

Rapport de stage de fin d'étude

Diagnostic de la ressource en eau superficielle sur le territoire du SAGE Arguenon-Baie de la Fresnaye

Julien LEMONCHOIS

MASTER Sciences de l'eau

Parcours Hydro3

Maître de stage : Bastien CAVILLA, Chargé de mission Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI)

Enseignante référente : Virginie VERGNAUD, Ingénieure de recherche en hydrogéologie, Chargée de valorisation plateforme CONDATE eau



Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Bastien CAVILLA qui m'a beaucoup aidé tout au long de ce stage à travers le partage de son expertise au quotidien, et pour toutes les connaissances qu'il m'a permis d'acquérir. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement en entreprise, mais aussi la confiance et l'autonomie qu'il m'a offert pendant ce stage. De même, je tiens à remercier Michel RAFFRAY président du SMAP, Marie Christine TOQUET directrice du SMAP et tous les collègues du syndicat mixte Arguenon Penthièvre pour leurs accueils chaleureux au sein de l'entreprise et pour tous les moments de bonne humeur et de détente partagé ensemble.

Merci à Virginie VERGNAUD d'avoir accepté d'être mon enseignante référente et d'avoir répondu à mes questions. Merci à Christophe CUDENNEC d'avoir pris le temps de nous envoyer de la bibliographie à propos de SIMFEN.

Je remercie Olivier Nauleau de la DREAL pour m'avoir fourni les données de débit, mais également d'avoir répondu à mes questions aux sujets du calcul et du choix des indicateurs les plus pertinents.

Je tiens également à remercier Louis AMIOT d'avoir répondu à mes questions et de m'avoir guidé pour l'analyse des données climatiques.

Par ailleurs et pour finir, je tiens à remercier tout le corps enseignant du Master HYDRO3 de l'Université de Rennes 1 Beaulieu, pour la formation que j'ai reçue au cours de ces deux années ainsi que pour leur motivation et leur plaisir d'enseigner.

Table des matières

I)	Contexte de l'étude	3
II)	Méthodes	6
	2.1.1) Données climatiques	6
	2.1.2) Données hydrologiques	7
	2.2) Traitements préliminaires des données.....	9
	2.3) Calcul des indicateurs	9
	2.3.1) Indicateurs climatologiques.....	9
	2.3.2) Indicateurs hydrologiques	9
	2.4) Calcul du débit de base	10
	2.5) Couplage des données de débits et de précipitations.....	11
	2.5.1) Méthode des polygones de Thiessen.....	11
	2.5.2) Calcul du coefficient d'écoulement.....	12
	2.5.3) Calcul du coefficient de tarissement	12
	2.6) Exploitation et traitement statistique des données.....	14
III)	Evolution climatique	15
	3.1) Variabilité spatiale de la pluviométrie.....	15
	3.2) Observation des tendances sur les séries historiques de précipitations	23
	3.3) Evolution des cumuls saisonniers à horizon moyen (2031-2060).....	26
	3.4) Evolution des températures	27
	3.5) Evolution de l'évapotranspiration	28
IV)	Evolution hydrologique.....	30
	4.1) Arguenon	31
	4.2) Rosette	35
	4.3) Quilloury.....	36
	4.4) Frémur	37
	4.5) Le Standardized Precipitation Index (SPI)	37
	4.6) Coefficient d'écoulement	39
	4.7) Coefficient de tarissement	40
V)	Discussion des résultats.....	41
	5.1) Limites	42
VI)	Conclusion.....	44
VII)	Bibliographie.....	46
VIII)	Annexe.....	49

1) Contexte de l'étude

La question de la ressource en eau se pose depuis longtemps (Larras, 1972), mais elle est devenue depuis plusieurs années une grande préoccupation que ce soit pour les chercheurs ou pour les gestionnaires du domaine de l'eau. De nombreuses études sur cette question existent sur les régions arides et semi-arides (Hubert et al., 2003; Hallouz et al., 2013). Mais actuellement, ces mêmes problèmes sont rencontrés dans différents types de climat comme le climat océanique de la Bretagne. La question de la gestion quantitative commence donc à émerger en Bretagne. Les acteurs du domaine de l'eau, jusqu'alors essentiellement concentrés sur sa qualité, souhaitent désormais s'emparer de cette question. L'année 2017 a marqué un tournant à cet égard, avec des inquiétudes fortes suscitées par une faible disponibilité de la ressource en eau. Cette année difficile a provoqué de nombreuses interrogations sur la gestion quantitative, en particulier devant l'éventualité probable d'une succession d'années de ce type. Cette prise de conscience peut être constatée à travers l'ensemble des études en cours ou en projet sur la question de l'eau. En effet, différentes études sur l'aspect quantitatif de cette ressource ont été lancées afin de savoir si celles-ci sont suffisantes pour subvenir aux besoins locaux notamment dans le cadre de la mise en œuvre de SAGE (Orsoni, 2012), ou encore l'instruction du 7 mai 2019 relative au projet territorial pour la gestion de l'eau (PTGE) (Le Begueg, 2019). Les études HMUC (Hydrologie - Milieux - Usages - Climat) spécificité de l'Agence de l'eau Loire Bretagne, sont en pleine expansion sur le territoire du SDAGE. Ce type d'étude a pour principaux objectifs d'affiner les connaissances sur l'adéquation besoin-ressource, mais également d'estimer les tendances d'évolution climatique, démographique et économique afin d'adapter au mieux la gestion des ressources tout en respectant les milieux aquatiques.

Le contexte actuel de changement climatique laisse supposer une variation de la ressource en eau. En effet, l'augmentation de concentration de gaz à effet de serre entraîne une augmentation du piégeage du rayonnement infrarouge par l'atmosphère, et alors une augmentation de l'énergie disponible (forçage radiatif). Cette hausse favorise l'évaporation et la transpiration des plantes. Ainsi, un changement climatique va impacter l'hydrosphère donc la disponibilité en eau (Field et al, 2014). Une hausse des températures entraîne plus d'évaporation et une capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau. Held et Soden ont montré que pour une hausse de température de 1°C, l'air peut contenir 7% de vapeur d'eau en plus (Held et Soden, 2006), ce qui signifie qu'un air plus humide favorise les précipitations. Donc, en théorie, une hausse des températures provoque une augmentation des pluies. Mais la réalité est bien plus complexe, car une multitude de paramètres influence la pluviométrie.

Le bassin versant de l'Arguenon présente un enjeu quantitatif important du fait de la présence du barrage de la Ville Hatté servant à prélever 11,5 millions de m³ d'eau par an pour l'alimentation en eau potable d'une partie des Côtes d'Armor. Cette gestion de la ressource doit être équilibrée et permettre le bon fonctionnement des milieux aquatiques et satisfaire l'ensemble des usages. A ceci, s'ajoutent les effets plus ou moins significatifs du changement climatique sur la ressource en eau.

L'objectif de cette étude est d'observer l'évolution de la ressource en eau sur le territoire du SAGE Arguenon-Baie de la Fresnaye (figure 1) en lien avec le changement climatique.

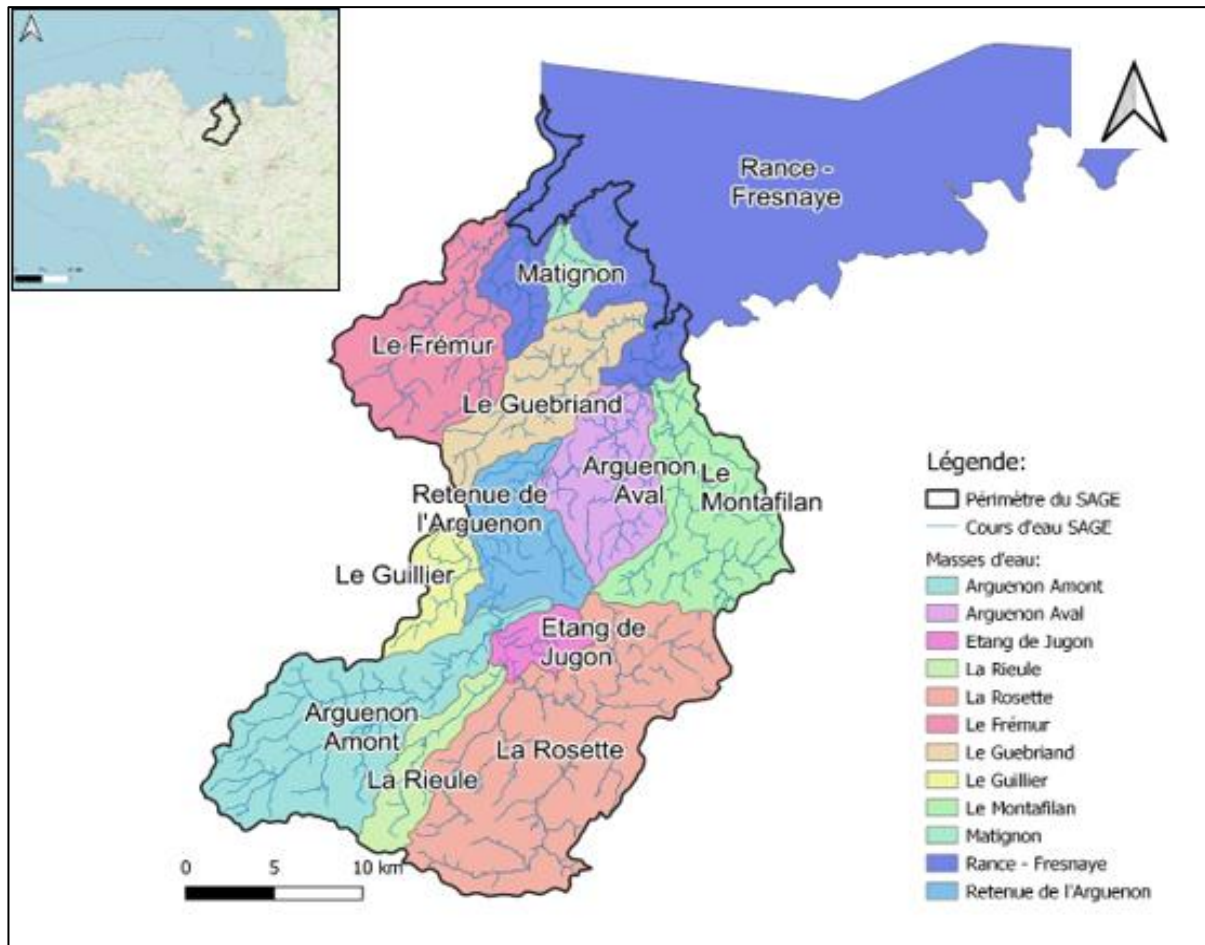


Figure 1 : Périmètre et localisation des masses d'eau du SAGE

Le SAGE couvre une superficie totale de 728 km², dont les principales masses d'eau sont l'Arguenon, la Rosette, le Montafilan, le Guébriand et le Frémur.

Ainsi, cela va permettre de mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant et ses ressources en eau et de savoir si ces dernières ont été modifiées au cours du temps. Ces résultats permettront de définir si l'inquiétude générale par rapport aux périodes d'étiage est justifiée ou si la période actuelle n'est pas significativement différente du passé (début des années 70). Des hypothèses quant aux raisons des possibles changements seront émises. Par ailleurs, cela servira à confirmer à l'aide de tests statistiques le ressenti des gestionnaires sur la modification de la ressource en eau, ainsi que de fournir des pistes de réflexion sur une éventuelle étude HMUC (Hydrologie - Milieux - Usages - Climat) par la suite.

En Bretagne, environ 26 milliards de m³ de pluie tombent chaque année sur la région (Observatoire de l'eau en Bretagne). Une majorité de ces précipitations sont renvoyées à l'atmosphère par évapotranspiration. Le reste, appelé pluie efficace est stockée dans les eaux superficielles et le sous-sol.

Le sol breton est assez peu perméable avec une roche dure et imperméable (figure 2), ce qui limite les infiltrations (Savelli, 2016). Il y a donc une forte corrélation entre la pluie et le débit sur la région.

A l'échelle du territoire l'Arguenon et son principal affluent la Rosette sont deux fleuves côtiers des Côtes d'Armor. Ils traversent principalement les deux unités géologiques du domaine Cadomien normano-breton que sont : l'unité de Fougères au Sud et l'unité de St Malo au Nord. Ces cours d'eau prennent leurs sources au Nord du cisaillement Nord Armoricaïn souligné par la présence de roches sédimentaires (Schistes, grès et quartzite) très fortement fracturées. Le Frémur coule majoritairement sur l'unité de Saint Malo et possède des caractéristiques hydrogéologiques assez proches de l'Arguenon et la Rosette.

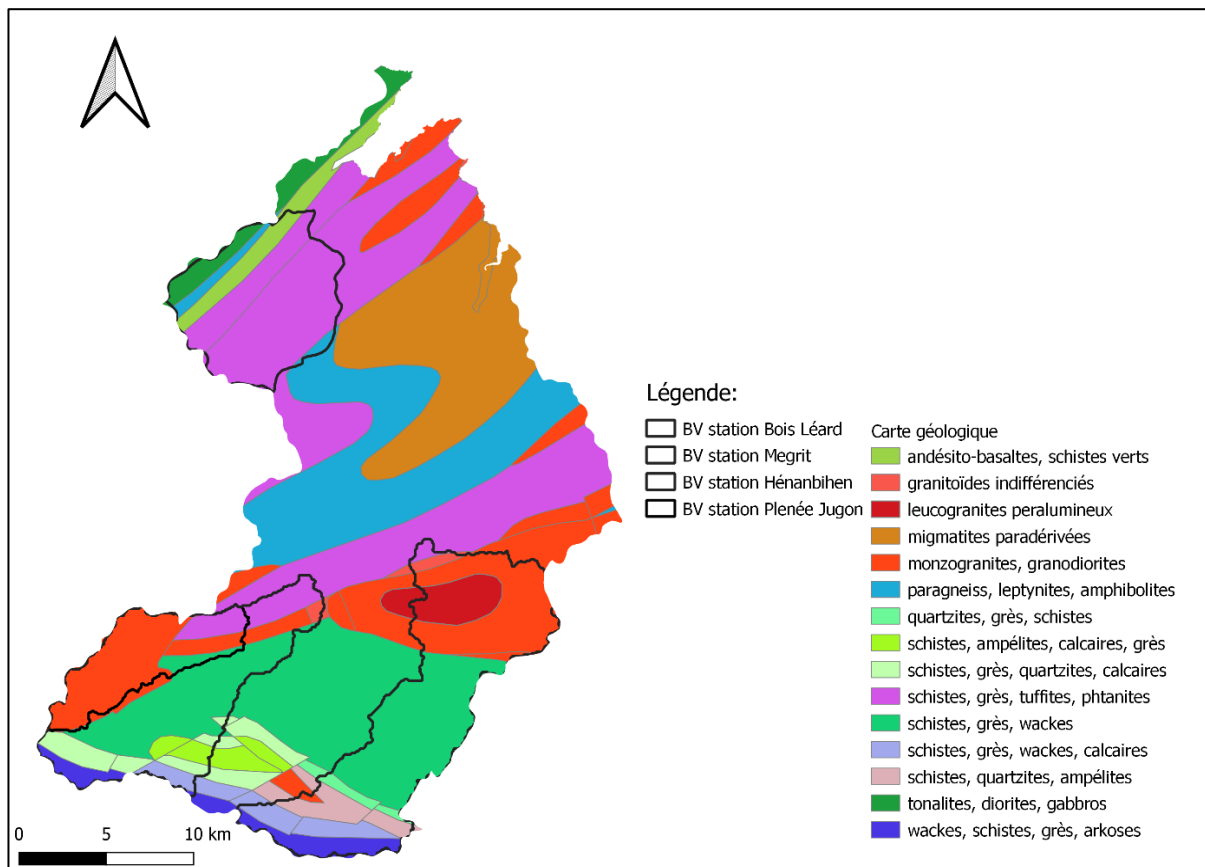


Figure 2 : Carte géologique du territoire du SAGE

L'unité de Fougères est composée de schistes gréseux du Briovérien plus ou moins altérés et métamorphisés en bordure des granites intrusifs hercyniens.

L'unité de Saint Malo est composée de roches métamorphiques telles que des gneiss et des migmatites.

Ces formations, dites de socle contiennent une nappe dans deux niveaux superposés et connectés : les altérites et la roche fissurée. Ils sont interdépendants, mais ils n'ont pas les mêmes caractéristiques hydrodynamiques : la roche altérée est plutôt argileuse et capacitive et l'horizon fissuré est plus transmissif (BD Lisa).

Il y a ainsi près de 30 000 km de cours d'eau, avec beaucoup de petits cours d'eau très réactifs à la pluviométrie. Sachant que 80 % de l'eau potable est prélevée dans ces eaux superficielles en Bretagne (ARS 2017), l'estimation de l'évolution de la pluviométrie est donc nécessaire pour évaluer la quantité d'eau disponible.

II) Méthodes

2.1.1) Données climatiques

Plusieurs stations météorologiques mesurant les données climatiques existent sur le territoire du SAGE. Ces stations constituent les sources des séries de données, il est donc essentiel d'avoir des séries homogènes et sans données manquantes pour considérer la série comme étant fiable (Bigot, 2002). Les données de précipitations à un pas de temps journalier ont été achetées à Météo France. Seules ces données ont été achetées, car sur le territoire, il n'y a pas de séries de données d'ETP assez longues. Ce paramètre étant mesuré seulement depuis 2004, cela ne permet pas de dégager de possibles tendances.

Le choix des stations est fait en fonction de la longueur de la série de données, la localisation sur le territoire (amont - aval), et l'homogénéité statistique des données (pas de manques dans la série de données). Les données de 5 stations (tableau 1) ont alors été achetées, puisqu'elles respectent les 3 conditions citées ci-dessus :

Localisation	Altitude	Description	Type
Collinée (1976-1996) Collinée (1997-2020)	233 m 201 m	Tête de bassin versant	Type 3 (Station automatique, acquisition temps réel, expertise temps différé (à M+21 jours maxi))
Lanrelas (1974-1996) Lanrelas (1997-2020)	112 m 92 m	Tête de bassin versant	Type 3 (Station automatique, acquisition temps réel, expertise temps différé (à M+21 jours maxi))
Languedias (1980-2020)	85 m	Bassin versant intermédiaire	Type 4 (Poste climatologique manuel ou station automatique, acquisition temps différé, expertise temps différé)
Quintenec (1984-2020)	84 m	Bassin versant intermédiaire	Type 1 (Station automatique Radome-Resome, acquisition temps réel, expertise à J+1)

Saint Cast le Guildo (1960-2020)	35 m	Aval bassin versant	Type 1 (Station automatique Radome- Resome, acquisition temps réel, expertise à J+1)
---	------	------------------------	---

Tableau 1 : Description des stations météorologiques

Concernant la température, les analyses réalisées sur la Rance (Amiot, 2019) sont généralisables sur le territoire du SAGE étant donné la proximité géographique et la similarité topographique, c'est pour cette raison que les données de température n'ont pas été achetées.

2.1.2) Données hydrologiques

Les données de débits à pas de temps journalier sont mesurées au niveau des stations de jaugeage à partir des hauteurs d'eau par le biais des courbes de tarage (Harrelson et al. 1994). Ces données sont représentatives du bassin versant en amont de la station qui représente alors l'exutoire. Dans cette étude, les débits moyens journaliers ont été récupérés auprès de la DREAL Bretagne (Banque HYDRO) et utilisés pour répondre à la problématique posée. 6 stations de jaugeages se situent sur le territoire du SAGE (figure 3) et recueillent des données depuis un certain nombre d'années :

- 1 station sur l'Arguenon à Jugon les Lacs (1972-2021)
- 1 station sur l'Arguenon à Jugon-les-Lacs à l'entrée de la retenue (2015-2021)
- 1 station sur l'Arguenon à Pléven à la sortie du barrage de La Ville Hatte (non disponible)
- 1 station sur la Rosette à Mégrit (1975-2021)
- 1 station sur le Quilloury à Plénée Jugon (2000-2021)
- 1 station sur Le Frémur à Hénanbihen au Pont de Montbran (2010-2021)

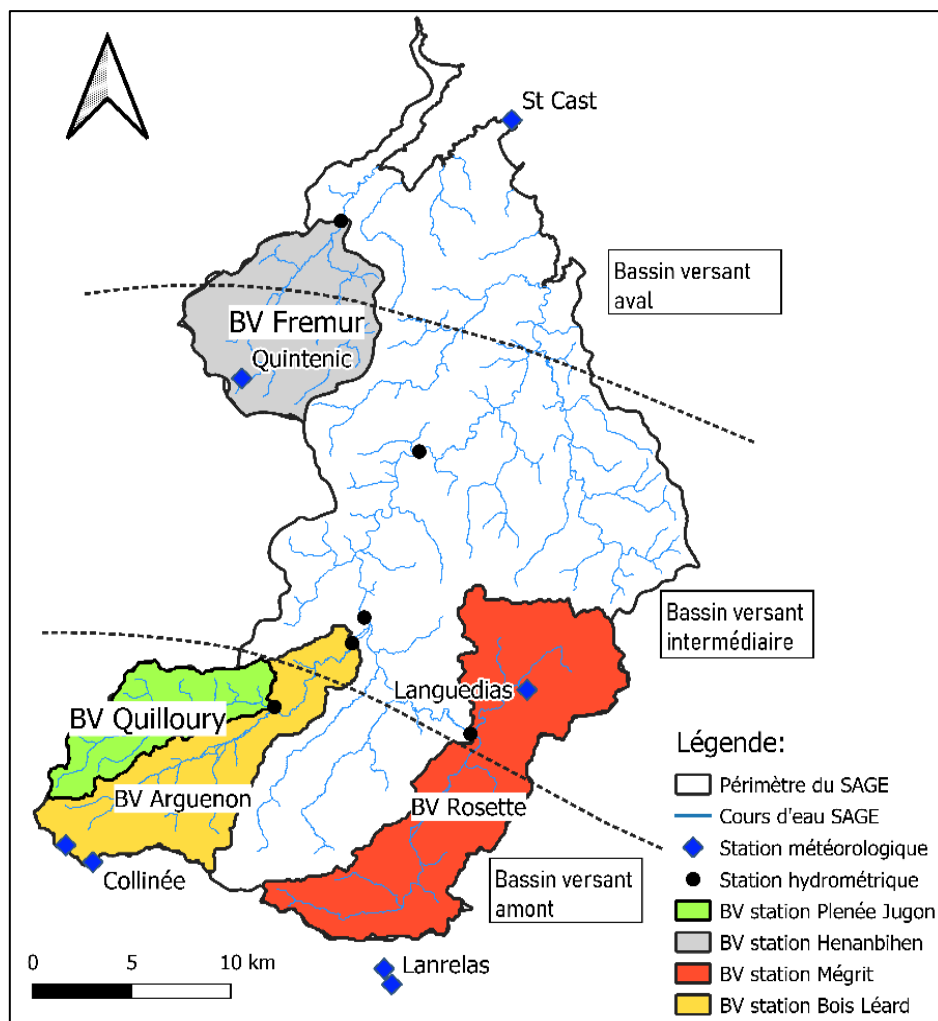


Figure 3 : Localisation des stations hydrométriques et météorologiques

Parmi ces 6 stations, seulement 4 sont exploitées, les 2 stations sur l'Arguenon à l'entrée et à la sortie de la retenue ne sont pas conservées. Ces 2 dernières n'étant pas pertinentes puisqu'elles sont impactées par le barrage, de plus, la fiabilité des mesures à l'étiage n'est pas bonne étant donné que ce sont des stations à cordes.

Ces stations de jaugeages permettent de définir des bassins versant en amont de ces dernières (figure 3) :

- Bassin versant du Frémur amont (68 km²)
- Bassin versant du Quilloury (37 km²)
- Bassin versant de la Rosette amont (114 km²)
- Bassin versant de l'Arguenon amont (104 km²)

2.2) Traitements préliminaires des données

Après récupération, les données de précipitations et de débits ont été analysées et vérifiées afin de détecter d'éventuelles données manquantes et/ou aberrantes.

Toutes les données de débit sont exploitées même les valeurs estimées ou jugées incertaines. Ces valeurs de débits incertaines sont principalement liées aux épisodes de crues, or les données qui nous intéressent le plus sont celles durant la saison d'étiage. La fiabilité des résultats obtenus est par conséquent peu impactée par ces valeurs de débits estimés.

2.3) Calcul des indicateurs

2.3.1) Indicateurs climatologiques

Les cumuls de précipitations sont séparés selon le « type de pluie » qui permet d'avoir une quantification de l'apport pluviométrique selon l'intensité des pluies. Concrètement, le cumul mensuel est décomposé selon l'intensité des précipitations quotidiennes. Plusieurs classes sont créées : entre 0 et 5 mm / jour qui correspond à un jour de pluie faible, entre 5 et 10 mm/jour pour des pluies intermédiaires, entre 10 et 20 mm pour des pluies marquées, entre 20 et 50 mm pour des pluies fortes, enfin supérieures à 50 mm pour des pluies extrêmes. Avec cette décomposition par intensité des pluies, il est possible de calculer le cumul mensuel ou annuel par type de pluie, ou bien compter le nombre de jours de pluie selon le type de pluie. Cela permet de faire le parallèle entre nombre de jours de pluie et leurs importances dans le cumul total. Cette analyse est intéressante par rapport à notre problématique, parce qu'en Bretagne, le nombre de jours de pluie est important, mais c'est la pluie forte qui contribue à façonner le régime de recharge (Dubreuil et al. 1994, Amiot, 2019). Plusieurs indicateurs sont ainsi calculés :

- Cumul de précipitations mensuel, saisonnier et annuel
- Nombre de jours de pluie décomposé selon leurs intensités
- Nombre de jours sans pluie
- Cumul minimum et maximum sur 3,10 et 30 jours

2.3.2) Indicateurs hydrologiques

Pour chaque station, différents indicateurs sont calculés :

- Débit moyen mensuel, saisonnier (saison d'étiage et de recharge) et annuel
- Débit moyen minimum sur 10 jours et 30 jours consécutifs (VCN 10 et 30)
- Date de début du débit moyen minimum sur 10 jours et 30 jours consécutifs
- Nombre de jours inférieurs à certaines valeurs seuils (analyse DC 50, DC 80, DC 90, débits dépassés 50, 80 et 90% du temps), 10^{ème} de module)
- Débit minimum annuel
- Date du débit minimum annuel

- Débit de base mensuel, saisonnier et annuel

Le QMNA (débit mensuel minimal au cours d'une année civile) qui est un indicateur de base en hydrologie n'est pas utilisé ici, car cette valeur est limitée à un mois calendaire. Les VCN 10 et 30 sont considérés plus pertinents dans le cadre de cette étude, puisqu'ils s'affranchissent des limites calendaires et permettent une meilleure analyse de la sévérité des étiages (Verstrate et al., 2011).

2.4) Calcul du débit de base

L'objectif de cet algorithme est d'estimer le débit de base dans l'hydrogramme des débits journaliers (Giuntoli I. et al.2009). Il est calculé à l'aide de l'algorithme présenté par Tallaksen and Van Lanen (2004) :

- La série de débits journaliers est découpée en n blocs consécutifs (non recouvrant) de d jours.
- Les valeurs minimales dans chaque bloc sont calculées, et sont notées $Q_{min_1}, \dots, Q_{min_n}$
- Pour $k = 2, \dots, n-1$:
 - Si $w * Q_{min_k} < \min(Q_{min_{k-1}}, Q_{min_{k+1}})$, Q_{min_k} est considéré comme un point pivot.
- La série filtrée est finalement obtenue en interpolant linéairement entre les points pivots.

L'algorithme de calcul dépend de deux paramètres d et w , dont les valeurs ont été fixées à $d = 5$ jours et $w = 0.9$, comme recommandé par Tallaksen and Van Lanen.

La figure 4 illustre le ratio entre le débit de base et le débit total sur une série de débits journaliers. Le débit de base (en orange) correspond aux apports souterrains auxquels s'ajoute le débit issu du ruissellement rapide (en bleu). Le calcul du débit de base est très intéressant, le projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2004) a montré que durant la saison d'étiage il y a une influence prépondérante du réservoir souterrain inférieur (fracturé), par rapport au réservoir supérieur (altéré). De plus il est calculé que de juin à octobre plus de 96% de l'écoulement de l'Arguenon et de la Rosette provient de l'écoulement souterrain.

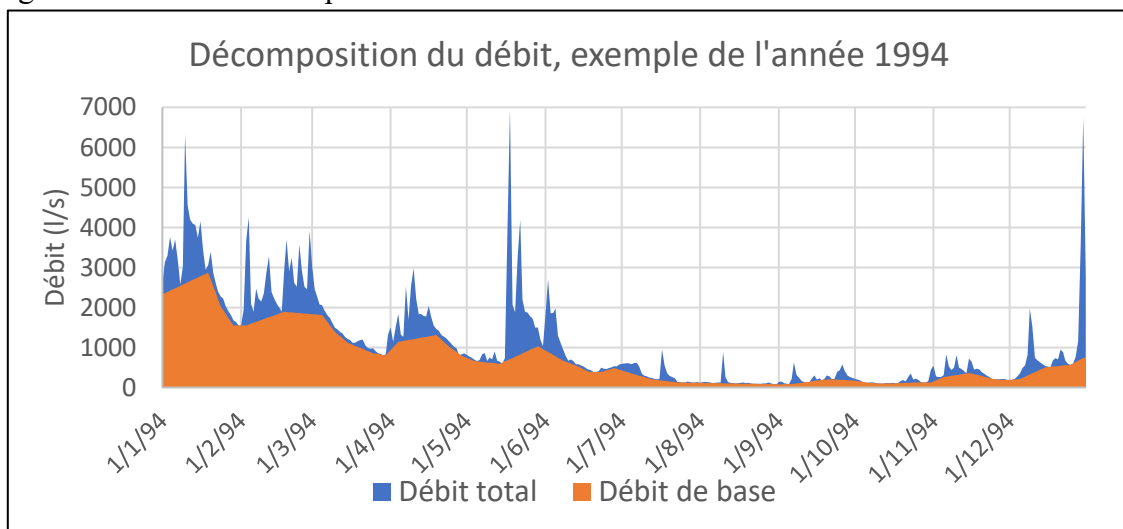


Figure 4 : Décomposition du débit durant l'année 1994

2.5) Couplage des données de débits et de précipitations

Dans cette partie, l'objectif est de combiner les données de précipitations et de débits afin d'observer si les précipitations sont les seules causes des changements sur les débits ou si d'autres facteurs influencent leur évolution.

2.5.1) Méthode des polygones de Thiessen

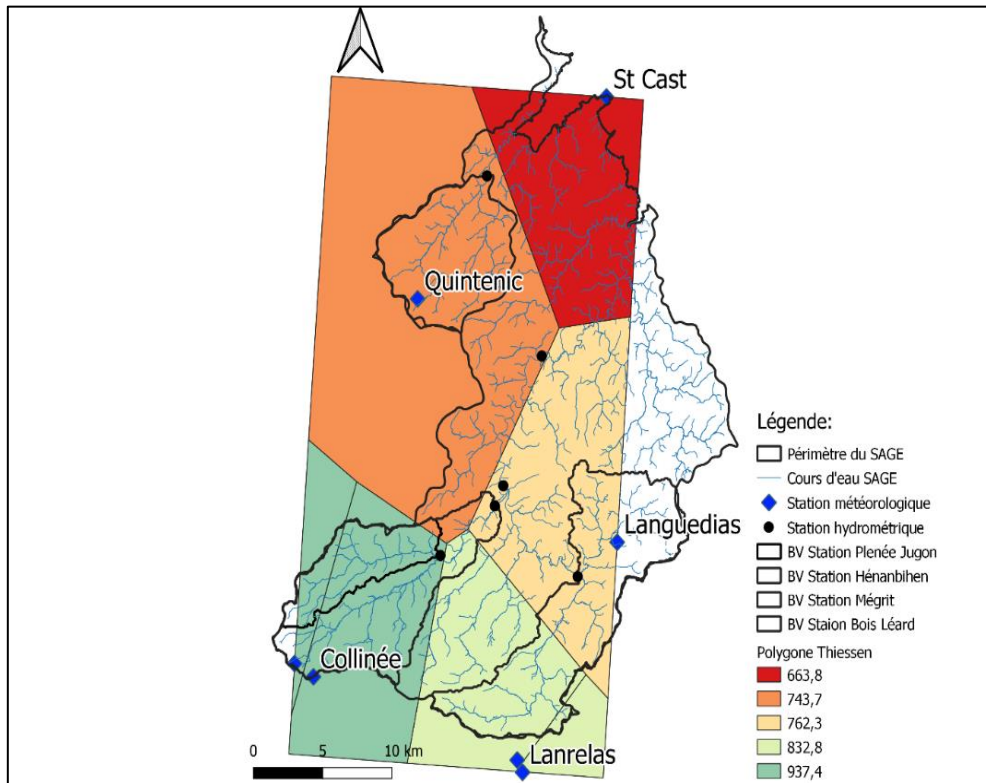


Figure 5 : Polygone de Thiessen

La contrainte majeure de cette deuxième partie vient du fait que la localisation des stations météorologiques diffère de l'emplacement des stations de jaugeage. Afin d'obtenir les données de précipitations au niveau de la station hydrométrique, la méthode des polygones de Thiessen (1911) est utilisée. Elle permet à partir des précipitations mesurées aux stations météorologiques (Collinée, Lanrelas, Quintenic, Languedias, St Cast) de calculer les précipitations aux stations de jaugeage du bassin (figure 5).

Une valeur de cumul de précipitations moyenne par année hydrologique est calculée pour chaque station météorologique puis appliquée à chaque polygone. Ainsi pour calculer la pluie d'un bassin ayant comme exutoire une station hydrométrique, le bassin doit être défini par le pourcentage « surfacique » de chaque polygone sur la surface de ce bassin. Autrement dit au niveau de la station hydrométrique, une pluie « moyenne » est calculée de la sorte :

$$P_{moy} = \frac{\sum P_n * S_n}{S}$$

Avec :

- P moy = Précipitations moyennes sur le bassin
- Pn = Pluie à la station n
- Sn = Surface du bassin recouverte par le polygone de la station n
- S = Surface totale du bassin

2.5.2) Calcul du coefficient d'écoulement

Un volume de précipitations qui arrive sur un bassin versant pendant un temps défini se divise en différentes parties pendant ce même temps, dont certaines vont alimenter plus ou moins rapidement le débit de la rivière et d'autres non. La partie qui arrive à la rivière est constituée de : la part ruisselée, la part infiltrée dans des stocks peu profonds et la part stockée dans la rivière ou dans ses affluents en attente avant d'atteindre l'exutoire (Roche, 1963).

Ainsi, le coefficient d'écoulement K correspond à la part de la lame d'eau écoulée (débits) sur la lame d'eau précipitée (pluies) :

$$K = \frac{\text{Volume écoulé}}{\text{Volume précipité}}$$

Les données de volume de pluie précipitée et de volume d'eau écoulée sont agglomérées à un pas de temps mensuel, saisonnier et annuel.

Ce coefficient est une caractéristique de base en hydrologie pour la description d'un bassin versant (Hallouz et al., 2013). Cette valeur est liée à la géologie, la taille et différents critères d'un bassin versant. Cette étape vise donc à l'observation de ce coefficient depuis le début des années 1980 jusqu'à aujourd'hui.

2.5.3) Calcul du coefficient de tarissement

Le tarissement d'une rivière correspond à une période, en l'absence de précipitations, de décroissance de la valeur des débits équivalents à la vidange des nappes. Ce phénomène est présenté graphiquement en figure 6. Les formules utilisées sont nombreuses et souvent dérivées du travail de Boussinesq (Tallaksen, 1995). L'utilisation de la formule de Maillet/Boussinesq (1905) :

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

Cela permet de décrire de façon simple le type de vidange d'un bassin versant et la valeur de α le coefficient de tarissement. Q_0 correspond au débit initial, Q_t correspond au débit à un temps t et t à la durée de la phase. Cette loi est la plus utilisée pour étudier les tarissements (Tallaksen, 1995; Lang, 2007).

Ce calcul implique plusieurs hypothèses, la décroissance exponentielle est calculée pour un versant droit (1D), homogène avec une transmissivité constante et sans alimentation en eau avec comme unique exhaure la rivière. Afin de calculer le coefficient α , deux tris sont à réaliser

sur les données de précipitations et de débits. Le premier vise à repérer les périodes où les précipitations ne sont pas capables d'influencer l'écoulement au sein de la rivière. La sélection des périodes où les précipitations sont nulles est une méthode plus rigoureuse cependant la Bretagne présentant un climat océanique, les événements pluvieux sont fréquents et donc les périodes sans pluies peu nombreuses. Cette contrainte amène à deux choix possibles, soit de retenir des périodes de tarissement avec des épisodes de précipitations faibles, soit de ne sélectionner que des courtes périodes de tarissement qui ne sont pas influencées par des précipitations. Le premier choix est décrit comme une méthode de l'enveloppe de tarissement définie comme l'enveloppe inférieure d'un hydrogramme (Larras, 1972). Ainsi, cette première méthode peut prendre en compte des remontées de débits dues à des précipitations. La deuxième méthode est plus stricte et consiste à la sélection des débits décroissants non influencés par des épisodes pluvieux. La première méthode est appelée la « méthode de courbes enveloppes » et la seconde, la « méthode de courbes séquences » par E.Gille et C.Lang (Lang and Gille, 2006). Dans la prévision des débits d'étiage, la méthode de courbes séquences est la plus appropriée pour répondre aux questionnements sur les apports des aquifères aux débits des rivières, c'est donc cette dernière méthode qui est appliquée dans notre cas.

Le choix des périodes où les précipitations n'influencent pas les débits des rivières est évoqué par (Lang, 2007), qui définit un seuil fixé à 1mm/jour. Ce seuil représente la valeur séparant les pluies influençant les débits des rivières et celles qui n'influencent pas l'écoulement, et permet en région océanique, la sélection d'un plus grand nombre de phases de tarissement. Par ailleurs au-delà d'un certain seuil, le débit ne peut pas être représentatif d'un tarissement, toutes les périodes où le débit est supérieur au module sont ainsi supprimées. Enfin, pour éliminer les débits encore influencés par l'écoulement rapide en début de tarissement, un temps de ressuyage minimum est introduit entre la fin de l'épisode pluvieux et le début de la séquence de tarissement.

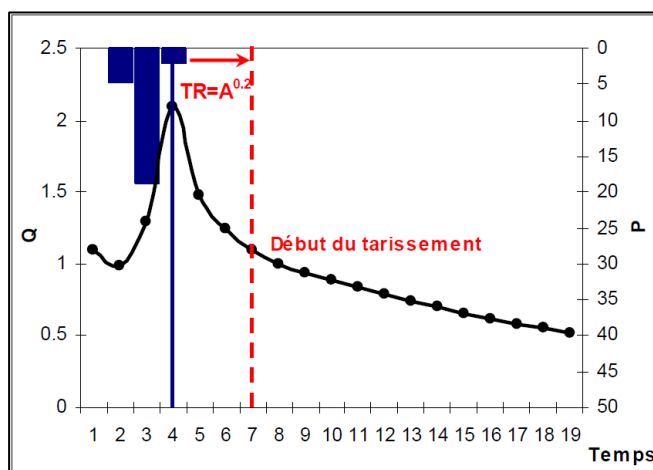


Figure 6 : Illustration théorique du temps de ressuyage pour un bassin de 250 km² Source : thèse de C.Lang

La durée du temps de ressuyage est déterminée à partir de la formule $TR=A^{0.2}$ souvent utilisée dans la bibliographie (Langbein, in Rutledge et Daniel, 1994) où TR (durée du ressuyage en jours) est fonction de A (surface du bassin versant en km²).

Pour chaque courbe de tarissement, le coefficient alpha est calculé et le coefficient mensuel est défini par la médiane de ces « sous coefficient ». Le coefficient de tarissement est calculé pour chaque année sur une période de juin à septembre sur les stations de l'Arguenon à

Jugon les Lacs et de la Rosette à Mégrit. Le Quilloury et le Frémur ne sont pas retenus, étant donné que les chroniques de données ne sont pas assez anciennes pour observer d'éventuelles tendances.

2.6) Exploitation et traitement statistique des données

Cette troisième étape vise à réaliser différents tests statistiques dont le but est d'observer si les chroniques de débits et de pluies présentent ou non une tendance, et/ou une rupture.

Des moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles sont réalisées avec les différents indicateurs et coefficients calculés précédemment afin de vérifier que les variations observées à l'aide des tests statistiques ont lieu à plusieurs pas de temps et non à un seul. Le raisonnement va se faire par année hydrologique, puis en décomposant entre saison de recharge et saison d'étiage et enfin au pas de temps mensuel. Sur le territoire, la saison d'étiage est définie entre le 1^{er} avril et le 30 septembre et celle de recharge entre le 1^{er} octobre et le 31 mars. L'année hydrologique correspond ainsi à une saison de recharge plus une saison d'étiage.

Une série chronologique dite stationnaire présente des caractéristiques comme la moyenne qui reste la même au cours du temps. Une chronique non-stationnaire présente au contraire un ou des changements de ses propriétés appelés ruptures ou bien tendances. Une tendance peut être croissante ou décroissante et correspond à une orientation générale d'une chronique. Une grande variété de tests statistiques existe afin de réaliser l'objectif de cette étape. Cependant, ces tests impliquent des conditions d'applications strictes. Les données des chroniques à traiter doivent suivre une distribution particulière et l'ensemble des données comprises dans la chronique doivent présenter une distribution identique. De plus, les données doivent absolument être indépendantes. Cet aspect-ci oblige à fixer un pas de temps correct. Celui-ci ne doit pas être trop grand, sinon les variations ne seraient pas identifiables, mais pas trop fin non plus sinon les données sont influencées entre elles. Les données sont donc observées à un pas de temps mensuel, saisonnier et annuel. Deux tests statistiques sont choisis (figure 7), le test de Man-Kendall afin de détecter d'éventuelles tendances et le test de Pettitt pour déceler la présence de ruptures.

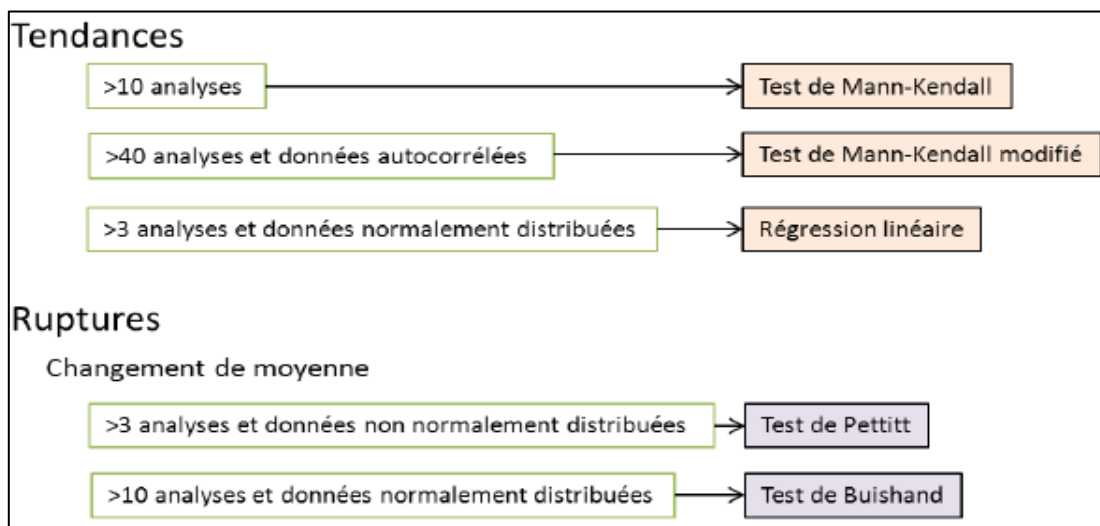


Figure 7 : Schéma récapitulatif des critères de sélection des tests statistiques (source : outils d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines, 2014)

Ces deux tests statistiques sont dits non-paramétriques, car ils ne font aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données. En particulier, ils s'appliquent à des données n'ayant pas une distribution gaussienne. Ils sont donc adaptés aux données hydrométéorologiques pour lesquelles les distributions sont souvent dissymétriques. De plus, ils sont très utilisés dans le domaine de l'hydrologie et également bien argumentés (Lemaitre, 2002; Fénéon, 2010; Bodian, 2012). L'indice de confiance est fixé à 95%, il y a alors un risque d'erreur de 5%, ce qui paraît convenable pour le sujet traité (tableau 2). Pour la réalisation de ces tests, le logiciel R a été utilisé.

Test de Mann-Kendall	Vérification du caractère aléatoire d'une série chronologique	La série est aléatoire, il n'y a pas de tendances	Si la valeur est inférieure à 0,05 on considèrera que l'on peut rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle il n'y a pas de tendances
Test de Pettitt	Détection de rupture dans les séries chronologiques	La série n'admet pas de rupture	Si la valeur est inférieure à 0,05 la série présente une rupture

Tableau 2 : Description des tests statistiques

En fonction du résultat du test de tendances, le taux d'évolution des indicateurs est calculé de 2 manières différentes :

Lorsqu'il y a une tendance mais pas de rupture l'évolution est évaluée de la manière suivante :

La série de données est séparée en 2 périodes de même durée, la moyenne de l'indicateur en question est calculée sur la première période et sur la seconde période et un taux d'évolution est calculé de la manière suivante :

$$\frac{\text{Valeur finale} - \text{Valeur initiale}}{\text{Valeur initiale}} * 100$$

Lorsqu'il y a une tendance et une rupture, la série de données est séparée au point de rupture sans tenir compte de la durée de ces 2 périodes. La moyenne de l'indicateur est réalisée sur la période avant et après la rupture, et le taux d'évolution est calculé de la même manière que ci-dessus.

III) Evolution climatique

3.1) Variabilité spatiale de la pluviométrie

Une première approche consiste à observer la situation sur une année hydrologique, c'est-à-dire une période de 12 mois qui débute après le mois habituel des plus basses eaux. En Bretagne, il est considéré que l'année hydrologique s'étend du 1^{er} octobre au 30 septembre de l'année suivante. Le choix de cette date est justifié par le fait que les premières précipitations automnales significatives ont généralement lieu à partir du début octobre.

La figure 8 montre le cumul de précipitations par type de pluie sur la dernière période de 30 ans. Ces stations sont organisées d'amont en aval en fonction de leurs altitudes. Concernant le cumul total annuel, il y a une décroissance du cumul entre l'amont et l'aval. La station de Collinée (amont) est la station la plus arrosée avec 980 mm et la station la moins pluvieuse est celle de St Cast avec 700 mm. Cette différence de presque 300 mm est liée au relief en amont du territoire, ainsi qu'à l'influence maritime qui peut s'observer sur la station de St Cast. Les stations de Languedias et Quintenic qui sont à des altitudes très proches ont un cumul annuel similaire.

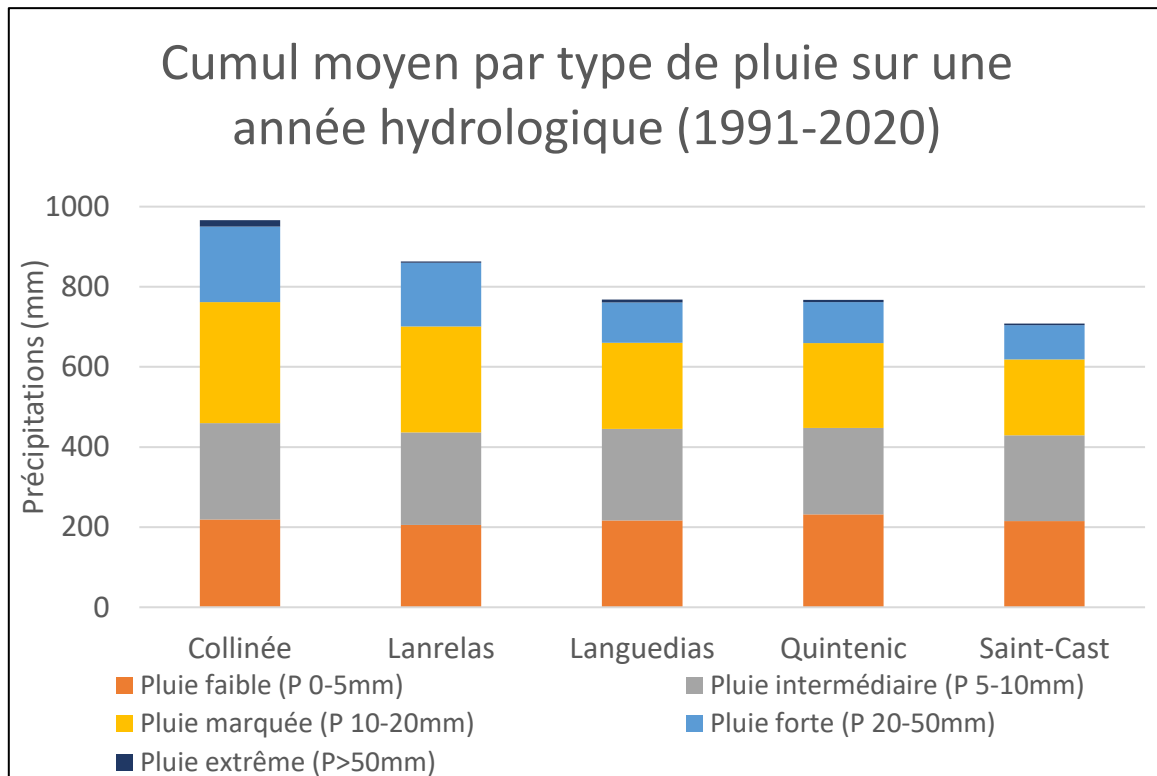


Figure 8 : Précipitations moyennes au cours d'une année hydrologique

Le découpage par type de pluie montre que le cumul de précipitation des jours de pluie faible (0-5mm) et intermédiaire (5-10mm) est relativement similaire pour toutes les stations en valeur absolue avec entre 400 et 450 mm chaque année pour l'ensemble du territoire.

En Bretagne, donc, les fortes pluies ont un rôle important dans le cumul total. Les jours de pluie de plus de 10 mm représentent au moins 40 % du cumul total. C'est sur ces jours où il pleut plus de 10 mm que se crée une différence entre l'amont et l'aval. Contrairement aux pluies faibles qui apportent des cumuls annuels relativement similaires d'une station à l'autre. L'intensité des pluies joue un rôle important dans le façonnement du régime pluviométrique.

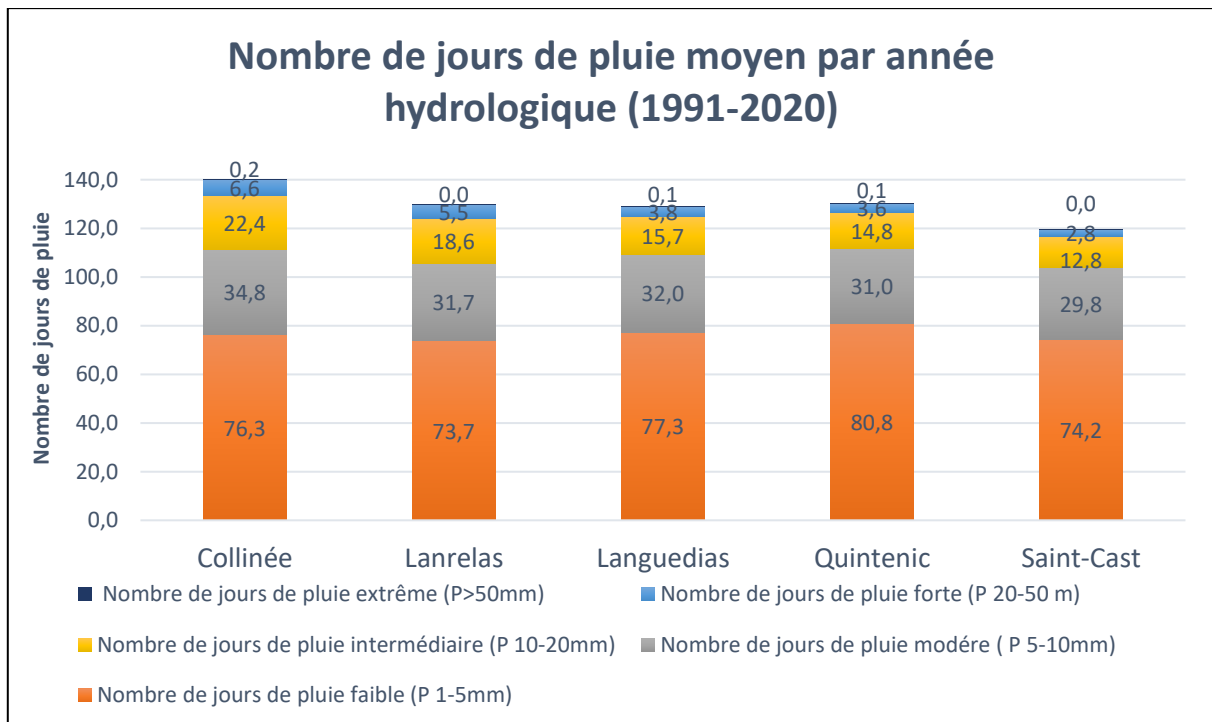


Figure 9 : Nombre de jours de pluie selon la localisation des stations météorologiques

En termes de nombre de jours de pluie, il est important de noter que les jours de pluie sont comptés à partir de 1mm. En deçà de ce seuil, les incertitudes sont trop grandes pour considérer qu'il a plu ou que c'est dû à l'humidité. La variation entre l'amont et l'aval est moins spectaculaire, mais existe tout de même. Il y a un écart de 20 jours de pluie entre Collinée et Saint Cast, avec respectivement 140 jours de pluie pour Collinée et 120 pour Saint Cast (figure 9).

Les jours de pluie forte (>20 mm) représentent seulement 3 à 7 jours, ils apportent pourtant une importante part de pluie annuelle (figure 10). Par exemple, en moyenne 6,6 jours de pluie forte apportent à Collinée 19% du cumul annuel, à Saint Cast 2,8 jours apportent 12% du cumul... A l'année, les jours de pluie intermédiaire et forte apportent entre 40 et 50 % des précipitations annuelles. L'importance de ces jours de pluie de forte intensité s'accroît en allant vers l'amont du bassin versant et diminue en allant vers la côte notamment à cause d'une intensité moins importante des jours de pluie. Au contraire, les jours de pluie faible, largement majoritaire sur toutes les stations (entre 73 et 81 jours par an) apportent seulement entre 23 et 30% du cumul annuel. Quant aux précipitations supérieures à 50 mm sur une journée, elles sont très rares et peu d'évolution est visible entre l'amont et l'aval du bassin versant.

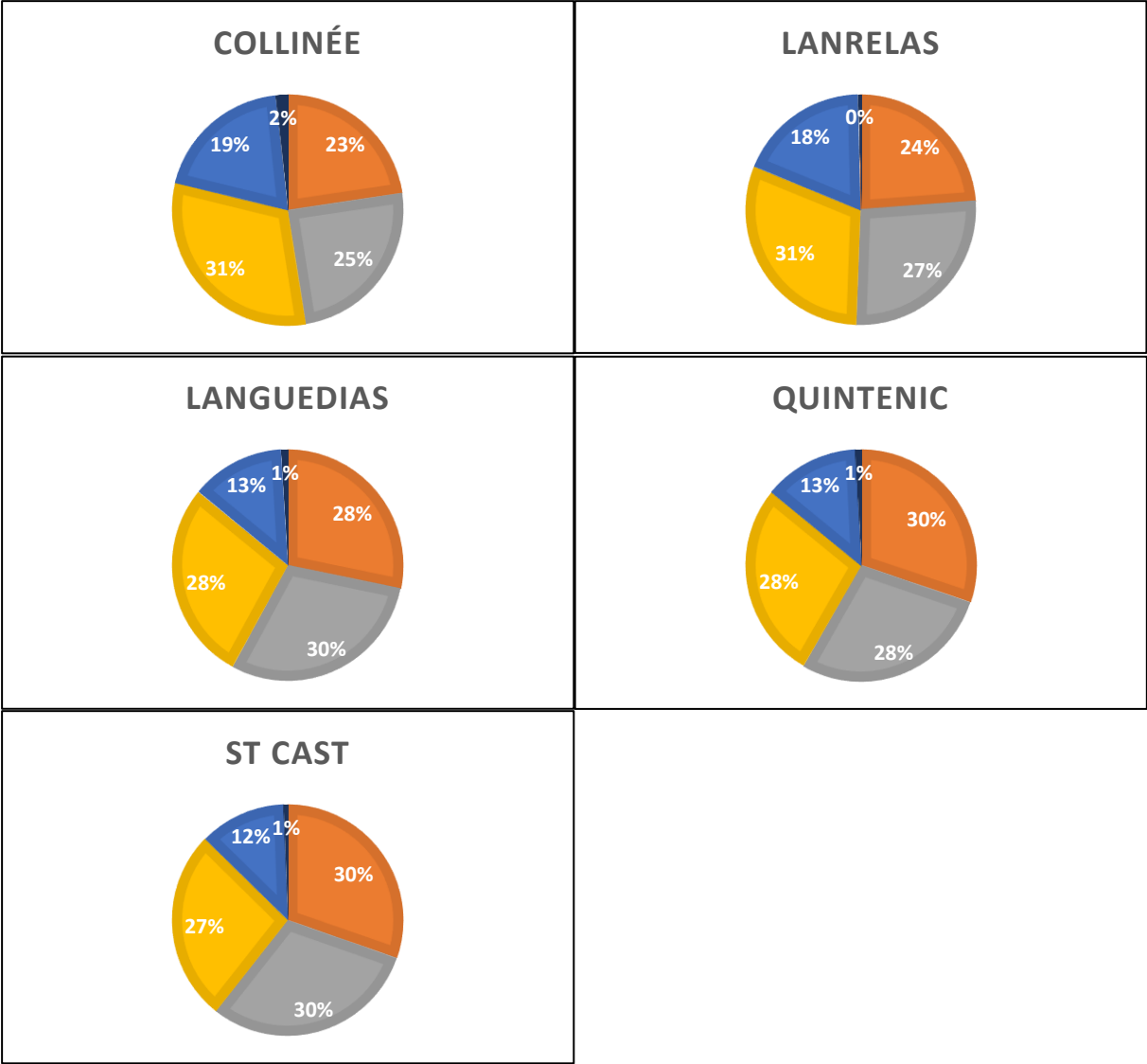


Figure 10 : Part relative du cumul annuel par type de pluie (1991-2020)

Variabilité par saison hydrologique

Les saisons hydrologiques correspondent aux périodes de recharge et d'étiage des cours d'eau. Cette période correspond au cycle hydrologique des cours d'eau où deux saisons liées au cycle de l'eau et au cycle végétal se distinguent :

- **La saison de recharge** des nappes et des cours d'eau correspond à la période du 1 octobre au 30 mars. C'est généralement la période la plus arrosée de l'année, avec une végétation en dormance. Les précipitations viennent recharger les réserves en eau en surface, où s'infiltrent dans le sol, une infime partie s'évapore du fait de températures modérées/basses.

- **La saison d'étiage** correspond à la période 1 avril au 30 septembre. Les pluies sont généralement moins présentes et la végétation est en pleine activité avec un besoin en eau accru. Les précipitations durant cette période sont majoritairement absorbées par la végétation et les cours d'eau ont tendance à s'assécher. L'année hydrologique s'achève donc théoriquement au minimum de débit des cours d'eau, généralement fin septembre/ début octobre en Bretagne.

Ce découpage saisonnier correspond aux enjeux de gestion de l'eau. En effet, il est nécessaire de connaître la quantité d'eau disponible pour recharger les réserves d'eau qui correspond en moyenne à la période octobre-mars. La saison d'étiage est la saison critique de la gestion de l'eau, celle où les besoins sont importants, alors que les réserves d'eaux ne se rechargent pas ou peu. À l'inverse, la saison de recharge est souvent celle où les inondations interviennent puisque les sols peuvent être saturés en eau.

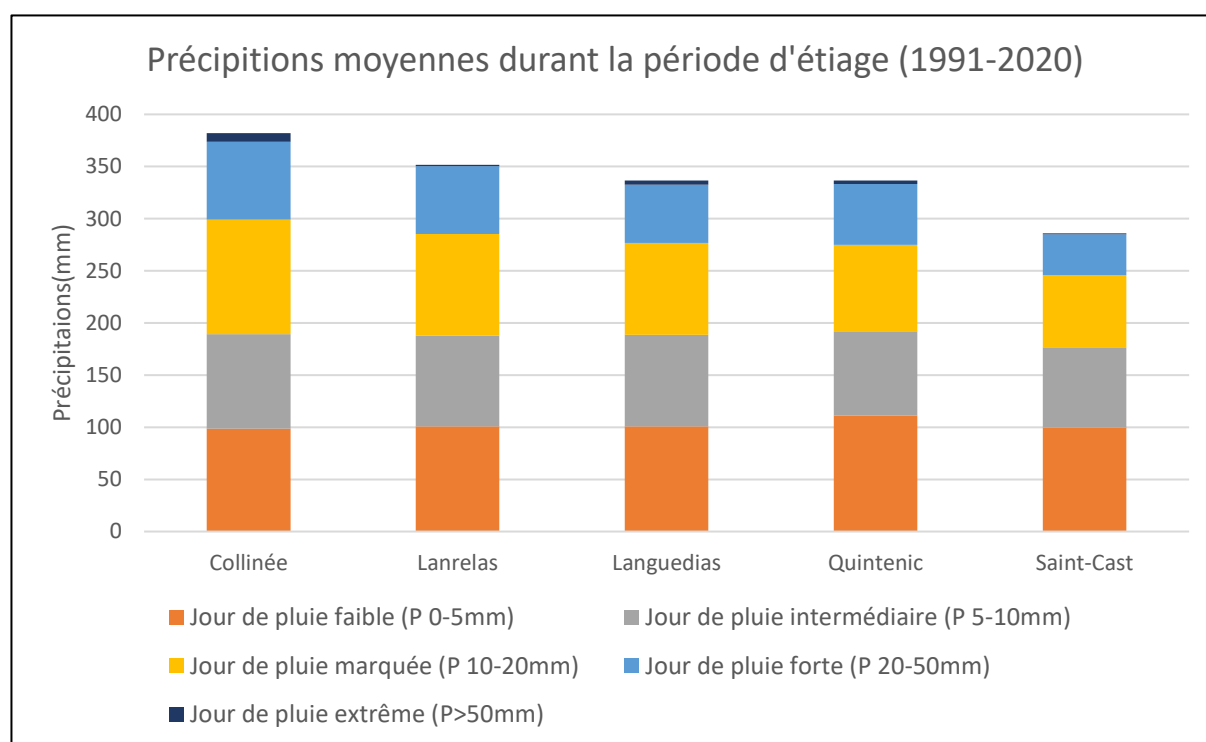


Figure 11 : Précipitations moyennes durant la période d'étiage (1^{er} avril-30 septembre)

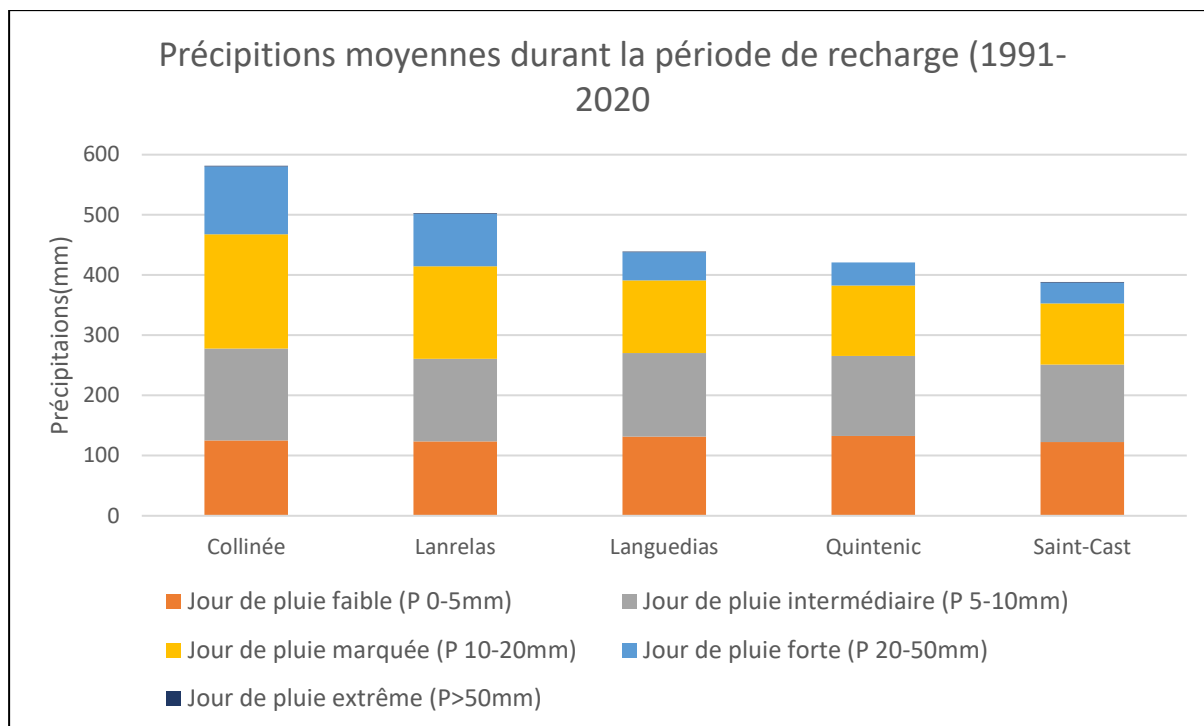


Figure 12 : Précipitations moyennes durant la période de recharge (1^{er} octobre-31 mars)

Sur le territoire, la saison de recharge représente environ 60% du cumul annuel et 40% pour la saison d'été. En terme quantitatif cela représente entre 390 et 580 mm durant la saison de recharge et entre 280 et 380 mm durant la saison d'été suivant la localisation des stations sur le bassin versant. Le cumul de précipitations est logiquement plus élevé durant la saison de recharge, mais il y a tout de même un apport non négligeable durant la saison d'été.

Variabilité mensuelle

En continuant dans ce zoom sur l'échelle temporelle, les cumuls sont maintenant comparés par mois. Cela permet de voir que les stations ont toutes le même régime pluviométrique, néanmoins il y a une accentuation de ce régime assez nette en allant vers l'amont du bassin versant (figure 13). Les cumuls de précipitations les plus importants ont lieu entre octobre et janvier et les plus faibles durant les mois de juillet – août.

Un léger pic de précipitations est observé aux mois d'avril-mai pour les stations de Collinée, Lanrelas, Languedias, et Quintenic avec des cumuls moyens supérieurs d'une dizaine de mm par rapport à mars et juin. Les météorologues expliquent ces pics de pluie par le phénomène des gouttes froides lié au climat océanique et fréquent à cette période de l'année sur la moitié nord de la France.

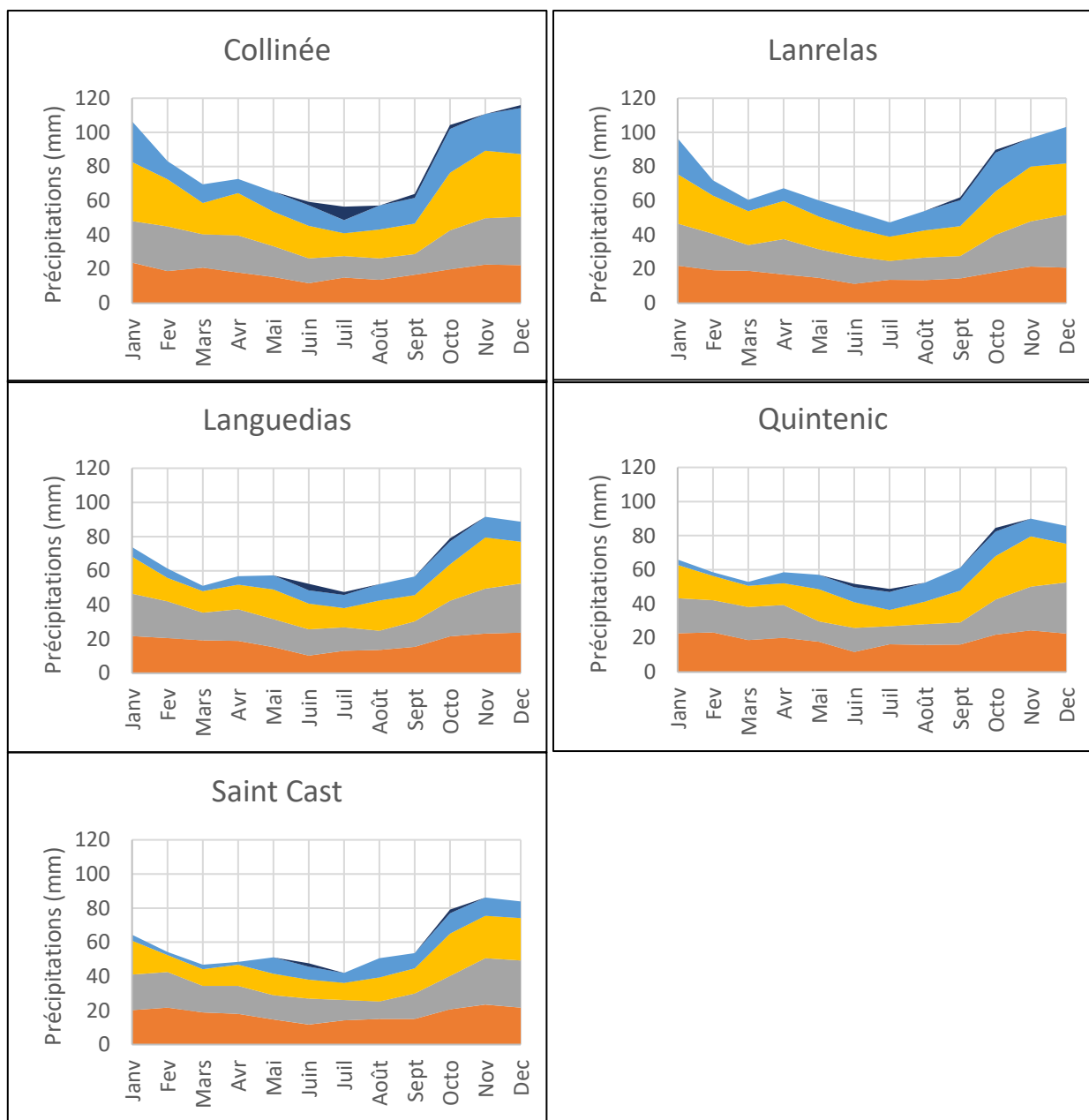


Figure 13 : Précipitations mensuelles en fonction des stations météorologiques

Les cumuls de précipitations minima et maxima

Observer les minima et maxima permet de donner une idée de l'amplitude annuelle des précipitations (tableau 3). Les cumuls annuels minimums varient entre 388 mm et 531mm, la date de ces événements est 1975-1976 ou 1988-1989. Ces 2 périodes-là correspondent aux 2 sécheresses les plus intenses connues sur le territoire depuis 1960. Seule la station de St Cast a enregistré les 2 événements, les autres stations plus récentes n'ont pas les données de ces 2 sécheresses. Une comparaison n'est donc pas possible afin de voir laquelle a été la plus intense sur le territoire.

Concernant les maximums, ils varient entre 923mm et 1485mm avec à chaque fois l'année hydrologique 2000-2001 comme référence. Ce cumul, relativement important est à mettre en lien avec les inondations ayant eu lieu à cette même période sur le secteur. Cette année-là correspond à l'année la plus humide recensée sur le territoire depuis 1960 avec à chaque fois 200 à 500 mm de plus que le cumul moyen annuel.

	Minimum (mm)	Année hydrologique	Maximum (mm)	Année hydrologique
Collinée	531,5	1988-1989	1484,9	2000-2001
Lanrelas	475,4	1988-1989	1348,8	2000-2001
Languedias	458,1	1988-1989	1026,5	2000-2001
Quintenic	382,2	1988-1989	998,4	2000-2001
St Cast	388,2	1975-1976	922,9	2000-2001

Tableau 3 : Cumuls maximums et minimums annuels pour chaque station

Concernant les maximums sur 10 et 30 jours, ils correspondent généralement assez bien avec le gradient du cumul de précipitations annuel. Les cumuls les plus élevés sur ces différents pas de temps sont ceux de Collinée qui est la station la plus pluvieuse du territoire du SAGE (figure 14). Le gradient amont-aval est bien visible ici aussi, hormis pour la station de Quintenic qui présente des valeurs supérieures sur 10 jours et 30 jours à celle de Languedias, alors qu'elles ont sensiblement la même altitude. Au pas de temps de 3 jours, il y a peu de différence entre les stations, les valeurs oscillent entre 70 et 90 mm et le gradient amont-aval est assez peu visible.

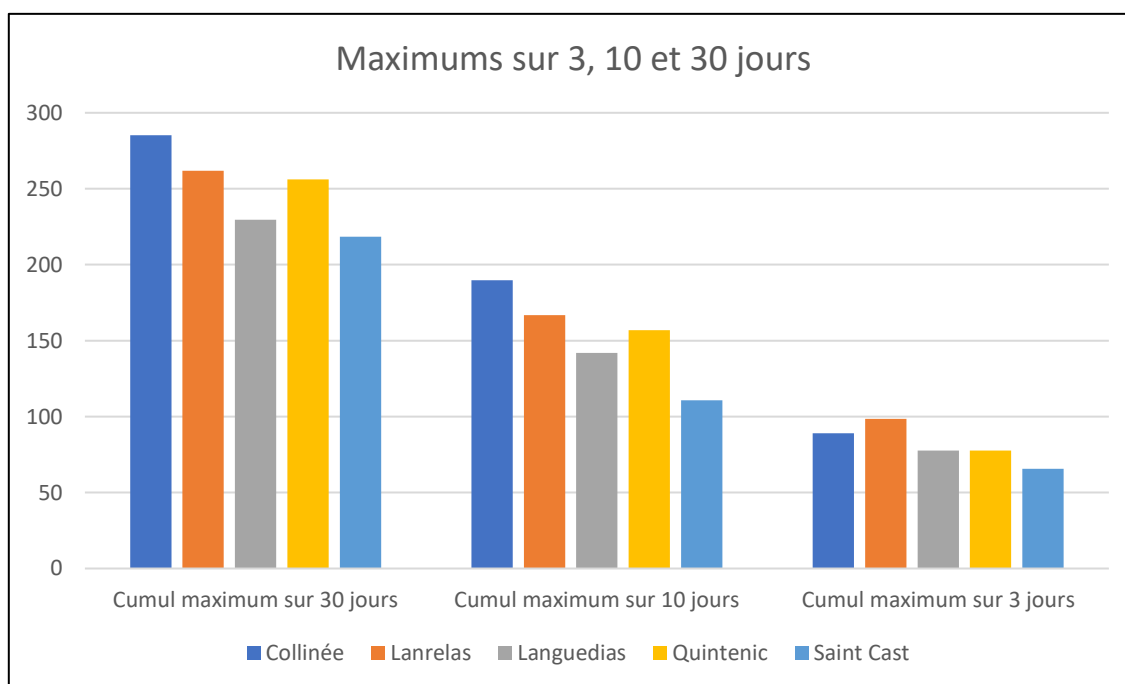


Figure 14 : Cumuls maximums sur 3,10 et 30 jours

3.2) Observation des tendances sur les séries historiques de précipitations

Les résultats présentés par la suite sont tous significatifs au test de tendance (Test de Kendall) et/ou au test de rupture (test de Pettitt) avec un degré de confiance supérieur ou égal à 95%. Toutefois, les indicateurs ayant un degré de confiance supérieur à 90% ont tout de même été analysés afin de voir si d'autres tendances complémentaires pouvaient en être déduites. Différentes tendances se dessinent sur le territoire en fonction de leurs localisations sur le bassin versant.

Tête de bassin versant

Collinée (comparaison entre les périodes 1976-1998 et 1999-2020 sauf si présence de ruptures)

Cette station présente le moins d'évolution parmi toutes les stations. Seuls 2 indicateurs présentent des tendances :

- Diminution de 7% des précipitations durant le mois de mars (79 mm à 73 mm)
- Diminution de 14% des précipitations durant le mois de mai (74 mm à 65 mm)

Lanrelas (comparaison entre les périodes 1974-1997 et 1998-2020, sauf si présence de ruptures)

La station de Lanrelas présente des tendances assez semblables à celles de Collinée :

- Diminution de 8% des précipitations durant le mois de mars (69 mm à 63 mm)
- Diminution de 18% des précipitations durant le mois de mai (73 mm à 59 mm)
- Augmentation de 55% des précipitations durant le mois d'août (37 mm à 57 mm)

Ces 2 stations en amont du bassin versant ont été déplacées en 1997 lors de leurs rachats par EDF, les résultats peuvent être affectés par ce changement et par conséquent être moins fiable. Cependant, les 2 stations présentent des tendances assez similaires à savoir une diminution des précipitations au printemps, et il n'y a pas de rupture détectée en 1997 lors du déplacement de la station attestant d'un changement de la pluviométrie. La fiabilité de ces données paraît donc assez bonne tout de même.

Bassin versant intermédiaire

Languedias (comparaison entre les périodes 1980-2000 et 2001-2020, sauf si présence de ruptures)

Cette station présente des évolutions mensuelles assez contrastées qui ne sont confirmées nulle part ailleurs :

- Diminution de 13% des précipitations durant le mois de mars (53 mm à 46 mm)
- Augmentation de 47% des précipitations durant le mois d'août (38 mm à 56 mm)
- Diminution de 42 % des précipitations durant le mois de septembre (74 mm à 42 mm)

- Augmentation de 40% des précipitations durant le mois de novembre (69 mm à 98 mm)

Durant la période de recharge, plusieurs indicateurs sont à la hausse sur cette station :

- Augmentation de 95% du nombre de jours de pluie supérieur à 20 mm durant la période de recharge (1.2 jour à 2.3 jours)
- Augmentation de 14% du maximum de précipitations sur 30 jours durant la période de recharge (131 mm à 150 mm)
- Augmentation de 16% du maximum de précipitations sur 3 jours durant la période de recharge (40 mm à 46 mm)

Quintenac (comparaison entre les périodes 1984-2002 et 2003-2020, sauf si présence de ruptures)

Cette station présente une augmentation de 6% du cumul de précipitations au cours de l'année hydrologique (720 à 767 mm). Ce changement est à mettre en lien avec l'évolution assez importante ayant lieu durant la période de recharge :

- Augmentation de 14% des précipitations durant la période de recharge (394 mm à 449 mm)
- Augmentation de 45% du nombre de jours de pluie supérieur à 20 mm durant la période de recharge (1.2 jour à 1.8 jours)
- Augmentation de 20% du maximum de précipitations sur 10 jours durant la période de recharge (69 mm à 83 mm)
- Augmentation de 23% du maximum de précipitations sur 3 jours durant la période de recharge (37 mm à 43 mm)

Les tendances sur cette partie du bassin ne sont pas les mêmes que sur le bassin versant amont. Ici, c'est plutôt une tendance à l'augmentation du nombre de jours de pluies intenses (>20 mm) qui domine ainsi que l'augmentation ($\approx +15\%$) du cumul de précipitations sur 3 et 10 jours. Il est à noter également une augmentation de 14% des précipitations durant la période de recharge affectant le cumul total annuel.

Aval bassin versant

Saint Cast (comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991-2020, sauf si présence de ruptures)

Cette station est la plus ancienne de toutes, c'est également celle présentant le plus d'évolution :

- Au cours de l'année hydrologique, une augmentation du cumul de précipitations est détectée ainsi qu'une rupture lors de la 37^{ème} année (1997). Au point de rupture, il y a une augmentation de 18% des précipitations (621 à 733 mm).
- Augmentation du nombre de jours de pluie supérieurs à 20 mm au cours de l'année hydrologique (2,3 jours à 3,2 jours) par année hydrologique

Ce changement au cours de l'année hydrologique est visible durant la période d'étiage :

- Augmentation de 18% des précipitations lors de la période d'étiage (01/04-30/09) (250 à 295 mm)
- Augmentation de 12% des précipitations maximum sur 10 jours durant la période d'étiage (59mm à 66 mm)
- Augmentation de 15 % des précipitations maximum sur 3 jours durant la période d'étiage (36 mm à 41 mm)

Mais également durant la période de recharge :

- Augmentation de 11% des précipitations lors de la période de recharge (366 à 408 mm par an)
- Augmentation de 19% des précipitations maximum sur 30 jours durant la période de recharge (119 mm à 141 mm)
- Augmentation de 16% des précipitations maximum sur 10 jours durant la période de recharge (66 mm à 77mm)
- Augmentation de 21% des précipitations maximum sur 3 jours durant la période de recharge (35 mm à 42 mm)

Plusieurs tendances ressortent donc à travers les résultats de ces tests statistiques, tout d'abord une diminution des précipitations au printemps assez similaire sur le bassin versant amont. Au cours de l'été et de l'automne les tendances indiquent une augmentation du cumul sur le bassin versant intermédiaire ainsi qu'une intensification des pluies durant la saison de recharge. Enfin, sur l'aval du bassin, il y a une augmentation assez nette du cumul de précipitations annuel qui se répartit de manière constante tout au long de l'année accompagnée ici aussi d'une augmentation du nombre de jours de pluies intenses.

3.3) Evolution des cumuls saisonniers à horizon moyen (2031-2060)

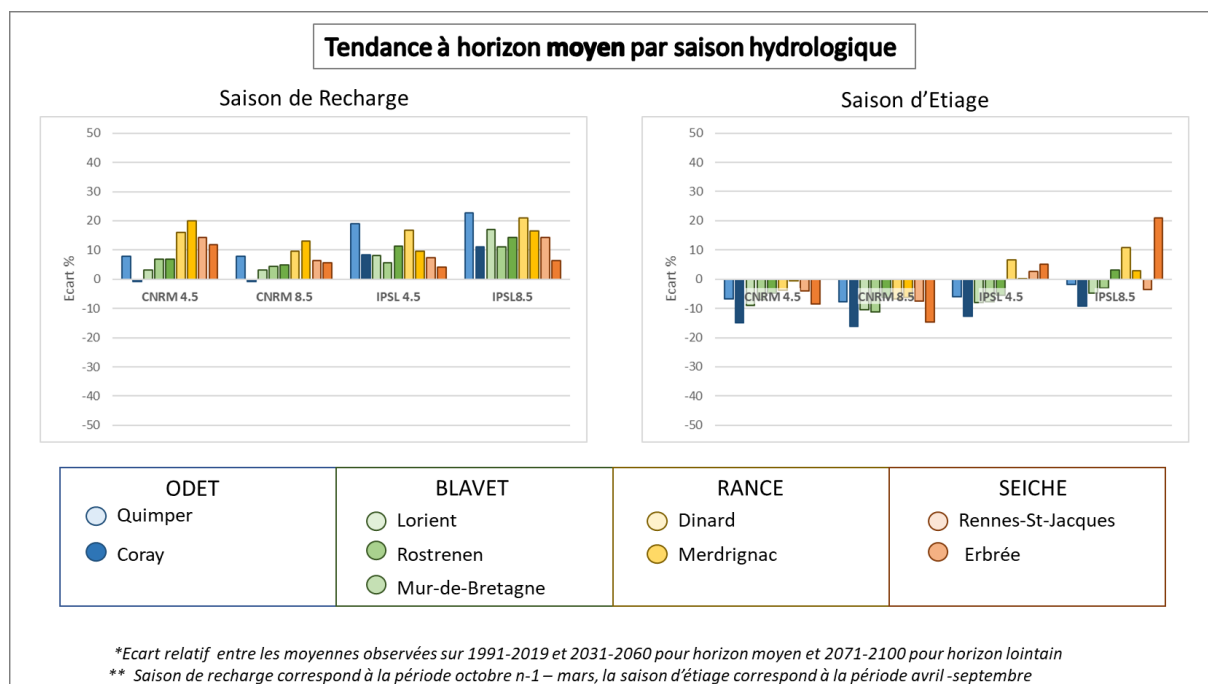


Figure 15 : Tendances pluviométriques pour l'horizon 2031-2060 (source : Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias)

Les données de simulation de la Rance (figure 15) sont intéressantes à exploiter, car ce territoire est très proche de celui du SAGE Arguenon-Baie de la Fresnaye. De plus, il est possible d'associer les données de Dinard (58 m d'altitude et 748 mm de précipitations annuelles) à celle de Saint Cast. Les données de Merdrignac (150 m d'altitude et 893 mm de précipitations annuelles) sont assez similaires à celles de Lanrelas.

D'après cette simulation le cumul de précipitations sera à la hausse durant la saison de recharge selon les différents modèles et les différents scénarios du GIEC. Cette évolution est estimée entre +10 et +20% durant la saison de recharge.

Durant la saison d'étiage, les résultats des simulations sont plus divergents, le modèle CNRM prévoit une diminution des précipitations pouvant aller jusqu'à 5 %. Quant au modèle IPSL, c'est plutôt une augmentation allant jusqu'à 10 %. Il y a donc une convergence des modèles durant la saison de recharge et une divergence durant la saison d'étiage.

3.4) Evolution des températures

Le rapport du GIEC indique un réchauffement de l'ordre de 0,9°C au niveau mondial depuis 1900 (GIEC,2014) et de 1,1°C en France (Planton et al, 2015). À l'échelle de la Bretagne, le réchauffement s'élève à +0,9°C ces cinquante dernières années et un rythme de +0,3°C par décennie depuis 1981-1990. Ce réchauffement est plus marqué en mai- juin avec +1,2°C et plus faible en septembre + 0,4°C à +0,5°C.

On enregistre des évolutions significatives sur la période 1959-2019 avec :

- un réchauffement net accentué depuis les années 1980 avec une rupture identifiée durant la fin des années 1980 concernant la température moyenne (Dubreuil, 2014)

- un nombre de journées chaudes (températures maximales supérieures ou égales à 25°C) très variable d'une année sur l'autre, une augmentation plus marquée à l'intérieur des terres : +4 à +5 jours contre +1 à +2 jours sur le littoral ;

- Le nombre de jours de vague de chaleur (avec température maximale supérieure de plus de 5°C à la normale pendant 5 jours ou plus) augmenterait de + 8 jours (RCP4.5) à + 33 jours (RCP8.5) à la fin du siècle.

- une diminution du nombre de jours de gelée, ces évolutions étant toutefois peu marquées du fait du caractère maritime de la région

Un réchauffement qui se poursuivra quel que soit le scénario

- Les projections climatiques indiquent : une poursuite du réchauffement, compris entre +1°C (RCP4.5) et +4°C en l'absence de politique climatique (RCP8.5) à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période 1991-2019

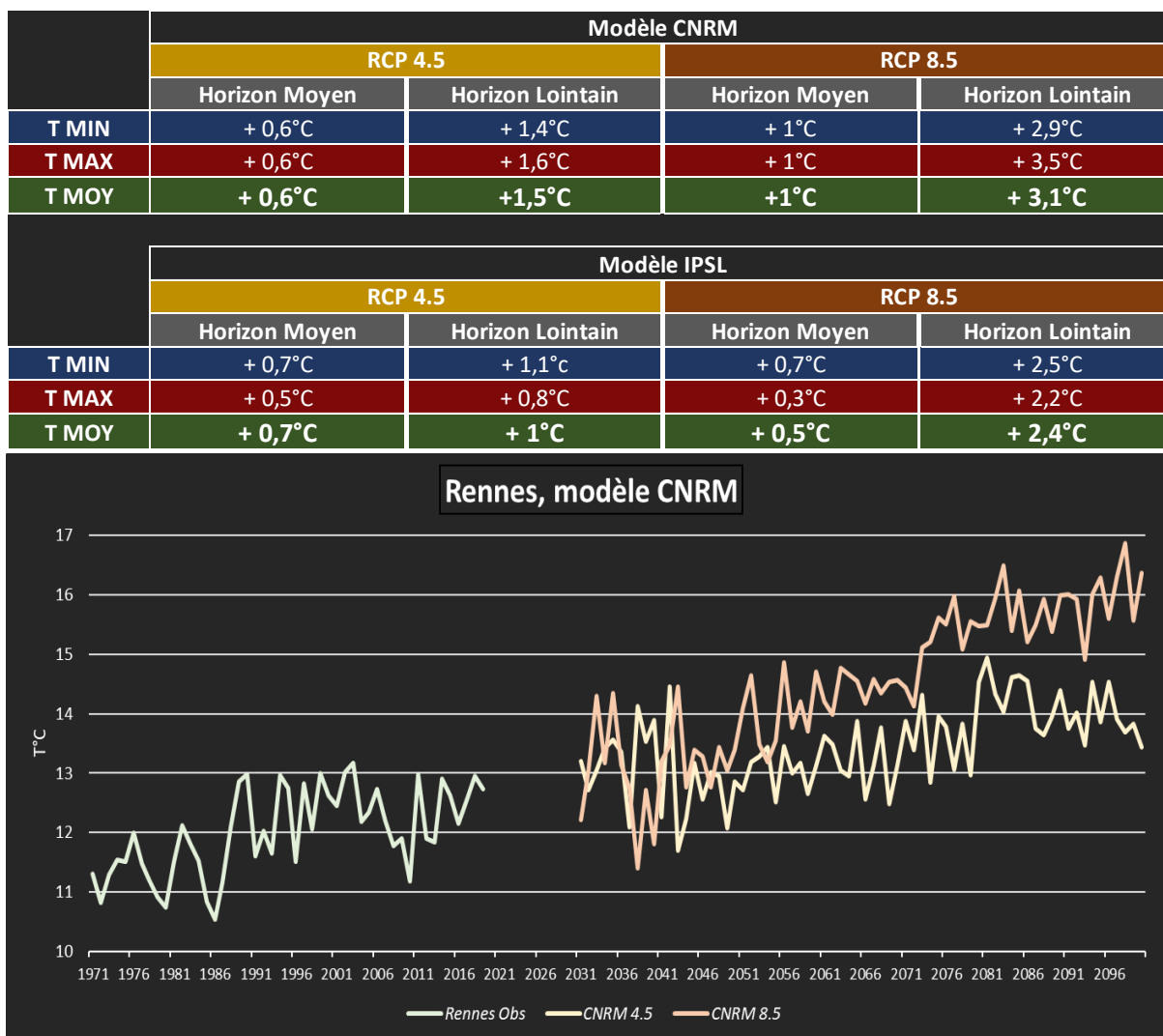


Figure 16 : Evolution des températures à Rennes (source : Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias)

Avec le scénario le plus pessimiste (scénario 8.5), la température moyenne de Rennes serait en fin de siècle autour de 16°C, soit l'équivalent de la température actuelle de Bastia.

3.5) Evolution de l'évapotranspiration

En lien avec l'augmentation des températures, l'évapotranspiration va elle aussi augmenter. Le calcul de l'ETP prend en compte de nombreux paramètres dont la température, le rayonnement solaire, la vitesse du vent ... Ce changement va être visible à travers le calcul du bilan hydrique qui met en parallèle les précipitations (apports d'eau), l'ETP (les besoins en eau) et l'ETR (consommation réelle en eau par les plantes) :

- Lorsque Précipitations > ETP, le surplus d'eau vient recharger la réserve utile, si la réserve a atteint son maximum, les sols sont saturés en eau et le surplus d'eau s'écoule et alimente les cours d'eau. Les mois où Précipitations > ETP sont considérés comme humides si la réserve se reconstitue, et très humide si le surplus d'eau alimente les écoulements.

- Lorsque Précipitations < ETP, le manque d'eau est compensé par une baisse de la réserve hydrique. En effet, les végétaux vont puiser l'eau manquante dans le sol. Cependant, la réserve ne peut totalement suffire à combler le manque d'eau, car les végétaux ne peuvent puiser toute l'eau de la réserve utile. Pour matérialiser cela, la réserve utile diminue de manière logarithmique. L'eau qui n'a pas pu être puisée est considérée comme déficitaire et est regroupée dans le déficit d'évapotranspiration (DE=ETP-ETR). Dès que les précipitations sont inférieures à l'ETP, il y a forcément un DE, même minime.

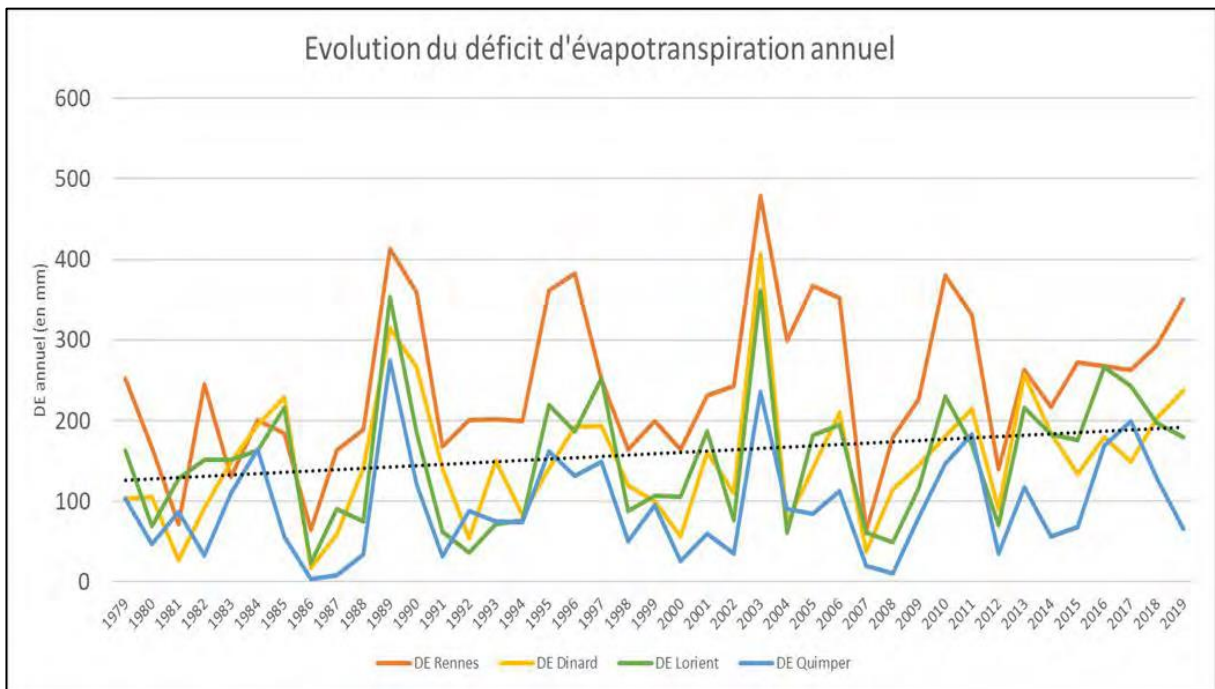


Figure 17 : Evolution du déficit d'évapotranspiration (source : Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias)

La hausse de la température tend à faire augmenter l'ETP, cela aboutit à une hausse du déficit d'évapotranspiration. L'ETP est considérée comme le premier préleveur de la ressource en eau. La température augmente plus vite en été et au printemps, ce qui tend à augmenter d'autant plus l'ETP. En Bretagne, l'évapotranspiration annuelle est estimée à 550 mm/an en moyenne, depuis les années 50 une augmentation de l'ordre de 50 à 100 mm a été observée (Météo France). Le risque de sécheresse tend donc à augmenter en Bretagne.

IV) Evolution hydrologique

tableai

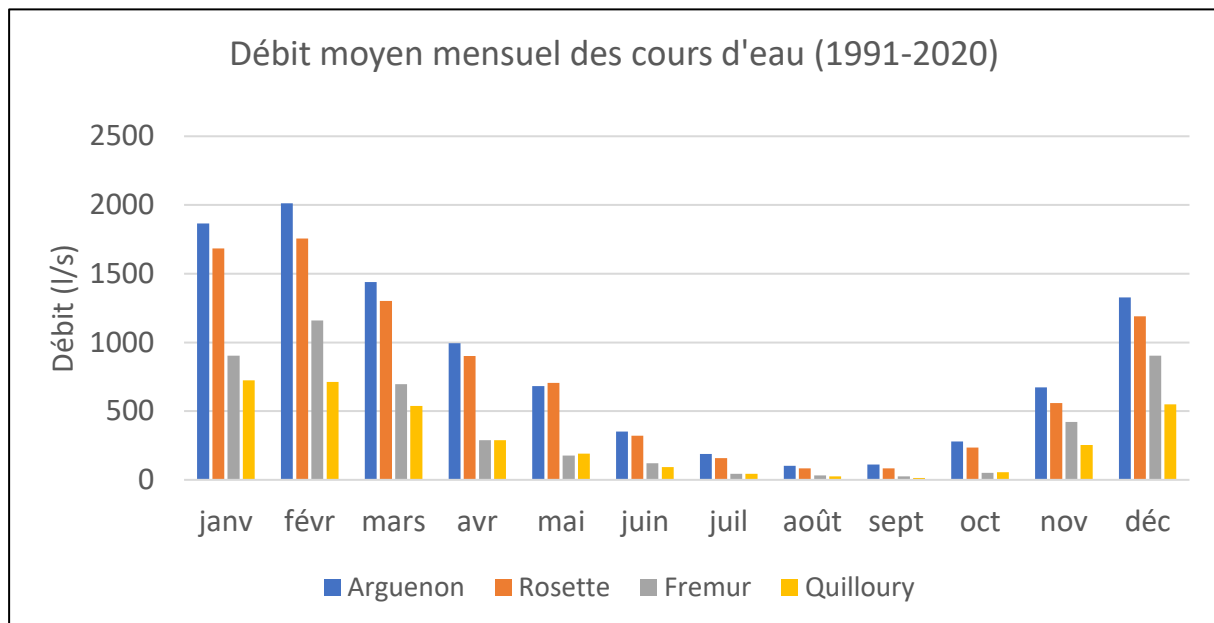


Figure 18 : Débit moyen mensuel des cours d'eau du SAGE

Le graphique ci-dessus présente les débits moyens mensuels des cours d'eau jaugés du SAGE entre 1991 et 2020 sauf pour le Quilloury où la moyenne est réalisée entre 2000 et 2020 et le Frémur entre 2010 et 2020. Les débits moyens mensuels présentent une forte amplitude entre la saison de recharge et celle d'étiage. Il y a un facteur 15 à 20 entre les débits les plus bas au mois d'août et septembre et ceux les plus élevés au mois de janvier – février. Ce comportement est dû au contexte géologique et hydrogéologique du territoire qui ne présente pas de nappes assez conséquentes pour maintenir des débits soutenus durant l'été. Dès lors que les précipitations diminuent, le niveau des nappes descend et le débit décroît.

4.1) Arguenon

Analyse des débits classés

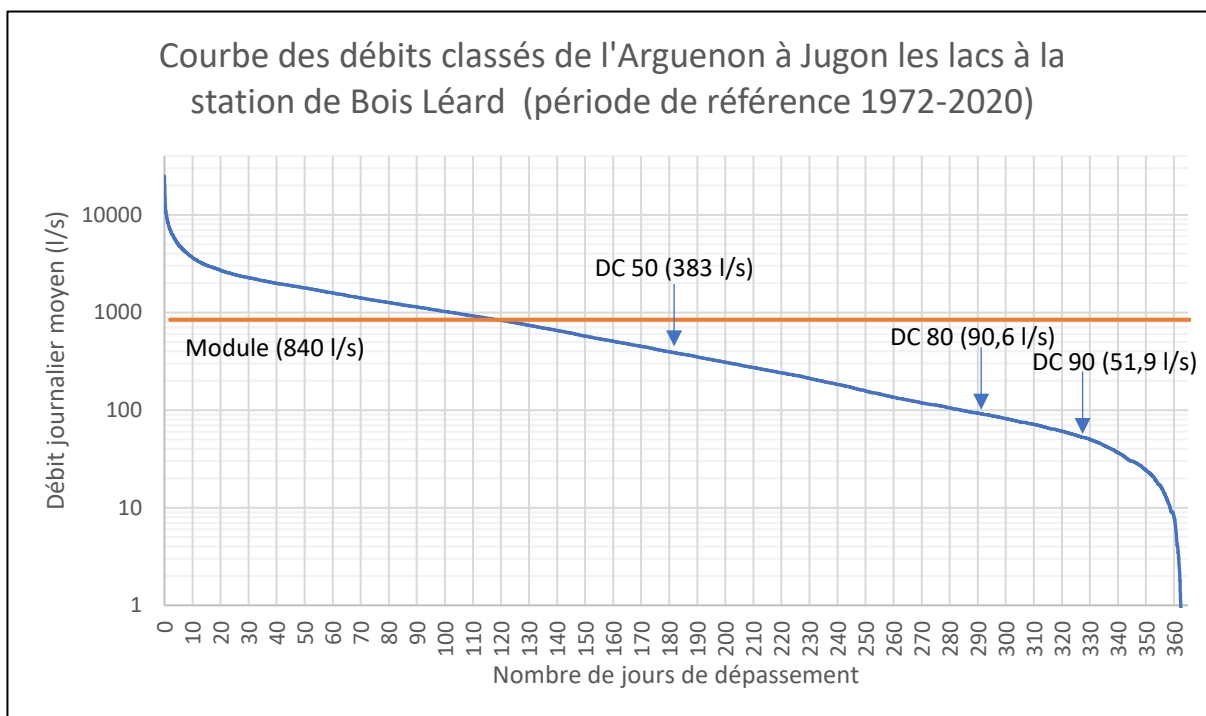


Figure 19 : Courbe des débits classés de l'Arguenon à Jugon les Lacs à la station de Bois Léard

L'analyse de la courbe des débits classés permet d'en déduire certaines valeurs intéressantes, notamment les valeurs de DC 50, 80 et 90 qui correspondent aux débits dépassés 50, 80 et 90% du temps. Une analyse du nombre de jours sous ces valeurs seuils est réalisée.

Recherche de tendances à l'aide de tests statistiques

Sur l'Arguenon, plusieurs indicateurs présentent des tendances décelées à l'aide d'un test statistique (test de Kendall), principalement les indicateurs d'étiage.

Le nombre de jours où le débit est inférieur au module ainsi qu'au DC 50 ne présente pas d'évolution significative.

Au contraire, l'analyse des DC 80 et 90 qui correspondent respectivement à des étiages peu sévères et sévères présentent des tendances à la hausse. Le nombre de jours où le débit est inférieur à 90,6 l/s (DC 80) est en augmentation de 32% avec un passage de 63 jours pour la période 1972-1996 à 84 jours par an pour la période 1997-2020.

L'analyse du DC 90 présente également une tendance à la hausse ainsi qu'une rupture en 1989. Au point de rupture, l'évolution est de +88% avec une augmentation de 23 jours pour la période 1972-1989 à 44 jours pour la période 1990-2020.

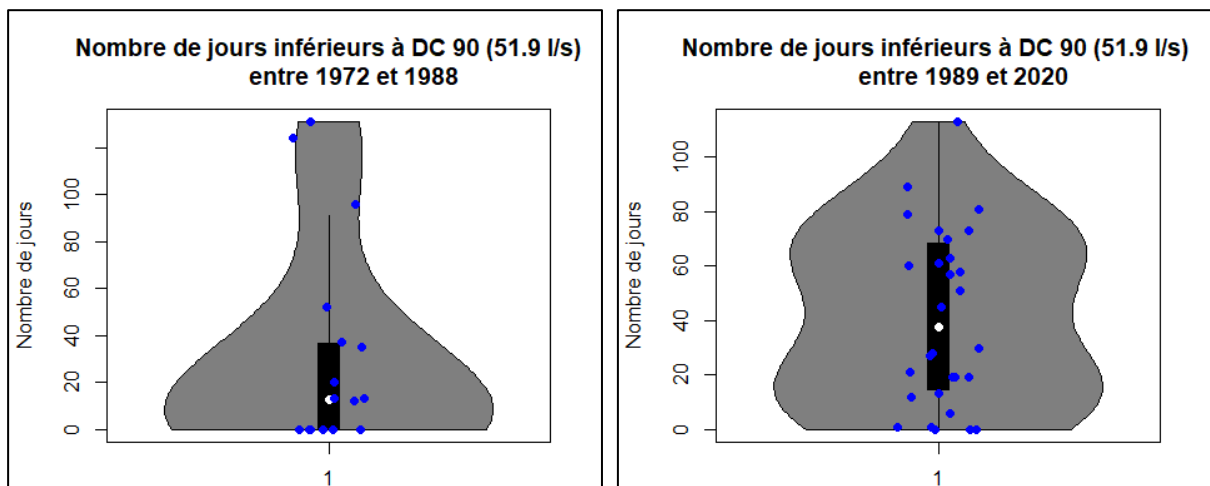


Figure 20 : Evolution du nombre de jours inférieurs à DC 90

L'augmentation du nombre de jours sous le seuil DC90 est assez marquante sur ce type de graphique (figure 20). Durant la première période, il y a en moyenne une vingtaine de jours par an sous le seuil DC 90 hormis quelques années de sécheresses extrêmes qui présentent plus de 100 jours sous ce seuil. A noter que plusieurs années entre 1972 et 1989 ne présentent aucune journée ou le débit inférieur à 51,9 l/s.

Sur le second graphique, une évolution importante est visible, il y a toujours ce nuage de points autour de 20 jours, mais un nouveau nuage de points semble se dessiner autour des 70 jours par an. Cela correspond à plus de deux mois sous ce débit (51,9 l/s), qui est caractérisé comme un débit d'étiage sévère. Il y a donc eu une évolution importante entre ces 2 périodes avec un accroissement de la sévérité des étiages assez notables.

Débits minimums moyens sur 10 et 30 jours consécutifs (VCN 10,30)

Cet indicateur ne tient pas compte des limites calendaires, il est alors plus pertinent que le QMNA qui est limité en entre le 1^{er} et le 30-31 de chaque mois.

Cet indicateur présente des tendances à la baisse avec un degré de confiance supérieur à 95% ainsi qu'une rupture en 1989. Au point de rupture, le débit moyen minimum sur 10 jours consécutifs a diminué de 40% entre la période 1972-1989 et 1990-2020 ce qui correspond à un passage de 61 à 36 l/s.

Le VCN 30 présente aussi une tendance significative à la baisse, avec un passage de 74 à 45 l/s, soit une diminution de 39%, mais ne présente pas de rupture.

Débit et date d'étiage

Ici, le débit d'étiage correspond au plus bas débit journalier enregistré au cours d'une année calendaire. Quant à la date d'étiage, cela correspond à la date d'apparition de ce plus bas débit journalier annuel. Cet indicateur présente une tendance à la baisse de -38% (de 47 à 29 l/s) ainsi qu'une rupture en 1989.

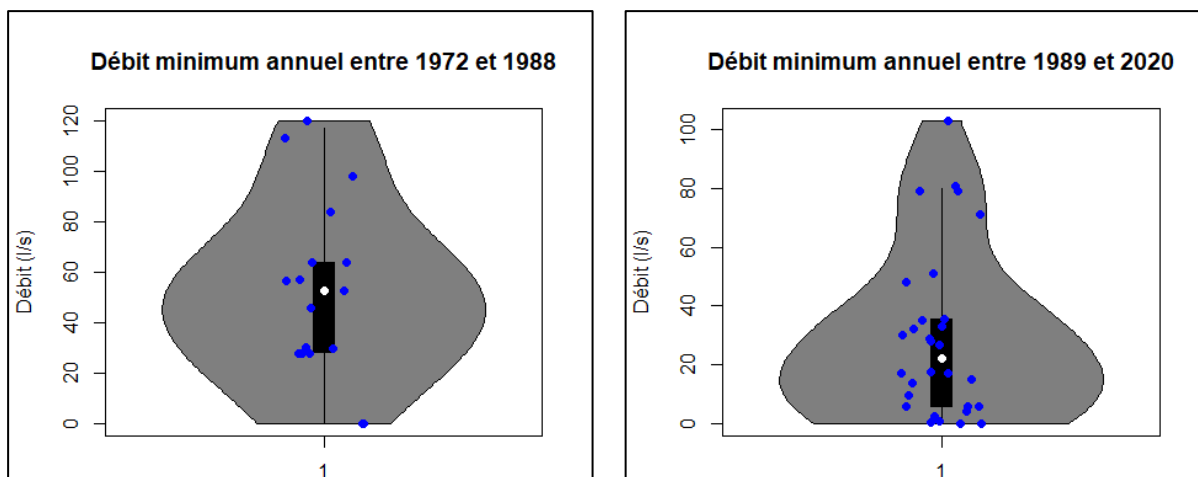


Figure 21 : Evolution du débit minimum annuel au cours du temps

Ici aussi, l'évolution est assez significative, au cours de la première période la moyenne des débits minimums est autour des 50 l/s avec un assec (sécheresse 1976). Durant la seconde période, cette moyenne se situe à 20 l/s, cet indicateur a été divisé par deux entre ces périodes. De plus, plusieurs assecs sont recensés au cours de cette seconde période.

La date d'apparition de ce débit minimum, présente une tendance à la hausse de +6%, ce qui correspond à un recul du 1^{er} septembre au 15 septembre. Le début de la période de recharge apparaît donc de plus en plus tard au fil du temps, ce qui indique un allongement de la période d'étiage.

Débit moyen durant la saison d'étiage

L'observation des débits à l'échelle mensuelle permet d'observer des diminutions significatives au cours des mois :

- Avril, diminution de 15% (1074 à 909 l/s)
- Juillet, diminution de 36% (229 à 144 l/s)
- Septembre, diminution de 58% (155 à 65 l/s)

Globalement, une tendance à la baisse des débits moyens durant la saison d'étiage (1^{er} avril- 30 septembre) est observée ainsi qu'une rupture en 1989, comme plusieurs des indicateurs précédents. Cette diminution est de 28% durant la saison d'étiage (493 à 352 l/s) entre la période 1972-1989 et 1990-2020.

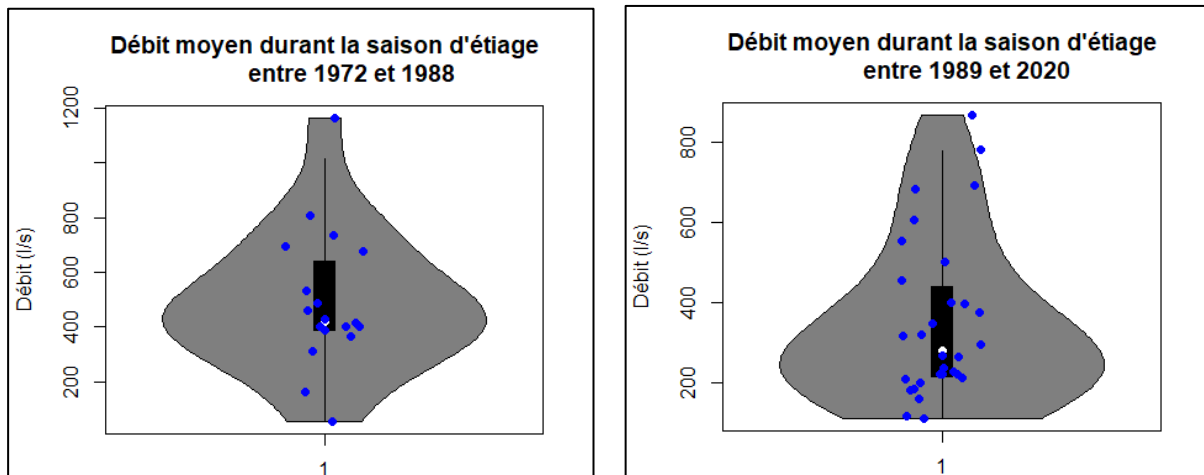


Figure 22 : Evolution des débits moyens durant la saison d'étiage

Cette diminution est bien visible sur ces graphiques avec un déplacement du nuage de points de 450 l/s pour la première période, à 300 l/s pour la seconde période.

Débit de base

Le débit de base est obtenu à l'aide de l'algorithme de Tallaksen and Van Lanen (2004). Le projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2004) a estimé que de juin à octobre plus de 96% de l'écoulement des cours d'eau du territoire provient de l'écoulement souterrain.

En regardant le débit de base (apport des nappes) à un pas de temps mensuel, plusieurs mois présentent une tendance à la baisse :

- Juin, diminution de 26% (278 à 205 l/s)
- Juillet, diminution de 26% (132 à 97 l/s)
- Août, diminution de 25% (76 à 57 l/s)
- Septembre diminution de 48% (80 à 41 l/s)

La diminution est assez homogène durant les mois de juin, juillet et août, mais elle est deux fois plus importante durant le mois de septembre. Cela est certainement à relier avec le recul de la date d'étiage, ce qui provoque un allongement la saison d'étiage. De plus à cette période, les nappes sont au plus bas et la recharge n'a pas encore commencé, cela peut expliquer cette diminution beaucoup plus importante du débit de base au mois de septembre.

Le débit de base moyen durant la saison d'étiage, présente aussi une tendance à la baisse ainsi qu'une rupture en 1989. Cette diminution moyenne est évaluée à 31% (358 à 244 l/s) durant la saison d'étiage.

4.2) Rosette

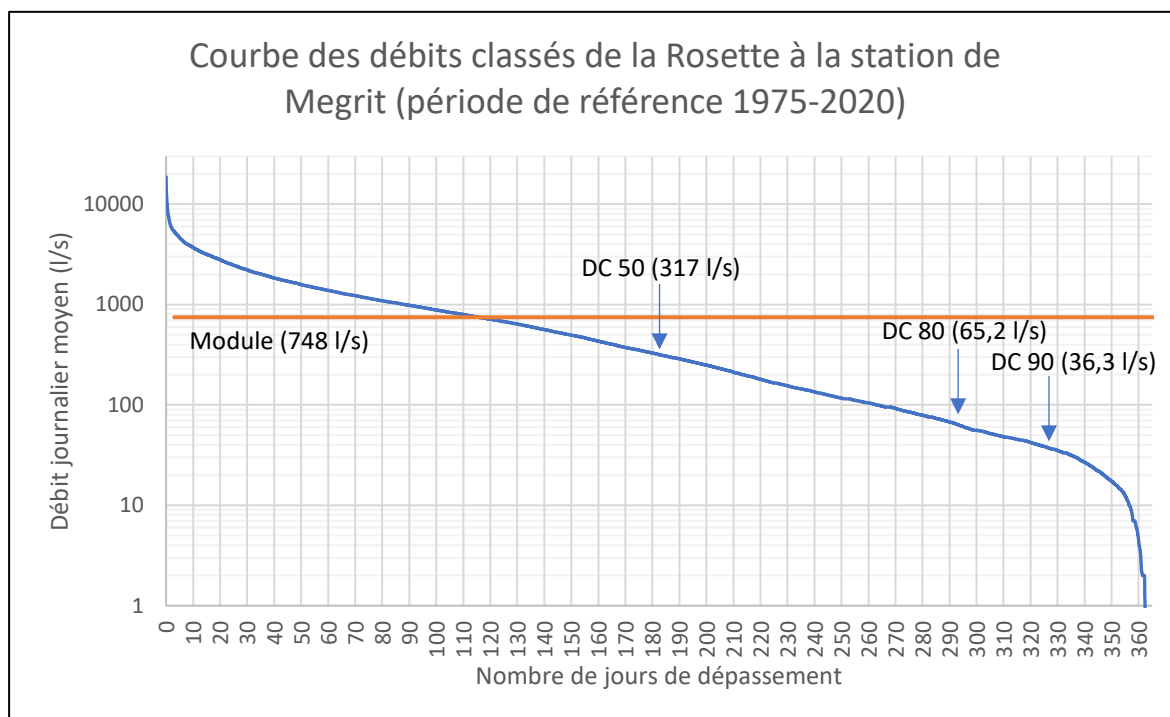


Figure 23 : Courbe des débits classés de la Rosette à la station de Mégrit

La courbe des débits classés de la Rosette est assez similaire à celle de l'Arguenon, ils ont des comportements très proches, hormis que la Rosette présente des valeurs légèrement moins élevées que celles de l'Arguenon.

Débit moyen durant la saison d'été.

A l'échelle mensuelle, aucune évolution n'est détectée selon les tests statistiques. Néanmoins, à l'échelle de la saison, une diminution est visible durant la période d'été. Elle se chiffre à 22% (414 à 304 l/s) avec une rupture lors de l'année 1989.

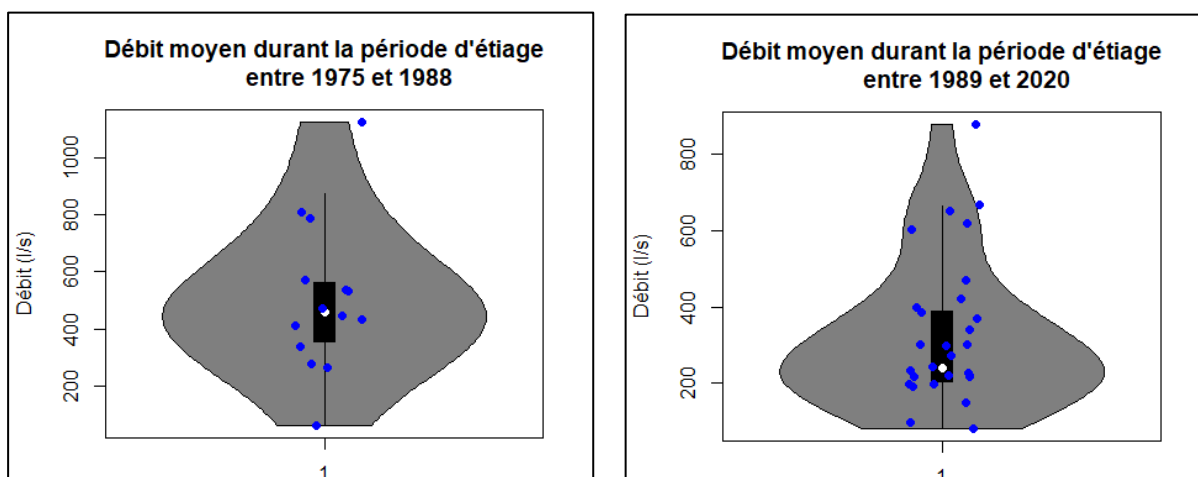


Figure 24 : Evolution du débit moyen de la Rosette durant la saison d'été

Cette évolution est illustrée sur les deux graphiques précédents au cours duquel la moyenne des valeurs se situe à environ 450 l/s pour la première période et autour des 250 l/s pour la seconde période.

Débit et date d'étiage

Concernant le débit d'étiage, il n'y a pas d'évolution significative, mais pour la date d'étiage il y a un recul dans le temps de 6%. Cela se manifeste avec une date d'étiage moyenne qui passe du 4 septembre pour la période 1975-1997 au 19 septembre pour la période 1998-2020. Ce recul est d'environ 15 jours comme pour l'Arguenon, les cours d'eau sur le territoire réagissent donc d'une manière similaire et indiquent un allongement de la période d'étiage.

Débit de base

Sur la Rosette, aucune évolution n'est détectée sur cet indicateur, cela peut être à relier avec le fait qu'il y a de nombreux plans d'eau qui influence l'écoulement naturel du cours d'eau.

4.3) Quilloury

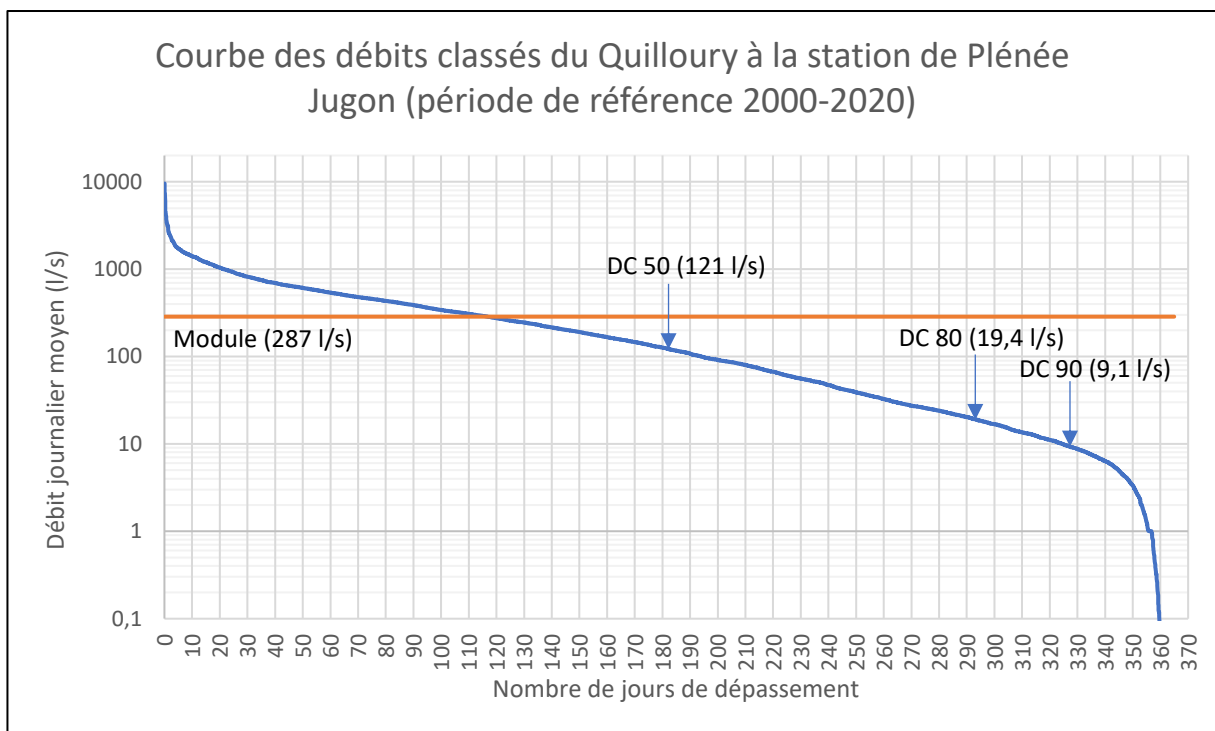


Figure 25 : Courbe des débits classés du Quilloury à la station de Plénée Jugon

A titre informatif des tests de tendance et de rupture ont été réalisés sur le Quilloury, mais aucun ne s'est révélé significatif. Cela est en lien avec le fait qu'il y a seulement 20 ans de données alors qu'il est conseillé d'en avoir au moins 30 pour obtenir des résultats fiables.

4.4) Frémur

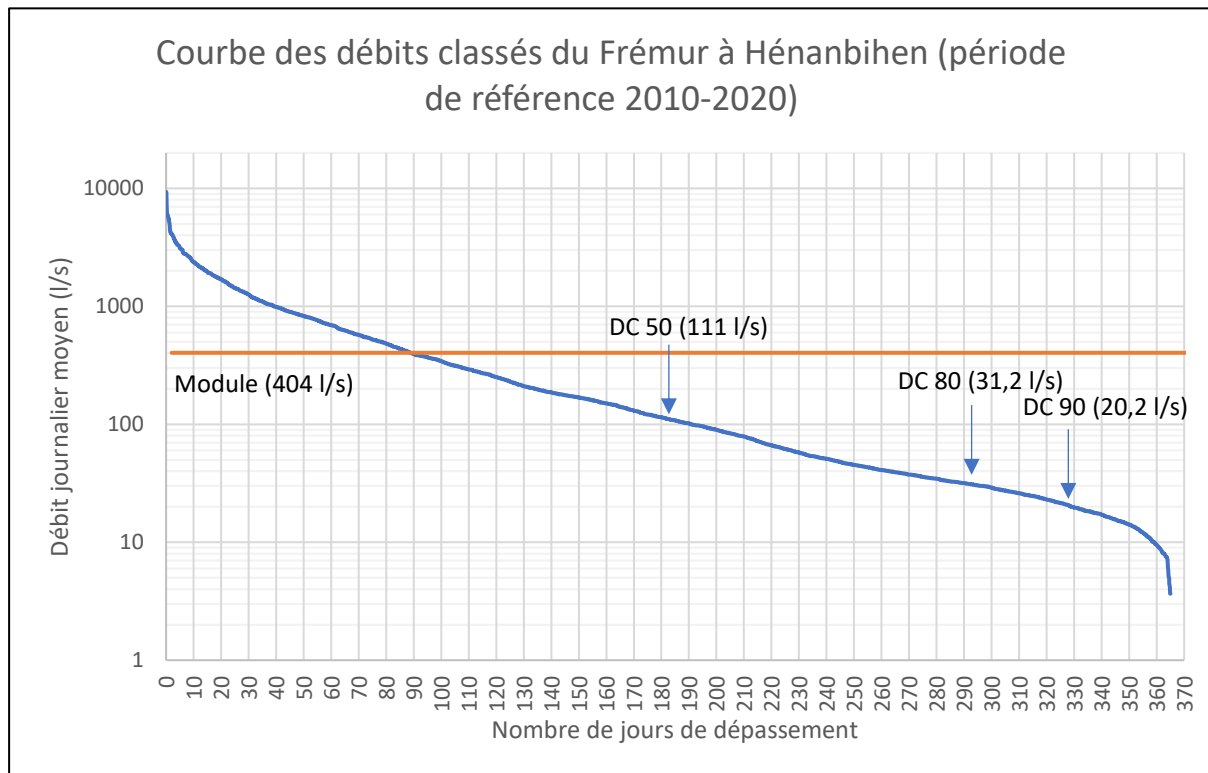


Figure 26 : Courbe des débits classés du Frémur à Hénanbihen

Les tests statistiques n'ont pas été réalisés sur les données du Frémur, car il y a seulement 10 ans de données et il est conseillé d'en avoir au minimum 30.

4.5) Le Standardized Precipitation Index (SPI)

Le SPI pour identifier les périodes sèches et humides

Le Standardized Precipitation Index (SPI) a été développé par McKee et al en 1993. C'est un indicateur statistique qui permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cet indicateur est recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale notamment pour identifier le risque de sécheresse (OMM, 2012). Il ne dépend que de la seule évolution des précipitations, ce qui limite les biais. La formule de calcul est la suivante :

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_P}$$

Avec : P : Précipitation totale d'une période (mm)

P_m : Précipitation moyenne historique de la période (mm)

σ_P : Ecart-type historique des précipitations de la période (mm)

Le SPI varie ainsi autour de 0, il est possible de désigner une période sèche ou humide selon l'intensité de l'indice. Globalement, un résultat positif correspond à une période humide et un résultat négatif à une période sèche. Si l'indice est au-delà de 2 ou - 2, il s'agit d'une période extrême. Le Tableau 4 indique les probabilités d'occurrence des sécheresses selon l'intensité du SPI. Ces données ont été obtenues avec l'analyse des données de stations du Colorado aux Etats-Unis (Mc Kee et al, 1993). Elles ne sont peut-être pas transposables en Bretagne vu le contexte climatique différent, mais cela permet de donner une indication sur la fréquence de ces sécheresses.

Indice SPI	Catégorie	Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence
De 0 à -0,99	Légère sécheresse	33	1 fois tous les 3 ans
De -1,00 à -1,49	Sécheresse modérée	10	1 fois tous les 10 ans
De -1,50 à -1,99	Grande sécheresse	5	1 fois tous les 20 ans
<- 2,0	Sécheresse extrême	2	1 fois tous les 50 ans

Tableau 4 : Probabilité d'occurrence des sécheresses selon le SPI (d'après McKee et al, 1993 ; OMM, 2012)

L'annexe 1 permet d'étudier l'évolution du SPI sur les stations du bassin versant. Les différentes périodes identifiées précédemment avec les cumuls minimums et maximums annuels ressortent nettement avec le calcul de cet indicateur. Les années 1976 et 1989 sont classées comme grande sécheresse selon cet indicateur ce qui correspond bien au vu des analyses des précipitations et des débits dans les cours d'eau. A noter également que la période 1988-1992 a été particulièrement sèche sur toutes les stations, c'est ce qui ressort également en analysant le cumul de précipitations annuel. L'année hydrologique 2000-2001 apparaît sur toutes les stations comme très humide, au vu des cumuls annuels de précipitation cela correspond à l'année la plus pluvieuse recensée sur le territoire depuis 1960. Globalement, les années sèches ou humides sont à chaque fois les mêmes sur toutes les stations étant donné leurs proximités géographiques.

Cet indicateur est intéressant, car il permet d'identifier visuellement les périodes sèches ou humides, cependant, il est difficile d'observer des tendances sans l'utilisation de tests statistiques. Visuellement, ce sont plutôt des cycles d'une dizaine d'années qui semblent se succéder, cela peut être en lien avec les cycles solaires qui ont une durée de 11 ans en moyenne.

4.6) Coefficient d'écoulement

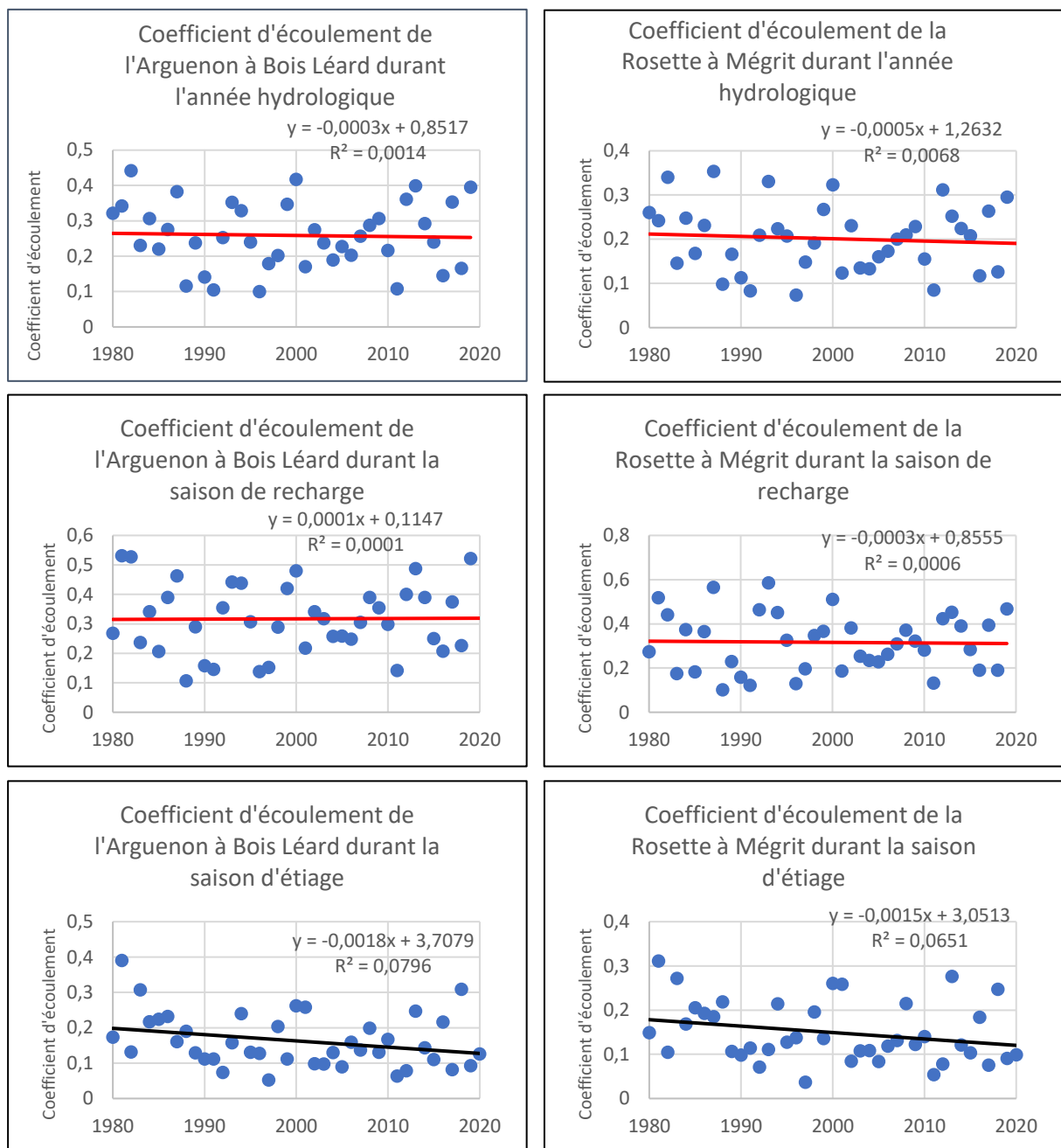


Figure 27 : Représentation graphique de l'évolution du coefficient d'écoulement, calculé pour les 2 stations hydrométriques du territoire du SAGE, la couleur noire de la droite de régression linéaire indique la présence d'une tendance

La figure ci-dessus illustre le résultat des tests statistiques sur les valeurs des coefficients d'écoulements des 2 stations de jaugeages en fonction du temps. Les valeurs des coefficients d'écoulements pour ces 2 cours d'eau ne présentent pas d'évolution statistique durant la période de recharge ainsi qu'au cours de l'année hydrologique. A l'inverse, ces 2 stations présentent des tendances décroissantes vérifiées statistiquement (Test de Kendall) au cours de la saison

d'étiage. Il y a donc une diminution de la lame d'eau écoulee par rapport à la lame d'eau précipitée au cours du temps. Par ailleurs quelle que soit la saison aucune rupture n'est détectée sur les valeurs des coefficients d'écoulement de ces 2 cours d'eau.

4.7) Coefficient de tarissement

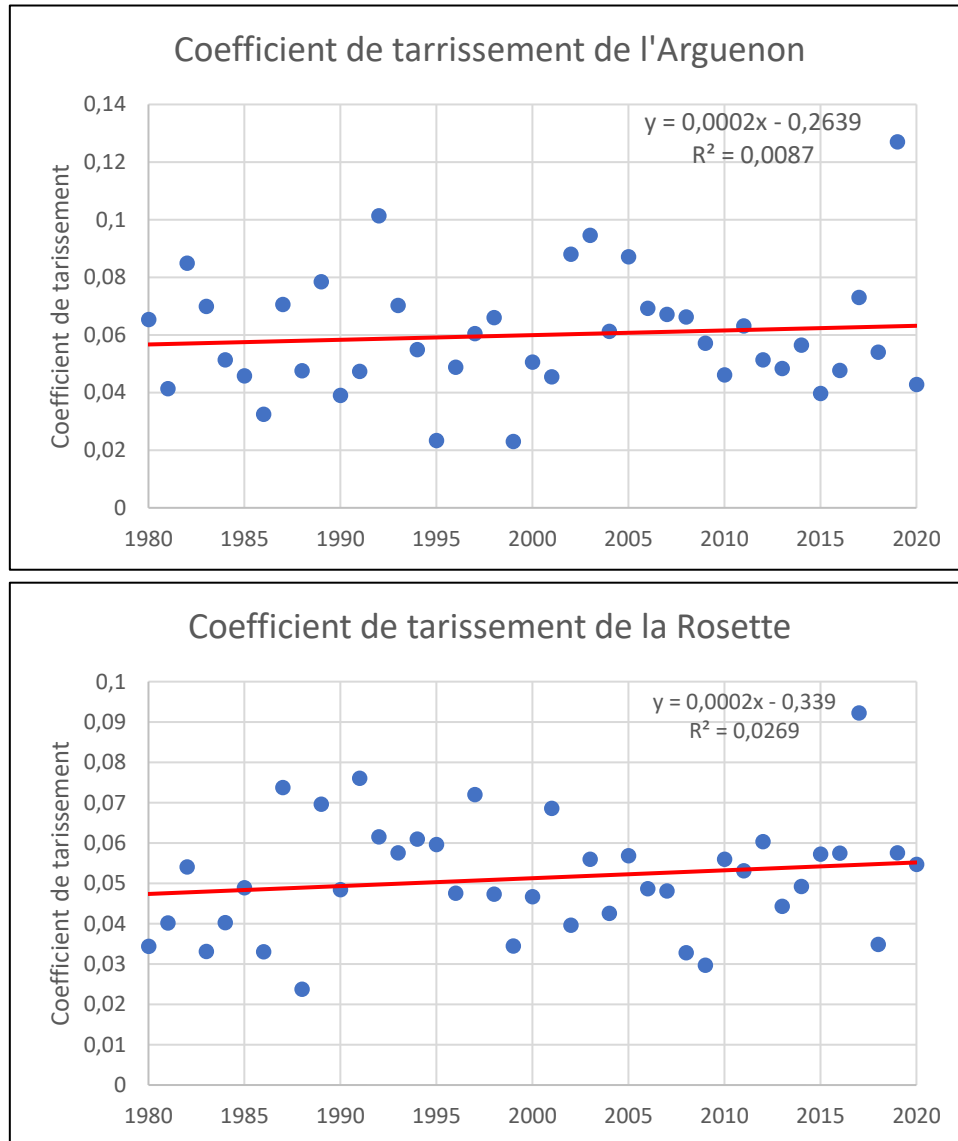


Figure 28 : Coefficient de tarissement de l'Arguenon et de la Rosette

La figure 28 présente les résultats des calculs de coefficients de tarissement moyen sur la période de juin à septembre pour les stations de jaugeage à Bois Léard et Mégrit. Les tests statistiques utilisés n'ont trouvé ni tendance ni rupture sur les valeurs des coefficients de tarissement des cours d'eau de l'Arguenon et de la Rosette. Ainsi, la vitesse de tarissement des nappes ne semble pas avoir évolué fortement depuis les années 1980.

V) Discussion des résultats

Les jours de pluies intenses façonnent le régime hydrologique et notamment le gradient de précipitations amont-aval (figure 8). La somme des pluies faibles et intermédiaires est similaire quelle que soit la localisation sur le bassin versant (environ 450 mm par année hydrologique). Au contraire les pluies marquées et fortes sont bien différentes en fonction de la localisation avec 200 mm de pluies fortes à Collinée (amont) contre 80 mm à St Cast (aval). Concernant les évolutions, elles sont assez différentes selon la localisation sur le bassin versant :

- sur la partie amont et intermédiaire le cumul de précipitations ne présente pas de tendances très importantes, hormis une diminution sur les mois de mars et mai. La répartition des précipitations semble changer au fil du temps. Elles sont globalement moins importantes au printemps et s'intensifient et se concentrent sur des plus courtes durées durant la saison de recharge. Ce qui explique les tendances d'augmentation du cumul de précipitations sur 3 et 10 jours.
- sur la station de St Cast qui se situe dans une des zones les moins pluvieuses de Bretagne, une augmentation du cumul de précipitations ainsi qu'une intensification des précipitations sont visible tout au long de l'année. Ce changement peut être à relier avec l'influence maritime étant donné sa position très proche du littoral. Toutefois, cette situation est retrouvée seulement ici sur le territoire, il est donc difficile de l'expliquer.

Les différents résultats statistiques obtenus sur l'Arguenon et la Rosette montrent une augmentation de la sévérité des étiages. Plusieurs indicateurs confirment cette tendance (VCN 10 et 30, DC 80 et 90, débit moyen durant la saison d'étiage...) assez significative. A noter qu'une diminution du débit moyen durant la saison d'étiage est constatée sur l'Arguenon et la Rosette. Cette diminution est en lien avec la diminution du débit de base sur l'Arguenon, mais sur la Rosette aucune évolution statistique n'est relevée sur le débit de base. Cela laisse penser que les plans d'eau, nombreux sur le cours d'eau de la Rosette, vont modifier l'écoulement naturel et par conséquent empêcher la détection de certaines tendances notamment sur cet indicateur. L'analyse de cette évolution est donc assez complexe sur ce cours d'eau à cause des aménagements anthropiques.

Le débit moyen durant la saison d'étiage est en diminution depuis les années 70 avec une accélération de cette tendance depuis l'année 1989 marquée par une rupture détectée sur les 2 cours d'eau (Arguenon et Rosette). L'année 1989 a été particulièrement sèche sur l'ensemble du territoire, mais elle fait partie d'un trio d'années avec les années 1988 et 1990 comme des années très sèches.

L'année 1989 apparaît ainsi comme une année charnière sur le territoire et semble avoir modifié durablement le régime hydrologique du bassin versant. Cette rupture peut être corrélée avec la rupture observée sur l'évolution des températures moyennes durant cette même période (Dubreuil et al. 1994). Par ailleurs, un allongement de la saison d'étiage est également visible avec un décalage de la date d'étiage (date du plus bas débit annuel) qui favorise l'accentuation de cette sévérité. Les étiages semblent être de plus en plus sévères et de plus en plus long sur le territoire très certainement en lien avec le changement climatique qui va modifier le régime de précipitations et augmenter la température moyenne. La diminution des cumuls de précipitations au printemps va alors contraindre la végétation à puiser plus tôt dans les

ressources en eau du sol et par conséquent les vider plus rapidement qu'auparavant. Toute la végétation va ainsi se retrouver en état de stress hydrique plus rapidement qu'autrefois. Cela peut expliquer les fins d'été particulièrement sec ces dernières années.

Les résultats graphiques et statistiques des valeurs de coefficient d'écoulement pour les stations de l'Arguenon et de la Rosette montrent une tendance à la baisse en période d'étiage. Ce résultat signifie qu'il y a une diminution de la part de la lame d'eau écoulée par rapport à la lame d'eau précipitée entre ces 2 périodes. Le changement climatique apparaît logiquement comme la première cause de ces résultats. En effet, celui-ci joue un rôle sur la proportion d'écoulement dans la rivière par rapport au volume précipité, notamment à travers l'évapotranspiration qui occupe une part de plus en plus importante au fil du temps. Sur le territoire l'évapotranspiration est considérée comme le premier préleveur de la ressource en eau avec en moyenne 550 à 600 mm par an (Oudin et al. 2005).

D'autres hypothèses peuvent également expliquer la cause de ces observations, la destruction du bocage, le drainage des zones humides ainsi que les recalibrages des rivières au cours des années, peuvent être responsables de ces tendances. Le changement des pratiques agricoles et notamment le travail et la couverture des sols avec des cultures de plus en plus gourmandes en eau peuvent également expliquer ces résultats. Cependant, ces deux hypothèses peuvent difficilement être vérifiées, car l'impact des deux facteurs évoqués n'est pas brutal mais plutôt progressif.

Pour le coefficient de tarissement calculé sur les deux stations, les tests statistiques n'ont montré ni tendance ni rupture. Ainsi, les nappes semblent se tarir au même rythme actuellement qu'il y a 40 ans.

5.1) Limites

Cette étude présente un certain nombre de limites qui tendent à augmenter l'incertitude sur la validité des résultats. Ces incertitudes proviennent de différents choix méthodologiques faits tout au long de l'étude afin de synthétiser l'évolution climatique et hydrologique.

Les sources d'erreurs dans la mesure où la transcription des données de mesure de précipitations peuvent être nombreuses (World Meteorological Organization, 2018) :

- erreur de mouillage (par défaut inférieure à 0,1 mm).
- erreur due à l'évaporation (de l'ordre de 0,2 mm maximum)
- erreur de l'efficacité de la captation (marge d'erreur qui augmente avec le vent, 0,5% d'erreur sans vent, 10 % pour un vent de 5 m/s et 25 % pour un vent de 10 m/s.

De plus, les données utilisées ne proviennent pas de série homogénéisée par Météo France, car il n'y en a pas sur le territoire du SAGE, cela constitue par conséquent une source d'incertitude supplémentaire. Enfin certaines stations météorologiques ont été déplacées (Collinée et Lanrelas) ce qui provoque une perte d'homogénéité des données. Toutefois ces données sont tout de même intéressantes puisqu'elles informent sur la pluviométrie dans la partie amont du bassin versant et permettent de voir un gradient assez net entre l'amont et l'aval de ce dernier. Par ailleurs, aucune rupture n'a été détectée en 1997, année qui correspond aux déplacements des stations. Cela atteste donc d'une certaine qualité des données.

La décomposition des pluies selon l'intensité a été effectuée selon des cumuls quotidiens. Cela mène à une interrogation sur le terme forte et faible pluie. L'intensité des pluies est en général définie au pas de temps horaire. Au niveau quotidien, un cumul de 5 mm est par exemple considéré comme faible au niveau quotidien, mais si ces mêmes 5 mm ont été mesurés en moins d'une heure, il ne s'agit pas de pluie faible, mais d'une courte averse de forte pluie. À échelle quotidienne, il y a donc beaucoup moins de détails concernant l'intensité des pluies. C'est plus le cumul total sur la journée qui intéresse ici. Ce travail n'est pas allé dans les détails des cumuls horaires, cela doit tout de même être précisé.

L'extrapolation grâce à la méthode des polygones de Thiessen comporte des lacunes, elle ne prend pas en compte la structure des précipitations, c'est-à-dire qu'elle ne tient pas compte de la hauteur de pluie dans le temps. En outre, elle ne tient pas compte de l'altitude qui est un facteur déterminant pour la répartition des pluies.

Les données d'évapotranspiration n'ont pas pu être récupérées, parce qu'il n'y a pas de stations mesurant ce paramètre sur le territoire du SAGE. La station la plus proche possédant ce type de données est celle de Dinard-Pleurduit, mais sa situation géographique (très proche du littoral) ne permet pas une extrapolation de ces valeurs sur le territoire du SAGE. Ce type de données aurait été intéressant notamment pour la réalisation d'un bilan hydrique ainsi que pour le calcul du déficit d'évapotranspiration.

Les données de débit représentent les données de base de cette étude et sont issues du site de la banque HYDRO, or sur cette donnée, il existe une incertitude qui peut varier selon les années et les stations. En effet, les débits étant calculés grâce à une courbe de tarage qui peut parfois être erronée, le site de la banque HYDRO fournit une appréciation des valeurs de débits. Cette incertitude est d'autant plus grande pour les débits très élevés (crues extrêmes). L'étude des prélèvements en amont des stations hydrométriques n'a pas été réalisée par manque de données. La création de forages déclarés ou non peut avoir modifié le niveau de la nappe et par conséquent affecter la sévérité des étiages, il est alors difficile de cibler la cause ou les causes précises de ces changements.

Les méthodes de calcul sont aussi une source d'incertitude dans cette étude. Le calcul du coefficient d'écoulement est souvent réalisé dans des études hydrologiques (Hallouz et al., 2013). Les façons de le réaliser sont diverses et variées, et la méthode utilisée ici reste simple, mais elle permet d'obtenir des résultats intéressants facilement.

Le calcul du coefficient de tarissement se fait selon des règles qui ont été décrites en partie Matériel et Méthodes, la visualisation graphique est nécessaire pour être sûr que la section choisie corresponde bien à un tarissement de la nappe. Lors de cette étape, c'est l'opérateur qui sélectionne ou non chaque période ainsi une incertitude liée à l'action humaine existe sur ce calcul du coefficient qui est délicat à réaliser. Les récessions sélectionnées dans cette étude sont donc courtes et peuvent être liées à des écoulements autres que ceux des aquifères. La méthode de calcul est affectée par des incertitudes, les débits de faibles valeurs qui sont utilisés pour réaliser cette méthode sont très affectés par les erreurs de mesure.

Ici les tests statistiques sont à chaque fois réalisés sur toute la longueur de la série de données, or les résultats de ces tests sont différents selon la période à laquelle on regarde. Par exemple, une tendance peut être détectée sur une période de 20 ans, mais elle peut « disparaître » sur une période de 40 ans. La conclusion est alors dépendante de l'échelle à laquelle on regarde les résultats.

Enfin, il a été choisi de séparer la série de données en 2 périodes de même durée, puis calculer la différence entre la moyenne de la première période et de la seconde période. Or, l'organisme météorologique mondial préconise qu'il faut faire une moyenne sur une série de données de 30 ans afin d'avoir des résultats optimaux et de s'affranchir des différents effets de cycle (Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques, 2017). Dans cette étude, seule la station de St Cast respecte cette directive, les autres stations sont trop récentes et peuvent présenter un biais dans leurs résultats qui peut être lié à l'effet de ces différents cycles.

VI) Conclusion

L'objectif de cette étude était d'avoir une meilleure connaissance des ressources en eau sur le territoire du SAGE Arguenon-Baie de la Fresnaye et d'observer si d'éventuelles évolutions avaient eu lieu au cours de la période de mesure. Une première analyse a été réalisée sur les valeurs de précipitations et de débit bruts et une seconde sur des indicateurs plus travaillés mélangeant les valeurs de débit et de précipitations le coefficient d'écoulement et le coefficient de tarissement. Ces analyses ont été réalisées grâce à des tests statistiques qui ont ainsi mis en évidence plusieurs tendances et ruptures. Concernant la climatologie différentes tendances se dessinent, tout d'abord une diminution des précipitations au printemps assez similaire sur le bassin versant amont. Au cours de l'été et de l'automne les tendances indiquent une augmentation du cumul sur le bassin versant intermédiaire ainsi qu'une intensification des pluies durant la saison de recharge. Enfin, sur l'aval du bassin, il y a une augmentation assez nette du cumul de précipitations annuel qui se répartit de manière constante tout au long de l'année accompagnée ici aussi d'une augmentation du nombre de jours de pluies intenses. Concernant l'hydrologie, une accentuation de la sévérité des étiages est bien marquée avec une diminution significative des débits moyens durant la saison d'étiage et du débit de base sur l'Arguenon. Un allongement de la saison d'étiage est perceptible sur les cours d'eau avec un recul de la date d'étiage d'une quinzaine de jours. A travers ces données une même date de rupture apparaît plusieurs fois (1989), cette sécheresse semble donc avoir modifié durablement le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Cette rupture peut également avoir un lien avec la rupture identifiée durant les années 80 pour la température moyenne.

Même si l'évolution n'est pas très importante, le coefficient d'écoulement a diminué durant la saison d'étiage pour l'Arguenon et la Rosette. Ce changement est certainement en lien avec le changement climatique, mais également avec l'aménagement du territoire. Il est ainsi difficile de dissocier le réel impact de chaque évolution sur ces changements.

Cette étude a été faite sur une période allant de 1970 à nos jours actuels afin d'observer les différents changements. Cela pourrait être pertinent de réaliser cette même analyse pour une

période future, avec différents scénarios comme ceux estimés par le DRIAS (portail de projections climatiques) liés au changement climatique (hausse de la température et modification des précipitations). Mais aussi en tenant compte du scénario estimé par les SCOT (Schéma de Cohésion Territoriale) sur la hausse des populations (de 0,1 à 0,4% de population en plus par an pour le SCOT du pays de Saint Briec).

VII) Bibliographie

- Agence de l'eau Loire Bretagne (2016). SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021, 360 pp.
- Amiot L., (2019). Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias. Mémoire de stage, 118pp.
- Aurenhammer, F. (1991). Voronoi diagrams a survey of a fundamental geometric data structure, *ACM Computing Surveys*, 23(3), pp. 345–405. doi: 10.1145/116873.116880.
- Bigot S., (2002). Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemple d'application. Actes des Journées de Climatologie de la Commission « Climat et Société » du Comité National Français de Géographie, Strasbourg, pp. 27-46.
- Bodian, A. (2012). Apport de la modélisation pluie-débit pour la connaissance de la ressource en eau : application au haut bassin du fleuve Sénégal, *Climatologie*, (Volume 9), pp. 2010–2011. doi: 10.4267/climatologie.223.
- Croiset N., Lopez B. (2013). HYPE: outil statistique des series temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines – Manuel d'utilisation. BRGM-63066-FR. 64 p., 33 fig.
- Damant, C. et al. (1983). Errors in the Thiessen Technique for Estimating a real rain amounts using weather radar data, *Journal of Hydrology*, 62, pp. 81–94.
- Dubreuil V., Huon F., Lejeune C., (1996). Les précipitations intenses en Bretagne, *Norois*, n°170, pp.395-406
- Fénéon, Jérôme (2010). Analyse hydrogéomorphologique et modélisation pluie / débit sur le bassin-versant de la Lizonne.
- Field C., Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D. (2014). *Climate Change 2013 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Giuntoli Ignazio, Renard Benjamin (2009). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages.
- Hallouz, F., Meddi, M. and Mahe, G. (2013). Etude des relations pluie / débit via les coefficients d'écoulement et le cumul de déficit de pluie dans le bassin versant de l'oued Mina

- Harrelson, C.C., (1994). Stream Channel Reference Sites: An Illustrated Guide to Field Technique. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment station.
- Held I. M., et Soden, B. J., (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 5686–5699.
- Hubert, P. and Mohamed, M. (2003). Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie, *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ. no. 278, (278), pp. 229–235.
- Lang C. and Gille, E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. A recession analysis method for low flow forecasting, *Norois*, (201), pp. 31–43. doi: 10.4000/norois.1743.
- Lang C. (2007). Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Université de Metz, 2007. Français. tel-00534656.
- Larras J. (1972). *Prévision et prédétermination des étiages et des crues*. Édit. Eyrolles, Paris, 159 p.
- Le Begueg M. (2019). Comment le département et ses partenaires peuvent contribuer à une gestion quantitative intégrée de la ressource en eau ? Rapport d'étude 171pp.
- Lemaitre, F. (2002). Lemaitre Fabien Travail de fin d'études, 98pp.
- Mougin B., Carn A., Debeglia N., Perrin J. et Thomas E. avec la collaboration de Jegou J-P. (2004). SILURES Bretagne -Rapport d'avancement de l'année 2 -BRGM/RP-52825-FR -62 p., 15 tabl., 23 fig., 3 ann.
- Organisme météorologique mondial (2017), Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé 25 pp.
- Orsoni, J. (2012). Bilan besoin – ressources – sécurité en eau Phases 1-2-3 : Bilan'. Available at: <https://www.smeil.fr/les-actions-du-sage/1-gestion-quantitative/besoins-et-ressources-en-eau/>.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., (2005). Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

- Renard B.(2014) Probabilités et Statistiques appliquées à l'Hydrologie. France.pp.90. hal-02597049
- Rutledge A.T, Daniel C.C, (1994). Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records, Ground water, vol. 32, n° 2, p. 181-188.TALLAKSEN (L. M.), 1995. – A review of baseflow recession analysis, Journal of hydrology, n° 165, p. 349-370.
- Savelli E., (2016). Les inondations en Bretagne. Bretagne environnement. n°11 64pp.
- Schéma de COohérence Territoriale (SCOT) du Pays de Saint Briec (2015), 27pp.
- Syndicat Mixte Arguenon Penthièvre (2014), Schéma d'aménagement et de gestion des eaux 209pp.
- Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology, 165(1–4), pp. 349–370. doi: 10.1016/0022-1694(94)02540-R.
- Tallaksen, L. M., and H. A. J. Van Lanen (2004). Hydrological Drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater, 580 pp., Elsevier.
- Verstrate A., Gailliez S. & Degré A. (2011). Statistical analysis of low-flow based on short time series, The case of Wallonia. Geophysical Research Abstract, 13.
- World Meteorological Organization, (2018). Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume I –Measurement of Meteorological Variables, 573 pp

VIII) Annexe

Année hydrologique	St Cast		Collinée		Lanrelas		Languedias		Quintenic	
	Etiage	Recharge	Etiage	Recharge	Etiage	Recharge	Etiage	Recharge	Etiage	Recharge
1960-1961	0,89	-0,16								
1961-1962	-1,33	-0,41								
1962-1963	-1,02	-0,93								
1963-1964	-0,41	-1,55								
1964-1965	0,10	-0,32								
1965-1966	-0,13	0,43								
1966-1967	0,82	-0,02								
1967-1968	-0,15	-0,17								
1968-1969	-0,24	-0,84								
1969-1970	-1,20	0,10								
1970-1971	-1,55	-1,63								
1971-1972	-0,17	-0,44								
1972-1973	-0,77	-1,27								
1973-1974	0,49	-0,94								
1974-1975	0,11	-0,16			-0,95	0,16				
1975-1976	-0,59	-1,74			0,10	-1,58				
1976-1977	-1,58	0,83	-1,58	0,27	-0,88	0,95				
1977-1978	-0,08	1,46	-0,66	0,12	-0,44	0,22				
1978-1979	-0,47	-0,22	-0,85	0,38	-0,76	0,35				
1979-1980	-1,06	0,32	-1,13	-0,12	-0,72	0,00				
1980-1981	-0,55	0,04	-0,78	0,32	-1,00	-0,30	-0,94	0,53		
1981-1982	1,34	0,08	0,89	-0,39	1,84	-0,43	2,17	0,23		
1982-1983	0,10	1,31	1,18	0,40	0,70	0,40	0,33	1,29		
1983-1984	0,08	-0,41	0,41	-0,15	1,14	-0,44	0,93	-0,65		
1984-1985	0,20	-0,18	-0,61	0,35	0,10	-0,02	0,52	0,40	0,11	0,17
1985-1986	-1,05	0,48	-0,87	-0,62	-1,07	-0,73	-1,21	-0,70	-0,95	-0,23
1986-197	2,27	-0,52	1,35	-1,24	0,70	-1,34	0,66	-1,34	1,23	-1,07
1987-1988	-0,06	1,62	0,42	1,45	-0,18	1,55	0,56	1,56	0,04	1,21
1988-1989	-0,49	-1,20	-0,31	-1,75	0,08	-1,53	-0,87	-1,47	-1,06	-1,88
1989-1990	-1,81	-0,28	-1,58	0,29	-1,75	0,05	-1,61	-0,59	-1,77	-0,71
1990-1991	-1,14	-0,76	-0,96	-0,36	-1,21	-0,43	-1,49	-0,63	-1,57	-0,88
1991-1992	-0,82	-1,60	-0,47	-1,54	-0,86	-1,14	-0,88	-1,44	-1,28	-1,80
1992-1993	1,54	-1,00	1,37	-0,84	1,19	-1,00	1,34	-1,06	1,61	-1,41
1993-1994	0,76	0,08	1,23	0,39	2,12	0,31	1,20	0,35	0,77	0,20
1994-1995	2,22	1,58	1,49	1,23	0,82	0,89	0,88	0,44	1,08	0,12
1995-1996	0,56	-1,67	0,53	-0,78	0,32	-0,62	0,67	-0,96	0,40	-1,22
1996-1997	-0,81	-1,10	-0,74	-1,16	-1,19	-1,24	-0,98	-1,41	-0,91	-1,11
1997-1998	-0,23	-0,33	-0,30	-0,57	-0,03	0,04	-0,30	-0,84	-0,30	0,15
1998-1999	0,86	0,54	1,60	0,00	1,38	-0,28	1,02	-0,14	1,84	1,19
1999-2000	1,09	0,36	1,99	0,10	1,11	0,10	0,55	0,08	1,44	0,79
2000-2001	1,24	3,06	1,53	3,47	1,20	3,36	1,95	2,37	1,51	2,46
2001-2002	-0,36	-0,81	0,58	-0,49	0,67	-0,75	0,04	-1,01	-0,04	-0,85
2002-2003	0,38	1,39	-0,29	0,77	-0,11	0,81	-0,22	1,08	-0,38	1,04

2003-2004	-1,79	0,97	-0,93	0,44	-1,26	0,94	-1,72	0,68	-1,66	1,10
2004-2005	1,30	0,16	1,22	-0,90	0,93	-0,69	0,54	-0,78	0,42	-0,10
2005-2006	-0,09	1,04	-0,49	0,14	0,06	0,35	-0,06	0,25	-0,06	0,65
2006-2007	-0,50	0,79	-0,75	1,19	-0,20	1,35	-0,64	0,01	-0,97	0,25
2007-2008	1,33	-0,61	1,52	-0,14	1,66	0,33	1,20	-0,54	1,53	-0,52
2008-2009	1,15	0,40	1,09	-0,05	1,13	-0,01	1,27	0,04	1,36	0,29
2009-2010	-0,18	0,81	0,16	1,00	0,13	0,79	0,20	0,45	-0,01	0,50
2010-2011	-1,10	0,31	-1,09	-0,46	-1,07	0,02	-1,42	-0,13	-0,89	-0,24
2011-2012	-0,34	-0,89	-0,72	-1,48	-0,80	-1,18	-0,98	-1,11	-0,67	-1,17
2012-2013	1,23	0,68	0,74	0,62	1,65	0,62	0,29	1,22	0,47	0,66
2013-2014	-1,38	1,33	-1,17	1,84	-1,65	2,38	-1,37	2,16	-0,99	0,81
2014-2015	0,31	1,10	-0,73	-0,16	-0,23	-0,29	-0,16	0,86	-0,41	0,68
2015-2016	1,47	-0,02	-0,60	-0,34	-0,52	-0,37	-0,10	-0,10	0,16	-0,37
2016-2017	-0,99	-0,94	-1,27	-1,40	-1,46	-1,34	-1,02	-0,93	-0,70	-0,73
2017-2018	1,84	1,05	0,20	-0,21	0,11	-0,22	0,64	0,86	0,79	0,83
2018-2019	0,07	-0,83	-0,81	-1,06	-0,70	-1,08	-0,78	-0,52	-0,25	-0,47
2019-2020	0,07	1,61	0,09	1,46	-0,09	1,05	0,17	1,48	-0,02	1,64

Extrêmement sec	Inf à -2
Très sec	Entre -1,5 et -2
Sec	Entre -1 et 1,5
Normal	Entre -1 et 1
Humide	Entre 1 et 1,5
Très humide	Entre 1,5 et 2
Extrêmement humide	Sup à 2

Annexe 1 : Calcul du SPI pour les différentes stations météorologiques