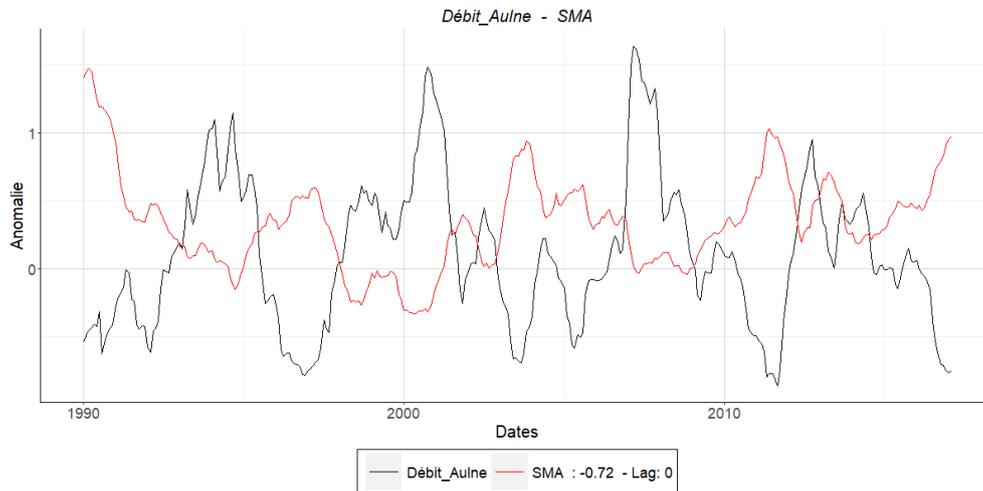


Illustration 127 : Corrélation entre les volumes distribués par le SMA et le débit de l'Aulne à Châteauneuf-du-Faou.

Les corrélations ont été calculées pour chacune des communes et syndicats de la zone où les données étaient disponibles. Un exemple d'anti-corrélation forte pour la commune de Le Faou et un exemple d'absence de corrélation pour la commune de Cast sont présentés en Illustration 128 & Illustration 129 respectivement. Une bonne anti-corrélation entre les signaux indique qu'en cas de sécheresse, la commune va sensiblement augmenter ses achats au SMA alors qu'une faible anti-corrélation indique que les achats au SMA resteront relativement constants ou que d'autres raisons contrôlent les besoins (ex : augmentation ou baisse de population sur le long terme). Une forte variation des achats en fonction du climat d'une commune peut venir de la défaillance de ses ressources propres ou d'une forte augmentation des besoins pour le tourisme ou l'agriculture. Dans le cas de l'agriculture, cette hausse de la demande peut venir d'une augmentation des besoins pour l'irrigation ou de l'assèchement des forages privés des agriculteurs. Cette hausse liée à la perte de productivité des ouvrages agricoles (où les volumes produits ne sont pas suivis) est une forte crainte des gestionnaires des réseaux AEP de certains territoires. Ce type d'analyse peut ainsi permettre d'identifier les zones concernées si une forte corrélation est observée.

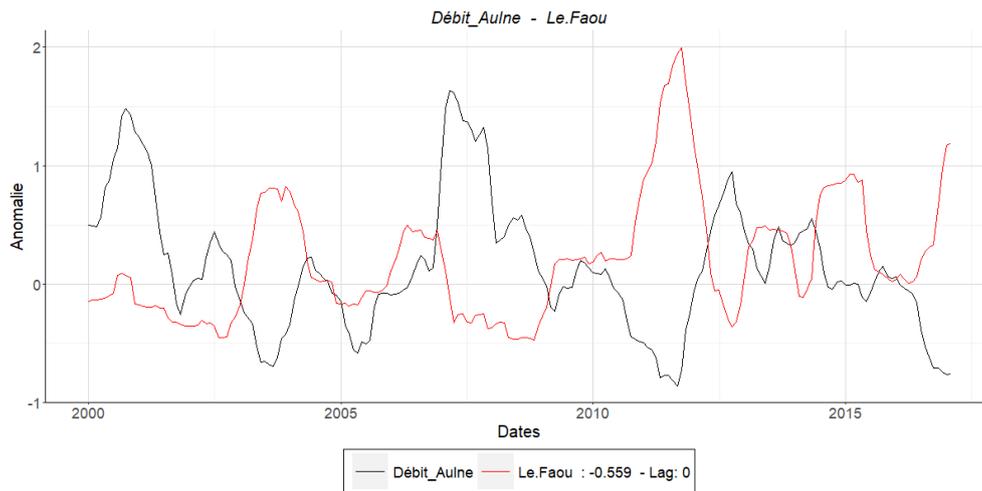


Illustration 128 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats d'eau potable au SMA pour la commune de Le Faou

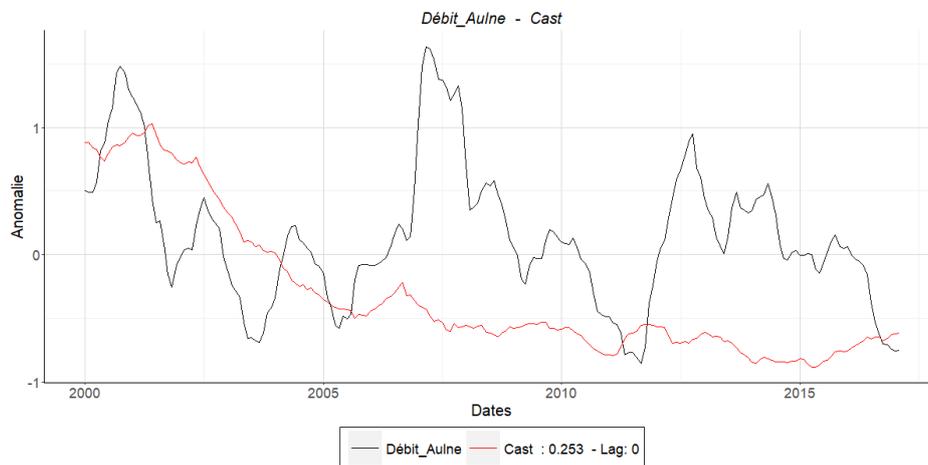


Illustration 129 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats d'eau potable au SMA pour la commune de Cast

Les corrélations entre les débits de l'Aulne, considérés comme représentatifs de la disponibilité de la ressource (cf. Chapitre 5), et les achats au SMA par les communes et les syndicats sont présentés sur les illustrations suivantes. Une partie des communes étant desservies par l'intermédiaire des syndicats d'eau (Pen Ar Goyen, Briec-Edern, SIVOMEAQ (Syndicat intercommunal pour l'équipement et l'expansion de l'agglomération quimpéroise) et CC_Crozon), les données individualisées par commune ne sont donc pas représentées pour ces communes.

L'illustration 130, présente les résultats pour les communes, l'illustration 131 pour les syndicats et l'illustration 132 regroupe l'ensemble des informations. Les anti-corrélations (en rouge) indiquent que ces territoires sont fortement dépendant du climat et des achats au SMA en cas de baisse de la ressource.

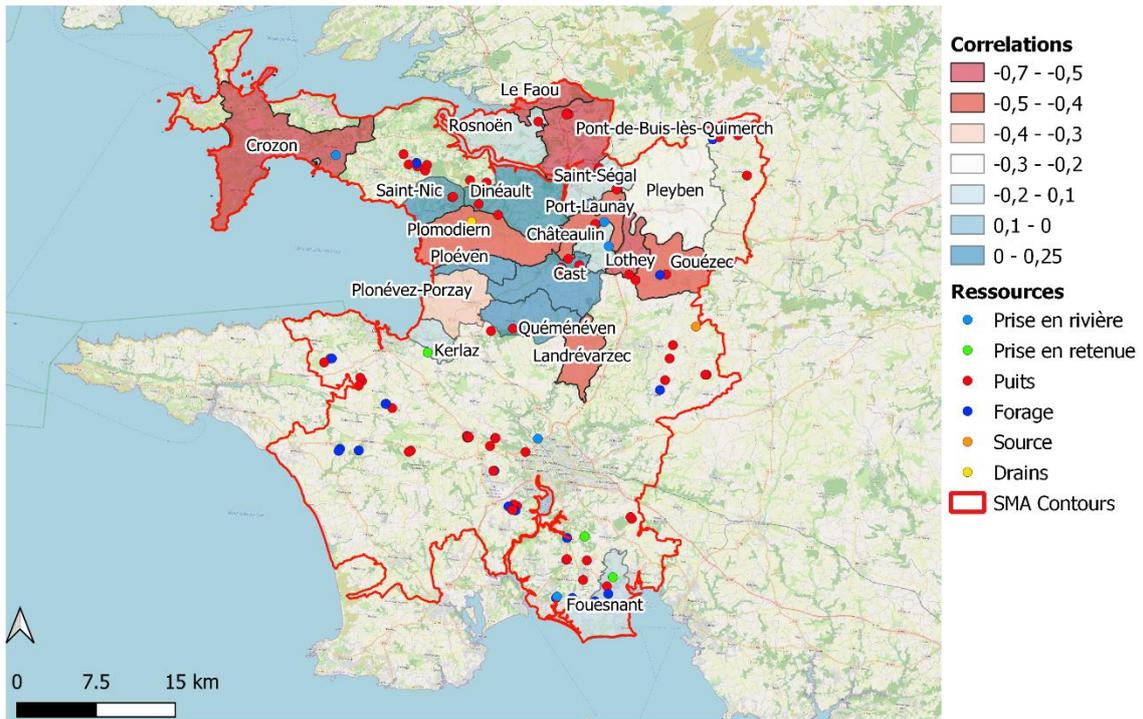


Illustration 130 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les communes (les zones non colorées sont desservies par les syndicats)

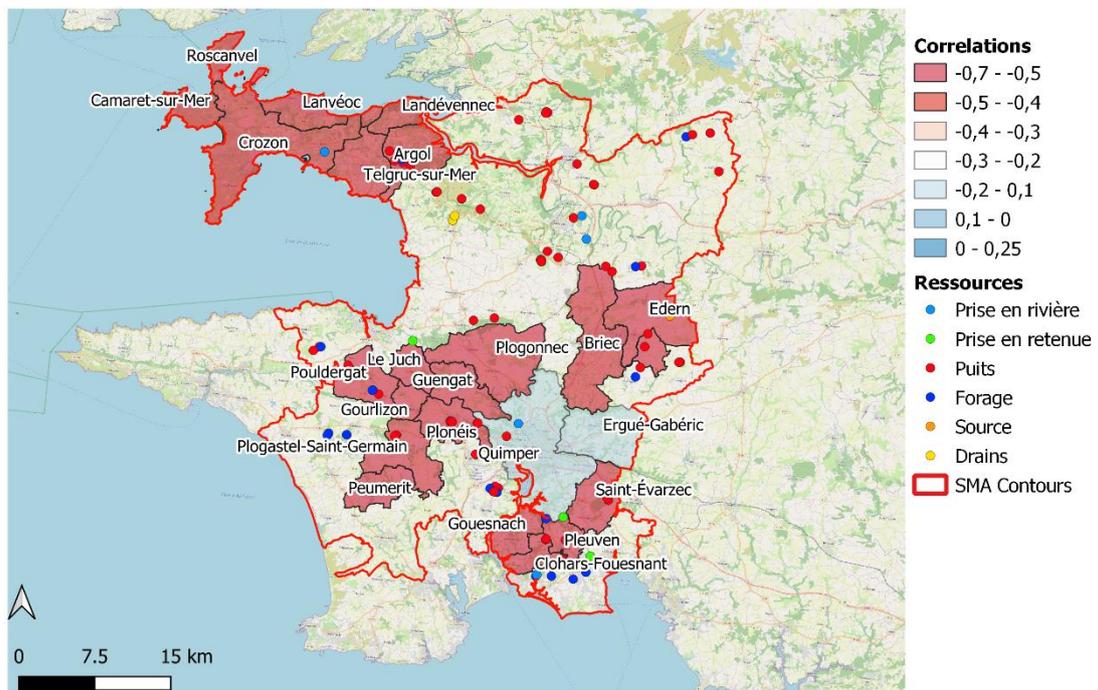


Illustration 131 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les Syndicats

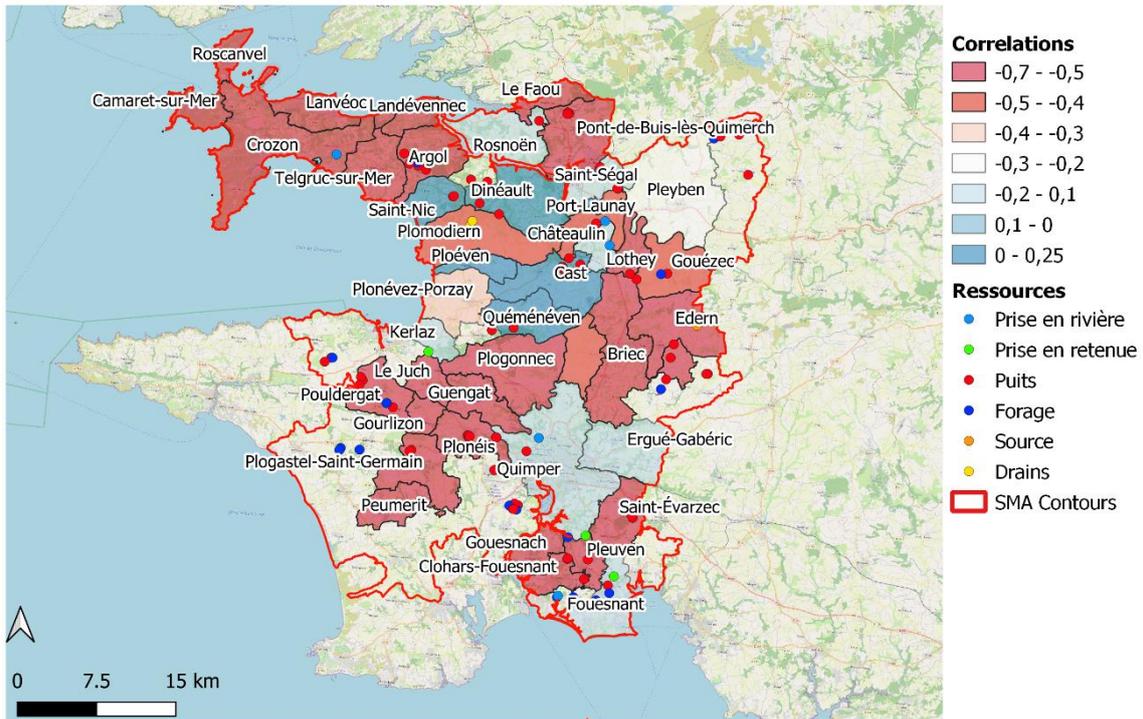
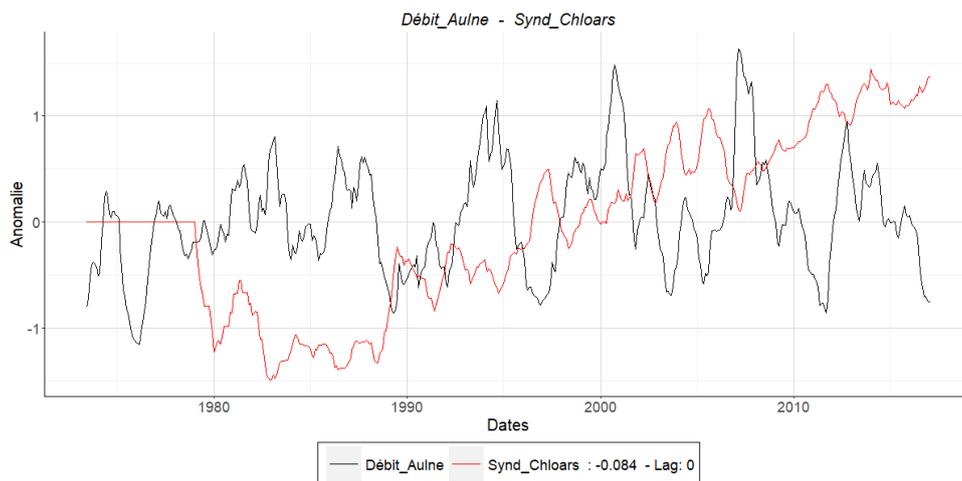


Illustration 132 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA pour les Syndicats et les communes

Les corrélations ont été calculées sur la période 2000-2017. Cependant sur le plus long terme (1973-2017), les corrélations peuvent être différentes. À titre d'exemple, pour le Syndicat de Clohars-Fouesnant, les évolutions ont été par le passé contrôlées par une augmentation générale, probablement due au développement démographique de la zone. Les corrélations calculées pour ce Syndicat sur les périodes 1973-2017 et 2000-2017 sont présentées sur l'illustration suivante. Pour la période 1973-2017, la corrélation est de -0,084 alors qu'elle est de -0,543 pour la période 2000-2017.



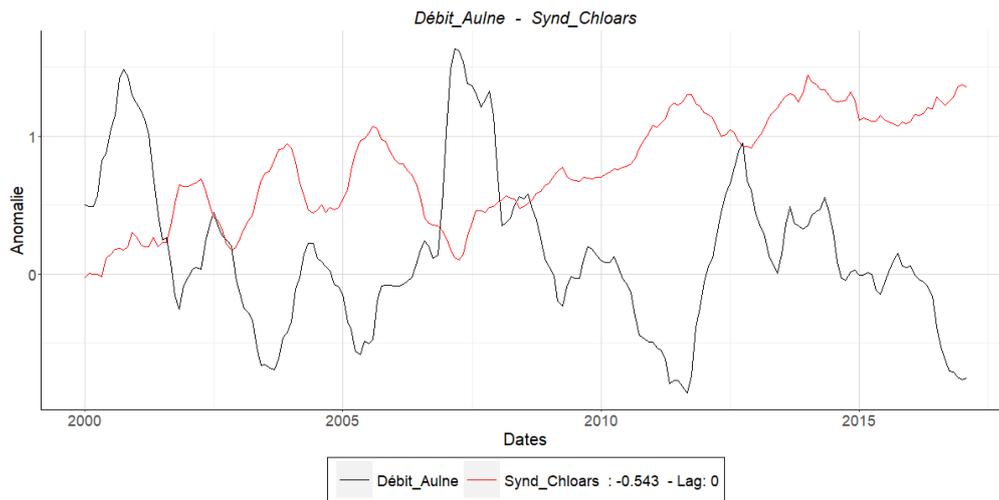


Illustration 133 : Corrélations entre les débits de l'Aulne et les achats au SMA du Syndicat de Clohars-Fouesnant. En haut, période 1973-2017 en bas, période 2000-2017.

Cette analyse permet d'obtenir une cartographie de la dépendance climatique du territoire (Illustration 133). Cependant, cette dépendance peut avoir des causes multiples telles qu'une hausse de la demande (irrigation, report de forages agricoles sur la ressource AEP) ou une défaillance des ressources propres qui ne sont pas individualisées dans ce cas.

5.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 4

L'analyse de la variabilité de production AEP en lien avec les évolutions climatiques montre un fort lien entre volumes distribués par le SMA et la disponibilité de la ressource. Ce lien est dû à la fois à une augmentation de la demande (quantifiée dans une autre tâche du projet Eau Pour Demain) et à la déficience de la production de certaines ressources individuelles en eau souterraine de sub-surface (puits) induisant un report vers la prise d'eau superficielle du SMA.

La méthodologie proposée permet de quantifier la dépendance d'une ressource exploitée aux variations climatiques annuelles et pluriannuelles. Les variations climatiques pluriannuelles ont des impacts sur les prélèvements, non seulement en raison d'une hausse de la demande (non quantifiée dans cette partie de l'étude) mais sur certains points d'eau en raison des déficiences des ressources individuelles se reportant sur l'unique ressource de sécurisation (prise d'eau superficielle du SMA), ce qui induit une vulnérabilité importante sur le territoire.

La présente étude permet de généraliser le comportement des différentes typologies de ressources (souterraines, puits, surface) sur un territoire et d'appréhender leur vulnérabilité. Les ressources profondes ne connaissent pas de diminution annuelle et permettent même une légère augmentation estivale de production pour répondre à la demande. Ainsi, la présence de forages par rapport aux puits permet le maintien de la production sur la période estivale et une plus faible dépendance aux variations pluriannuelles. Une analyse sur un plus grand échantillon d'ouvrages permettra une généralisation plus fiable à l'échelle régionale. La création de forages en soutien aux puits de sub-surface existants pourrait permettre de maintenir une production de sécurisation supérieure et ainsi de limiter le report sur les ressources en eau de surface. Ceci est déjà en place sur des sites du CCHPB.

Cette observation du report de certaines ressources en eau souterraine montre le besoin de méthodologies de gestion prenant en compte la disponibilité annuelle de la ressource et non une ressource en eau infinie comme cela est souvent le cas dans des études se basant uniquement sur la demande. Cet élément est particulièrement important dans un contexte d'aquifères de socle peu capacitifs.

Le constat réalisé ici montre la nécessité de la mise en place d'une démarche de sécurisation dans un contexte d'aquifères de socle particulièrement vulnérables aux variations climatiques. Elle met aussi en avant le besoin d'un suivi continu et homogène des ressources en eau à l'échelle d'un territoire et le besoin de communication entre les acteurs.

Le fort lien entre le niveau des nappes et les défaillances des ressources, induit la possibilité d'utiliser des outils de prévisions du niveau des nappes tels que « MétéEAU Nappes - BRGM » (<https://meteeanappes.brgm.fr/fr>) pour prévoir et estimer les risques de perte de productivité des différents ressources individuelles et prévenir des risques de report des prélèvements sur les ressources de sécurisation. Ces éléments permettront à terme de développer des modèles de gestion de la ressource, tels que réalisés sur le territoire du SMA par Bourgeois *et al.* (2023).

Enfin, bien que cela n'ait pas été observé directement dans le cadre de la présente étude, le risque de report des forages ou puits agricoles sur le réseau AEP nécessite d'être pris en compte. L'importance des volumes distribués en 1989 par le SMA dans le cadre d'une sécheresse de longue durée peut être un indicateur de ce mécanisme. L'analyse des volumes produits et leur variation entre années sèche et humide peut être un indicateur pour identifier les territoires avec des risques de report.

Une des recommandations pouvant être faite pour la sécurisation des ressources sur le SMA pourrait être de compléter les sites exploitant des puits peu profonds par des forages plus profonds. Si cette solution ne crée pas réellement une nouvelle ressource exploitable, elle permet d'exploiter une ressource existante plus longtemps dans l'année et donc de limiter le report vers le SMA ou autres ressources superficielles en période estivale. De plus, cette solution a l'avantage de ne pas nécessiter de profondes révisions des périmètres de protection de captages (PPC) en place.

Les travaux réalisés sur le site de l'Aff (en annexe 6) à l'échelle des ouvrages confirment les observations réalisées dans le Finistère, c'est à dire du lien fort entre capacité de production et variations climatiques. Si dans le cas de ce site, la ressource est toujours disponible en quantité, les règles de gestion pour notamment respecter le débit d'étiage induisent une baisse de la production.

L'ensemble des sites étudiés dans la présente étude, à l'exception des forages de Botcarn, sont affectés directement (par des baisses de production) ou indirectement (par une compensation ou un report d'autres ressources) par des variations climatiques. Même si sur certains sites les variations sont faibles, la généralisation des mécanismes induit des variations importantes sur les ressources de sécurisation pouvant elle-même avoir des contraintes (maintien du débit réservé pour l'Aulne). Il semble donc important de pouvoir prévoir et quantifier ce phénomène pour améliorer la gestion des sécheresses.

Le type d'analyse de tendance tel que mené ici, ne fournit pas de détails sur les raisons des dépendances au climat car les facteurs régulant les demandes en eau sont nombreux. Cependant dans le cadre du projet « Eau pour demain » les analyses de facturation par typologie d'usagers réalisées par les syndicats départementaux, le Conseil départemental du Finistère et le BRGM permettent de fournir les explications de ces tendances sur certaines zones. D'un autre côté, l'analyse de tendance présentée dans ce chapitre permet d'extrapoler et de valider plus facilement les résultats sur l'évolution des consommations issues de panels, tels que réalisés dans le cadre du projet « *De l'eau pour demain* » par les syndicats départementaux d'eau potable, en complétant l'approche menée à l'échelle des usagers par une méthode plus large. Ces éléments permettent la réalisation de modèles prédictifs de variation des capacités de production qui sont aussi essentiels pour la constitution de modèles de gestion.

Si les variations climatiques ont actuellement un effet limité sur la hausse des consommations (Bourgeois and Neverre, 2022), les mécanismes de report entre les différentes ressources et la concentration des prélèvements vers un nombre limité de ressources de sécurisation induit une forte vulnérabilité du territoire. La quantification de la vulnérabilité aux variations climatiques de chaque ressource de sécurisation à l'échelle régionale est un élément majeur de la sécurisation du réseau AEP à l'échelle régionale.

6. Conclusion générale

Le projet « *De l'eau pour demain* », financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, la Région Bretagne et le BRGM a été mené par les syndicats d'eau potable de la région (SDAEP22, SMG Eau 35, Eau Du Morbihan), le conseil départemental du Finistère et le BRGM. L'objectif de ce projet était de fournir des connaissances sur les consommations d'eau, l'évolution des ressources naturelles et exploitées, développer de nouveaux outils de gestion, notamment sur les équilibres besoins/ressources à l'échelle des territoires, et de rechercher des ressources alternatives pour l'alimentation en eau potable. Au sein de ce projet, le présent volet de l'étude avait pour but de représenter la dynamique des ressources en eau naturelles et exploitées, pour identifier leurs liens avec le climat sur le territoire breton. Ceci a été réalisé au travers de l'analyse de données sur des échelles annuelles et pluriannuelles.

Dans un premier temps, l'analyse de données cartographiques statiques et dynamiques à l'échelle annuelle a montré qu'il existait des différences de comportement des bassins versants selon leurs lithologies et leur perméabilité à l'échelle de la région. L'analyse conjointe des contributions des différentes lithologies aux cours d'eau et la répartition des sources indiquent que les roches plutoniques tendent à avoir un soutien d'étiage plus marqué, alors que les roches méta-sédimentaires ont des soutiens d'étiages plus faibles. Un gradient de perméabilité est-ouest, amplifié par le gradient climatique est observable sur les piézomètres et reste visible sur les cours d'eau, bien que nettement moins marqué. Le rôle de la géologie sur cette inertie est identifiable. Les analyses montrent aussi que l'inertie de la recharge et de la vidange des aquifères sur le territoire présente une certaine variabilité. Cette différence, qui correspond à l'échelle d'une saison peut être suffisante pour créer des différences exploitables dans le suivi et l'anticipation des sécheresses. Les résultats indiquent de manière qualitative qu'à l'échelle de la région les territoires peuvent avoir des réponses différentes face aux événements de sécheresse et sont donc plus ou moins vulnérables aux variations climatiques. Ceci est fortement lié à la capacité des aquifères à constituer et à renouveler un stock d'eau souterraine. Les formations plutoniques ont par exemple tendance à permettre un meilleur stockage de l'eau et une plus forte restitution aux cours d'eau.

Le croisement réalisé par SIG, des informations issues des études existantes, a permis de réaliser une carte homogène des informations. Elle permet de définir à l'échelle de la région les zones, qui selon ces études sont les plus favorables à la présence d'eau souterraine exploitable. La différenciation par type de données permet de synthétiser les informations disponibles, qui est une demande des acteurs de l'eau dans les territoires.

Les évolutions temporelles des ressources en eaux ont été reconstituées à l'échelle de la région en intégrant à la fois des variables climatiques (précipitations et ETP), hydrologiques (débit des cours d'eau) et hydrogéologiques (niveaux piézométriques). Les résultats montrent que si l'évolution de l'ETP est en hausse sur toute la région, les précipitations comme les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques présentent des oscillations mais restent en moyenne relativement stables. L'impact de cette augmentation sur le long terme de l'ETP sur l'accroissement des sécheresses est suspecté mais n'a pas pu être généralisé pour toute la région.

Les ressources en eau souterraine à l'ouest de la région ont des cycles purement annuels et leurs variations sont extrêmement corrélées aux précipitations annuelles. A l'inverse, sur l'est de la région, il existe un décalage temporel entre les précipitations et les niveaux des ressources souterraines. Ce décalage semble s'accroître sur les dernières années. Ces ressources souterraines (à l'est), globalement moins perméables et avec une inertie plus grande peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresses que les ressources souterraines de l'ouest qui vont avoir tendance à se vidanger naturellement chaque année. Cette plus grande inertie provient d'une faible perméabilité limitant la constitution de stock. En

raison de l'effet mémoire pouvant perdurer sur ces ressources (à l'est), elles peuvent être plus sensibles à des successions de sécheresse ou à des recharges faibles en hiver (sécheresse hivernale). L'impact des sécheresses hivernales semble plus marqué à l'est qu'à l'ouest et l'est est globalement plus vulnérable.

L'évolution des écarts aux normales des ressources souterraines depuis les années 1970, montre que la sécheresse de 1976 reste la plus intense et que la période 1989-1991 reste la période de déficit la plus longue. Si les sécheresses récentes de 2011, 2016, 2019 et 2022 sont moins intenses, la fréquence semble augmenter. Bien que relativement proches sur tout le territoire, ces anomalies montrent des effets variables géographiquement en fonction des événements climatiques. Les évaluations sur les dates de début de recharge et l'amplitude du battement de nappe ont montré des résultats variables entre les différents points du territoire et de faibles amplitudes de variations. Si de légères tendances semblent ressortir, telle qu'une augmentation de l'amplitude du battement de nappe, celles-ci ne sont pas marquées et sont à prendre avec précaution.

L'analyse de la variabilité de production AEP en lien avec les évolutions climatiques a montré un fort lien entre volumes distribués et la disponibilité de la ressource. La méthodologie proposée permet de quantifier la dépendance d'une ressource exploitée aux variations climatiques annuelles et pluriannuelles. Les variations climatiques pluriannuelles ont des impacts sur les prélèvements, non seulement en raison d'une hausse de la demande (non quantifiée dans cette partie de l'étude) mais sur certains points d'eau en raison des déficiences des autres ressources se reportant sur l'unique ressource de sécurisation (prise d'eau superficielle du SMA), ce qui induit une vulnérabilité importante sur le territoire.

La présente étude permet de généraliser le comportement des différentes typologies de ressources (souterraines, puits, surface) sur un territoire et d'appréhender leur vulnérabilité. Les puits de sub-surface sont les ressources les plus vulnérables. Les ressources profondes ne connaissent pas de diminution annuelle et permettent même une légère augmentation estivale de production pour répondre à la demande. Ainsi, la présence de forages par rapport aux puits de sub-surface permet le maintien de la production sur la période estivale et une plus faible dépendance aux variations pluriannuelles. La création de forages en soutien aux puits existants pourrait permettre de maintenir une production de sécurisation supérieure et ainsi limiter le report sur les ressources en eau de surface.

Cette observation du report de certaines ressources en eau souterraine montre le besoin de suivi et de méthodologies de gestion prenant en compte la disponibilité mensuelle de la ressource. Le constat réalisé ici montre la nécessité de la mise en place d'une démarche de sécurisation dans un contexte d'aquifères de socle particulièrement vulnérables aux variations climatiques. Elle met aussi en avant le besoin d'un suivi continu et homogène des ressources en eau à l'échelle d'un territoire et le besoin de communication entre les acteurs.

Le fort lien entre le niveau des nappes et les défaillances des ressources donne la possibilité d'utiliser des outils de prévisions du niveau des nappes tels que « MétéEAU Nappes - BRGM » (<https://meteeanappes.brgm.fr/fr>) pour prévoir et estimer les risques de perte de productivité des différentes ressources individuelles et prévenir des risques de report des prélèvements sur les ressources de sécurisation. Ces éléments permettront à terme de développer des modèles de gestion de la ressource, tels que réalisés sur le territoire du SMA par Bourgeois *et al.* (2023).

L'ensemble des sites étudiés dans cette étude, à l'exception des forages de Botcarn, sont affectés directement (par des baisses de production) ou indirectement (par une compensation ou un report d'autres ressources) par des variations climatiques. Même si sur certains sites les variations sont faibles, la généralisation des mécanismes induit des variations importantes sur les ressources de sécurisation pouvant elle-même avoir des contraintes (maintien du débit

réservé pour l'Aulne dans le cas présent). Il semble donc important de pouvoir prévoir et quantifier ce phénomène pour une améliorer la gestion des sécheresses.

Si les variations climatiques ont actuellement un effet limité sur la hausse des consommations (Bourgeois and Neverre, 2022) les mécanismes de report entre les différentes ressources et la concentration des prélèvements vers un nombre limité de ressource de sécurisation induit une forte vulnérabilité du territoire. La quantification de la vulnérabilité aux variations climatiques de chaque ressource de sécurisation à l'échelle régionale est un élément majeur de la sécurisation du réseau AEP à l'échelle régionale.

7. Références

- Acworth, R.I., 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 20, 265–272. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1987.020.04.02>
- Ayraud, V., Aquilina, L., Labasque, T., Pauwels, H., Molenat, J., Pierson-Wickmann, A.-C., Durand, V., Bour, O., Tarits, C., Le Corre, P., Fourre, E., Merot, P., Davy, P., 2008. Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Applied Geochemistry* 23, 2686–2707. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.06.001>
- Baulon, L., Allier, D., Massei, N., Bessiere, H., Fournier, M., Bault, V., 2022. Influence of low-frequency variability on groundwater level trends. *Journal of Hydrology* 606, 127436. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127436>
- Belleguic, K., Conseil, C., Eveno, T., Lorge, S., 2012. Le changement climatique en Bretagne. Météo-France.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 127, 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
- Bevillon, C., Thomas, A., 2016. Les enjeux de l'eau en Bretagne à l'horizon 2040. Conseil Economique, Social & Environnemental Régional.
- Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 691–708. <https://doi.org/10.5194/hess-18-691-2014>
- Boisson, A., Lucass, Schoëtter, J.-M., Mougin, B., 2021. Identification et caractérisation des aquifères tertiaires et quaternaires stratégiques de Bretagne (projet ICARE). Rapport final (No. BRGM/RP-70336-FR).
- Boisson, A., Maréchal, J.C., Perrin, J., Dewandel, B., Ahmed, S., 2015. Impact of Vertical Geological Structure and Water Table Depletion on Indian Crystalline Aquifers, in: Lollino, G., Arattano, M., Rinaldi, M., Giustolisi, O., Marechal, J.-C., Grant, G.E. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*. Springer International Publishing, pp. 583–587.
- Bourgeois, C., Neverre, N., 2022. Etude de la demande en eau potable: résultats d'une analyse économétrique en Bretagne (No. BRGM/RP-71959-FR). BRGM.
- Bourgeois, C., Neverre, N., Boisson, A., Rinaudo, J.-D., 2023. Sécuriser l'alimentation en eau potable future dans le périmètre du Syndicat Mixte de l'Aulne. Rapport Final. (No. BRGM/RP-72460-FR). BRGM.
- Boutt, D.F., 2018. Assessing hydrogeologic controls on dynamic groundwater storage using long-term instrumental records of water table levels. *Hydrological Processes* 31, 1479–1497. <https://doi.org/10.1002/hyp.11119>
- Boutt, D.F., Diggins, P., Mabee, S., 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeology Journal* 18, 1839–1854. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0640-y>

- Chilton, P.J., Foster, S.S.D., 1995. Hydrogeological characterisation and water supply potential of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology journal* 3, 36–49.
- Clauser, C., 1992. Permeability of crystalline rocks. *Eos Trans. AGU* 73, 233–238. <https://doi.org/10.1029/91EO00190>
- Cornette, N., 2022. Impact du changement climatique sur les ressources en eau de subsurface à l'horizon 2050-2100 dans un contexte de milieux de socle cristallin (These en préparation). Rennes 1.
- Dewandel, B., Amraoui, N., Baltassat, J.-M., Boisson, A., Caballero, Y., Mougin, B., 2020. Projet de recherche - MORPHEUS - MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle. Rapport final. (No. BRGM/RP-69431-FR). BRGM.
- Dewandel, B., Boisson, A., Amraoui, N., Caballero, Y., Mougin, B., Baltassat, J.-M., Maréchal, J.-C., 2021. Improving our ability to model crystalline aquifers using field data combined with a regionalized approach for estimating the hydraulic conductivity field. *Journal of Hydrology* 601, 126652. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126652>
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>
- Dewandel, B., Maréchal, J.C., Bour, O., Ladouche, B., Ahmed, S., Chandra, S., Pauwels, H., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers. *Journal of Hydrology* 416–417, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038>
- Dobson, B., Coxon, G., Freer, J., Gavin, H., Mortazavi-Naeini, M., Hall, J.W., 2020. The Spatial Dynamics of Droughts and Water Scarcity in England and Wales. *Water Resources Research* 56, e2020WR027187. <https://doi.org/10.1029/2020WR027187>
- Dubreuil, V., 1994. La Sécheresse dans la France de l'ouest: étude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR (These de doctorat). Rennes 2.
- Dubreuil, V., Lamy, C., Planchon, O., 2018. Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur. undefined.
- Ducharne, A., Habets, F., Pagé, C., Sauquet, E., Viennot, P., Déqué, M., Gascoïn, S., Hachour, A., Martin, E., Oudin, L., Terray, L., Thiéry, D., 2010. CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES AND HYDROLOGICAL EXTREMES IN NORTHERN FRANCE 8.
- Gascuel-Oudou, C., Arousseau, P., Durand, P., Ruiz, L., Molenat, J., 2010. The role of climate on inter-annual variation in stream nitrate fluxes and concentrations. *Science of The Total Environment, Special Section: Integrating Water and Agricultural Management Under Climate Change* 408, 5657–5666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.003>
- Girard, C., Rinaudo, J.-D., Pulido-Velazquez, M., Caballero, Y., 2015. An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the river basin scale in a global change scenario. *Environmental Modelling & Software* 69, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.023>

- Gleeson, T., Novakowski, K., 2009. Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow: Lineaments in the Canadian Shield. *Geological Society of America Bulletin* 121, 333–347. <https://doi.org/10.1130/B26241.1>
- Gleeson, T., Smith, L., Moosdorf, N., Hartmann, J., Dürr, H.H., Manning, A.H., van Beek, L.P.H., Jellinek, A.M., 2011. Mapping permeability over the surface of the Earth: MAPPING GLOBAL PERMEABILITY. *Geophysical Research Letters* 38, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL045565>
- Guihéneuf, N., Boisson, A., Bour, O., Dewandel, B., Perrin, J., Dausse, A., Viossanges, M., Chandra, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2014. Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. *Journal of Hydrology* 511, 320–334. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061>
- Guillaud, J.-F., Bouriel, L., 2006. Relation concentration-débit et evolution temporelle du nitrate dans 25 rivières de la région Br etagne (France). *Revue des sciences de l'eau* 20, 213–226. <https://doi.org/10.7202/015814ar>
- Gustafson, G., Krasny, J., 1994. Crystalline rock aquifers: Their occurrence, use and importance. *Applied Hydrology* 2, 64–75.
- Gustard, A., Demuth, S., 2008. *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*. WMO.
- Harou, J.J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D.E., Medellín-Azuara, J., Lund, J.R., Howitt, R.E., 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375, 627–643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Hartmann, A., Gleeson, T., Wada, Y., Wagener, T., 2017. Enhanced groundwater recharge rates and altered recharge sensitivity to climate variability through subsurface heterogeneity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, 2842–2847. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614941114>
- Holman, I.P., Rivas-Casado, M., Bloomfield, J.P., Gurdak, J.J., 2011. Identifying non-stationary groundwater level response to North Atlantic ocean-atmosphere teleconnection patterns using wavelet coherence. *Hydrogeol J* 19, 1269–1278. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0755-9>
- Hurrell, J.W., Van Loon, H., 1997. DECADEAL VARIATIONS IN CLIMATE ASSOCIATED WITH THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION. *Climatic Change* 36, 301–326. <https://doi.org/10.1023/A:1005314315270>
- Jackson, C.R., Meister, R., Prudhomme, C., 2011. Modelling the effects of climate change and its uncertainty on UK Chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model projections. *Journal of Hydrology* 399, 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.028>
- Jiménez-Martínez, J., Longuevergne, L., Le Borgne, T., Davy, P., Russian, A., Bour, O., 2013. Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fractured aquifers: Insights from a frequency domain analysis: Temporal and Spatial Scaling in Fractured Aquifers. *Water Resources Research* 49, 3007–3023. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20260>

- Kolbe, T., Marçais, J., Thomas, Z., Abbott, B.W., de Dreuzy, J.-R., Rousseau-Gueutin, P., Aquilina, L., Labasque, T., Pinay, G., 2016. Coupling 3D groundwater modeling with CFC-based age dating to classify local groundwater circulation in an unconfined crystalline aquifer. *Journal of Hydrology*, RESIDENCE TIMES IN SUBSURFACE HYDROLOGICAL SYSTEMS: Signature of hydrological processes and impact on environmental applications 543, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.020>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2021. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeol J.* <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>
- Lamy, C., 2013. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne (These de doctorat). Rennes 2.
- Lamy, C., Dubreuil, V., 2013. Impact potentiel du changement climatique sur les sécheresses pédologiques en Bretagne au 21^{ème} siècle. *Climatologie* 10, 107–121. <https://doi.org/10.4267/climatologie.96>
- Lanini, S., Courtois, N., Giraud, F., Petit, V., Rinaudo, J.D., 2004. Socio-hydrosystem modelling for integrated water-resources management—the Hérault catchment case study, southern France. *Environmental Modelling & Software, Integrated Catchment Modelling and Decision Support* 19, 1011–1019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.11.004>
- Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Claudal, J.-P., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology* 328, 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029>
- Leray, S., de Dreuzy, J.-R., Bour, O., Bresciani, E., 2013. Numerical modeling of the productivity of vertical to shallowly dipping fractured zones in crystalline rocks. *Journal of Hydrology* 481, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.014>
- Liesch, T., Wunsch, A., 2019. Aquifer responses to long-term climatic periodicities. *Journal of Hydrology* 572, 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.060>
- Marçais, J., 2018. Variabilités des temps de résidence de l'eau et du débit dans les rivières et les nappes phréatiques: implications sur la qualité de l'eau: inférence, modélisation et prédiction des temps de transit de l'eau dans les bassins versants.
- Marçais, J., de Dreuzy, J.-R., Ginn, T.R., Rousseau-Gueutin, P., Leray, S., 2015. Inferring transit time distributions from atmospheric tracer data: Assessment of the predictive capacities of Lumped Parameter Models on a 3D crystalline aquifer model. *Journal of Hydrology* 525, 619–631. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.055>
- Montginoul, M., Rinaudo, J.-D., 2009. Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine ?. Le cas du Roussillon. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 40–56. <https://doi.org/10.4000/economierurale.2149>
- Mougin, B., 2006. Atlas du réseau piézométrique de Bretagne (No. BRGM/RP-54576-FR). BRGM.

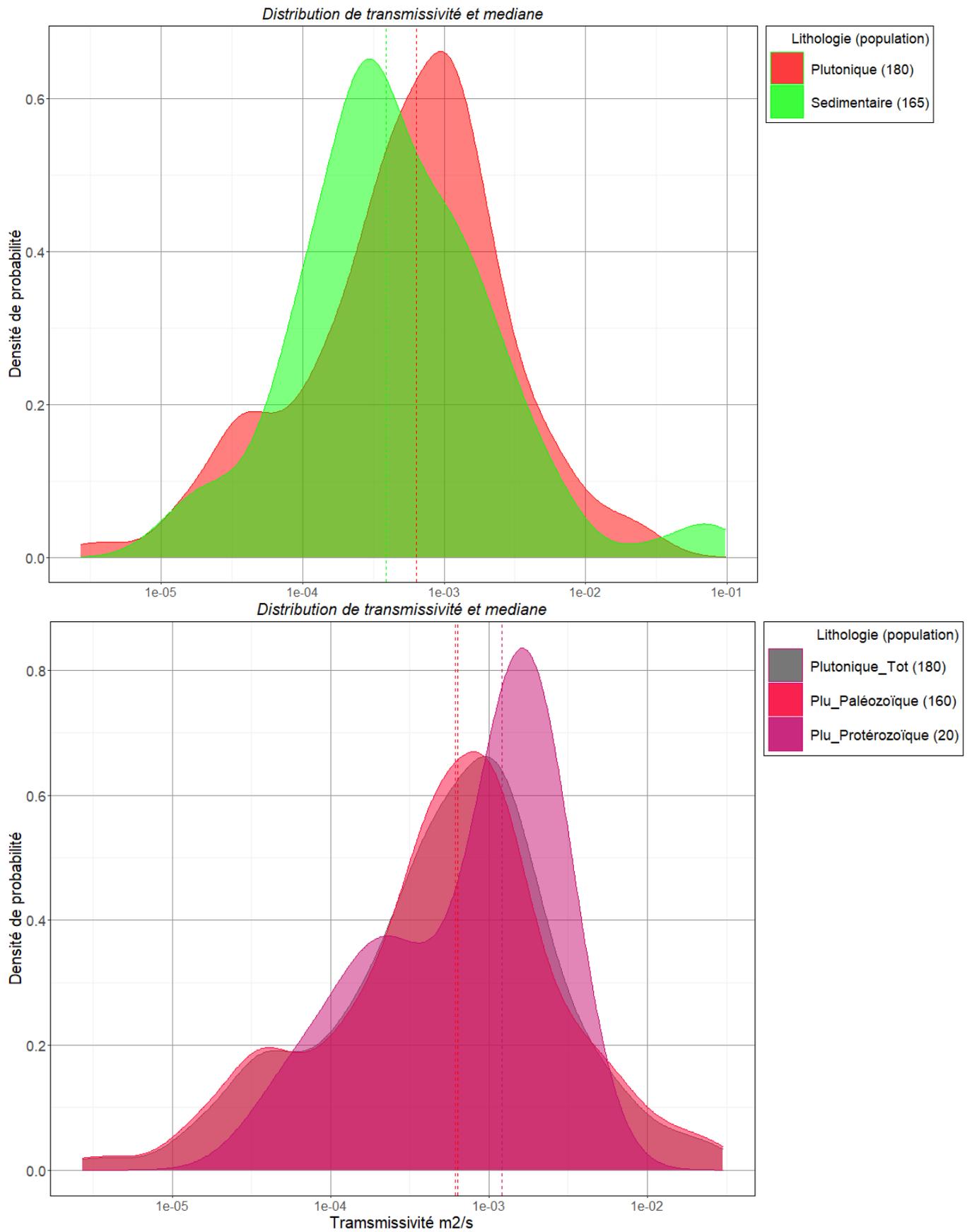
- Mougin, B., Allier, D., Blanchin, R., Carn, A., Courtois, N., Gateau, C., Putot, E., 2008. SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines). Rapport final - Année 5. BRGM/RP-56457-FR.
- Mougin, Bruno, Allier, D., Blanchin, R., Carn, A., Courtois, N., Gateau, C., Putot, E., Jegou, J.P., Lachassagne, P., Stollsteiner, P., Wyns, R., 2008. SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) - Rapport final - Année 5. BRGM.
- Mougin, B., Dewandel, B., Schroëtter, J.-M., Petelet-Giraud, E., Lanini, S., Boisson, A., Charlier, J.-B., Portal, A., Koch, F., Maurice, B., Lucassou, F., Vergnaud, V., 2022. Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du site de l'Aff (communes de Beignon et Paimpont), pour une gestion durable des prélèvements dans les 3 forages FE3, FE4 et FE7. (No. BRGM/RP-71294-FR). BRGM.
- Neverre, N., Dumas, P., Nassopoulos, H., 2016. Large-scale water scarcity assessment under global changes: insights from a hydroeconomic framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1–26. <https://doi.org/10.5194/hess-2015-502>
- Neves, M.C., Jerez, S., Trigo, R.M., 2019. The response of piezometric levels in Portugal to NAO, EA, and SCAND climate patterns. *Journal of Hydrology* 568, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.054>
- Price, K., 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review - Katie Price, 2011. *Progress in Physical Geography* 35, 465–492. <https://doi.org/10.1177/0309133311402714>
- Rinaudo, J.D., Garin, P., 2005. The benefits of combining lay and expert input for water-management planning at the watershed level. *Water Policy* 7, 279–293. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0018>
- Rinaudo, J.-D., Neverre, N., Montginoul, M., 2012. Simulating the Impact of Pricing Policies on Residential Water Demand: A Southern France Case Study. *Water Resour Manage* 26, 2057–2068. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9998-z>
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., 2016. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. *Hydrogeol J* 24, 2157–2170. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1451-6>
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., Leray, S., Schroetter, Jm., Longuevergne, L., Le Borgne, T., Hochreutener, R., Labasque, T., Lavenant, N., Vergnaud-Ayraud, V., Mougin, B., 2014. Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. *Journal of Hydrology* 509, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.023>
- Rust, W., Holman, I., Corstanje, R., Bloomfield, J., Cuthbert, M., 2018. A conceptual model for climatic teleconnection signal control on groundwater variability in Europe. *Earth-Science Reviews* 177, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.017>
- Salquèbre, D., Bertin, C., Doney, C., Fleury, P., Jallais, N., Mougin, B., Orofino, S., Rouxel, E., Thinon-Larminach, M., 2018. Réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines du bassin Loire-Bretagne. Rapport de gestion 2017 (No. BRGM/RP-67778-FR). BRGM.

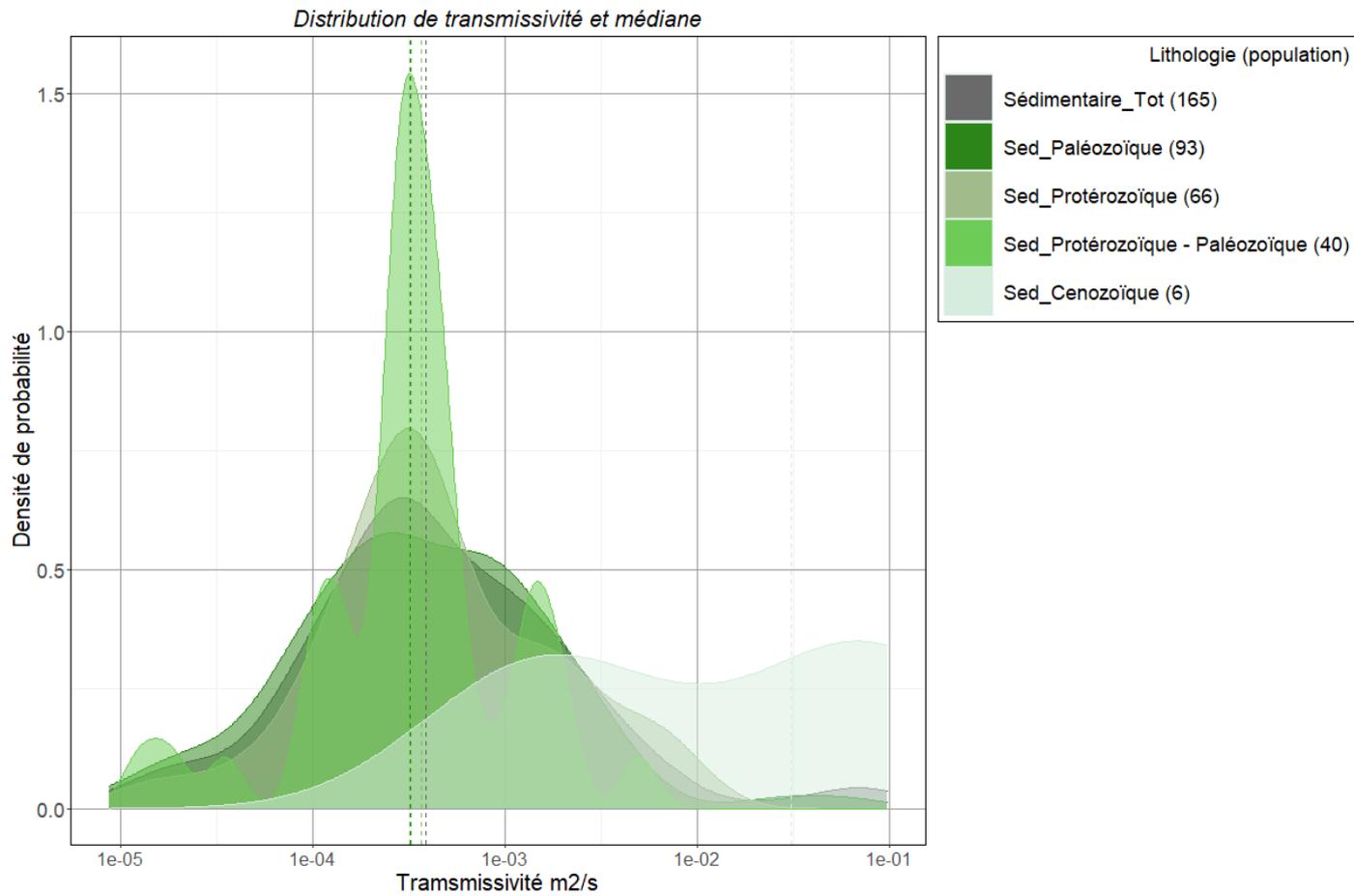
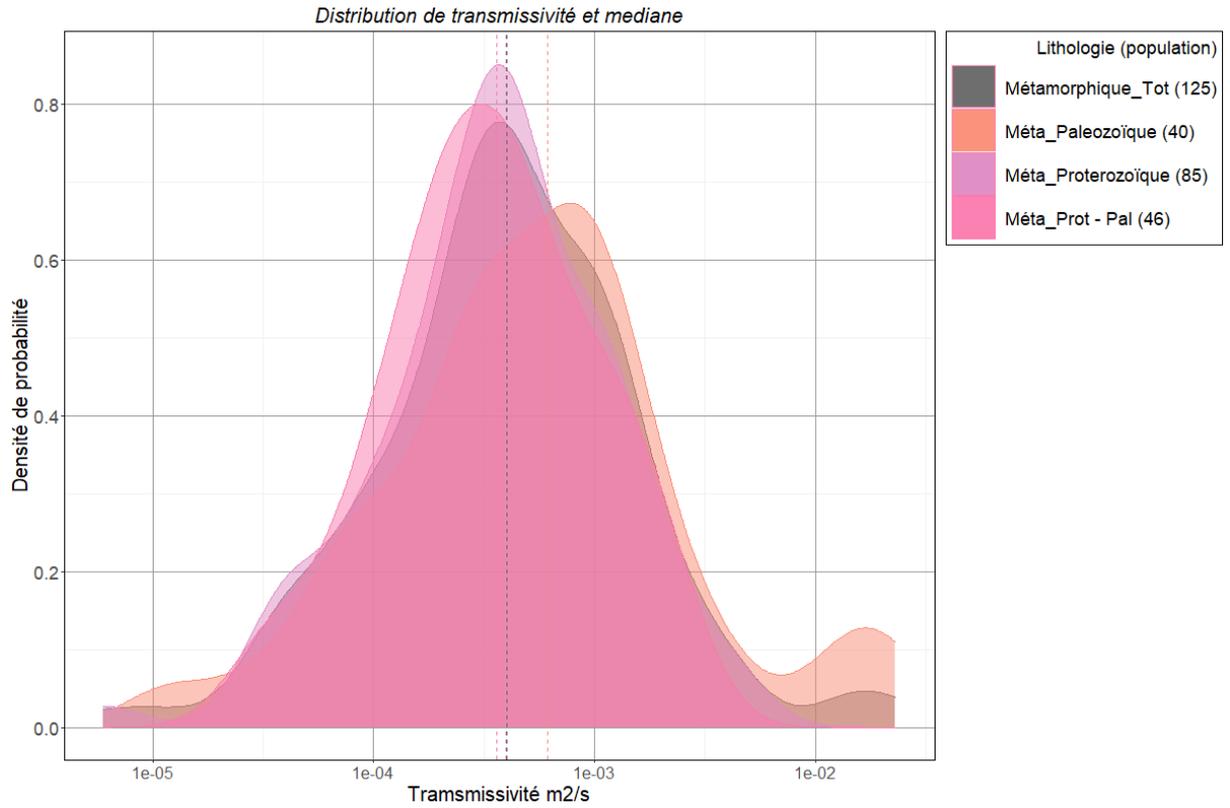
- Saltel, M., Bourguin, B., 2016. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Année 5 - Module 1 - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. (No. RP-65039-FR.). BRGM.
- Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L., 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resources Research* 43. <https://doi.org/10.1029/2006WR005486>
- Schroëtter, J.-M., Boisson, A., Lucassou, F., Bader, A.-G., Beccaletto, L., Ouergui, Y., Tournlière, B., 2020. ANAFORE: Analyse multicritère des données de forages les plus productifs de Bretagne - Rapport Final (No. BRGM/RP-70280-FR). BRGM.
- Seaton, W.J., Burbey, T.J., 2005. Influence of ancient thrust faults on the hydrogeology of the blue ridge province. *Ground Water* 43, 301–313. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0026.x>
- Seguin, J.-J., Allier, D., Croiset, N., Klinka, T., Manceau, J.-C., 2018. ESTHER. Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Guide d'utilisation. (No. BRGM/RP-67518-FR). BRGM.
- Snelder, T.H., Datry, T., Lamouroux, N., Larned, S.T., Sauquet, E., Pella, H., Catalogne, C., 2013. Regionalization of patterns of flow intermittence from gauging station records. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 2685–2699. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2685-2013>
- Tallaksen, L.M., Lanen, H.A.J. van, 2004. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yecheili, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.-F., Holman, I., Treidel, H., 2013. Ground water and climate change. *Nature Clim. Change* 3, 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Thiéry, D., 2013. Logiciel GARDENIA, version 8.2, Guide d'utilisation (GARDENIA software, version 8.2, User Guide) (No. BRGM/RP62797-FR).
- Weider, K., Boutt, D.F., 2010. Heterogeneous water table response to climate revealed by 60 years of ground water data. *Geophysical Research Letters* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL045561>
- Wright, E.P., 1992. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geological Society, London, Special Publications* 66, 1–27. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.066.01.01>
- Wyns, R., Baltassat, J., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F., 2004. Application of proton magnetic resonance sounding to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la société géologique de France* 175, 21–34.

8. Annexes

Annexe 1

Distribution des transmissivités par lithologies et âges





Annexe 2

Illustration des éléments complémentaires de la section 2.5 relative à la dynamique annuelle des piézomètres

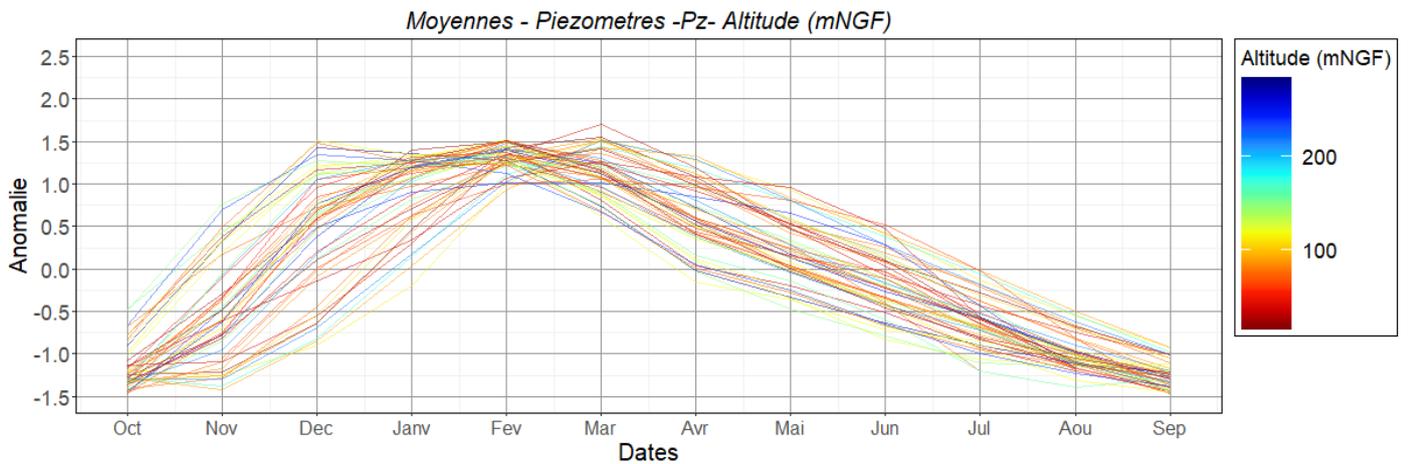


Illustration 134 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de l'altitude du piézomètre

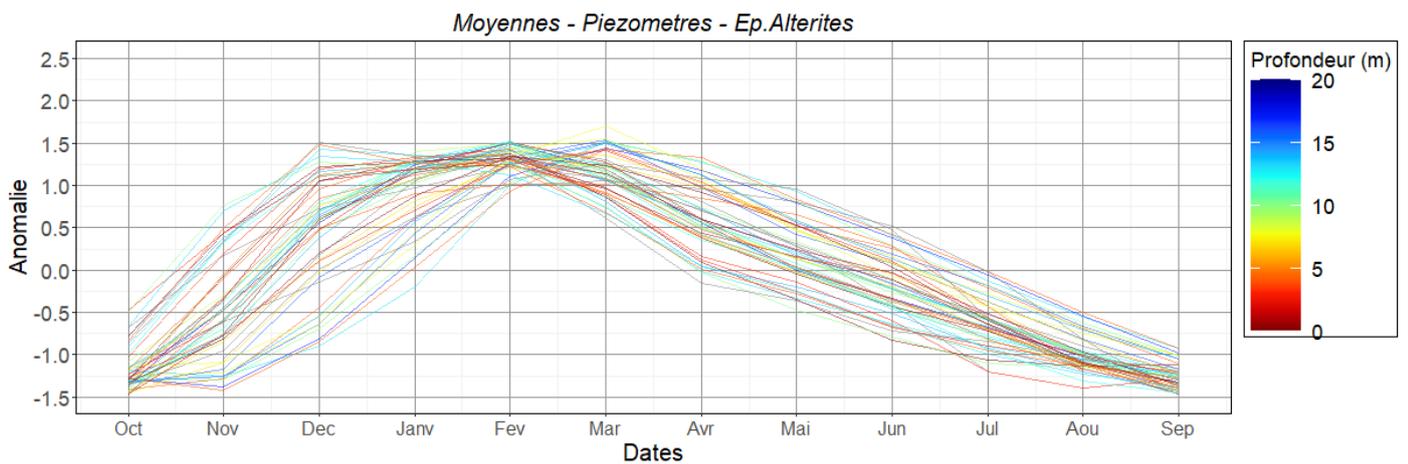
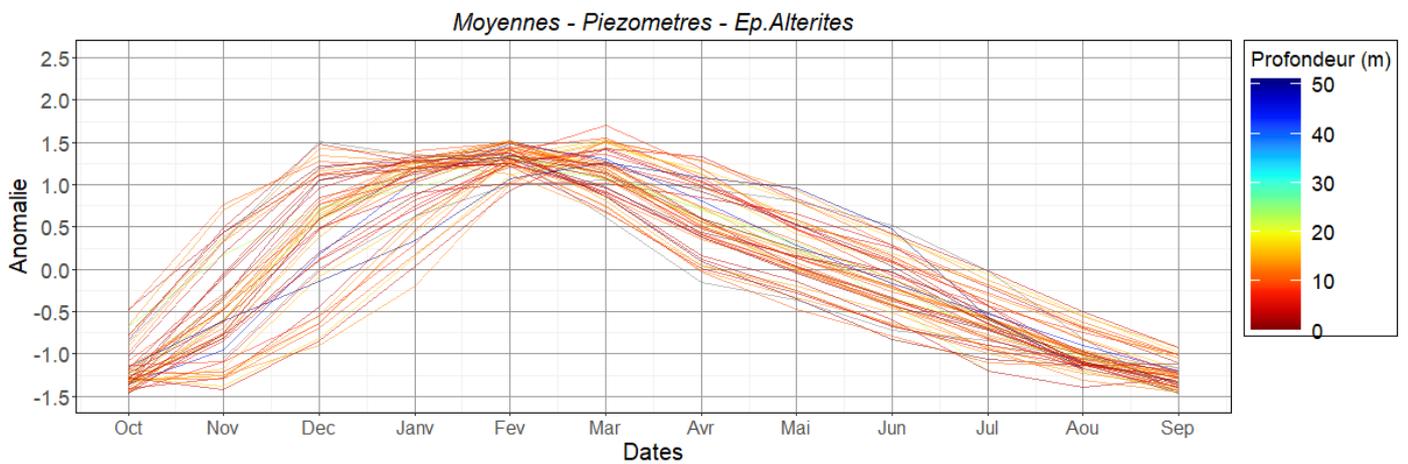


Illustration 135 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de l'épaisseur des altérites au point de foration. En haut, échelle de couleur 0-50 m ; en bas échelle reserrée sur la plage la plus représentée (0-20m)

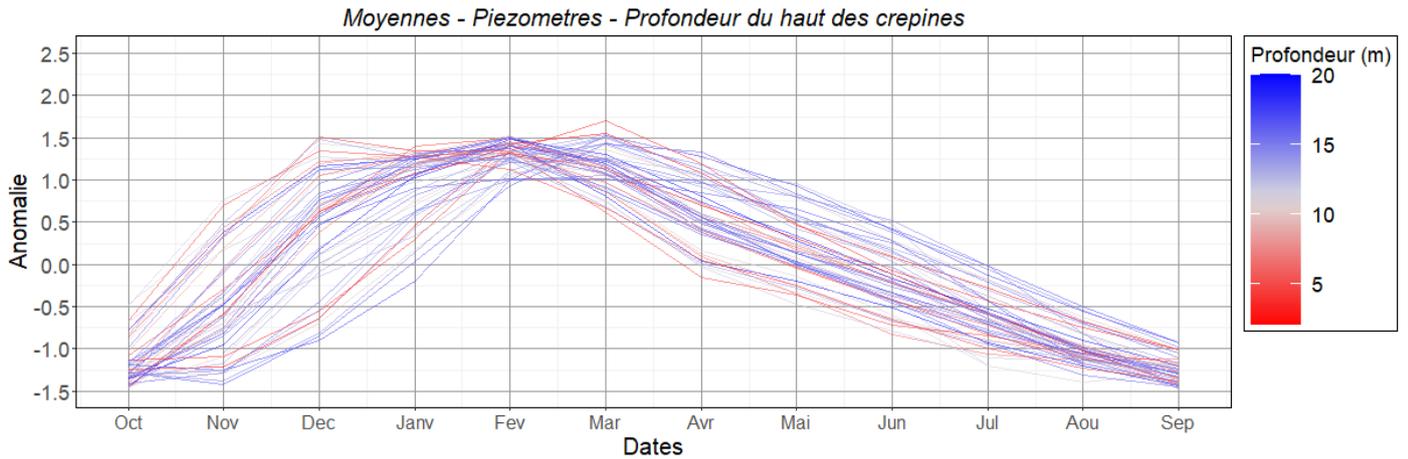


Illustration 136 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur du haut des crépines.

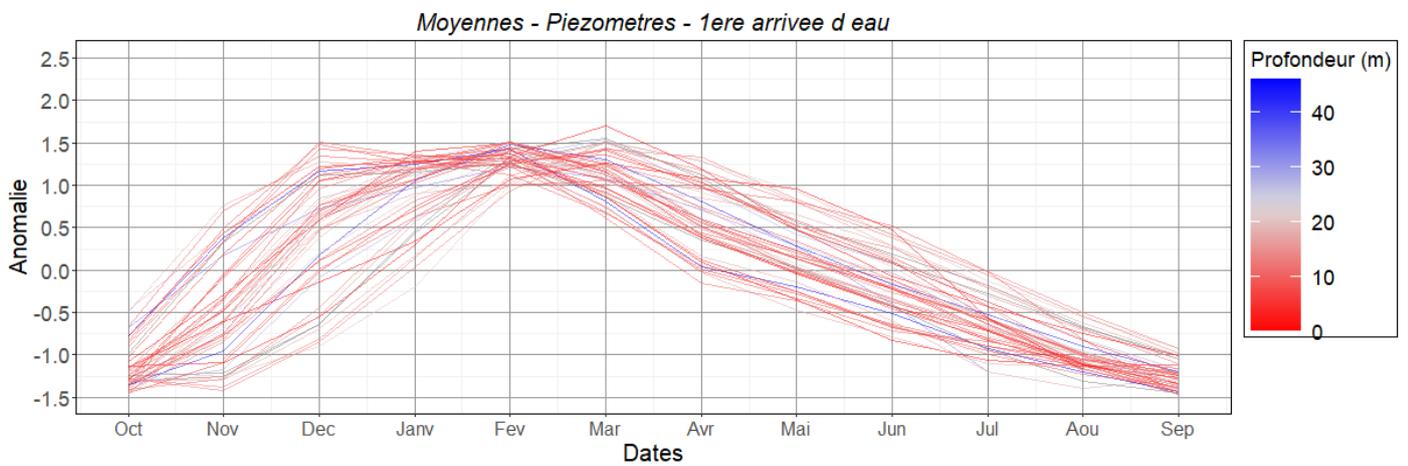


Illustration 137 : Moyennes mensuelles (centrée-réduite) de l'ensemble des piézomètres de Bretagne en fonction de la profondeur des premières arrivées d'eau

Annexe 3

Cartographie des critères

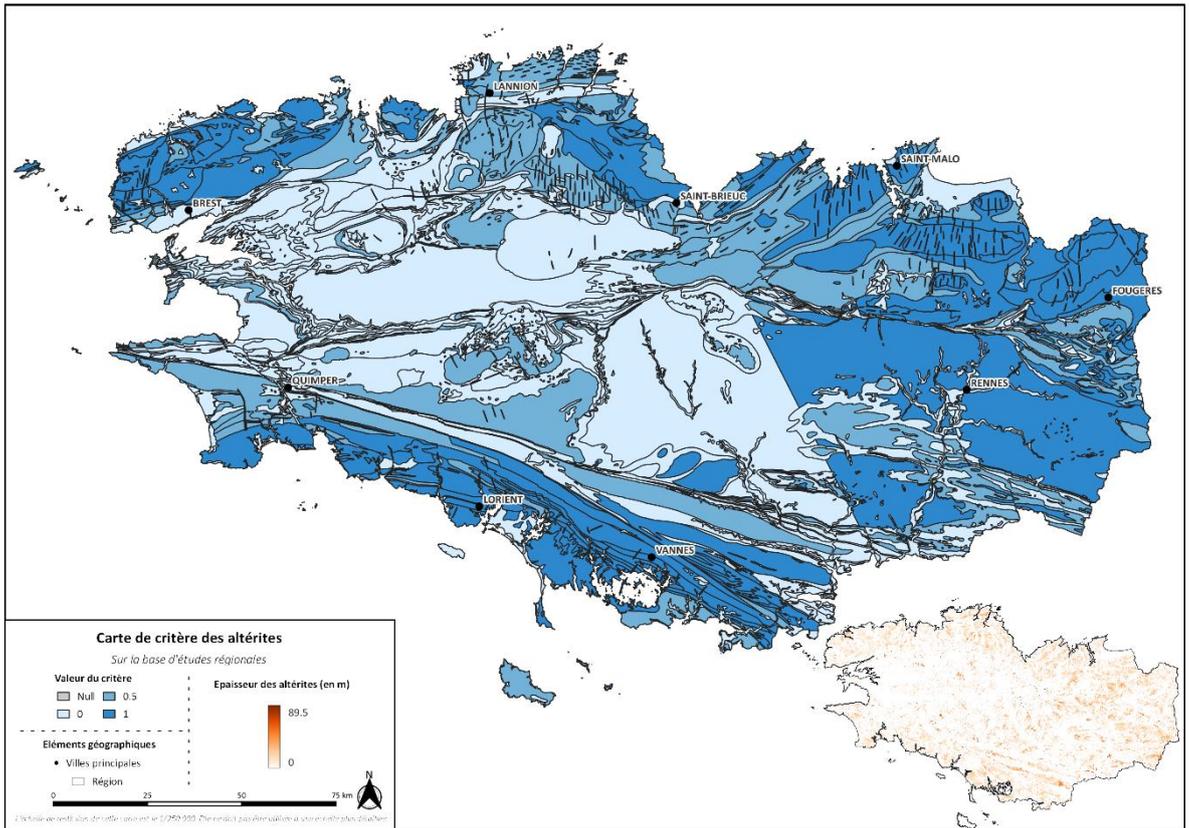


Illustration 138 : Carte de critère des transmissivités.

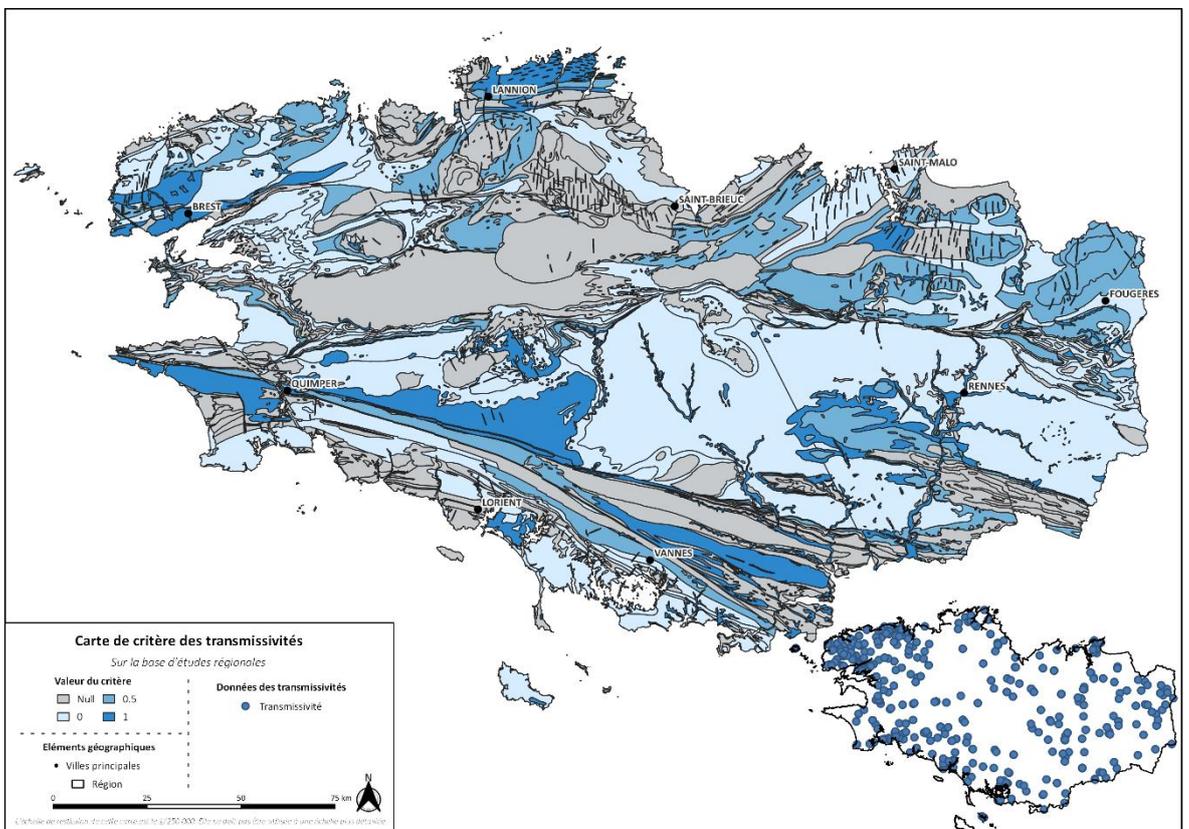


Illustration 139 : Carte de critère des altérites.

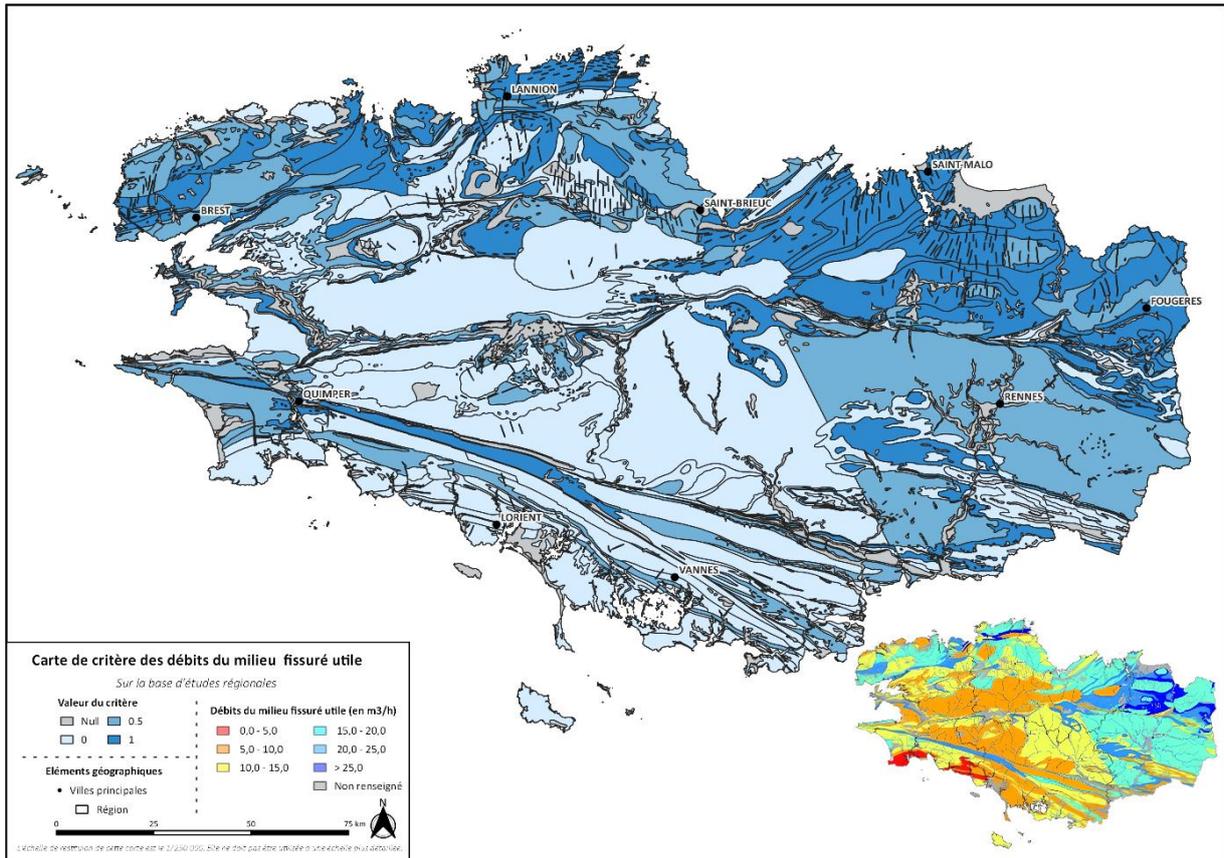


Illustration 140: Carte de critère des débits du milieu fissuré utile.

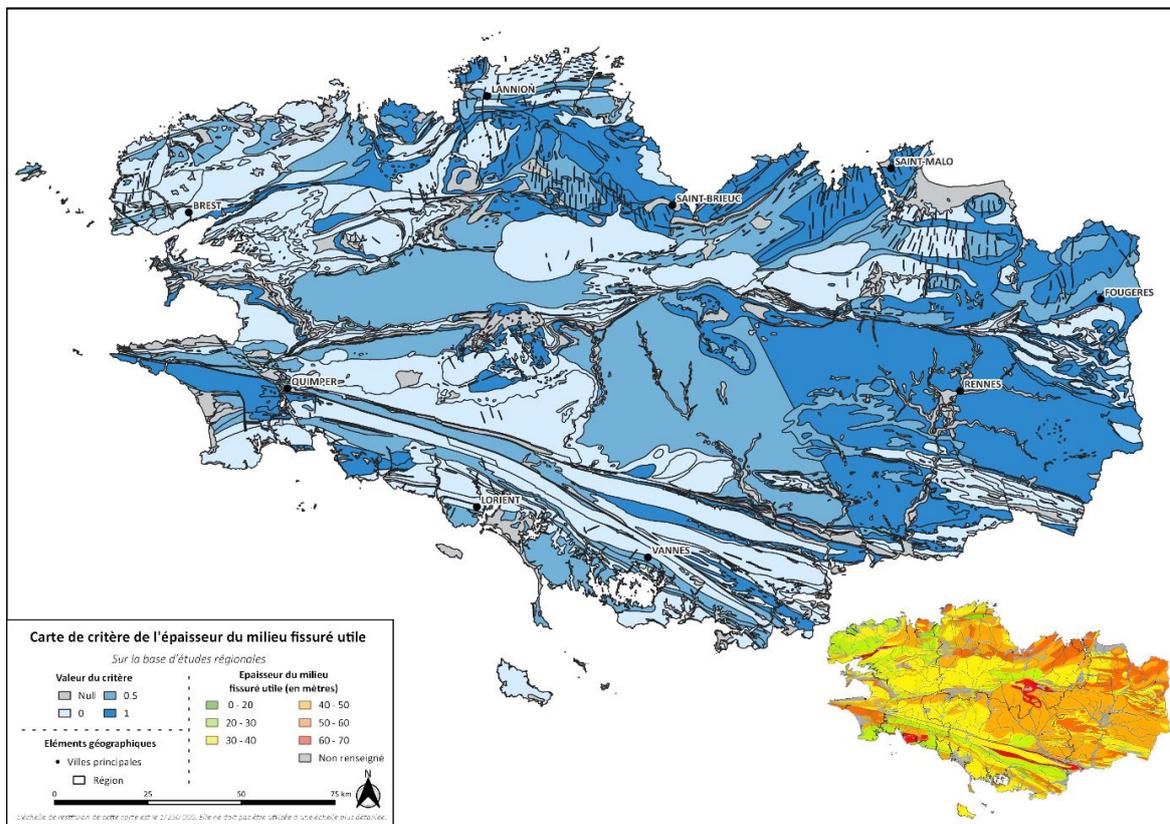


Illustration 141: Carte de critère de l'épaisseur du milieu fissuré utile

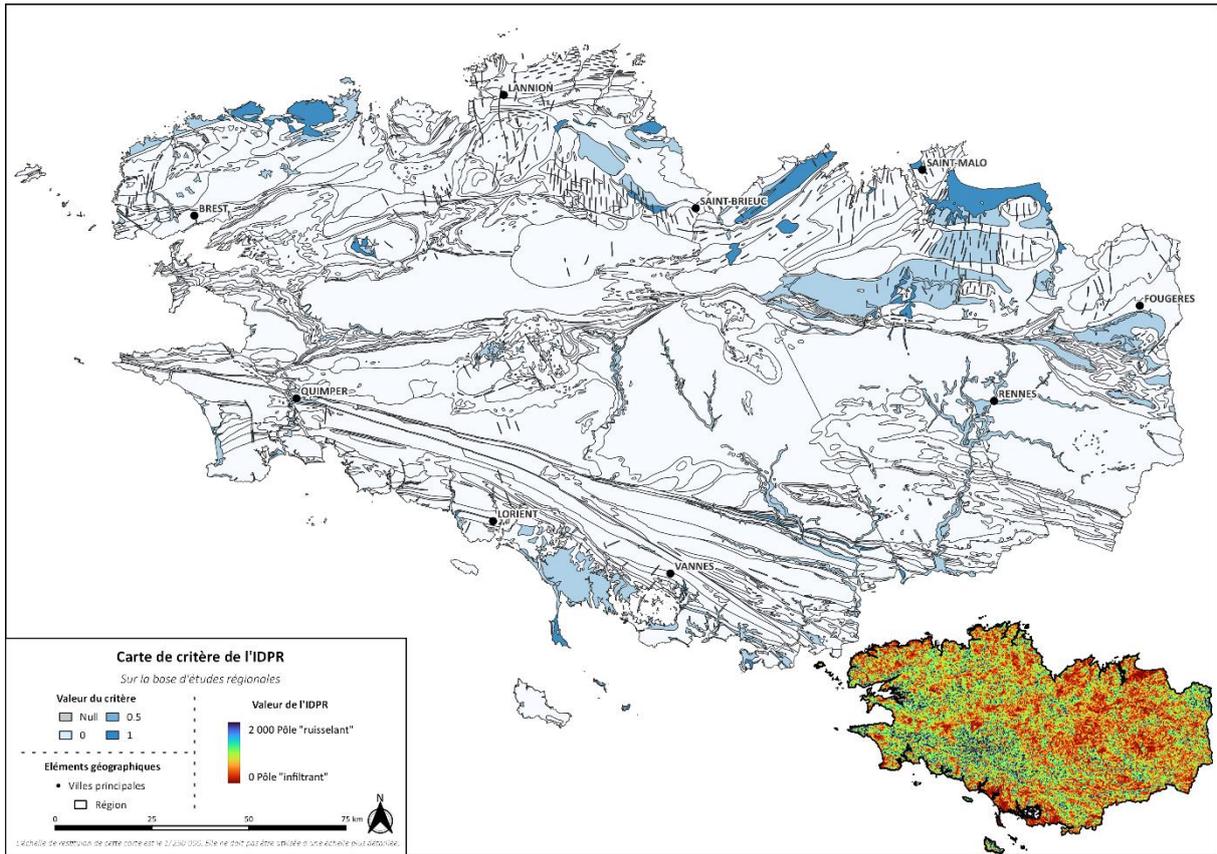


Illustration 142 : Carte de critère de l'IDPR.

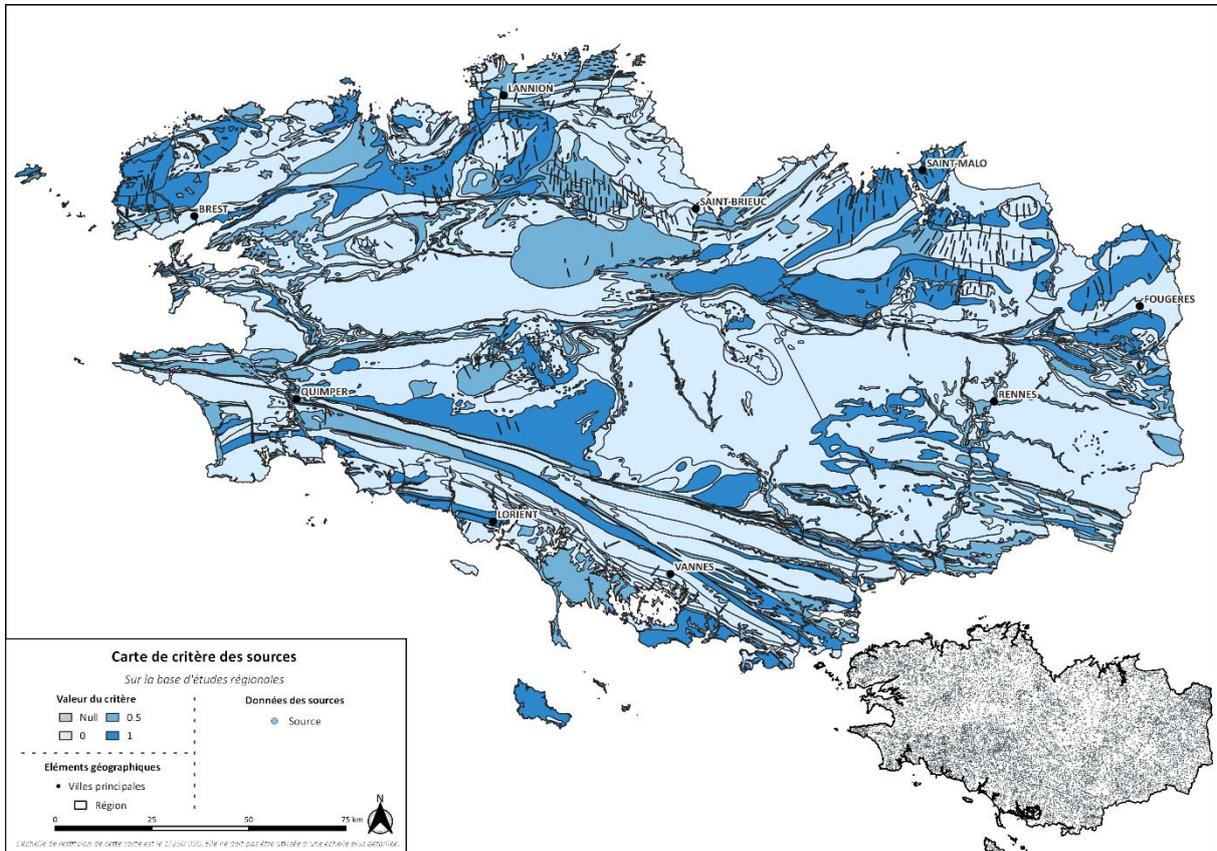


Illustration 143 : Carte de critère des sources.

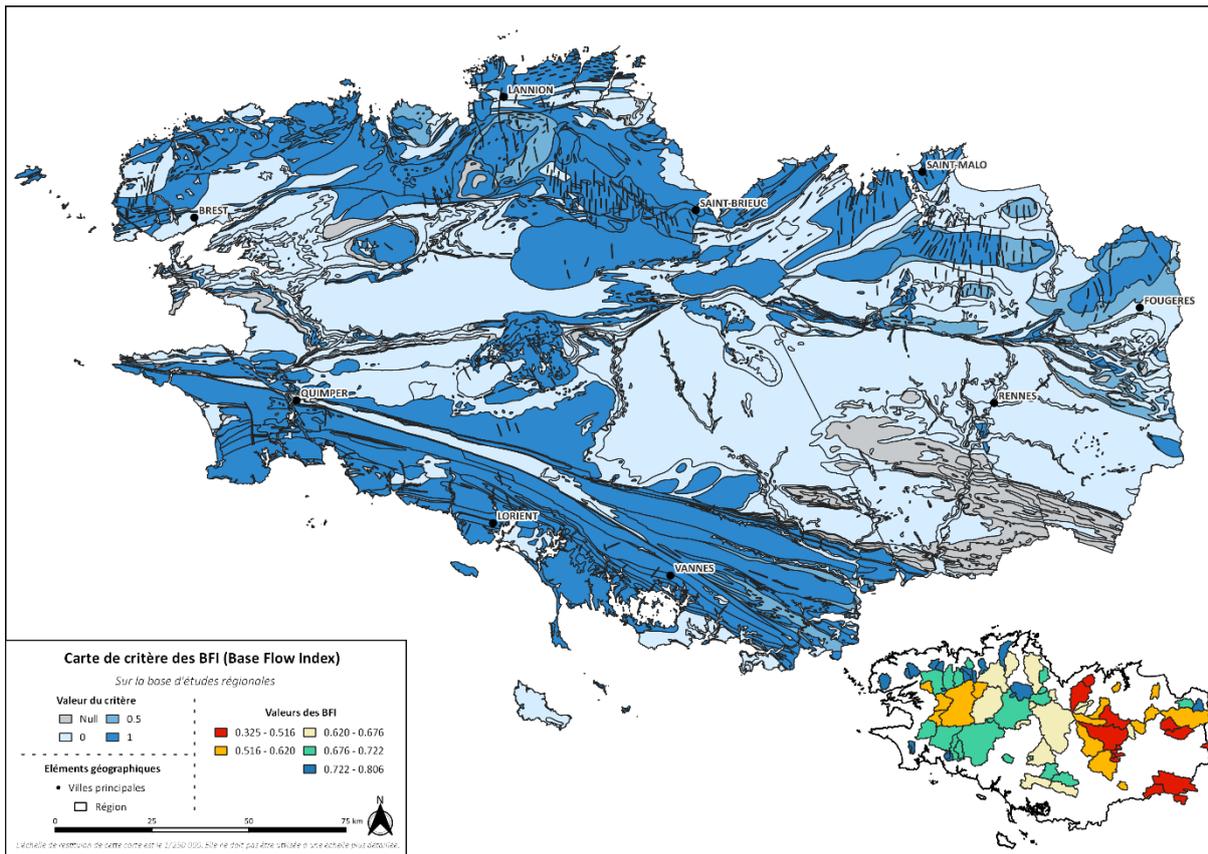


Illustration 144 : Carte de critère des BFI (Base Flow Index).

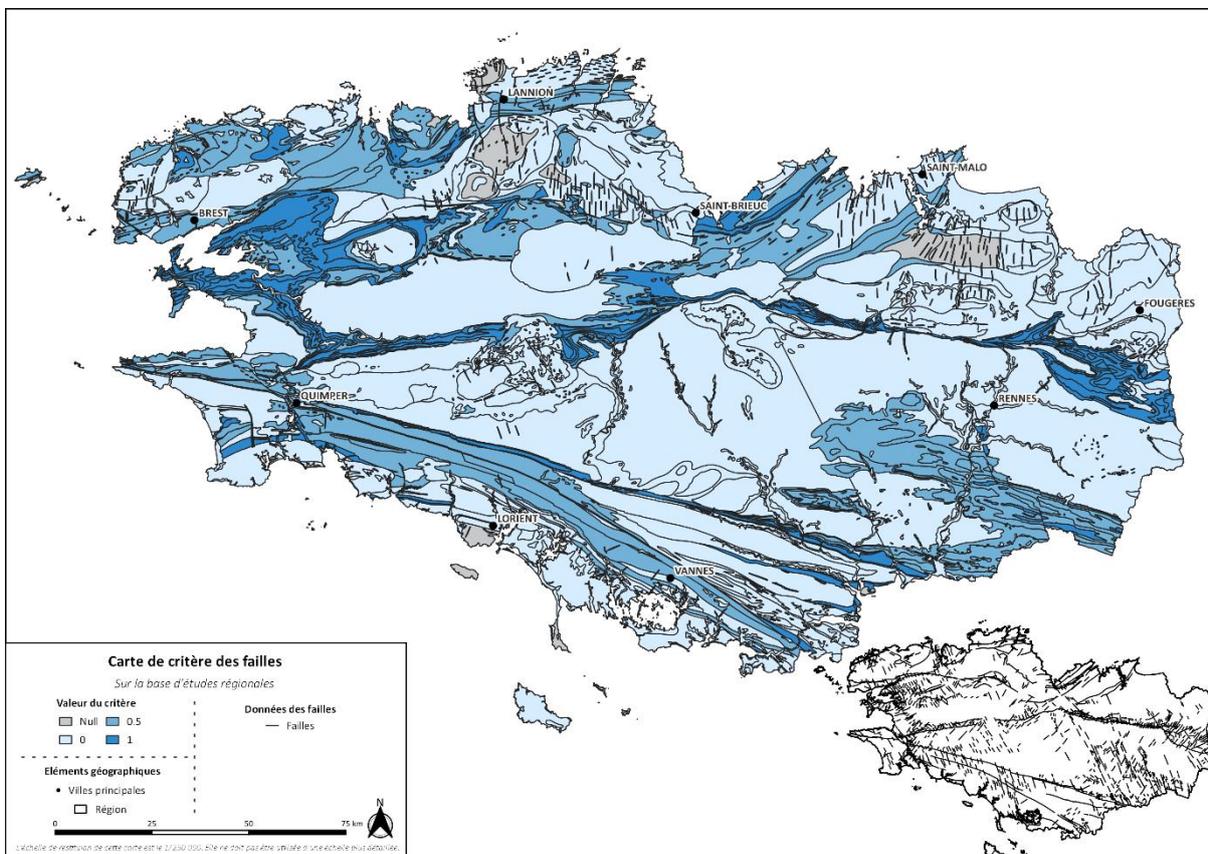


Illustration 145: Carte de critère des failles.

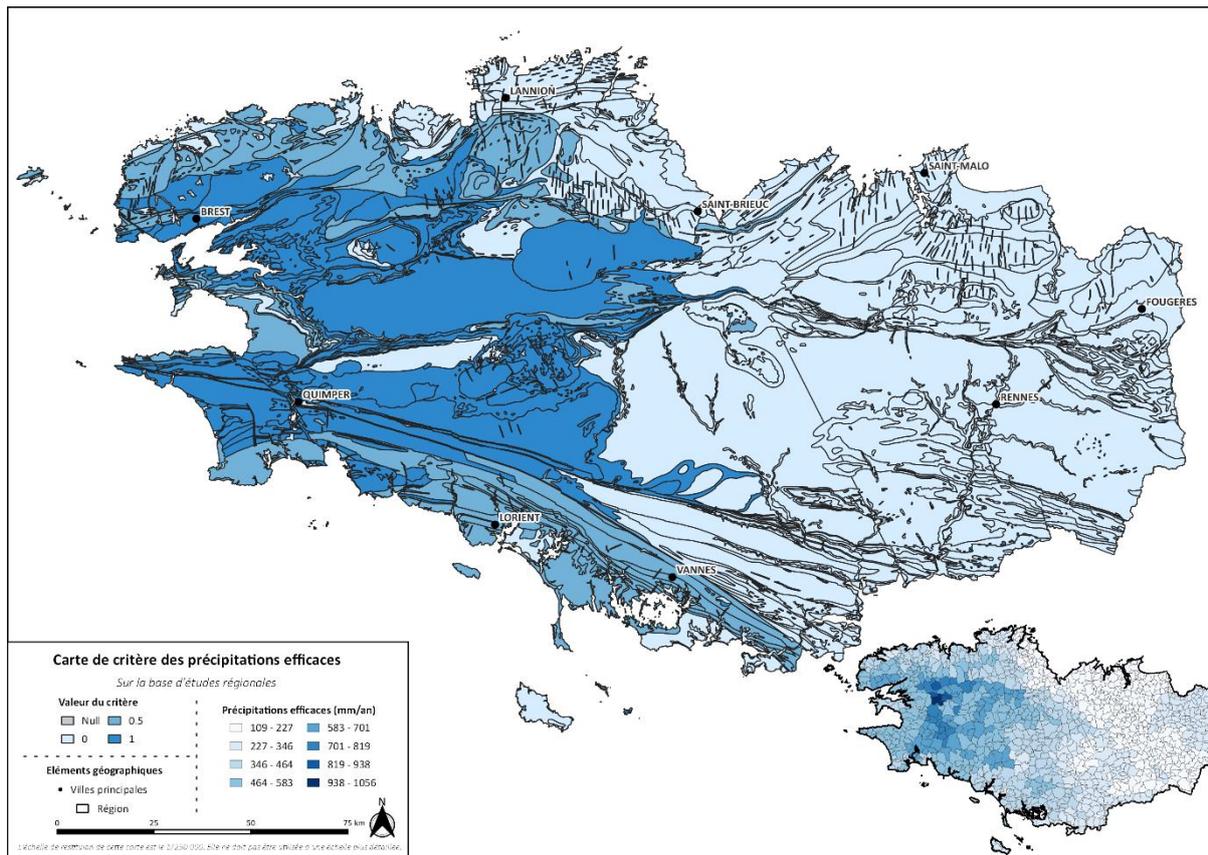


Illustration 146 : Carte de critères des précipitations efficaces.

Annexe 4

Tendances d'évolution des cours d'eau en fonction de la lithologie et de l'âge des formations

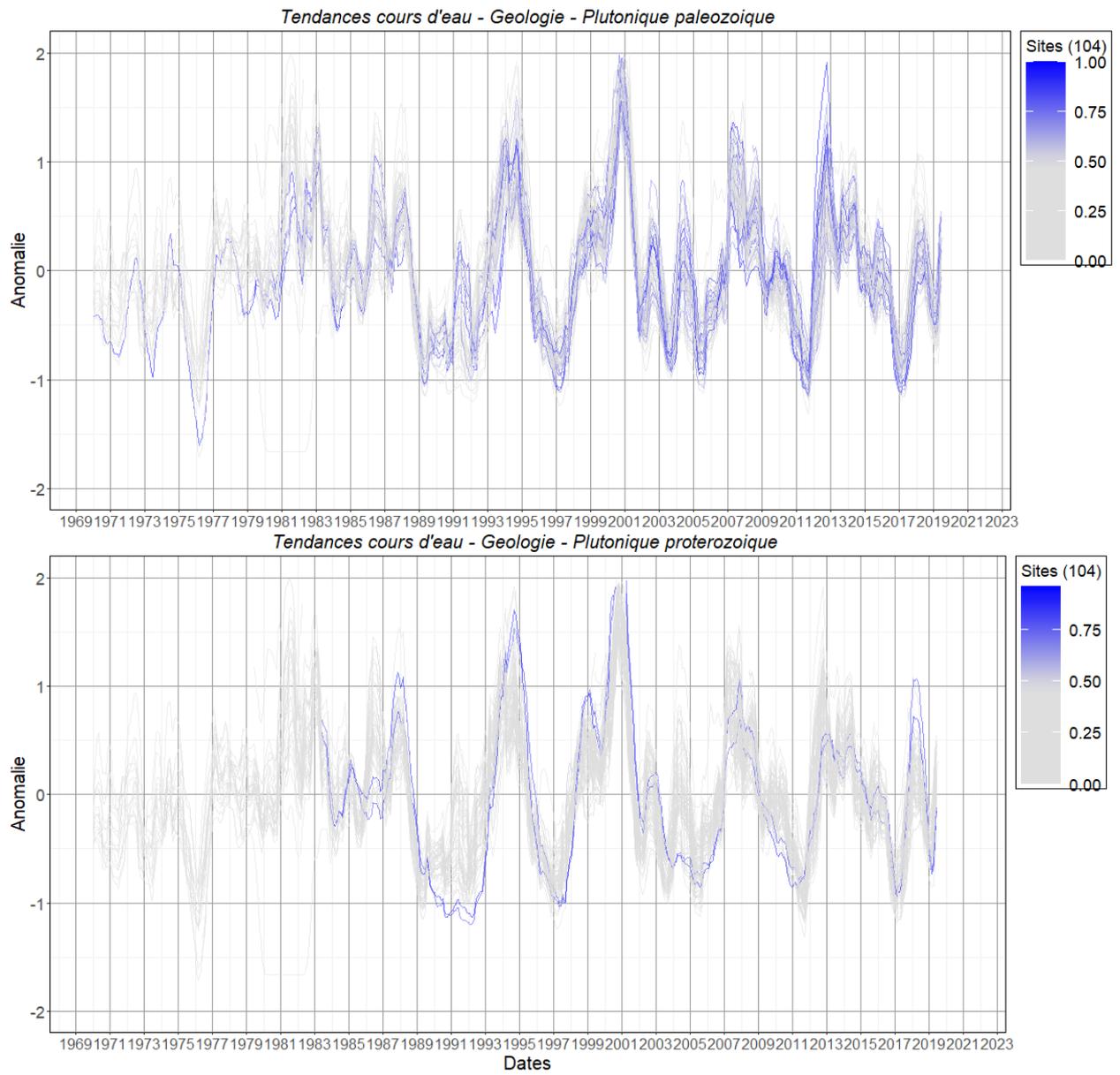


Illustration 147 : Écarts aux normales par âge des formations plutoniques

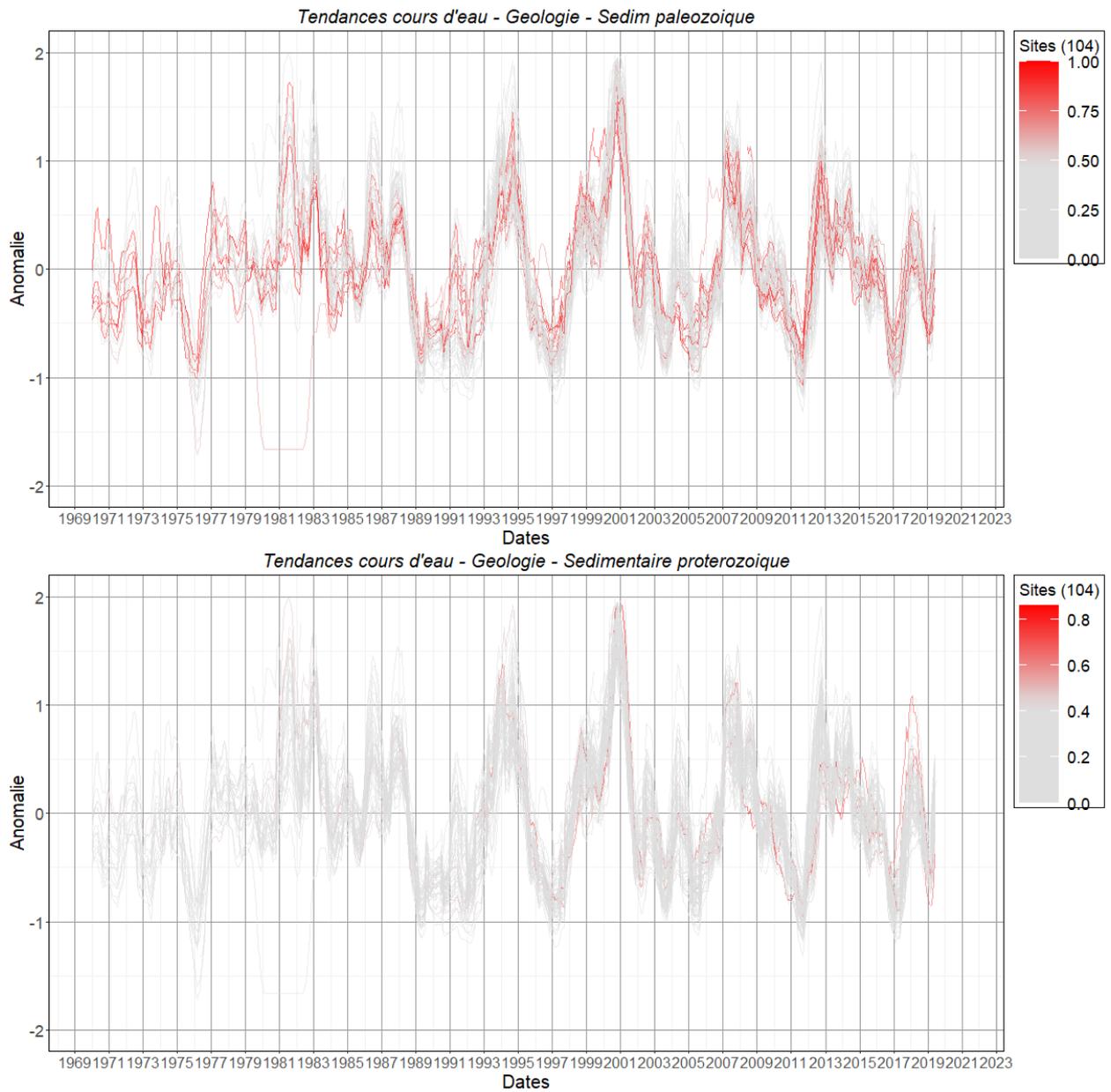


Illustration 148 : Écarts aux normales par âge des formations métasédimentaires

Annexe 5

Analyses des données de production sur les autres Communautés de Communes (Complément du chapitre 4)

Cas de Crozon – Lien entre production des ressources et disponibilité

Pour prendre en compte les baisses de productivité saisonnière, les capacités de production sont évaluées aux travers des productions passées sur la Communauté de communes (CC) Presqu'île de Crozon-Aulne maritime. La CC possède les sites suivants :

- le site de Kernagoff qui est composé de 6 puits et d'un forage plus profond ;
- le site de Poraon qui est une prise d'eau superficielle ;
- 3 autres sites de faible capacité. Aucune donnée n'est disponible sur ces 3 autres sites où des puits sont utilisés (à l'exception du DUP [Déclaration d'utilité publique] de 400 m³/j)

Évolution annuelle moyenne de la production à Kernagoff et Poraon

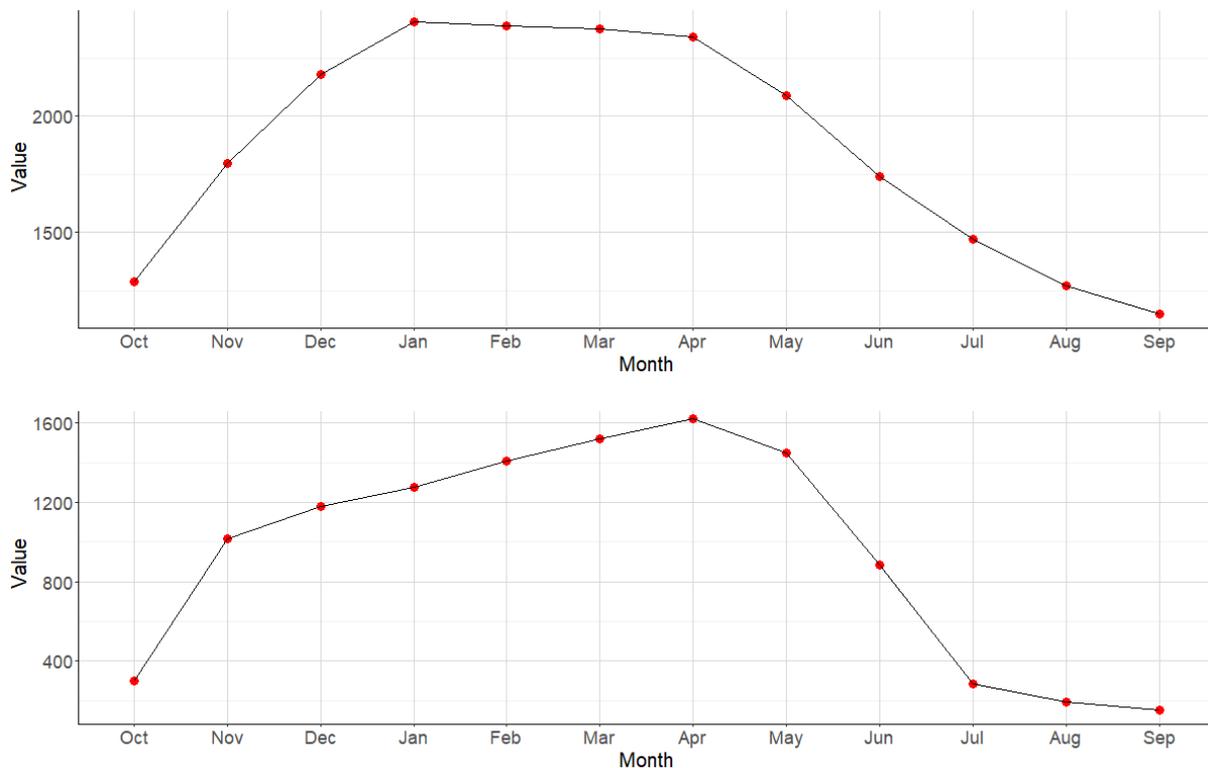


Illustration 149 : Moyenne journalière mensuelle de production (m³/j) des deux principaux sites de la CC, Kernagoff en haut et Poraon en bas.

La production des deux principaux sites de la CC de Crozon connaît de fortes baisses durant les mois de l'été.

Sensibilité de la production aux variations climatiques

Les anomalies par rapport à la normale de la production sur le site de Kernagoff suivent les anomalies par rapport à la normale de la pluviométrie et celles des variations du débit de cours d'eau. La production sur le site de Poraon a une dynamique différente (Illustration 150).

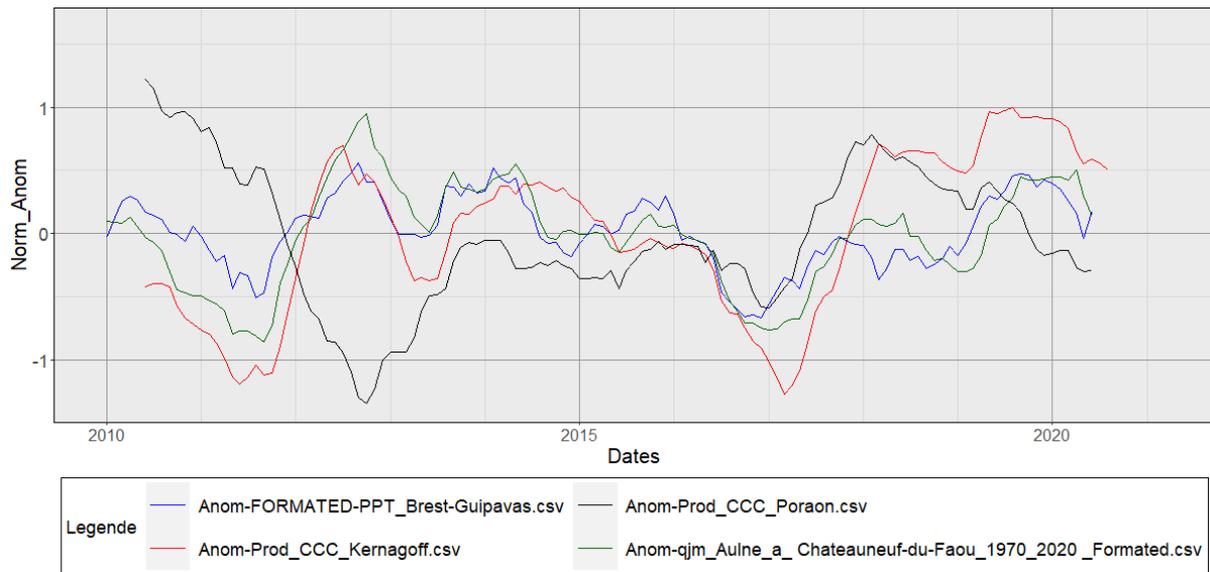


Illustration 150 : Ecarts par rapport aux normales mensuelles des précipitations à Brest, production à Kernagoff et Poraon et débit de l'Aulne à Châteauneuf du Faou.

Production en cas de sécheresses

Sur les figures suivantes, les niveaux de gris représentent du plus foncé au plus clair les 25-75 percentiles, 5-95 percentiles, les minima et maxima. La courbe bleue représente la moyenne et la rouge la médiane. La courbe verte indique l'année sélectionnée. Les interprétations sont focalisées sur la période juillet-septembre.

Sur la période considérée 2010-2020, les deux sécheresses les plus importantes sont celles des années 2011 et 2017. La production des deux sites pour ces deux années est comparée au niveau du piézomètre BRGM de Landrévarzec. Ces années représentent les deux années de production les plus faibles sur le site de Kernagoff et les deux années des niveaux les plus bas sur le piézomètre de Landrévarzec sur la période considérée. En revanche, sur le site de Poraon les productions sont supérieures à la médiane et la moyenne en été.

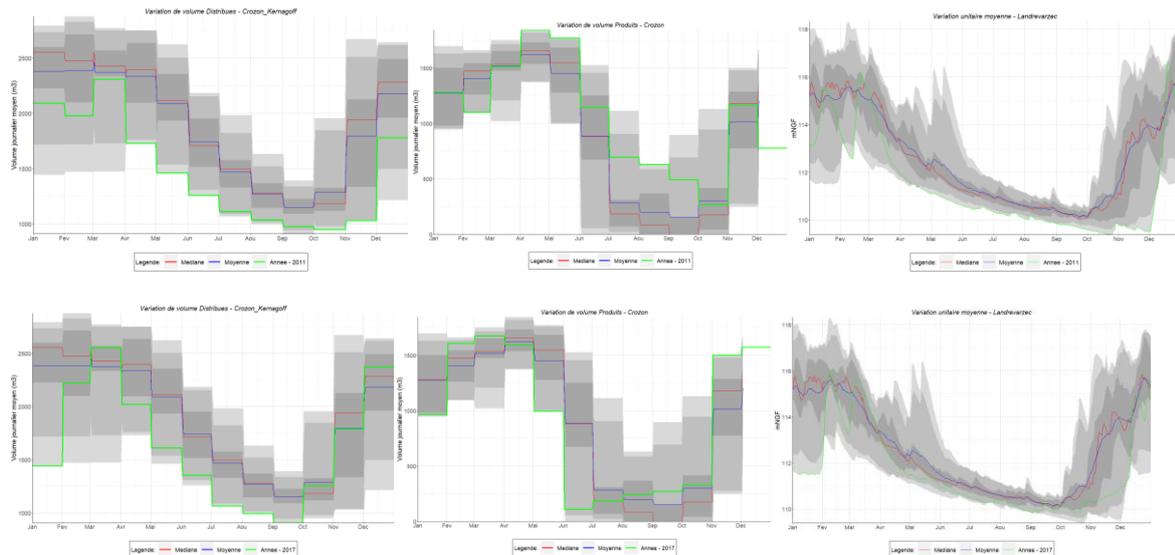


Illustration 151 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour les années 2011 (en haut) et 2017 (en bas).

Production lors d'années pluvieuses

L'été 2012 a été celui où les niveaux piézométriques ont été les plus importants sur la période documentée. Il correspond à la production la plus importante sur le site de Kernagoff. Le site de Poraon n'a pas été sollicité pendant l'été en 2012.

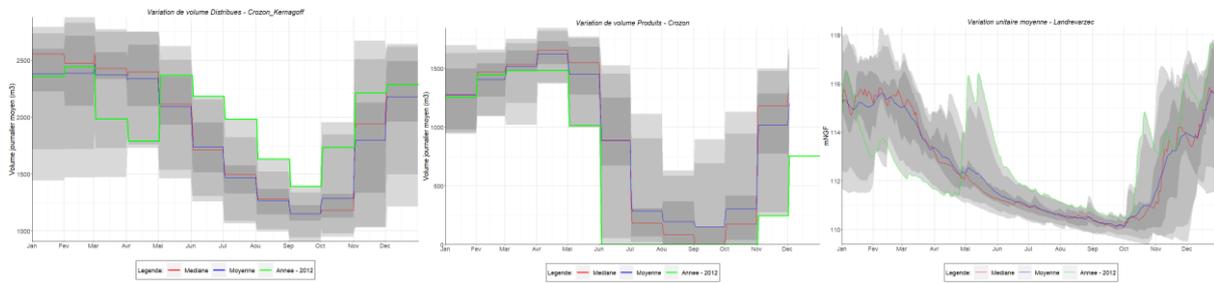


Illustration 152 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour l'année 2012

Production lors d'années moyennes

L'année où les niveaux d'eau sont les plus proches de la moyenne est l'année 2015. La production à Kernagoff est aussi proche de la moyenne et la production estivale de Poraon est proche de zéro.

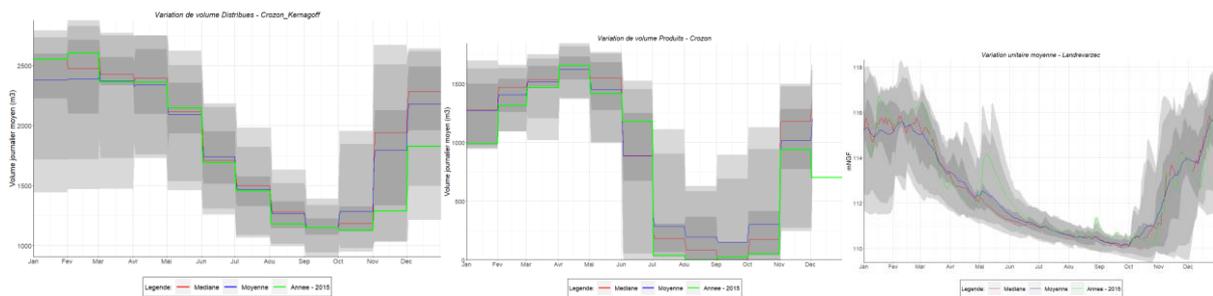


Illustration 153 : Variabilité de la production sur les sites de Kernagoff (à gauche), Poraon (au centre) et niveau piézométrique à Landrévarzec pour l'année 2015

Annexe 6

Analyse de tendances à l'échelle du site d'exploitation – Exemple de l'Aff (56)

Introduction

La méthode d'analyse d'évolution des tendances a été appliquée sur le site de l'Aff à la limite entre les départements d'Ille-et-Vilaine (35) et du Morbihan (56). Les objectifs de l'analyse à l'échelle du site étaient les suivants :

- tester la capacité de la méthode à indiquer un changement de tendance pouvant être lié à des activités anthropiques, telles que l'exploitation de forages pour l'eau potable à proximité d'une rivière ;
- évaluer l'impact des variations climatiques sur un champ captant AEP composé de plusieurs forages ;
- évaluer les répercussions des variables climatiques à l'échelle de forages individuels d'un champ captant.

Le choix de ce site a été conditionné par la qualité des données disponibles, notamment des chroniques de niveaux piézométriques et de prélèvements en eau souterraine à l'échelle de chaque ouvrage sur près de 10 ans. De plus, la réalisation récente d'une étude hydrogéologique complète (Mougin *et al.*, 2022) menée sur le site permet de compléter l'interprétation des observations réalisées sur les chroniques. Le site d'exploitation est situé dans les schistes briovériens recouverts des siltites rouges et grès verts de la formation de Pont-Réan. Trois forages sont exploités en bordure de la rivière de l'Aff. Les données utilisées sont présentées ci-dessous (Illustration 154). Les données météorologiques sont fournies par Météo France, hydrologiques par la DREAL et piézométriques par le BRGM.

Point de mesure	Nom	Type	Période
Station météorologique	Mauron (56127001)	Precipitations	2014-2019
Station météorologique	Mauron (56127001)	Evapotranspiration	2014-2019
Station hydrologique	Quelneuc (J8632410)	Débit	1969-2021
Station hydrologique	Pont aux secrets (J8602410)	Débit	1969-2021
Forage exploité	FE3	Volumes prélevés journaliers	2012-2021
Forage exploité	FE3	Niveau piézométrique maximum journalier	2012-2021
Forage exploité	FE3	Niveau piézométrique minimum journalier	2012-2021
Forage exploité	FE4	Volumes prélevés journaliers	2012-2021
Forage exploité	FE4	Niveau piézométrique maximum journalier	2012-2021
Forage exploité	FE4	Niveau piézométrique minimum journalier	2012-2021
Forage exploité	FE7	Volumes prélevés journaliers	2012-2021
Forage exploité	FE7	Niveau piézométrique maximum journalier	2012-2021
Forage exploité	FE7	Niveau piézométrique minimum journalier	2012-2021
Piézomètre	Paimpont (BSS000ZLVF)	Niveau piézométrique journalier	2006-2021

Illustration 154 : Données utilisées pour l'analyse d'évolution des tendances sur le site de l'Aff

CAPACITE D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DE POMPAGES RÉALISÉS À COTÉ D'UN COURS D'EAU

Le débit de l'Aff est suivi par deux stations hydrologiques, l'une située en aval direct du site AEP de pompage des eaux souterraines (Paimpont Pont du Secret– station J8602410 – BV 30,2 km² – station J8602410) et la seconde nettement plus en aval (Quelneuc - station J8632410 - BV de 334 km²). La comparaison des tendances sur les deux chroniques montre que les cycles sont très similaires pour ces deux stations (Illustration 155).

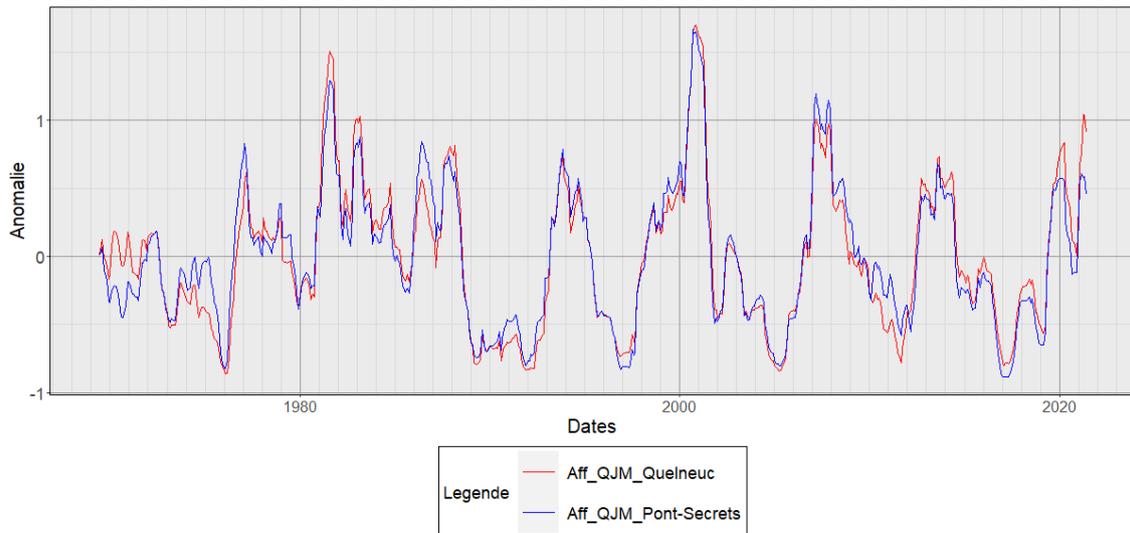


Illustration 155 : Anomalie de débits journaliers aux stations de mesures de l’Aff

Cependant, un zoom sur la période 2000-2021 montre que si les anomalies à la station amont (Paimpont Pont du Secret) étaient confondues, voir supérieures avec celle de la station aval entre 2000 et 2011, depuis 2012, année de la mise en pompage du site, celles-ci deviennent inférieures tel que présenté sur la figure suivante.

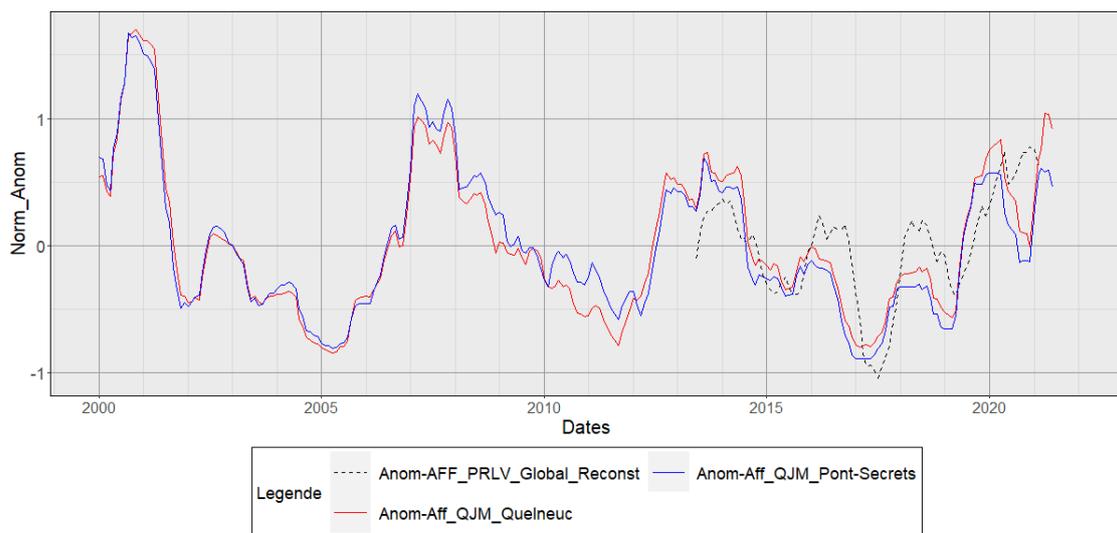


Illustration 156 : Anomalie de débits journaliers aux stations de mesures de l’Aff et de prélèvements sur le site – Période 2000-2021 – la courbe en pointillés représente l’évolution des prélèvements sur le site d’exploitation

La correspondance entre les anomalies à chacune des stations, fournie en Illustration 157, montre que depuis 2012, les anomalies au Pont du secret sont systématiquement inférieures à celle de Quelneuc ce qui avait été le cas précédemment par le passé (Illustration 155 et Illustration 157) mais pas de manière aussi systématique et prolongé dans le temps. Ceci peut être un indicateur de l’impact des pompages sur le débit du cours d’eau. Toutefois d’autres facteurs ont pu influencé l’évolution de ce signal. Avant la mise en place des forages de l’Aff, l’armée ; qui occupe un terrain à proximité, avait des prélèvements dans la rivière au lieu-dit la Fosse Noire située à 2 km en aval de la station du Pont aux Secrets. De plus, l’étang des forges assurait le soutien d’étiage de l’Aff en période de basses eaux. Il n’est donc pas possible d’avoir des conclusions sur l’impact de ces pompages sur le long terme sur le débit du cours d’eau de l’Aff à partir de cette seule analyse.

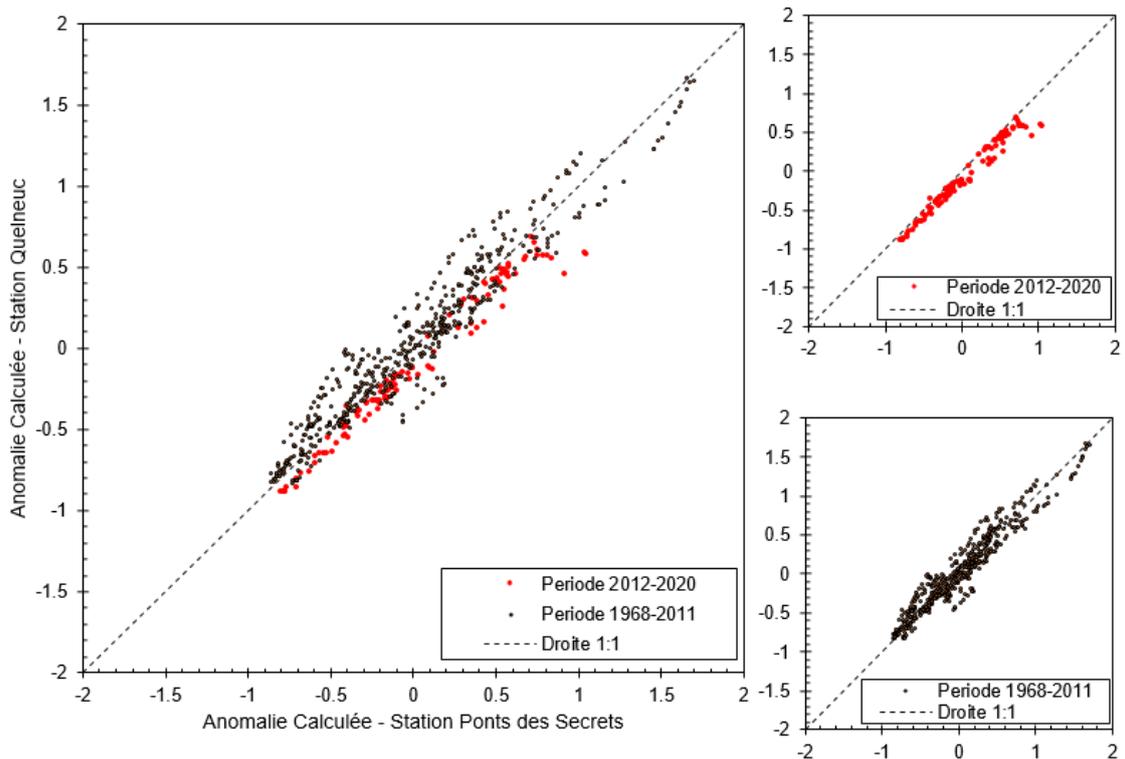


Illustration 157 : Corrélation entre anomalies des deux stations de mesure hydrologique de l’Aff. Encart principal avec l’ensemble des valeurs. Sur la droite en rouge : période 2012-2020 isolée ; en noir : période 1968-2011 isolée

IMPACT DES VARIATIONS CLIMATIQUES SUR L’EXPLOITATION DE LA RESSOURCE ET SUR LE COURS D’EAU

La comparaison des anomalies pour les précipitations, le débit de l’Aff, le niveau piézométrique à Paimpont et les prélèvements est fournie ci-dessous (Illustration 158). Toutes ces anomalies montrent des cycles similaires avec des décalages temporels.

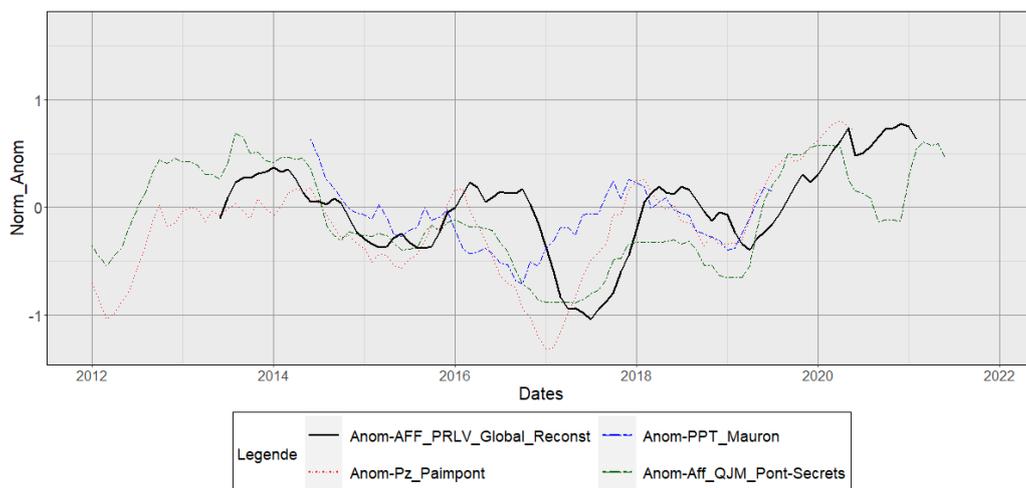


Illustration 158 : Anomalies de prélèvements, de précipitations, niveau piézométrique à Paimpont, débit de l’Aff au Pont du secret

Le calcul des corrélations croisées montre une corrélation (0,49) entre précipitations et prélèvements avec un décalage temporel de 10 mois (le signal précipitations étant en avance par rapport au signal prélèvements).

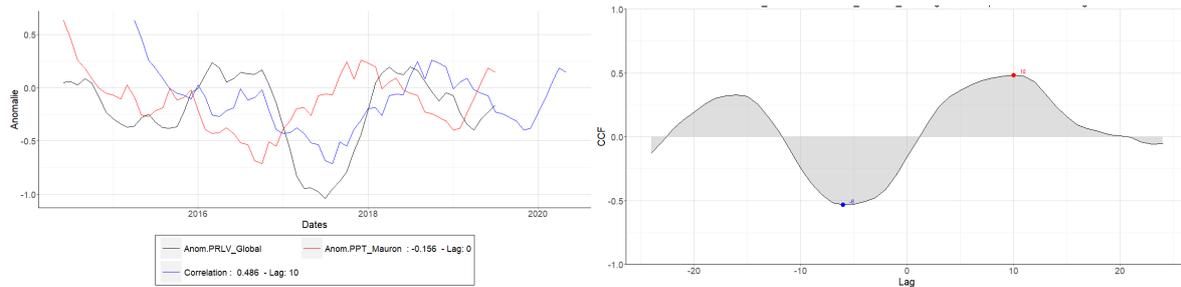


Illustration 159 : Corrélations entre anomalies de précipitation et variations de prélèvements

La corrélation entre prélèvements et débits de l’Aff est maximum (0,73) avec un décalage temporel de 3 mois (le signal débits étant en avance par rapport au signal prélèvements).

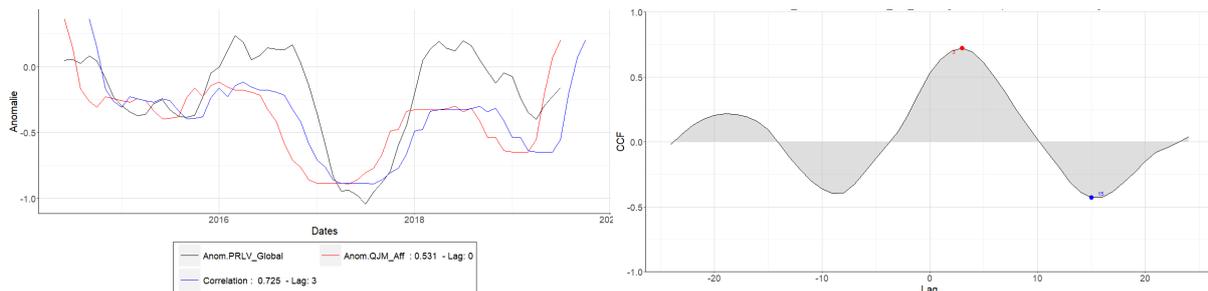


Illustration 160 : Corrélations entre anomalies de débit de l’Aff au Pont du Secret et variations de prélèvements

Une baisse des précipitations se répercute sur le débit de l’Aff avant d’entraîner une baisse des prélèvements. Cette baisse de production n’est ici certainement pas liée à une diminution des capacités de production de l’aquifère, celui-ci étant très capacitif (Mougin *et al.*, 2022), mais plutôt à des mécanismes de gestion ; la baisse existe aussi en raison du risque d’assec de l’Aff et donc les débits des pompages sont limités par l’exploitant en période de sécheresse.

COMPORTEMENT AUX FORAGES SUR LE CHAMP CAPTANT

Les prélèvements et variations de niveaux de nappe ont été détaillées à l’échelle de l’ouvrage sur chacun des 3 forages AEP. Si les prélèvements à l’échelle du site semblent s’adapter aux variations climatiques par l’intermédiaire d’un contrôle de la production globale, les prélèvements à l’échelle de l’ouvrage sont plus aléatoires indiquant des règles de gestions propres à chaque forage (Illustration 161). Pour chacun des 3 ouvrages, les prélèvements globaux sont comparés aux prélèvements locaux et aux niveaux minimums et maximums en exploitation (Illustration 162, Illustration 163, Illustration 164). Les dynamiques des prélèvements sur FE3 et FE7 sont proches de l’exploitation globale mais les variations de FE4 sont nettement moindres. Sur la période considérée les productions journalières moyennes sont d’environ : FE3 = 500 m³/j, FE4 = 418 m³/j et FE7 = 540 m³/j. Malgré des débits de pompage relativement similaires, des différences sur les dynamiques des niveaux min et max sont observables. Les niveaux pour FE3 suivent la dynamique des prélèvements alors que pour FE4 et FE7 une baisse est observable entre 2013 et 2017 avant une relative stabilisation. La baisse globale et individuelle des prélèvements couplée à une remontée des précipitations depuis 2017 induit une remontée de ces niveaux piézométriques. Cette dynamique différente entre niveaux piézométriques et pompages montre une plus grande inertie des forages FE4 et FE7.

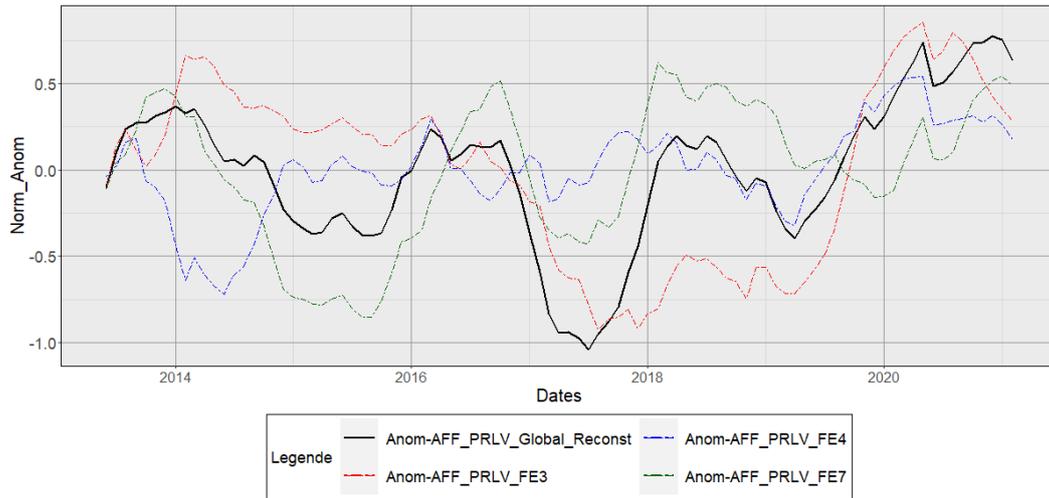


Illustration 161 : Anomalies de prélèvement à l'échelle du site et pour chacun des forages pris individuellement

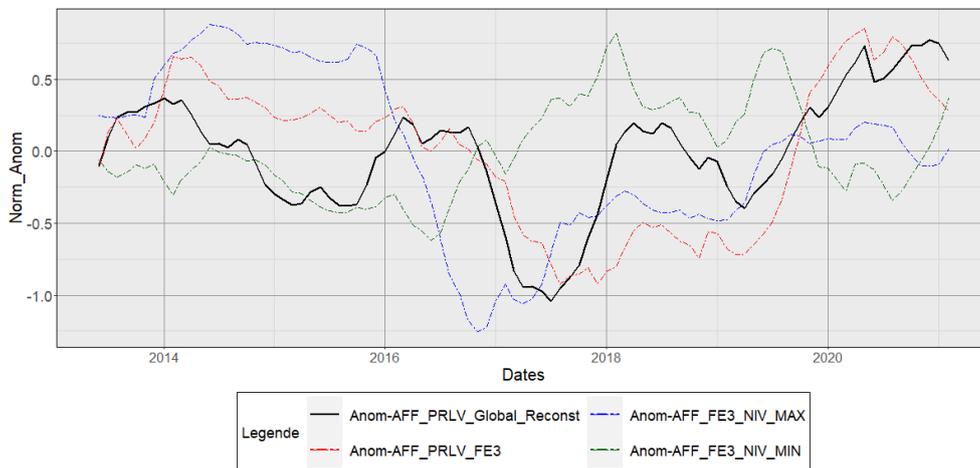


Illustration 162 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE3 et évolution des niveaux maxima et minima.

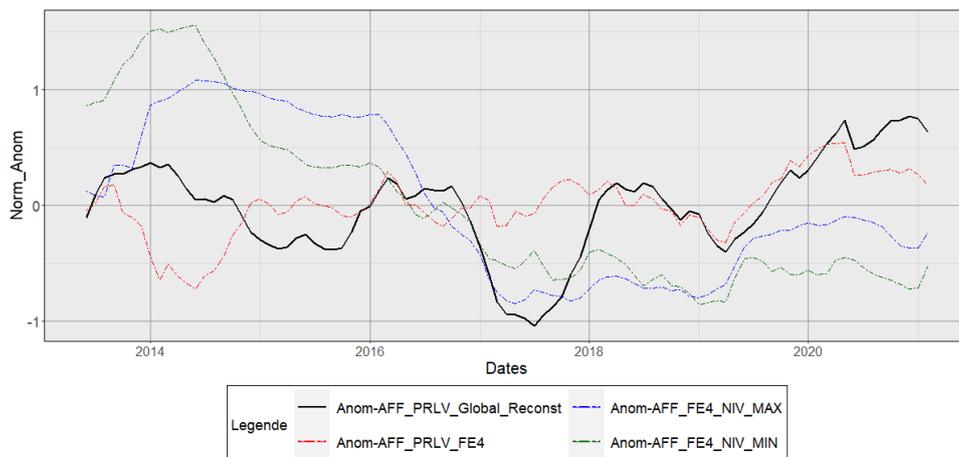


Illustration 163 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE4 et évolution des niveaux maxima et minima.

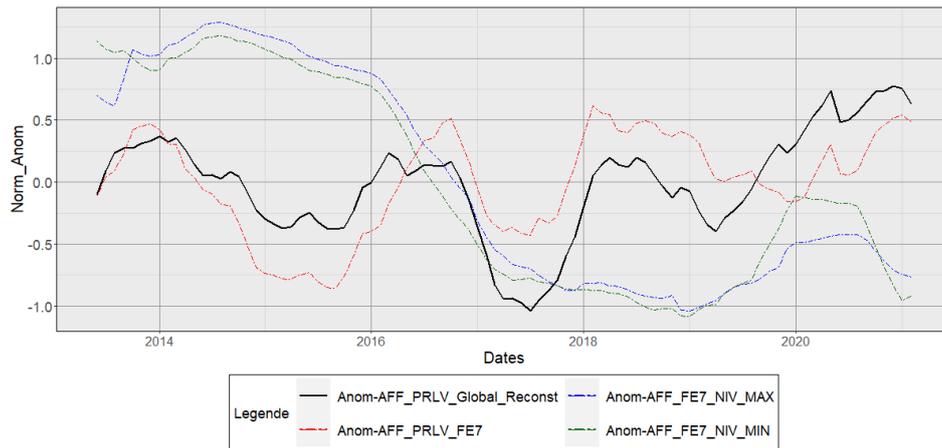


Illustration 164 : Anomalies de prélèvements à l'échelle du site de l'ouvrage FE7 et évolution des niveaux maxima et minima.

CONCLUSION

La méthode utilisée peut être un indicateur de l'impact des pompages d'eau souterraine sur un cours d'eau voisin. Toutefois, seule, cette analyse ne permet pas de tirer des conclusions directes sur l'impact des prélèvements et est extrêmement liée au positionnement des stations hydrologiques.

L'analyse permet aussi de montrer la dépendance d'un champ captant aux variations climatiques, avec dans le cas présent une baisse des prélèvements suite à une baisse des précipitations et des débits en rivière. Toutefois, cette baisse n'est pas liée à une défaillance de la ressource mais plutôt à une façon de gérer les prélèvements (baisse en été) afin de limiter l'impact sur la rivière en période d'étiage. La connexion entre nappe et rivière a été démontrée dans l'étude Mougin *et al.*, 2022. Bien que cette baisse des prélèvements ne soit pas majoritairement liée à des contraintes physiques, elle est représentative de la baisse de production des forages liée au climat dans les conditions et avec les règles de gestions actuelles. Ces règles de gestion sont à prendre en compte pour une analyse de la production AEP à une échelle plus globale (ex : départementale ou régionale).

L'analyse menée à l'échelle des ouvrages permet de voir que les débits prélevés sur les différents ouvrages sont liés à des problématiques d'exploitation et que seule la production globale est en lien avec les variations climatiques. Toutefois, cela permet aussi de noter une tendance à la baisse des niveaux sur deux des trois ouvrages (FE4 et FE7) depuis 2013 et que ceux-ci ont une inertie importante.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

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

Direction régionale Bretagne

2, rue de Jouanet
35700 – Rennes2 – France
Tél. : 02 99 84 26 70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm