



Université Rennes 2

Master Géographie, Aménagement Environnement,
Développement Parcours Environnement, Territoires,
Acteurs

2019 / 2020

**Impacts des changements climatiques
sur la ressource en eau en Bretagne :**

**Approche exploratoire à partir des données historiques
et des données du portail Drias**

Louis Amiot

Mémoire soutenu le 14 octobre 2020

Tuteurs :
Vincent Dubreuil
Professeur de géographie
Université Rennes 2

Franck Baraer
Météo-France

Josette Launay
Chargée de mission au
Creseb

Remerciements

Je tiens d'abord à faire un remerciement général à l'ensemble de mes encadrants pour le suivi régulier et rigoureux tout au long du stage. Vous m'avez laissé une grande autonomie dans la méthode de travail et j'ai l'impression que vous m'avez fait confiance dès le début du travail. Pour cela je tiens vraiment à vous remercier.

Merci à Vincent Dubreuil pour sa grande disponibilité tout au long du stage et tous ses apports et conseils scientifiques sur le travail mené. Merci à Frank Baraer pour son suivi et son regard expert sur le climat breton. Merci à Josette Launay pour ses conseils et ses relectures attentives. Merci à Guillaume Pajot pour son suivi et ses conseils sur les premiers mois de stage. Merci aussi à Jean-Claude Oleron pour son aide dans le choix des données.

Merci à ma famille qui m'a toujours soutenu et accueilli pendant la période de confinement. Merci à tous mes ami-e-s qui ont toujours été présents pour moi et m'ont permis de décompresser. Et une dédicace spéciale à l'ensemble de mes camarades de M2 ETA qui sont formidables !

Préambule

Ce mémoire est l'issue d'un travail de 6 mois de stage en climatologie qui s'est déroulé du 2 mars au 31 août 2020. Le stage s'intègre dans une volonté de la Région d'étudier les impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne à des horizons allant de 25 à 100 ans. Cette démarche est portée par le Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau de Bretagne, les gestionnaires de la ressource, et leurs partenaires académiques. Le CRESEB est une plateforme régionale créée par la région Bretagne dans le but de faciliter et organiser le partage des connaissances autour de la ressource en eau. Leur mission principale est le transfert de connaissance des scientifiques et spécialistes vers les acteurs de la gestion de l'eau. Le but est que les gestionnaires s'approprient ces connaissances pour en tenir compte dans leurs plans de gestion.

Les résultats de ce travail doivent être réutilisés d'une part d'un point de vue méthodologique. Le raisonnement et tous les points de vigilance qui mènent aux résultats sont bien mis en avant. L'un des objectifs ambitieux est que les gestionnaires puissent réaliser par eux-mêmes ce diagnostic climatique. D'autre part, ces résultats pourront être synthétisés pour être réutilisables afin de montrer les impacts potentiels du changement climatique sur l'eau en Bretagne.

La ressource en eau est abordée ici d'un point de vue climatologique c'est-à-dire en termes de pluviométrie. Il s'agit d'étudier la variation de la pluviométrie avec le changement climatique. Cette approche ne prend pas ou peu en compte la pédologie et la géomorphologie. Ce travail est complété par une thèse sur le fonctionnement des eaux souterraines sous influence du changement climatique.

Le stage en lui-même aurait dû se dérouler dans les locaux du CRESEB. Cependant, le contexte sanitaire particulier a impacté le déroulé du stage. Il était prévu de faire une partie au laboratoire Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) à Rennes 2 et une partie au CRESEB mais aussi au besoin à Météo-France. Les deux premières semaines de stage se sont donc déroulées à Rennes 2 puis à partir du confinement en télétravail. Il y a donc eu deux semaines en présentiel et cinq mois et demi en télétravail.

À titre personnel, j'estime que ma capacité de travail n'a pas été altérée par le télétravail. J'ai eu la chance d'avoir pu rentrer chez moi pour le confinement et ainsi vivre cette période dans la maison de mes parents, à la campagne. J'avais donc un bureau et un cadre de vie agréable je ne peux pas m'en plaindre. Le télétravail n'a pas été une difficulté pour moi, je pense avoir su surmonter la difficulté principale qui est la grande liberté dans les horaires. Cette liberté est à la fois très plaisante mais peut vite devenir un piège si on ne se met pas de limite. Je peux dire que j'ai apprécié le télétravail, travailler depuis chez soi n'est pas désagréable.

Cependant, il y a quand même un inconvénient majeur, c'est le manque de lien direct notamment avec mes tuteurs. Le suivi du stage a certainement été ralenti par ces liens uniquement virtuels. Au lieu de simplement se rendre sur place et montrer directement le problème, le doute ou juste les résultats directement sur le tableur ; il faut préparer les données avec mise en forme pour bien montrer où est le problème. Cela demande plus de temps pour tout le monde. Les quelques fois où j'ai pu me rendre directement à la fac cela a été bien plus productif que des échanges par mail. Il y a aussi eu un manque de lien avec les gestionnaires de l'eau. C'est pour eux que ce travail est destiné mais nous n'avons eu que peu de contact ce qui n'a pas permis de cerner concrètement leurs attentes.

Mais au final, le stage s'est bien déroulé du début à la fin !

Index des sigles

BV : Bassin Versant

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

CRESEB : Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau de Bretagne

DE : Déficit d'Évapotranspiration

ETP : Évapotranspiration Potentielle

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

RCP : Representative Concentration Pathway

SPI : Standardized Precipitation Index

TCA : Type de Climat Annuel

Sommaire :

Préambule -----	5
Index des sigles -----	6
Sommaire : -----	7
Introduction : -----	8
1. L'eau en Bretagne une ressource abondante mais convoitée -----	13
1.1 Le climat breton : une abondance de la ressource en eau -----	13
1.2 Les usages de l'eau en Bretagne -----	20
1.3 Les risques climatiques liés à l'eau : définition et synthèse des connaissances dans la région -----	22
1.4 La gestion de l'eau en France -----	26
1.5 Le SDAGE et le SAGE, des outils réglementaires des usages de l'eau -----	28
2. Méthode -----	31
2.1 Les objectifs et attendus des acteurs -----	31
2.2 Choix des lieux d'études -----	32
2.2. Choix des stations -----	37
2.3. Choix des indicateurs climatiques : -----	40
3. Les variabilités pluviométriques historiques : un regard rétrospectif sur le climat breton -----	43
3.1 Une grande variabilité spatiale de la pluviométrie -----	43
3.2 Les évolutions du climat sur les séries historiques en Bretagne -----	59
3.3. Le risque de sécheresse et d'inondation en Bretagne -----	67
4. Projection des données avec le portail Drias -----	81
4.1 Modèles et scénarios -----	81
4.2 Modèles et incertitudes -----	83
4.3 Les évolutions du climat breton selon les modèles -----	88
4.4 Tentative de modélisation du risque de sécheresse -----	101
5. Discussion des résultats -----	111
5.1. Quels indicateurs pertinents ? -----	111
5.2. Limites -----	112
6. Conclusion -----	114
Table des matières -----	116
Table des figures -----	118
Table des Tableaux : -----	119
Table des cartes -----	119
Bibliographie : -----	120

Introduction :

L'eau est le grand enjeu du XXI^{em} siècle. C'est la source de la vie et aussi celle de l'activité humaine. Les besoins en eau pour des usages industriels, agricoles, domestiques ou encore énergétiques n'ont jamais été aussi importants. La consommation en eau dans le monde a été multipliée par 5 en 50 ans et va continuer d'augmenter au regard de l'évolution démographique (Mutin, 2000). Elle est aussi nécessaire pour l'ensemble de la biosphère. En parallèle, la sécheresse semble chaque année un peu plus présente posant ainsi la question de la disponibilité de la ressource et la menace du manque d'eau. Pourtant, l'eau ne manque pas sur la planète « bleue » :

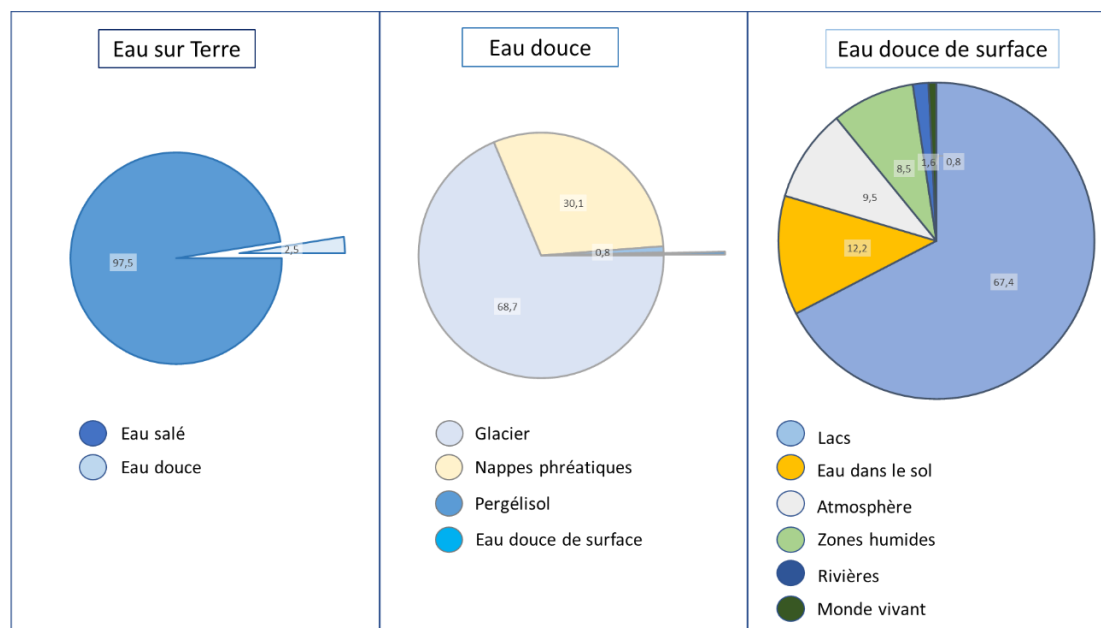


Figure 1: Répartition de l'eau sur Terre (Synthèse des données d'après Morel, 2007 et Cosgrove 2000)

Sur Terre, la quantité d'eau est estimée à 1,4 milliard de km³, et cela depuis 3 milliards d'années (UNESCO). Elle existe sous toutes les formes (solide, liquide ou gazeuse), cependant 97% de l'eau est stockée dans les océans, les 3% restants constituent l'eau douce (Figure 1). Mais, parmi cette eau douce, une large majorité est stockée dans les glaciers et la banquise, et près d'un tiers dans les nappes phréatiques. L'eau douce de surface représente ainsi une infime partie de l'eau sur Terre, c'est pourtant celle-ci qui est convoitée par la faune et flore terrestre ainsi que par l'Homme. Elle constitue la ressource en eau ou « eau bleue ». Les eaux de pluie sont aussi intégrées à cette ressource en eau, celle-ci permet notamment la production de 60% de la nourriture mondiale (Cosgrove 2000). Donc, sur les 1,4 milliard de km³ d'eau sur Terre, seuls 10 à 12 000 km³ d'eau douce de surface sont accessibles et utilisables directement par l'Homme chaque année (Morel, 2007).

Cette eau n'est pas statique puisque chaque année, 577 000 km³ d'eau se renouvelle (cycle de l'eau) en s'évaporant des grands réservoirs de surfaces, principalement l'océan et puis en retombant lors des précipitations (Morel, 2007). L'eau est ainsi une composante essentielle du système climatique à travers les échanges au sein de l'hydrosphère.

Le fonctionnement de l'hydrosphère est régi par 3 processus : stockage et déstockage des réservoirs d'eau, transfert de l'eau d'un réservoir à un autre et transformation de l'eau d'un état physique à un autre. Le cycle de l'eau dépend aussi de 3 types d'énergies : d'abord l'énergie gravitationnelle qui empêche toute perte d'eau en dehors de l'atmosphère et permet d'attirer les gouttes d'eau vers le sol. Elle permet aussi les écoulements des cours d'eau entre l'amont et l'aval. L'énergie radiative qui favorise l'évaporation de l'eau. L'énergie de rétention hydrique correspond à

la capacité du sol à absorber l'eau et la saturation du sol entraîne des écoulements de surface (Ambroise, 1999).

En Bretagne, environ 26 milliards de m³ de pluie tombent chaque année sur la région (Figure 2). Une majorité de ces précipitations sont renvoyées à l'atmosphère par évapotranspiration. Le reste, appelé pluie efficace est stocké dans les eaux superficielles de surface.

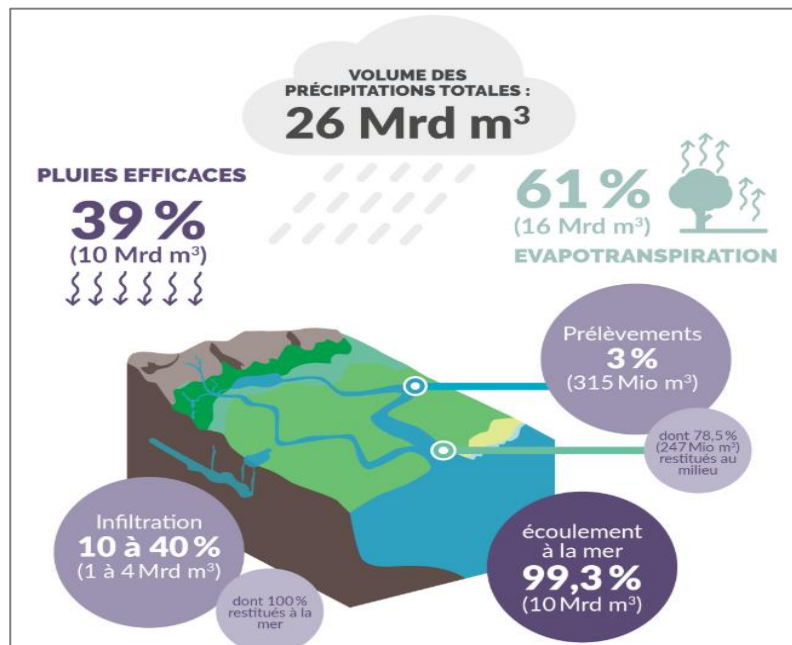


Figure 2 : Le cycle de l'Eau en Bretagne (moyenne 1980-2014 ; OEB, 2019)

Le sol breton est assez peu perméable avec une roche dure et imperméable, ce qui limite les infiltrations (Savelli, 2016). Il y a donc une forte corrélation entre la pluie et le débit sur la région. 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 prélevé dans ces eaux superficielles en Bretagne (ARS 2017), l'approche climatologique est nécessaire pour évaluer la quantité d'eau disponible. C'est-à-dire une approche de la ressource en eau par l'évolution de la pluviométrie

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 rayonnement infrarouge, et donc une augmentation de l'énergie radiative. 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 un air plus humide qui favorise les précipitations. Donc en théorie, une hausse des températures provoque une augmentation des pluies. Mais la réalité est plus complexe.

D'après le 5^{em} rapport du GIEC, il y a réchauffement de 0,85 [0,65 à 1,06] °C sur la période 1880-2012 au niveau mondial, il concerne l'ensemble des surfaces terrestres (GIEC 2014). En France, le réchauffement entre 1901 et 2012 est de l'ordre de +1,3°C soit plus que la moyenne mondiale (Planton *et al*. 2015). Les tendances mesurées sont donc bien connues pour les températures. Mais, concernant les précipitations, il est plus difficile de détecter une tendance car la variabilité spatio-temporelle est plus grande. Les relevés de cumuls de pluies sont plus récents et plus rares.

Ainsi, la surface terrestre est moins couverte par ces données. Il y a donc une incertitude sur l'évolution des précipitations observées au niveau mondial et local.

Il persiste ainsi une grande incertitude sur l'évolution de la ressource en eau à venir tant au niveau mondial que local. De nombreuses études tentent d'estimer l'évolution de cette ressource, particulièrement dans l'ouest à travers l'évolution des précipitations, du risque de sécheresse ou d'inondation (Merot *et al*, 2012 ; Jouzel *et al*, 2012 ; Valy 2010. ; Dubreuil 1994 ; Lamy 2013 ; ...). Il est donc important de connaître les impacts du changement climatique sur la ressource en eau, son évolution future et sa distribution spatiale et temporelle.

En Bretagne, l'aspect qualitatif de l'eau est beaucoup abordé par les gestionnaires depuis ces dernières décennies, notamment suite au contentieux européen lié au non-respect de la directive 80/778/CEE relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. L'aspect quantitatif de l'eau émerge depuis quelques années, notamment au niveau des gestionnaires bretons en eau potable, inquiets de connaître l'évolution de la quantité d'eau disponible au regard du changement climatique.

Les simulations sur le changement climatique comme la variabilité interannuelle passée (sécheresses de 1976, 1989 et 2003 ou hivers très humides comme 2000-2001, 2013-2014) les interrogent sur l'évolution future des ressources en eau en Bretagne. En effet, comme dans d'autres régions tempérées, les ressources souterraines de la région sont vulnérables et sensibles aux variations climatiques du fait de leur faible profondeur, de leur stock limité et de l'évolution éventuellement rapide de leur saturation.

Dans un contexte de changement climatique, les projections futures de la température et des précipitations posent question vis-à-vis de la disponibilité de la ressource et des évolutions à prévoir jusque dans les enjeux d'aménagement du territoire au niveau des bassins versants. Cependant, devant la diversité des situations à prendre en compte selon les scénarios, modèles et indices climatiques, les gestionnaires paraissent souvent démunis, alors même que leur expérience acquise sur le terrain lors d'événements passés est aussi une source d'information pertinente.

Cette étude s'intègre dans une démarche régionale portée par le CRESEB (centre de ressources et d'expertise scientifique en eau de Bretagne), les gestionnaires de la ressource et leurs partenaires académiques, pour proposer une vision des impacts du changement climatique sur les ressources en eau à des horizons allant de 25 à 100 ans sur la région Bretagne. Elle porte ici sur l'analyse de **la ressource en eau d'un point de vue climatologique, c'est-à-dire sa disponibilité en fonction de l'évolution du volume de précipitation totale et des autres paramètres climatiques élémentaires (température, rayonnement solaire, vent) qui impactent l'évapotranspiration et le bilan hydrique**. L'objectif est d'analyser les données existantes sur l'évolution passée observée du climat et l'évolution future modélisée de ressource en eau en Bretagne pour répondre au questionnement principal suivant :

Quels sont les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne depuis 1951 ?

Quels seront les potentiels impacts du changement climatique à un horizon proche ou lointain ?

Quelles sont et seront les évolutions spatiales et temporelles de la ressource en eau en Bretagne ?

L'objectif final étant de proposer des indicateurs climatiques pertinents aux gestionnaires pour évaluer les effets du changement climatique au niveau de leurs bassins versants afin qu'ils puissent élaborer une stratégie d'adaptation.

Pour y répondre, ce mémoire est divisé en 5 parties :

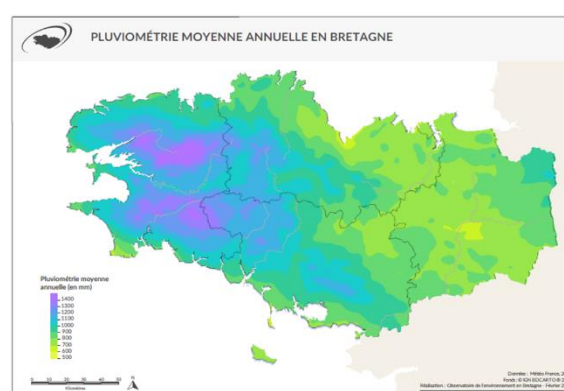
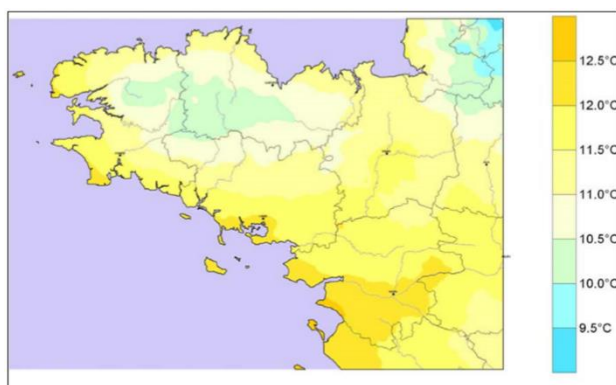
- La première partie est une partie introductive sur la ressource en eau en Bretagne avec une synthèse des connaissances sur cette question. Elle présente le climat général en Bretagne, les différents usages de l'eau dans la région, qui dépendent aussi des événements extrêmes type inondations ou sécheresse. Enfin les outils de gestions de l'eau seront présentés.
- La deuxième partie présente la méthode c'est-à-dire les objectifs de l'étude, le choix des lieux d'étude et le choix des indicateurs climatiques utilisés.
- La troisième partie montre l'état de la ressource en eau actuelle avec l'analyse des séries historiques. Il en ressort les différences spatiales en Bretagne et les tendances observées depuis 1951.
- La quatrième partie s'intéresse à la projection des données avec le portail Drias.
- Enfin, la dernière partie amène une discussion générale des résultats et perspectives.

1. L'eau en Bretagne une ressource abondante mais convoitée

1.1 Le climat breton : une abondance de la ressource en eau

1.1.1 Quel climat en Bretagne ?

D'abord, il est important de revenir aux bases géographiques pour mieux appréhender l'aspect climatique. La Bretagne est la région la plus à l'ouest de la France métropolitaine, elle forme une péninsule à l'extrémité du continent eurasiatique. Cette situation géographique fait que la région possède plus de 2 700 km de côtes soit $\frac{1}{3}$ du littoral de la métropole. En son centre à l'ouest, le Massif armoricain est marqué par les Monts d'Arrée avec le point culminant de Roc'h Trévezel à 384 m d'altitude et les Montagnes noires avec une altitude de 300 m. C'est un « vieux » massif, vestige de montagnes d'une hauteur de 2 000 à 3 000 m il y a 300 millions d'années (Grand Atlas de France, 1969). Son altitude aujourd'hui certes modeste influence toujours le climat de la région.



Températures moyennes annuelles (1971-2000)

Figure 3 : Températures et pluviométrie annuelle moyenne (Météo-France, 2012)

Le climat breton est de nature océanique avec des étés frais, des hivers doux et des précipitations bien réparties tout au long de l'année. Les températures sont relativement clémentes du fait de la proximité de l'océan. Il y a une variation diurne des températures et sans excès en général, entre 7°C en hiver et 17°C en été. La Figure 3 montre une certaine homogénéité concernant les températures annuelles avec en moyenne 1 à 2°C de moins sur le Massif armoricain. Cependant, l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est très variable de quelques degrés jusqu'à 20°C selon le type de temps pour la Bretagne. C'est à travers des études menées à échelle fine, notamment sur la vigne, qu'il a été démontré une importante variabilité spatiale et temporelle de la température avec notamment un rôle important de la topographie dans cette variabilité (Le Roux *et al*, 2017 ; Bonnefoy, 2013). Les données disponibles à Rennes, Dinard, Lorient et Quimper, indiquent un écart plus réduit de l'ordre de 0,5°C. Dinard est la station la plus fraîche avec en moyenne 11,85°C à l'année sur 1991-2019 contre 12,37°C à Rennes. Le contraste saisonnier est bien plus marqué à Rennes avec 18,5°C en été et 6,5°C en hiver (cf. Annexe 8).

Concernant les précipitations, la Bretagne est sous régime océanique qui apporte des précipitations régulières tout au long de l'année. La partie ouest est globalement plus arrosée, notamment sur les reliefs. Le contraste annuel est bien plus marqué que ce soit du point de vue de la variabilité géographique ou interannuelle. Le cumul moyen annuel varie de 600 mm sur le bassin

rennais à 1600 mm sur les monts d'Arrée, ce qui est proche d'un cumul de montagne (*Figure 3*). Il y a une grande différence pluviométrique allant du simple au double sur 250 km. En plus de cette variabilité spatiale, une variabilité interannuelle est observée, à hauteur de 200 à 400 mm d'une année à l'autre. Ces contrastes seront plus amplement étudiés.

En raison de sa position géographique, la Bretagne est une région très ventée. Seules les îles britanniques ont des vents équivalents. Le vent est aussi marqué par une variabilité importante. Le nombre de jours à vent peut varier du simple au double d'une année à l'autre. Le vent est à dominance Ouest et Sud-Ouest, les vents d'Ouest sont les plus forts. Le vent est généralement plus fort en hiver (Belleguic *et al*, 2012.).

Le climat breton peut aussi être décrit avec la classification de Köppen. C'est une des méthodes de classification climatique les plus célèbres et une des plus utilisées dans le monde. Elle a été mise au point en 1900 à partir des cartes mondiales de la végétation disponibles à l'époque, l'auteur cherchant à faire correspondre les données climatiques avec les limites des grands domaines végétaux. Elle est souvent considérée comme la première tentative de classification climatique quantitative du climat (Trewartha, 1937). Cette classification part d'une simple combinaison entre les températures et les précipitations moyennes mensuelles, elle est facilement applicable et généralisable. Différents auteurs ont ajusté les seuils du climat de Köppen mais aussi proposé une annualisation de la classification afin de rendre la classification plus dynamique et illustrer l'évolution du climat (Brisse *et al.*, 1982). L'expression « Type de Climat Annuel » (TCA) a ainsi été employée pour définir l'ambiance climatique d'une année donnée (Brisse *et al.*, 1982). La méthode utilise des seuils de classification de 1961 avec une adaptation des climats de type Cs à sécheresse estivale qui fait l'objet de critique pour la définition de sécheresse en zone tempérée (Eveno *et al*, 2016). L'adaptation est basée sur l'étude de Bagnouls et Gaussen (1957) qui définit une période sèche si les précipitations mensuelles sont inférieures à deux fois la température moyenne de ce même mois. Des informations complémentaires sont disponibles en annexe (cf. Annexe 1) pour plus de précisions sur le seuillage des différents types de climats.

D'après la classification de Köppen, le climat moyen en Bretagne est de type Cfb, c'est-à-dire un climat tempéré océanique avec des étés tempérés. Avec la méthode des types de climats annuels, il est possible d'observer la fréquence d'apparition des climats par station :

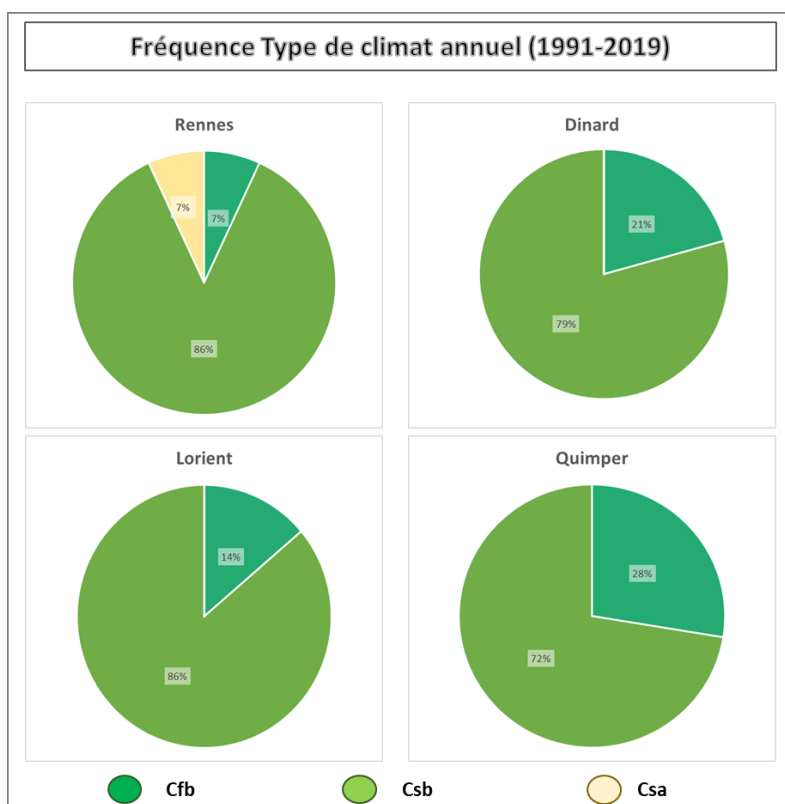


Figure 4 : Fréquence TCA Köppen sur 4 stations bretonnes

Pour les quatre stations, le climat de type Csb est ultra majoritaire avec au moins 70 % d'années. Il correspond à un climat tempéré à été sec. Ensuite, c'est le climat Cfb, climat tempéré océanique. La station de Quimper présente plus d'un quart d'années Cfb là où Rennes n'en a que moins de 1 sur 10 (Figure 4). À Rennes, il y a eu deux années de type Csa c'est-à-dire climat méditerranéen, à savoir (été sec et chaud) 2003 et 2006 (cf. Annexe 1). La disparité climatique bretonne se retrouve par cette classification annuelle des climats de Köppen. Globalement, l'Est est plus enclin à des climats océaniques à été sec (Csb) avec cette annualisation du climat de Köppen. **Donc le climat de Köppen est en moyenne de type Cfb en Bretagne mais le climat le plus fréquent est le Csb.**

1.1.2 Les éléments qui influencent le climat breton

Différents facteurs climatiques rentrent en jeu dans la différenciation climatique bretonne. L'objectif ici n'est pas d'être exhaustif mais de montrer que la situation géographique de la région influence son climat.

De par la situation péninsulaire de la Bretagne, son pourtour littoral est soumis à une influence maritime se caractérisant par des pluies plus abondantes en automne et hiver, avec un minimum en fin d'été et un maximum en hiver. Ce régime océanique est aussi marqué par une amplitude thermique diurne moindre ainsi qu'une amplitude thermique saisonnière moins importante. Il fait plus chaud en hiver et plus frais en été (Belleguic *et al*, 2012.). L'amplitude hydrologique entre le mois le plus arrosé et le mois le plus sec est plus grande : alors que dans les terres la différence est de l'ordre de 30 mm, elle est de 100 mm à Lorient et 70 mm à Quimper (Belleguic *et al*, 2012.). Ces écarts importants entre le littoral et l'intérieur des terres ont incité des auteurs à décrire et caractériser ce « climat maritime » (Planchon, 1993). L'influence maritime diminue en allant vers l'intérieur des terres. Généralement, ces effets sont atténués au-delà de 10 à 20 km. Dans les terres, l'amplitude thermique est plus marquée, les hivers sont plus froids et les étés plus chauds en allant vers l'Est de la Bretagne. Le régime pluviométrique est plus soutenu dans les terres mais moins marqué.

La proximité de l'océan a aussi une influence sur le vent : en été, sur le littoral, le phénomène de brise de terre et brise de mer peut survenir lors de temps calme et chaud. Ce phénomène intervient lors d'un réchauffement différentiel des océans et des continents. Cette différence crée un contraste thermique qui permet le développement de brise de mer. Au-dessus de la terre, l'air se réchauffe plus vite qu'au-dessus de la mer en journée, l'air chaud s'élève en altitude qui déséquilibre les masses d'air. Cela crée un mouvement d'air frais de la mer vers la terre. La nuit c'est la situation inverse, l'air se refroidit plus vite au-dessus de la terre, une brise de terre est alors observée allant de la terre vers la mer (Planchon *et al*, 2004).

Le relief joue aussi un rôle dans la différenciation des climats bretons. Bien que peu marqué (384 m pour le point culminant), cela suffit pour créer une différence avec notamment des vents plus forts, des précipitations plus marquées et des températures plus faibles que sur le littoral. C'est l'un des éléments les plus marquants dans la différenciation des climats bretons. Un relief élevé favorise une abondance pluviométrique c'est le constat qui a été fait lors d'observation des minimas et maximas pluviométriques en 1949 (Berthaud, 1949). Ces observations ont été faites sur les reliefs principaux mais peuvent être extrapolées en Bretagne. En effet, la présence du relief, même de faible altitude entraîne une perturbation de l'interface terre-atmosphère en déformant la dynamique des masses d'air et leurs propriétés physiques (Douguedroit et Saintignon, 1984). Le gradient altitudinal des précipitations est, contrairement à celui des températures, plus difficile à estimer. Il varie beaucoup selon d'un relief à un autre mais aussi au sein d'un même relief, les effets de ce gradient pluviométriques sont très variables. Toujours est-il que pour la Bretagne. L'écart de pluviométrie entre les stations littorales et les stations du relief armoricain est bien présent. Le cumul annuel brut de précipitation dépasse régulièrement les 1 000 mm sur le Massif armoricain contre 600 mm sur le bassin rennais.

Un autre aspect est la diminution de la température avec l'altitude. Angot est le premier à quantifier la baisse de température à 0,55°C pour 100 m, mais la méthode est critiquée pour son manque de rigueur (Angot, 1903 ; Douguedroit 1980). Il est plutôt considéré aujourd'hui que la température varie entre +0,5°C et +1°C pour 100 m selon l'humidité de l'air. Ainsi, la température des monts d'Arrée et des Montagnes Noires est plus faible, particulièrement en hiver.

L'urbanisation impacte localement le climat. La concentration de surface bâtie et artificialisée bouleverse le climat au niveau local en modifiant le bilan radiatif. La concentration de bâtis est favorable à la formation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). L'îlot de chaleur urbain correspondant au gradient thermique entre la ville centre et la périphérie se manifeste la nuit. Il peut entraîner une hausse de température de 2 à 12°C dans les grandes métropoles (Onerc, 2010). L'influence des villes reste cependant assez minime dans les régions ventées comme la Bretagne, où l'écart moyen est de 1 à 2°C dans le grand ouest entre la ville et la campagne (Foissard *et al*, 2011 ; 2012). Les ICU ont notamment des effets sur la végétation comme la précocité de floraison et germination des cerisiers et des pois observés dans la ville de Rennes. L'urbanisation et l'artificialisation des sols entraînent aussi une augmentation des écoulements de surface. L'artificialisation des sols et la faible présence des surfaces végétales en ville entraînent une baisse des infiltrations d'eau. Ce surplus d'eau peut créer des inondations, notamment dans les plaines alluviales. Les villes de Bretagne sont particulièrement concernées par ces inondations urbaines (Valy, 2010).

La présence de bocage a aussi un effet sur l'environnement. Sa densité et sa forme (haies avec ou sans talus, arbustives ou arborées) sont très variables selon les bassins versants. Les haies influencent notamment le vent, elles jouent un rôle de brise-vent. Le brise-vent peut avoir des conséquences sur la température nocturne selon les conditions climatiques locales et elle a tendance à augmenter l'amplitude thermique diurne (Guyot, 1983).

1.1.3 Changement climatique en Bretagne : Un regard rétrospectif sur le climat

Le climat est en changement permanent, il varie selon des grands cycles : nycthéméral (cycle jour/nuit), cycle saisonnier, cycle astronomique. Les paramètres faisant varier le climat sont aussi appelés des forçages. Le principal forçage climatique est bien évidemment le soleil puisque c'est la source principale d'énergie (Denhez 2008).

Milankovitch a identifié trois paramètres astronomiques qui expliquent en partie la variation naturelle du climat terrestre. D'abord, la révolution de la Terre passe de cercle parfait à ellipse aplatie selon des cycles de 400 000 ans. C'est le paramètre d'excentricité qui modifie la quantité de chaleur perçue sur Terre. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre varie aussi de 1°28 selon des cycles de 41 000 ans. C'est le paramètre d'obliquité qui modifie la répartition de la chaleur. Le dernier paramètre correspond à la précession des équinoxes qui entraîne une différence dans les écarts saisonniers entre les hémisphères, les dates des équinoxes et les solstices varient (Denhez 2008). Ces trois paramètres expliquent en partie la variation climatique passée avec ce cycle de glaciation dû à ces paramètres astronomiques.

Le cycle de glaciation est de 100 000 ans avec en général 80 000 ans de glaciation et 20 000 ans de période interglaciaire. Le dernier maximum glaciaire était il y a 20 000 ans. Les températures étaient inférieures de 3 à 5°C et le niveau de la mer inférieur de 120 m. Le climat breton n'avait strictement rien à voir avec celui d'aujourd'hui. La Bretagne se situait à la marge des glaciers avec un paysage de type toundra. Le climat d'Europe occidentale était globalement beaucoup plus froid que celui d'aujourd'hui, en hiver les glaciers descendaient jusqu'au nord de la France (*Belleguic et al*, 2012.). À partir de -10 000 ans, il y a eu une phase de radoucissement nette du climat accompagnée d'un retrait des glaciers et d'une remontée du niveau marin. Ce réchauffement a été lent sur plusieurs milliers d'années. Ce cycle de glaciation laisse des marques dans le paysage, encore aujourd'hui. Il est notamment possible d'observer les vestiges du climat passé dans les roches, sur le littoral.

Au cours de l'histoire humaine, le climat n'a cessé de varier entre des périodes plutôt douces telles que le Petit Optimum Romain ou Petit Optimum Médiéval et des périodes plus fraîches comme le Petit Âge Glaciaire (Denhez 2008 ; Leroy-Ladurie, 2009).

Ce court regard rétrospectif permet de prendre conscience que le climat terrestre a toujours varié. Un changement climatique de quelques degrés au niveau mondial peut engendrer des changements majeurs au niveau régional et local. L'histoire des sociétés et l'histoire climatique entretiennent des liens étroits. Si l'Homme a toujours subi les variations naturelles du climat, aujourd'hui, il est démontré que les activités humaines sont responsables du changement climatique. Le lien entre les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique et la hausse des températures est aujourd'hui acté (GIEC, 2014). La question n'est plus de savoir si l'homme est responsable du changement climatique mais comment faire face à ce changement climatique. En effet, selon les projections du GIEC, la température va continuer à augmenter sur Terre. Selon les différents scénarios de projection, la température mondiale va augmenter de 2 à 5°C. La hausse est plus marquée sur les continents et hautes latitudes. L'évolution des précipitations est plus difficile à déterminer : à priori, elles vont augmenter de 20 à 50% à l'Équateur et aux hautes latitudes et baisser sur l'Atlantique et la Méditerranée.

En France, les projections sur le climat sont bien connues et ont été synthétisées dans le rapport « Le climat de la France au XXI^e siècle » sous la direction de Jean Jouzel. Ainsi, en moyenne selon les scénarios, il y aurait une hausse de 3,5°C en hiver, 6,5°C en été d'ici 2100. Avec un réchauffement de 2°C, les précipitations devraient diminuer de 25% à 35% dans le sud du pays et entre 5% et 15% dans le nord du pays sur une année (Jouzel *et al*, 2014). Mais les différents scénarios ne semblent pas s'accorder sur la spatialisation de cette baisse ni quand cette baisse va intervenir dans l'année. Concernant les débits des fleuves, de grandes incertitudes persistent selon le lieu, la situation, et le scénario plus ou moins pessimiste. En hiver, les débits diminueraient de 10% en moyenne d'ensemble

sur la Garonne et la Loire, et changeraient peu en relatif sur les autres bassins versants, ils diminueraient d'environ 20% sur la Garonne, de 15% sur la Loire, de plus de 10% sur le Rhône et la Seine (Dayon, 2016).

Il a été montré un climat assez diversifié en Bretagne qui dépend de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Les climats bretons subissent ainsi un changement climatique qui va redistribuer les précipitations et donc probablement changer la disponibilité de la ressource en eau. Cela va affecter les différents usages qui sont décrits dans la partie suivante.

1.2 Les usages de l'eau en Bretagne

L'eau et les milieux aquatiques sont la source de nombreux usages au sein d'un bassin versant ou en bord de mer :

- Agricole (irrigation, hydratation pour élevage, nettoyage, etc.)
- Industriel (prélèvement, hydroélectricité, production d'énergie nucléaire, gravières, etc.)
- Domestique (adduction d'eau potable, assainissement, etc.)
- Loisir (canoë/kayak, pêche, baignade, etc.)
- Touristique (navigation de plaisance, baignade, découverte de milieux naturels, etc.)
- Transport (marchandises, navigation, etc.)
- Cadre de vie (qualité de l'environnement, inondations, etc.)
- Halieutique (pisciculture, conchyliculture, etc.) (SAGE Rance, 2013)

L'agriculture est à l'interface entre le milieu naturel (eau, sol, climat, etc.) et la société (économie, politique, démographie, etc.) Les liens entre l'eau et l'agriculture bretonne sont souvent reliés à l'aspect qualitatif de l'eau avec notamment les scandales des algues vertes et la pollution aux nitrates. La pollution à l'azote provient de l'agriculture pour 95 % (Eau & Rivières de Bretagne, 2012). Mais c'est aussi un secteur qui prélève beaucoup d'eau. L'agriculture bretonne représente 12 % de la production nationale et plus de 50 000 emplois. Malgré une baisse constante du nombre d'exploitants, la Bretagne reste la première région concernant les produits animaliers (DRAAF, 2016) avec plus de 100 millions de têtes de bétail. Selon le Rapport AGRESTE de 2010, 58 % de viande porcine, 33 % de volaille, 41 % des œufs et 80 % des choux blancs sont produits en Bretagne. C'est un secteur économique important et même si le nombre d'agriculteurs a fortement diminué, les interactions avec le milieu naturel restent fortes puisque les surfaces cultivées représentent plus de la moitié de la surface en Loire-Bretagne. Les besoins en eau de ce secteur sont essentiels pour la croissance des plantes et nourrir le bétail ce qui en fait le premier consommateur d'eau. Il existe un lien fort entre le rendement des cultures et les précipitations, ce secteur dépend donc encore aujourd'hui grandement des aléas climatiques.

L'eau dans l'industrie est utilisée pour fabriquer des produits soit directement dans le produit fini (jus de fruit, shampoing, etc.) ou alors en la faisant intervenir dans la chaîne de production. Elle est utilisée pour refroidir, nettoyer ou pour l'hygiène des employés. Ainsi il faut 5 à 10 000 litres d'eau pour produire une voiture, 80 L d'eau pour produire 1 kg de sucre ou encore 20 à 30 L pour 1 kg de camembert (Eau-Seine-Normandie). L'industrie en Bretagne est tournée vers l'agroalimentaire c'est la première filiale de la région avec près de 60 000 salariés. Il y a une très forte activité de production de viande de boucherie dont la pollution brute par les industriels bretons est estimée à 6 millions d'équivalents habitants (CRCI 2009), en majorité due aux activités agroalimentaires. Cette prédominance de l'industrie agroalimentaire fait de celle-ci l'activité industrielle la plus consommatrice d'eau. L'industrie bretonne est donc très liée à l'agriculture et donc indirectement aux conditions climatiques. Donc en plus d'être des secteurs très demandeurs d'eaux, les secteurs agricoles et industriels ont besoin d'un apport pluviométrique. La pluviométrie joue donc un rôle important pour la santé économique de ces secteurs.

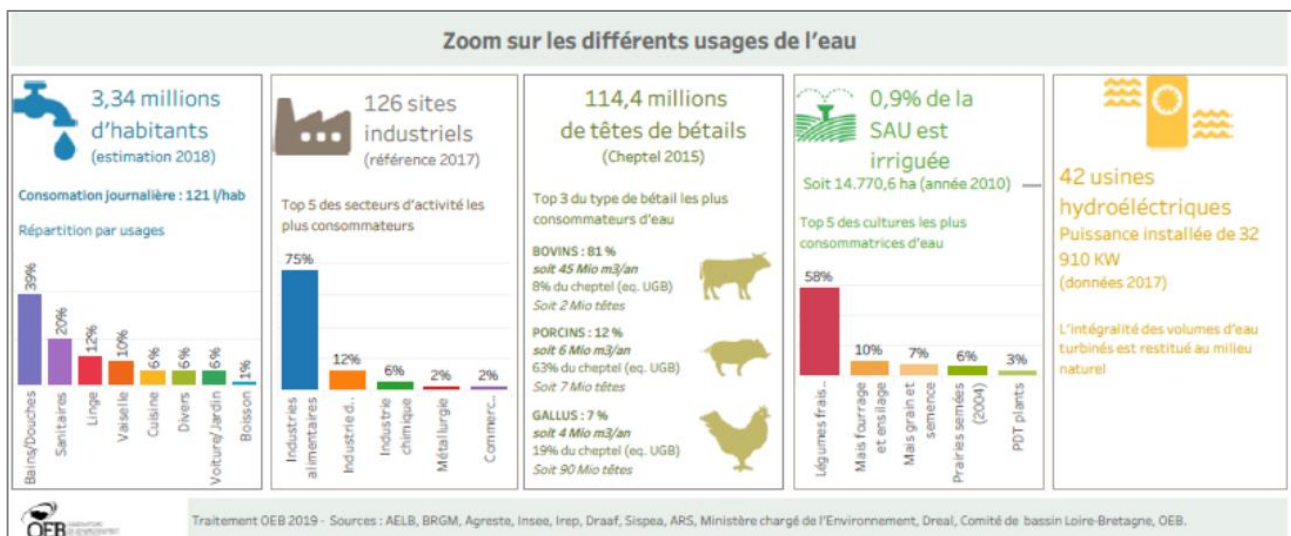


Figure 5 : Les différents usages de l'eau en Bretagne

La Figure 5 souligne les consommations d'eau des différents secteurs. Il est important de noter la différence entre l'eau prélevée et l'eau consommée. L'eau prélevée correspond à l'eau captée dans les nappes phréatiques puis restituée après utilisation. L'eau consommée n'est pas restituée après utilisation. Cette différenciation est importante parce que les enjeux ne sont pas les mêmes s'il s'agit d'eau prélevée ou d'eau consommée. Les plus importants consommateurs d'eau correspondent aux usages domestiques de l'eau. Tandis que le secteur qui prélève la plus grande quantité d'eau est de loin le secteur agricole (CIE).

Parce que l'eau est convoitée par l'ensemble des acteurs de la société, le lien entre les événements climatiques extrêmes et les usages de l'eau doit être fait. Ces événements extrêmes affectent la disponibilité de l'eau et peuvent engendrer des pressions sur la ressource. L'eau peut être source de conflit d'usage entre les acteurs d'un même territoire. Par cet aspect conflictuel, l'eau est un élément géopolitique majeur sur un territoire (Giblin, 2003). Les usages de l'eau peuvent être affectés plus ou moins gravement par un aléa climatique qui peut entraîner une situation de manque d'eau. Un manque d'eau peut entraîner ou exacerber un conflit d'usage sur cette ressource. **Les liens entre la société et le climat sont encore assez directs dans le domaine de l'eau.**

1.3 Les risques climatiques liés à l'eau : définition et synthèse des connaissances dans la région

Les événements extrêmes, par leurs caractères exceptionnels sont par définition rares. L'évolution de la ressource en eau climatique peut se traduire par des événements exceptionnels de type sécheresse ou inondation. Il est important de bien définir ces événements et de montrer leurs conséquences potentielles en Bretagne. En effet, c'est à partir de la connaissance de ces événements et l'évaluation de leurs probabilités d'occurrences que s'effectue la politique de gestion de l'eau et la prévention des risques. Parce qu'il s'agit bien d'une approche par la notion de risque qui est appréhendée en climatologie par une approche des extrêmes. Le risque se définit par une conjoncture entre un aléa et une vulnérabilité (ADEME, 2013). La vulnérabilité est liée à la question des dommages, dans le cas des risques climatiques, la vulnérabilité est le degré auquel les éléments d'un système peuvent être affectés par un aléa. Elle peut être structurale, corporelle, humaine ou sociale qui concerne les populations, organisationnelle ou institutionnelle, environnementale ou fonctionnelle (Léone et Vinet 2006). L'aléa correspond à un événement d'origine naturelle ou humaine. Il est souvent rattaché la notion d'enjeu, c'est ce qui est menacé par l'aléa, l'enjeu concerne l'ensemble des biens et des personnes sur un territoire. Enfin la catastrophe est l'aboutissement du risque, souvent c'est la catastrophe qui révèle un risque (Valy, 2010). Dans la gestion du risque, il y a trois acteurs principaux : l'État, la commune et les riverains.

1.3.1 Les inondations en Bretagne :

L'inondation est un aléa naturel de recouvrement du sol par l'eau, elle est souvent causée par une remontée d'eau provenant des nappes phréatiques, du ruissellement ou d'une submersion marine ou encore des crues. Les inondations sont associées à des précipitations intenses et/ou sur une longue durée. Une crue correspond à une montée plus ou moins rapide des cours d'eau causée par une augmentation des débits ou des périodes de précipitations plus ou moins longues et intenses (Dupont *et al*, 2012). Les inondations peuvent impacter des biens et des personnes, selon les enjeux. L'inondation est bien un risque naturel car elle relie le débordement des eaux et la vulnérabilité des biens et personnes.

En Bretagne, les crues et les inondations sont liées à la saturation des sols en eau lors de précipitations longues ou de forte intensité. En quelques heures se créent de forts écoulements, souvent associés à des phénomènes extrêmes de type tempête. Mais le plus souvent, les crues de grande ampleur sont des phénomènes en hiver caractérisées par leurs lenteurs et surviennent lorsque les sols sont saturés en eau (Dupont *et al*, 2012). La caractérisation et l'intensité du phénomène dépendent de la pente, de l'intensité des précipitations et du degré d'imperméabilisation des sols.

Une crue se caractérise aussi par sa période de retour. C'est-à-dire sa fréquence d'apparition, une crue décennale correspond à une crue qui revient tous les 10 ans, c'est-à-dire une chance sur 10 par an, 96% de chance sur 30 ans. Cette période de retour est calculée à un point donné, elle dépend de la chronique connue à l'instant T et elle dépend donc de la précision et la justesse de la mesure du débit. La notion de période de retour suppose une stabilité du phénomène dans le temps (Valy, 2010). Plusieurs types d'inondations peuvent être observés :

- **Les inondations lentes hivernales** sont liées à une augmentation progressive des débits. Ce type d'inondation est associé à une longue période de précipitation continue, pas forcément intense. Le caractère lent de ce phénomène n'en fait pas un danger pour l'homme car il peut être anticipé. Par contre, le temps de retour à la normale est aussi lent, les périodes de crues peuvent s'étaler sur plusieurs jours voire semaines. Ce type d'inondation atteint donc les activités humaines pendant une période assez longue allant de plusieurs jours à plusieurs semaines. **En Bretagne, janvier 1995 et décembre 2013** peuvent être associés à des inondations lentes hivernales (Dupont *et al*, 2012).

- **Les inondations printanières ou estivales** sont souvent liées à des précipitations courtes et intenses, notamment les orages. Ces crues sont rapides et soudaines mais le temps de retour à la normale est généralement court, de quelques heures à quelques jours. Ce type d'inondation a par exemple été observé sur le bassin versant de l'Ille en mai 1981.
- En zone côtière, les **inondations marines** surviennent principalement dans les estuaires. Des débits importants conjugués à des grandes marées ou des surcotes liées à des tempêtes favorisent ces inondations côtières (Valy, 2010)
- D'autres types d'inondations peuvent être observés plus localement. Il existe les inondations urbaines par ruissellement, des inondations par débordement des réseaux, ou des inondations par remontée de nappes lorsque le sol est saturé en eau (Valy 2010).

Une des crues historiques récentes en Bretagne est celle de 2000-2001. Entre le 18 septembre 2000 jusqu'à fin janvier 2001, la région a subi une succession quasiment ininterrompue d'épisodes pluvieux. Cette situation est responsable de quatre crues remarquables durant cette période : d'abord mi-novembre, l'Ille-et-Vilaine est concernée par d'importantes crues, à Rennes l'Ille est proche de la crue centennale. À la mi-décembre, c'est à l'Ouest que d'importantes crues se manifestent. Après des cumuls de 80 à 110 mm atteints entre le 11 et 12 décembre, le niveau de crue centennale est quasiment atteint dans le bassin versant de l'Odette et un niveau de crue cinquantenaire sur le Blavet. Début janvier après une courte période d'accalmie, il pleut à nouveau entraînant un débordement de tous les cours d'eau. Puis, fin janvier les cours d'eau débordent à nouveau. L'hiver 2000-2001 reste marquant en termes d'inondation, pas tant par leurs intensités mais plutôt par leurs durées et leurs nombres. (Lang *et al*, 2013). Outre cet hiver extrêmement humide, d'autres événements importants sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1- Synthèse des inondations majeures en Bretagne depuis les années 1950

Date	Type d'évènement	Lieu	Conséquences
06-juil-69	Tempête	Bretagne	Tempête inhabituelle pour la saison
04-juil-73	Orage	Région de Saint Brieuc	Plus de 80mm en 2h : 83mm à Plaintel, 124 mm à Bréhand. Torrents de boues à Saint-Brieuc, pavés arrachés et voitures emportés, 3 morts
20-mai-90	Orage	Quimper	112mm en 6h, des torrents de boues passent dans la partie basse de la ville
26/27-dec-99	Tempête	Bretagne	En 36h succession de 2 tempêtes, 200 000 foyers privés d'électricités. Forêt de Fougères déracinée
févr-14	Série de forte pluie	Bretagne	Un mois très arrosée marquée par une série d'inondations. Les débits du Blavet atteignent des niveaux records.

Pour faire face au risque d'inondation, il existe différents plans et programmes afin d'anticiper au mieux le risque. D'abord, le Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN), créé par la loi du 2 février 1995. Le PPRN est prescrit et approuvé par le préfet départemental, il est basé sur une délimitation cartographique en secteurs à risques, dans ces secteurs, une réglementation spécifique est soumise aux règles d'urbanisations (règlement en annexe du Plan Local d'Urbanisme (PLU)). La création d'un PPRN s'accompagne d'un Fond de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) destiné à financer des expropriations de biens exposés à des risques majeurs. Parmi les 315 communes bretonnes concernées par un risque d'inondation, 249 ont un PPR approuvé (DREAL 2015).

Les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) ont été créés en 2002 suite aux inondations en Bretagne, dans la Somme et dans le Sud-Est entre 1999 et 2002. Il s'agit d'un outil de contractualisation entre l'État et les collectivités. Le but est de promouvoir une gestion globale du risque d'inondation afin de réduire les conséquences sur les biens, les personnes et les activités économiques. Fin 2015, il y avait six PAPI labellisés en Bretagne pour 744 communes concernées (DREAL 2015).

1.3.2 Les sécheresses en Bretagne :

La sécheresse se définit comme une situation temporaire ou saisonnière de manque d'eau, mais ne signifie pas pour autant un manque d'eau potable. Inversement, les problèmes de gestion de l'eau en période d'étiage ne sont pas synonymes de sécheresse car les besoins en eau sont souvent plus importants en été. Lambert (1996) a défini 3 types de sécheresses :

- La **sécheresse météorologique** ou atmosphérique qui se traduit par un déficit des précipitations sur une période donnée. En France, Météo-France considère une sécheresse comme une période où les précipitations quotidiennes sont inférieures à 1mm pendant au moins 15 jours. Elle peut être sans conséquence sur les activités humaines et les écosystèmes, particulièrement si elle intervient en hiver.
- La **sécheresse pédologique** aussi appelée sécheresse agricole ou édaphique est la conséquence d'une sécheresse météorologique trop longue. Le déficit d'humidité des sols dépasse la capacité des végétaux à puiser les réserves d'eau du sol, ce qui entraîne un stress hydrique pour la végétation sur place. Ce type de sécheresse se manifeste surtout lorsqu'il y a de l'activité végétale et des températures relativement importantes.
- Enfin, la **sécheresse hydrologique** correspond à une sécheresse pédologique importante entraînant un assèchement des sols et à des étiages sévères des cours d'eau avec une baisse du niveau des nappes phréatiques (Lambert, 1996).

Les trois niveaux de sécheresse peuvent aussi être définis comme sécheresse météorologique, sécheresse relative et sécheresse absolue (Hutfy, 2011). Ils peuvent s'apparenter à une graduation où une sécheresse météorologique trop longue entraîne une sécheresse pédologique et une sécheresse pédologique entraîne sur la durée une sécheresse hydrologique. La sécheresse hydrologique est la plus impactante pour les activités humaines et les écosystèmes car elle entraîne une baisse de la disponibilité de la ressource ce qui augmente la pression sur cette même ressource.

A priori il est difficile d'imaginer des sécheresses en Bretagne. C'est dans l'imaginaire collectif « une région où il pleut tout le temps ». Mais il est nécessaire de prendre en compte la pédologie des sols avec la capacité d'absorption de l'eau des sols. Mounier est l'un des premiers à étudier la fréquence des sécheresses en Bretagne. Il montrait déjà à l'époque que le risque de sécheresse existe en Bretagne avec une importante fluctuation climatique en été qui impacte notamment l'élevage intensif (Mounier, 1965, 1977).

La dendrochronologie permet d'étudier le climat passé notamment en termes de pluviométrie en fonction des anneaux de croissances d'arbres. Grâce à cette technique, les périodes de sécheresse ont pu être identifiées par des anneaux de croissances resserrés synonymes de condition thermique ou pluviométrique extrême (Leroy-Ladurie, 2009). Le tableau ci-dessous montre les sécheresses majeures qui ont affecté la Bretagne.

Tableau 2 - Sécheresses majeures en Bretagne observées par dendrochronologie (Lamy, p.38 2013)

Année	Impacts observés
1540	Sécheresse hydrologique : les cours d'eau bretons sont asséchés, les fontaines taries. Les moissons furent précoces.
1762	Sécheresse néfaste pour l'agriculture bretonne. Le blé noir ne résistera pas à la saison sèche qui dura plusieurs mois.
1785	Sécheresse sévère en France et en Bretagne, impactant des régions réputées humides telles que le Trégor.
1921	Sécheresse sévère en France de l'est principalement. La répartition des pluies fait que l'agriculture souffre peu, contrairement à l'eau d'alimentation qui fut très affectée par le tarissement de nombreuses sources.
1949	Sécheresse hydrologique avec diminution du niveau des rivières en Ile-et-Vilaine. Des cultures ont été anéanties, certains arbres (jeunes ou vieux) sont sévèrement impactés.
1959	Sécheresse importante pour le nord de la France. Importants dégâts sur des parcelles agricoles d'Ile-de-France et sur une majeure partie du département de la Manche.
1976	Sécheresse extrême sur tout le territoire français ayant des impacts sur divers secteurs économiques.
1989	Impacts inégaux sur l'agriculture régionale, le maïs est la culture la plus touchée. En Bretagne, au Limousin et en Provence les réserves en eau sont sévèrement asséchées.

Sur le 20^e siècle, cinq sécheresses extrêmes sont recensées, 2003 peut être rajouté à cette liste. **Les trois sécheresses majeures qui ont touché la Bretagne ces cinquante dernières années sont celles de 1976, 1989 et 2003.** La sécheresse de 1976 fait office de référence au niveau national, c'est la première sécheresse à avoir un impact aussi étendu sur le pays et un impact économique aussi important. À partir de cette date, la sécheresse a réellement été prise en compte dans la notion de calamité agricole qui permet de recevoir une aide compensatoire de l'État (Marchand *et al*, 1986). Cet impact important sur l'agriculture notamment a permis de faire émerger un intérêt pour la communauté scientifique pour étudier les sécheresses, leurs particularités, les fréquences d'apparitions, l'étude des aspects climatiques, hydrologiques et les conséquences sur la forêt et l'agriculture. Médiatiquement, aujourd'hui les sécheresses actuelles sont fréquemment comparées à cette sécheresse de 1976.

La gestion de l'eau en période de sécheresse est d'abord une gestion quantitative. C'est-à-dire une gestion qui cherche l'équilibre entre l'offre et la demande. Cela passe avant tout par une régulation de la demande. La politique de gestion de la demande agricole passe par des autorisations de prélèvement et des quotas d'irrigation. Les seuils sont définis en concertation avec les acteurs concernés. En cas de sécheresse sévère, il peut y avoir des restrictions d'usages de l'eau ordonnée par un arrêté sécheresse du préfet. L'arrêté sécheresse limite temporairement certains usages de l'eau notamment les usages domestiques comme l'arrosage ou le nettoyage de voiture à domicile. Les autres secteurs sont aussi concernés de manière plus détaillée selon les besoins et les spécificités du secteur. Un arrêté-cadre, fixant les seuils de nappes d'eau à partir desquelles s'appliquent les restrictions, est pris en début d'année. Lorsque le seuil d'alerte est atteint, des comités sécheresses se réunissent pour définir les mesures à prendre selon le niveau d'alerte. Aucun dédommagement n'est accordé aux usagers. Une autre gestion des sécheresses, moins utilisée est la gestion volumétrique. Un volume maximum d'eau à prélever est attribué à chaque exploitant qui est subdivisé en plusieurs périodes d'irrigation de mi-juin à mi-septembre. Ce mode de gestion est par exemple utilisé en Charente (Erdlenbruch *et al*, 2013).

1.4 La gestion de l'eau en France

Deux visions de la ressource en eau s'affrontent : l'eau bien public contre l'eau marchandise. Dans la plupart des pays, la gestion de l'eau potable est un service public. En France, c'est l'un des seuls pays où la distribution par des compagnies privées a une telle importance et ce depuis le 19^e siècle (Giblin, 2003). La décentralisation de l'eau dans les années 80 a favorisé cette situation en donnant davantage de pouvoirs aux maires de décider de la gestion de l'eau. À l'origine, ce partenariat public/privé est lié à la forte croissance urbaine lors de la révolution industrielle qui a montré la nécessité de revoir la gestion de l'eau dans les villes accompagnée d'un besoin sanitaire avec la prolifération d'épidémies dans les villes (Giblin, 2003). Par ailleurs, l'eau a été un des premiers facteurs de regroupements en syndicats intercommunaux dans le monde rural.

Les premières bases de la gestion de l'eau sont transmises dans la loi 64-1245 de 1964 relative au régime et à la répartition des eaux ainsi qu'à la lutte contre leurs pollutions. Avec cette loi, trois grands principes novateurs de gestion sont définis :

- une gestion décentralisée par bassin hydrographique avec la création de circonscriptions administratives délimitées par l'hydrographie (agences de l'eau),
- une gestion concertée avec des comités de bassin intégrant l'ensemble des acteurs et des utilisateurs de l'eau,
- une mise en place d'outils incitatifs financiers comme le principe de pollueur-payeur (Office International de l'Eau, 2009).

Au niveau national, la gestion se divise en six grands bassins hydrographiques, dont le bassin Loire-Bretagne, avec pour chacun d'eux une agence financière et un comité de bassin. Cette loi souligne avant tout l'importance de la lutte contre la pollution de l'eau.

Ensuite, la loi de 1984 relative à la pêche en eau douce et la gestion des ressources piscicoles dite loi pêche, introduit la prise en compte du milieu aquatique dans la gestion de l'eau, avec notamment l'obligation de garantir un débit minimum permanent qui permet la circulation et la reproduction des espèces aquatiques. La gestion de l'eau prend désormais en compte la préservation du milieu aquatique.

La loi de 1992 dite « loi sur l'eau » introduit des changements importants quant à la gestion de celle-ci. L'eau devient un « patrimoine commun de la nation » (art 1), ce qui induit un renforcement de la protection de la ressource en eau. Elle a été faite en partie suite aux sécheresses, notamment celle de 1989, qui ont révélé des conflits d'usages importants et la nécessité d'initier une gestion quantitative (Stosser et Montignoul, 2001). La gestion n'est plus seulement en lien avec la qualité de l'eau et la pollution, elle devient une gestion quantitative avec la nécessité de garantir un certain niveau dans les cours d'eau pour les espèces aquatiques. Elle introduit donc des principes nouveaux avec d'abord une gestion globale et équilibrée de la ressource entre la préservation des écosystèmes aquatiques, la valorisation économique et les usages. Posant ainsi les bases de la gestion intégrée de l'eau.

Il y a aussi une unicité de la ressource entre les eaux superficielles, les eaux souterraines et l'eau de mer qui est regroupée par la loi dans le terme « ressource en eau ». La gestion de l'eau se fait toujours par bassin versant mais elle est déclinée en plusieurs niveaux avec des outils de planification qui sont créés : les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) pour les grands bassins hydrographiques et les Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) pour les bassins hydrographiques locaux (cf § suivant). Un autre principe introduit par cette loi est la valorisation économique de l'eau qui doit se faire par autorisation pour les activités touristiques, piscicoles ou hydroélectriques. Les usages de l'eau sont donc davantage encadrés par la loi. La priorité à l'adduction en eau potable (AEP) est donnée avec des mesures de limitation ou de suspension des prélèvements pour les autres usages de l'eau (Gazzaniga *et al*, 2011). La

décentralisation a influencé cette loi : toutes les communes de plus de 2 000 habitants doivent être équipées d'un système de collecte et épuration d'eau. Il y a donc un transfert de compétence. Les collectivités deviennent les artisans de la gestion de l'eau (Grujard, 2003).

La loi de 2004 transcrit dans le droit français la directive européenne cadre sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000. La notion de coûts liés à l'utilisation de l'eau est ajoutée ainsi que des objectifs de qualité des masses d'eaux avec une obligation de résultat.

Enfin, la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) du 30 décembre 2006 clarifie des éléments des précédentes lois, notamment le droit à l'eau pour tous et le rôle des communes dans le domaine de l'eau. La LEMA donne aussi des moyens financiers pour atteindre les objectifs de qualité de l'eau fixés par la loi de 2004. Pour s'assurer de l'atteinte de ces objectifs, l'Organisation Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) est créée. L'ONEMA (aujourd'hui intégré à l'OFB, office français pour la biodiversité) a pour but de prendre en charge la gestion de la protection et des écosystèmes aquatiques. La gestion intégrée et concertée de l'eau est renforcée avec l'apparition des notions de très bon état écologique, de réservoir biologique et de continuité écologique (Veyrac-Ben Ahmed, 2012).

Le bassin versant est l'échelle hydrographique qui est privilégiée pour la gestion de l'eau. Un bassin versant est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête ou lignes de partage des eaux, et irriguée par un même réseau hydrographique (une rivière principale avec tous ses affluents qui alimentent ce territoire). À l'intérieur d'un même bassin, du fait du relief, toutes les eaux suivent une pente naturelle et se concentrent vers un point de sortie appelé exutoire.

Les caractéristiques varient d'un bassin versant à l'autre (taille, densité du réseau, sol, climat...). La gestion de l'eau par bassin versant prend ainsi sens, car certes elle ajoute un découpage territorial administratif mais c'est une échelle de territoire qui est plus proche pour les usages de l'eau.

1.5 Le SDAGE et le SAGE, des outils réglementaires des usages de l'eau

Pour faire un parallèle avec le découpage territorial, le SDAGE est un document qui concerne plusieurs régions administratives françaises, il pourrait s'apparenter à une « région de l'eau » là où le SAGE serait un « département de l'eau ».

Au total, il y a douze SDAGE dont sept en Métropole qui reprennent la délimitation par bassins fluviaux de 1964 en détachant la Corse du SDAGE du Rhône-Méditerranée. Il y a 191 SAGE en France dont 19 en Bretagne, tous validés par le préfet sauf le SAGE du golfe du Morbihan qui est en cours d'approbation (SDAGE Loire-Bretagne).

1.5.1 Le SDAGE :

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, créé en application de la directive-cadre sur l'eau de 2000, est un document à portée juridique qui intègre les lois et directives existantes. Concrètement, il s'agit de l'outil de mise en œuvre des politiques dans le domaine de l'eau. Ce document est à l'échelle des bassins versants fluviaux. Les collectivités et les organismes doivent s'y conformer. Ainsi, les actions et les décisions d'aménagement dans les plans locaux d'urbanisme (PLU) ou les schémas de cohérence territoriale (Scot) dans le domaine de l'eau doivent être compatibles avec le SDAGE.

L'objectif général des SDAGE est la non-détérioration des masses d'eau, définie comme étant une unité hydrographique (eaux de surface) ou hydrogéologique (eaux souterraines) cohérente. Il y a les cours d'eau, les plans d'eau (superficie supérieure à 50 hectares), les masses d'eaux côtières et de transition (estuaires) et les masses d'eau souterraine.

L'objectif du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021 est d'atteindre 61 % des eaux en bon état en 2021. Aujourd'hui, 26 % des eaux sont en bon état et 61 % s'en rapprochent. Le bon état de l'eau se définit par un bon état écologique et chimique, c'est-à-dire une eau qui permet d'avoir une biodiversité faunistique et floristique importante, une eau exempte de produits toxiques et une eau dont la quantité est suffisante pour garantir tous les usages. Un des enjeux est que les points de captage pour l'alimentation en eau potable doivent être en bon état écologique. Pour cela, des périmètres de protection autour des points de captage sont mis en place. Pour atteindre les objectifs fixés, il y a des financements de travaux et actions afin de lutter contre la pollution, gérer les ressources en eaux superficielles et souterraines, restaurer et entretenir le milieu aquatique. Ces financements sont de l'ordre de 460 millions d'euros par an dans le dernier SDAGE Loire-Bretagne, soit 2,8 milliards sur six ans (durée du plan d'action). Les principaux domaines de dépenses concernent les milieux aquatiques (945 millions d'euros), l'assainissement des collectivités (887 millions d'euros), l'agriculture (604 millions d'euros) et la gestion quantitative de la ressource en eau (204 millions d'euros). Concernant celle-ci, des mesures sont prises pour éviter les pressions sur la ressource liées aux prélèvements. Ces mesures consistent à mettre en place des dispositifs pour économiser l'eau dans l'agriculture, l'industrie et l'artisanat ; trouver des modalités de partage de la ressource en eau ; gérer les situations de crise liées à la sécheresse ; améliorer la qualité d'un ouvrage de captage ; mettre en place une ressource complémentaire (SDAGE Loire-Bretagne, 2016).

. Pour le sous-bassin "Vilaine et côtiers bretons" (~la Bretagne), plus de 4 500 mesures sont financées par le SDAGE pour plus de 500 millions d'euros sur cinq ans dont une majorité de mesures concernant l'assainissement des collectivités. Enfin, 904 mesures sont menées pour le milieu aquatique, notamment pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau, le maintien de la continuité écologique et la gestion des zones humides (SDAGE Loire-Bretagne, 2016).

1.5.2 Le SAGE

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est un outil de planification opérationnel né de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, et renforcé par celle du 30 décembre 2006. Les dispositions prises par ces lois ont pour objet une gestion équilibrée de la ressource en eau. Ces lois confèrent également au SAGE une valeur juridique puisque le SAGE et les documents cartographiques qui l'accompagnent sont opposables à toute décision administrative prise dans le domaine de l'eau. Le SAGE décline localement les orientations et les objectifs du SDAGE en prenant en compte les spécificités locales. Le SAGE doit être compatible avec le SDAGE (SAGE Odet, 2016).

Il fixe des objectifs généraux et des dispositions permettant de satisfaire aux principes d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau (code de l'environnement, art. L. 211-1) ainsi qu'à la préservation des milieux aquatiques et à la protection du patrimoine piscicole (code de l'environnement, art. L. 430-1). Ces objectifs concernent le domaine de la prévention aux inondations, la préservation des zones humides, la lutte contre la pollution des eaux, la restauration de la qualité des eaux, la valorisation économique de l'eau, la promotion d'un usage durable de la ressource et le maintien de la continuité écologique (SAGE Odet, 2016).

La Commission Locale de l'Eau (CLE) est le véritable moteur du SAGE. Elle se compose de trois collèges :

- le collège des représentants des collectivités territoriales, de leurs groupements et des établissements publics locaux (au moins 50 % des membres) ;
- le collège des usagers, des propriétaires fonciers, des organisations professionnelles et des associations concernées (au moins 25% des membres) ;
- le collège des usagers, des propriétaires fonciers, des organisations professionnelles et des associations concernées (au moins 25% des membres).

Le SAGE est composé d'un Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD) qui fixe les objectifs, les orientations et les dispositions du SAGE ainsi que ces conditions de réalisation. Ce document est construit et voté par la CLE. Enfin le règlement est souvent accompagné de cartes qui fixent les règles pour l'atteinte des objectifs fixés par le PAGD (SAGE Rance, 2013).

2. Méthode

2.1 Les objectifs et attendus des acteurs

L'objectif final de ce travail est d'élaborer une méthode d'analyse des effets du changement climatique sur la ressource en eau. Les gestionnaires de l'eau souhaitent en effet être guidés dans la démarche d'analyse de l'évolution climatique. La première étape du travail est présentée ici, elle consiste à faire une exploration des indicateurs climatiques les plus pertinents pour évaluer l'évolution de la pluviométrie. Il s'agit d'une étude climatologique, c'est-à-dire une étude du climat, de ses variations et de ses extrêmes, axée sur les paramètres ayant principalement des incidences sur la recharge en eau des nappes et des cours d'eau, et donc des captages d'eau potable (forages, prises d'eau, retenues, puits...). L'étude porte donc principalement sur l'évolution des précipitations et en partie des températures en région Bretagne. Elle s'est déroulée en deux phases : d'abord une analyse des données historiques avec une recherche des indicateurs les plus pertinents puis une analyse des évolutions possibles, modélisées à l'aide du portail Drias. Le temps consacré à ces deux phases a été équivalent (rétroplanning, cf. Annexe 2).

Ce travail est articulé par le Creseb avec une thèse en hydrogéologie (*Figure 6*) afin d'apporter des indicateurs climatiques pour aider à voir ce qui est déterminant dans la corrélation entre les paramètres géologiques, géomorphologiques et climatiques avec l'hydrologie des bassins versants. Si la géomorphologie des bassins versants est plutôt bien connue, des incertitudes liées à l'hétérogénéité spatiale de la géologie et à l'évolution temporelle du climat restent à exploiter pour estimer les stocks d'eau dans le compartiment souterrain et prévoir son évolution sous changement climatique.

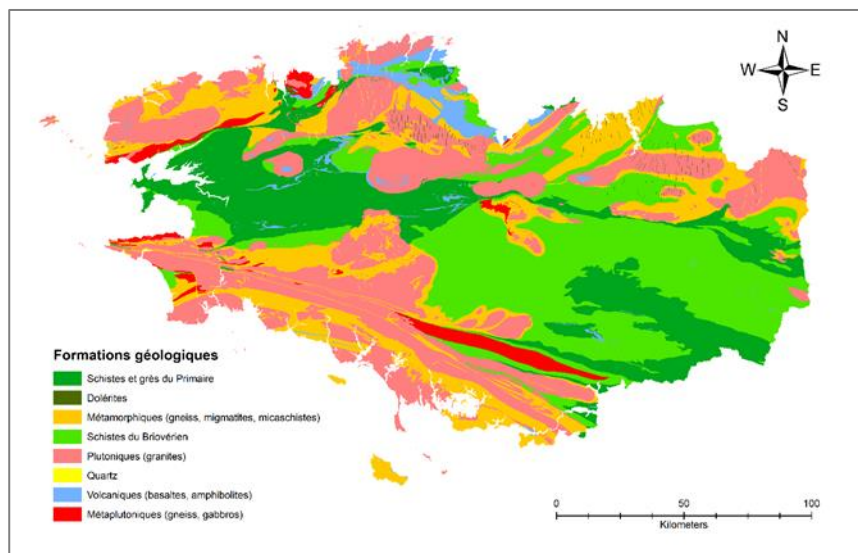


Figure 6 : Regroupements lithologiques (Mougin et al., 2008 - Projet SILURES du BRGM)

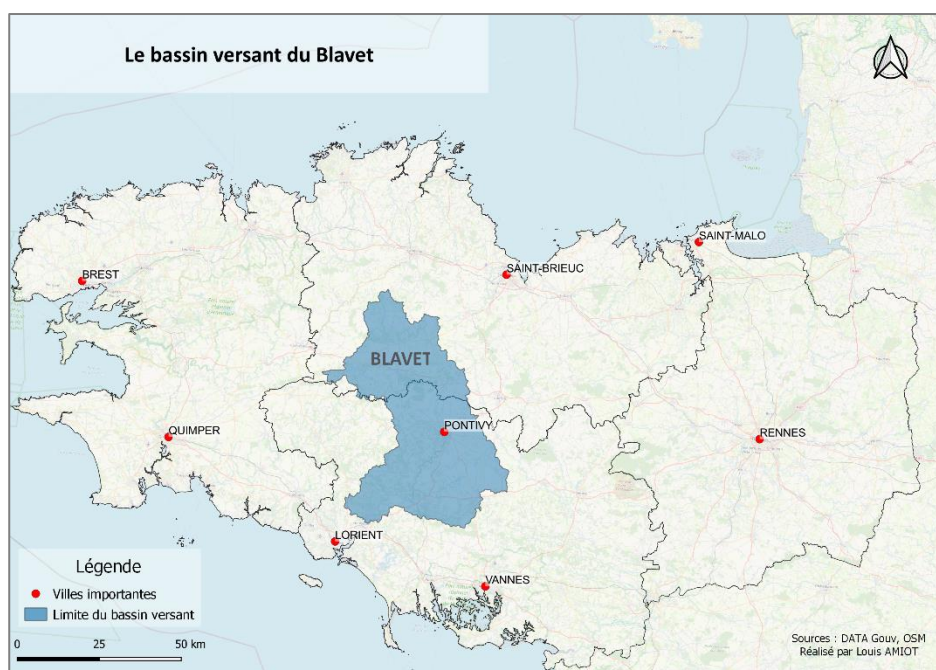
2.2 Choix des lieux d'études

Le paramètre principal est la ressource en eau, considérée ici comme les arrivées d'eau sur un territoire, c'est-à-dire les précipitations. Par cohérence avec le souhait du CRESEB de s'adresser aux gestionnaires de l'eau, il a été décidé de travailler à l'échelle des bassins versants. C'est en effet à cette échelle hydrographique que s'effectue la gestion de l'eau (Cf. 1.4). Le temps imparti pour ce travail ne permettait pas d'étudier l'ensemble des bassins versants bretons. De plus, des situations climatiques similaires peuvent se retrouver dans plusieurs bassins versants, l'étude se limite donc à 4 bassins versants dont les critères de choix ont été :

- avoir une taille intermédiaire et similaire autour de 1 000 à 2 000 km² pour permettre une comparaison efficace entre eux ;
- représenter la diversité climatique (gradient ouest-est, marqué par un écart de cumuls de précipitations important), géographique (littoral-intérieur) et hydrogéologique bretonne.

Cette sélection s'est effectuée sur la base des données climatiques observées disponibles, mais aussi sur les résultats de différentes études qui montrent cette différence spatiale (Merot *et al*, 2012 ; Belleguic *et al*, 2012 ; Mounier 1965 ; ...).

2.2.1 Blavet



Carte 1 : Le bassin versant du Blavet

Le bassin versant du Blavet est situé au centre de la Bretagne, en partie dans le département des Côtes-d'Armor et du Morbihan (Carte 1). Il est constitué de 39 affluents avec un chevelu hydraulique total d'environ 3140 km (160 km pour le cours d'eau principal), c'est le plus grand des quatre bassins versants sélectionnés, à savoir environ 2050 km². D'un point de vue géologique, le cours d'eau traverse de nombreuses structures géologiques. D'abord en amont un bloc granitique puis de nombreuses failles de roches métamorphiques (Cf. Figure 6). Ces différentes structures du sol influencent la capacité de l'eau à s'infiltrer.

C'est un bassin versant très artificialisé avec 3 barrages sur le cours d'eau principal : le barrage du Korong, construit au début XIX^e, qui couvre 75 ha et stocke 3 millions de m³ d'eau. Le barrage de Kerné Uhel, construit en 1981 pour l'eau potable, constitue un plan d'eau de 74 ha qui peut contenir

2,4 millions de m³ d'eau. Enfin, le barrage de Guerlédan, construit en 1923, concédé à EDF en 1946, contrôle un bassin versant de 304 ha, retenue d'eau de 51 millions de m³ d'eau dont 32 m³ utiles pour la production d'énergie. Ces retenues d'eau superficielle ont une place particulière dans la gestion de l'eau sur le bassin versant : ils jouent un rôle important sur les inondations et le maintien des étiages. Leurs berges sont en partie aménagées pour les activités de loisirs (baignade, nautisme, randonnées). Ces barrages ont donc un rôle important dans l'économie locale. De plus, ils permettent de moduler le débit du Blavet (SAGE Blavet, 2014).

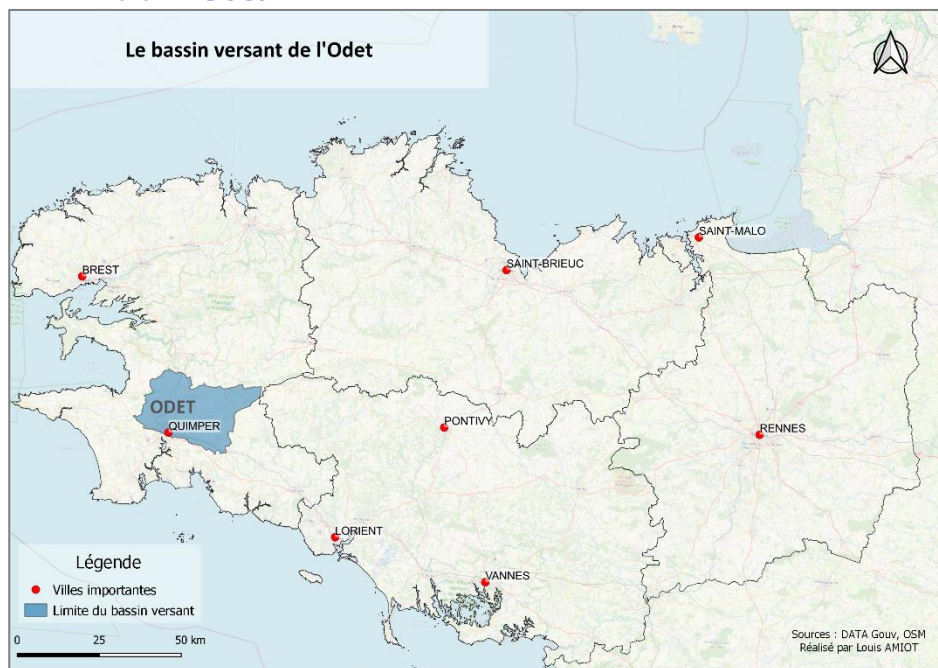
D'un point de vue démographique, il y a un fort contraste en termes de dynamique de population entre l'amont et l'aval. En amont, la population est majoritairement rurale et vieillissante tandis qu'en aval, il y a un dynamisme important avec un plus fort développement industriel et touristique entraînant une plus forte densité de population et donc de besoin en eau. Lorient, Lanester et Pontivy sont les principales villes du bassin versant.

L'agriculture y occupe une place majeure, la surface agricole correspond à 2/3 de la surface des communes du Sage. En amont, production agricole est tournée vers les élevages laitiers, avec une régression des activités. Sur la partie médiane, l'agriculture est plus diversifiée avec une base de production laitière bien présente mais une prédominance hors sol. En partie aval du Blavet, les activités secondaires dominent, la SAU occupe moins de 50 % du territoire.

Les prélèvements en eau sur le bassin versant sont destinés en priorité au réseau d'eau potable. Près de la moitié des prélèvements annuels sont destinés à l'alimentation en eau potable, viennent ensuite les prélèvements agricoles puis industriels. Concernant l'agriculture, les prélèvements pour l'irrigation sont en baisse et les prélèvements pour l'élevage sont issus des forages donc moins soumis aux aléas climatiques. Le SAGE exporte deux fois plus d'eau qu'il n'en importe. De ce fait, le risque de pénurie d'eau est jugé quasiment nul du fait de la présence de barrage (SAGE Blavet, 2014).

Le territoire du SAGE abrite aussi 22 000 ha de zone humide dont la surface varie de 5 à 20% du territoire. Il y a notamment 69 zones humides remarquables, milieu d'intérêt communautaire prioritaire au titre du réseau Natura 2000 (SAGE Blavet, 2014). Si la ressource en eau ne présente à priori pas de problèmes en termes de disponibilité pour garantir les activités humaines sur le bassin versant, la présence de zones humides est par contre un élément important à prendre en compte dans la gestion qualitative et quantitative de l'eau (zones tampons, dénitrification, soutien d'étiage).

2.2.2 Odet



Carte 2: Le bassin versant de l'Odet

L'Odet est un bassin côtier situé au Sud-Ouest de la Bretagne (Cf. *Carte 2*). Le relief est assez marqué au Nord avec une altitude de près de 300m. Cette situation favorise les crues avec des versants pentus et un sol imperméable. Le cours d'eau a un profil à pente forte, le bassin versant lui est organisé avec une succession de petites vallées très planes et des secteurs très encaissés. Le bassin versant est marqué par de nombreuses failles géologiques et divers types de roches.

Le périmètre du bassin versant couvre 725 km² au sud-Finistère, il s'étend sur 32 communes et concerne 8 EPCI (établissement public de coopération intercommunale). La population du SAGE est estimée à 137 500 habitants, avec une progression de 1.4 % par an. Le territoire est à dominante agricole avec 82% de SAU, 9% de forêts et 8% de surfaces artificialisées. L'agriculture est orientée vers le bovin laitier, mais une baisse de l'élevage bovin (-14 % entre 2000 et 2010) a été observée, ainsi que -3 % élevage porcin et -20 % pour élevage avicole. L'urbanisation progresse, notamment autour de Quimper avec +12 % de surface artificialisée entre 1990 et 2016 (SAGE Odet, 2016).

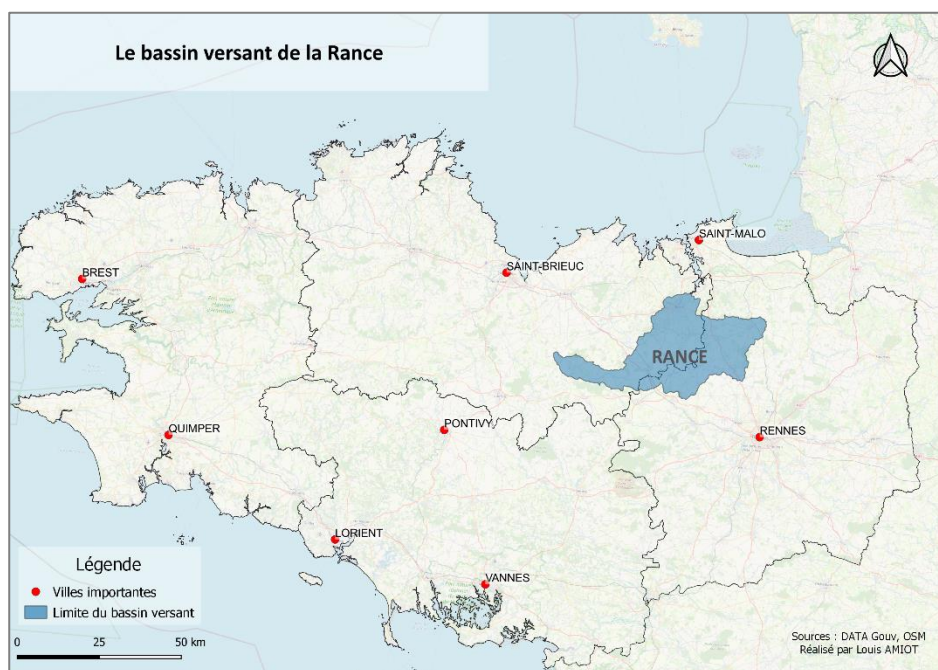
Ce bassin versant compte une cinquantaine de captages d'eau souterraine destinés à l'alimentation en eau. D'après le PAGD (plan d'aménagement et de gestion durable) du SAGE de l'Odet, la ressource en eau est suffisante pour satisfaire la consommation moyenne d'eau. Le débit d'objectif d'étiage (DOE), qui est le débit « permettant de satisfaire l'ensemble des usages en moyenne 8 années sur 10 et d'atteindre le bon état des eaux », n'est pas respecté 8 années sur les 21 dernières années sur l'affluent du Steïr à Guengat, au nord de Quimper.

Un volume de 6,5 millions de m³ est prélevé chaque année dont 71% pour l'alimentation en eau potable. La ville de Quimper représente plus de la moitié des besoins pour ce prélèvement.

L'agriculture et l'industrie représentent 14% des prélèvements totaux sur le SAGE (l'irrigation représente moins de 1% des prélèvements).

L'enjeu majeur de l'Odet est la gestion du risque inondation. Le littoral sud a été reconnu comme territoire à risque important. Selon les données de l'état des lieux du SAGE, seules les communes de Briec, Ergué-Gabéric, Guengat, Plonéis et Quimper disposent d'un schéma directeur Eaux pluviales concernant les inondations. Les précipitations hivernales entraînent fréquemment une saturation des sols qui conduisent à des inondations sur le territoire du SAGE. Quimper est la ville la plus importante du bassin versant, elle s'est construite à la convergence hydrographique de 3 cours d'eau : l'Odet et ses 2 affluents, le Steïr et le Jet, et juste au début de l'estuaire. Ce qui en fait un lieu favorable au développement des inondations.

2.2.3 Rance



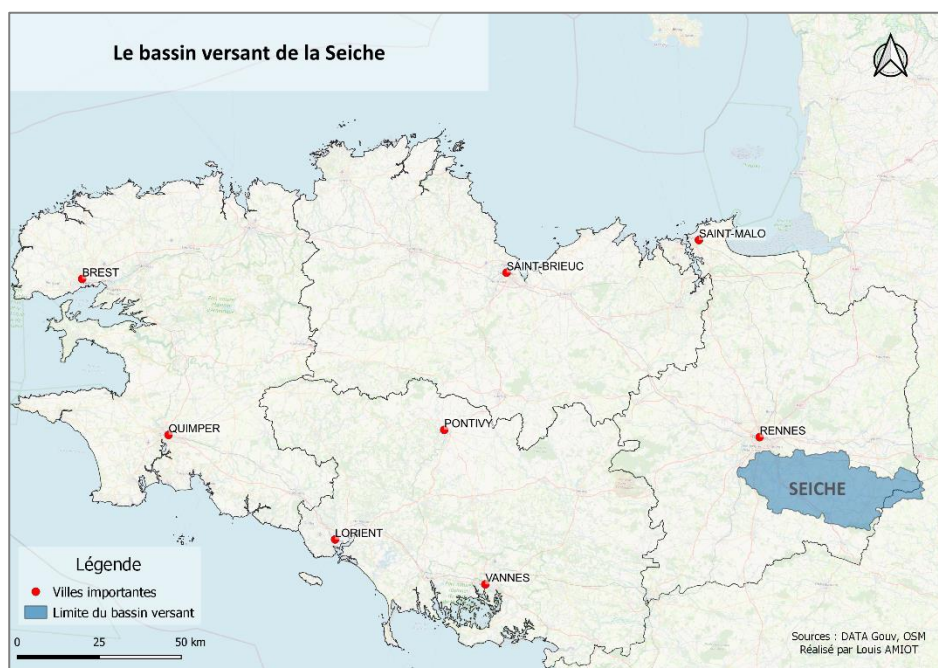
Carte 3 : Le bassin versant de la Rance

Le bassin versant de la Rance, d'une superficie de 915 km², est situé au nord-est de la Bretagne (Cf. Carte 3), il est composé d'un réseau hydrographique dense avec 1100 km de linéaire de cours d'eau sur les cartes IGN, mais près de 1600 km d'après un inventaire réalisé sur 80% du territoire. La Rance, le cours d'eau principal mesure une centaine de kilomètres dont les principaux affluents sont le Frémeur, le Néal, le Linon et le Guinefort. Le territoire est marqué par une forte artificialisation qui permet de limiter les effets des événements extrêmes : Apports estivaux par les étangs d'alimentation du canal d'Ille-et-Rance et rôle de stockage des écoulements hivernaux. L'occupation du sol est là aussi majoritairement tournée vers l'agriculture avec 84 % de terres agricoles.

Les inondations ne sont pas un point majeur pour le bassin versant de la Rance. Les épisodes majeurs interviennent surtout avant 1960. L'évaluation préliminaire des risques d'inondations du SDAGE insiste davantage sur le risque de submersion marine.

Il y a des pressions sur la ressource en eau avec 20 millions de m³ d'eau prélevés chaque année (soit plus de deux fois plus que pour l'Odette), dont 94 % pour l'eau potable, 5 % pour l'industrie et 1 % pour l'agriculture. L'eau du bassin versant de la Rance sert en effet en partie à alimenter la ville de Rennes en eau potable (retenue de Rophemel de 90 ha), ce qui explique ces forts prélèvements. L'enjeu de la gestion quantitative de l'eau est donc le maintien des eaux en saison d'étiage pour garantir la distribution en eau potable. Le territoire comprend aussi 9000 ha de zone humide et l'estuaire de la Rance est un site inscrit. Il y a donc un enjeu écologique important dans le maintien des quantités d'eau (SAGE Rance, 2013).

2.2.4 Seiche



Carte 4 : Le bassin versant de la Seiche

Le bassin versant de la Seiche couvre 873 km² au sud-est de Rennes (cf. *Carte 4*). La Seiche s'écoule sur près de 100 km d'est en ouest. Il s'agit d'un sous-bassin versant de la Vilaine, n'ayant pas de documents spécifiques au sous-bassin versant de la Seiche, les enjeux se confondent avec ceux du SAGE de la Vilaine. Prélèvements au niveau de la Vilaine sont destinés à 80% pour l'alimentation en eau potable puis 12 % industrie et 8 % agriculture. Sur le sous-bassin versant de la Seiche, l'occupation du sol est dominée par l'agriculture avec une répartition équilibrée entre les cultures (de blé et maïs principalement) et les prairies destinées à l'élevage.

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans le régime de la Vilaine, surtout en période d'étiage. Mais les étiages restent marqués pour le sous-bassin versant de la Seiche. Concernant le risque d'inondation, celui-ci est assez important sur la Vilaine notamment parce que des surfaces urbaines sont en zone inondable, environ 15 000 bâtiments ont été recensés en zone à risque (SAGE Vilaine, 2013).

Il y a donc un double enjeu sur ce bassin versant : d'abord la gestion de l'eau en période d'étiage, les étiages sont assez marqués pour la Seiche. Ensuite la gestion du risque d'inondation afin de limiter les inondations des zones urbaines notamment autour de Rennes.

Les caractéristiques des bassins versants sont résumées ci-dessous :

Tableau 3 - Synthèse des caractéristiques des bassins versants :

Bassin versant	Taille (en km ²)	Relief	Contexte démographique	Villes majeures
Blavet	2050	Relief en amont	Rural en amont, périurbain en aval	Lorient, Pontivy
Odet	725	Relief assez marqué	Rural en amont, périurbain en aval	Quimper
Rance	915	Assez plat	Plutôt rural	Dinan, Dinard Saint-Malo
Seiche	875	Assez plat	Urbain en aval	Rennes*

*Rennes n'est pas dans le bassin versant mais très proche

Comme indiqué précédemment, le choix des bassins versants a aussi été conditionné par la disponibilité de données climatiques suffisantes et de qualité.

2.2. Choix des stations

Les stations météorologiques sont les sources des séries de **données de précipitations**. Dans une analyse du changement climatique, il est essentiel d'avoir des séries de données homogènes et sans données manquantes pour considérer la série comme étant fiable (Bigot, 2002). Le choix de ces sources de donnée a été motivé par la proximité de la station avec un bassin versant, la situation amont/ aval, la longueur de la série et l'homogénéité statistique des données.

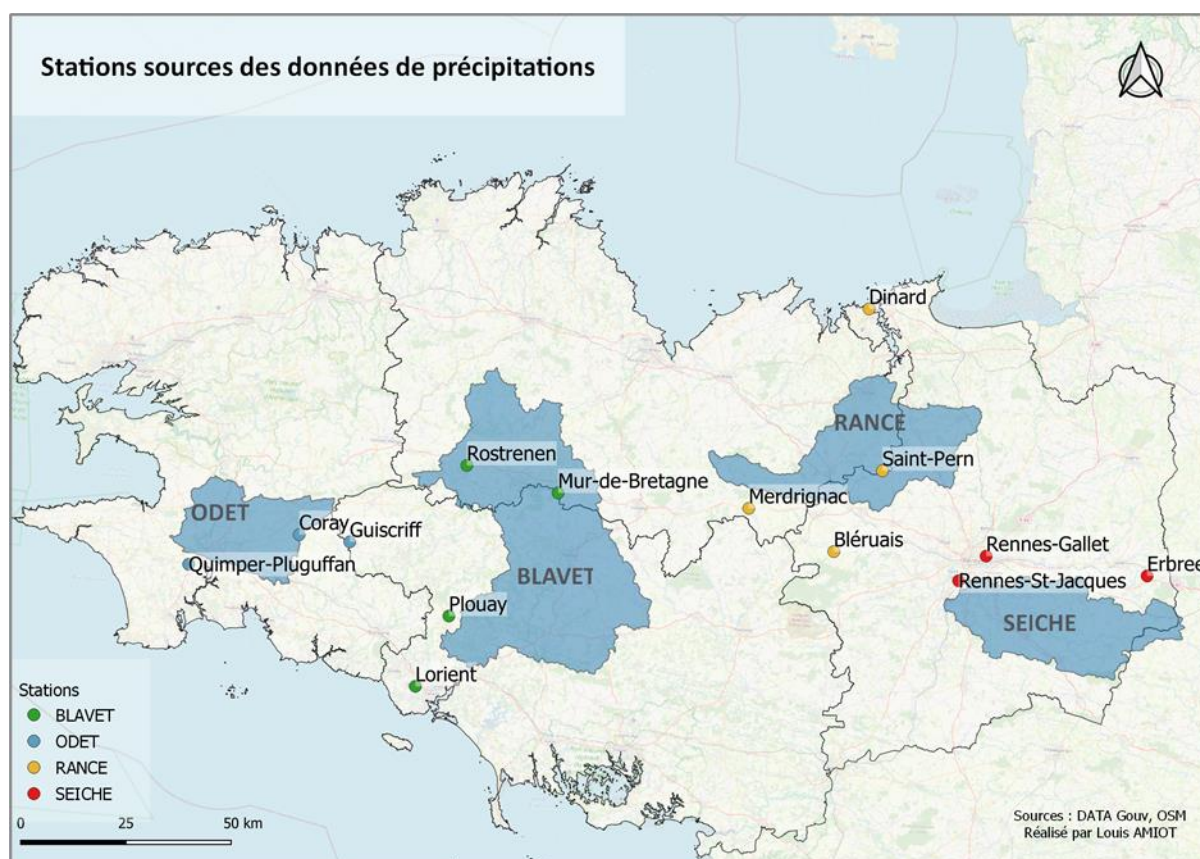
La proximité à un des 4 bassins versants permet d'identifier des phénomènes propres à un bassin versant, ainsi que la comparaison entre les bassins versants. La différence de situation entre les stations d'un même bassin versant permet d'identifier les différences entre l'amont et l'aval d'un bassin versant.

La longueur de la série est essentielle pour identifier des tendances d'évolution dans le temps. De plus, il faut au moins trente ans de donnée pour faire une moyenne climatique de référence : « la normale » (OMM, 2017). Il faut donc des séries de données d'au moins trente ans, la longueur de série recherchée était de soixante ans pour pouvoir comparer deux périodes et voir les évolutions moyennes.

L'homogénéité statistique des séries de données est un paramètre important à prendre en compte pour étudier l'évolution d'une longue série de données. Elle se traduit par une absence de rupture dans la série de données. Une série hétérogène marquée par de nombreuses ruptures peut présenter des biais de près de 2°C dans l'analyse des températures et plus de 10% pour les cumuls de pluie (Moisselin *et al*, 2002). Il existe différents facteurs d'hétérogénéisation des données qui augmentent le risque de fausser toute analyse temporelle.

Dans l'objectif d'une meilleure connaissance du climat passé et d'une meilleure représentativité des modèles, l'effort d'homogénéisation des données s'est accentué depuis 1994 notamment avec la mise en place du programme PRODIGE mené par Météo-France. Malgré l'homogénéisation des données, il peut persister une rupture d'homogénéité de l'ordre de 10% pour les mesures de pluie (Moisselin *et al*, 2002).

Ainsi, la *Carte 5* dévoile les 14 stations qui ont été sélectionnées pour cette étude, avec 3 ou 4 stations par bassin versant retenu. La rupture d'homogénéité persistante est inférieure à 10% pour toutes les stations sélectionnées. Les stations sont donc toutes exploitables pour un regard historique sur l'évolution du climat mais il persiste une marge d'erreur minime des données qui ne perturbe pas les tendances sur le long terme. Les stations ne couvrent pas tout le territoire breton mais présentent des situations différentes, elles s'étalent d'est en ouest sur près de 250km. Les stations sources des données sont à proximité des quatre bassins versants mais pas forcément dedans. Au regard des autres critères de sélection, il s'agit des stations qui y répondent le plus.



Carte 5 : Les 14 stations sources des séries de données

Les stations ont des séries de données quotidiennes et mensuelles de plusieurs paramètres climatiques décrits au *Tableau 4*. Toutes les stations fournissent des données de pluviométrie et au moins une station par bassin versant possède des données de température (Rennes pour le BV de la Seiche, Dinard pour le BV de la Rance, Lorient pour le BV du Blavet et Quimper pour le BV de l'Odet). Les données d'évapotranspiration potentielles (ETP) quotidiennes de Météo-France et d'insolation sont aussi disponibles dans quelques stations. Ces paramètres sont utiles pour l'évaluation du risque de sécheresse. L'ETP sera décrite plus en détail dans la présentation des indicateurs.

Concernant les mesures de pluviométrie, celles-ci sont toutes exprimées en millimètres/m² ou mm¹. C'est l'unité de référence de mesure des quantités de précipitation.

¹ Le millimètre correspond à la hauteur d'eau par mètre carré. Ainsi un cumul de pluie de 1 mm correspond à une hauteur d'eau de 1 mm sur une surface de 1 m², cela correspond aussi à un volume de 1 litre sur un mètre carré.

Tableau 4 - Données disponibles par stations

Bassin versant	Station (d'Ouest en Est)	Paramètre climatique disponible			
		P	T	ETP	INST
ODET	Quimper				
	Coray				
	Guiscriff				
BLAVET	Lorient				
	Plouay				
	Rostrenen				
	Mur				
RANCE	Merdrignac				
	Bléruais				
	Saint-Pern				
	Dinard-Pleurtuit				
SEICHE	Rennes-St Jacques				
	Rennes Gallet				
	Erbrée				

P Précipitation (en mm)
 T Températures (en °C)
 ETP EvapoTranpiration Potentielle (en mm)
 INST Insolation (en Joule/cm²)

Les séries de données ne commencent pas toutes à la même date, l'idée est d'avoir au moins 50 ans de données. Onze stations démarrent avant 1959, la station de Mur-de-Bretagne possède la plus longue série de données avec un début en 1932 (cf. *Tableau 5*). Certaines stations ont aussi quelques mois de données manquants, c'est notamment le cas à Bléruais où il manque plusieurs mois sur les cinq dernières années et Rennes-Gallet où il manque plusieurs mois entre 2005 et 2007.

Tableau 5 - Détail des manques et dates de débuts des données pluviométriques

Bassin versant	Station (d'Ouest en Est)	Début de Série	Manques
ODET	Quimper	juin-65	
	Coray	janv-51	Avr-1955
	Guiscriff	janv-58	
BLAVET	Lorient	janv-52	
	Plouay	janv-58	
	Rostrenen	janv-56	
	Mur	janv-32	Mar-2000, Déc-2001
RANCE	Merdrignac	juin-53	
	Bléruais	janv-65	Fev-1970, Fev-Mar-2011, Dec-2015, Janv-Juil-Dec-2016, Nov-2017, Janv-2018
	Saint-Pern	janv-70	
	Dinard-Pleurtuit	nov-49	
SEICHE	Rennes-St Jacques	janv-51	
	Rennes Gallet	janv-51	Avr-Juil-Nov-Dec-2005, Aou-Dec-2006, Fev-Mai-Aou-2007
	Erbrée	janv-51	

La période de référence sur laquelle sont calculés la plupart des indicateurs est 1958-2019. Cette période a été choisie car c'est la plus longue période pour laquelle une majorité de stations peut fournir des données (11 sur 14) et de plus, elle permet de mener l'analyse sur deux normales climatiques² Météo-France recalcule les normales tous les 10 ans. Les normales en vigueur actuellement ont été calculées sur la période 1981-2010. Pour les séries considérées ici, la première normale climatique va du 1^{er} janvier 1961 au 31 décembre 1990, en accord avec les recommandations de l'organisation météorologique mondiale (OMM, 2017). Pour la période actuelle (1991-2019), il manque une année sur la dernière normale climatique. Mais pour éviter de perdre 9 ans de données, il est considéré que l'année manquante (2020) n'entraîne pas de biais significatifs. Cela permet ainsi une actualisation des données des récentes études qui considèrent la normale 1981-2010

² Les normales climatiques sont des produits statistiques calculés sur des périodes de 30 ans. Elles permettent de caractériser le climat sur cette période et servent de référence (Météo-France).

2.3. Choix des indicateurs climatiques :

Un indicateur est défini par l'IFEN comme étant « une donnée sélectionnée à partir d'un ensemble statistique plus important car elle possède une signification et une représentativité particulières » (IFEN, 2000). Il permet de simplifier ou synthétiser une information afin d'identifier des phénomènes et des tendances (ADEME, 2013). Un indicateur climatique permet de donner une vision synthétique du climat et de son évolution. Sans indicateurs climatiques uniformes entre les différentes stations, il n'est pas possible de comparer les données, y compris pour comparer le futur modélisé avec le passé observé.

De base, le fichier fourni par station était composé de la série de données quotidiennes et mensuelles de cumul de précipitation. La masse d'information disponible a été triée pour éviter un éparpillement des données et une perte de l'information essentielle. Les données quotidiennes sont d'abord triées par mois, saison et année, décennie ou encore période de 30 ans qui correspondent aux normales climatiques. La recherche d'indicateurs s'est effectuée en explorant d'abord les données de la station de Mur-de-Bretagne.

Le *Tableau 6* affiche l'ensemble des indicateurs utilisés. **Les indicateurs sélectionnés peuvent se diviser en deux catégories : des indicateurs pour décrire le climat moyen actuel et des indicateurs pour évaluer les risques de sécheresses et inondations.**

Les premiers **indicateurs descriptifs** correspondent aux moyennes, sur la période de référence 1958-2019, des températures et précipitations à différentes échelles temporelles (mois, saison météorologique ou hydrologique, année). L'analyse de la répartition de la pluviométrie au cours de l'année est importante, notamment pour voir son évolution potentielle par rapport à la période de recharge des nappes et des retenues d'eau superficielle. Les gestionnaires d'AEP ont la sensation d'un décalage de la période de recharge de plus en plus lointaine dans l'année, accentuant la pression sur la ressource en eau.

Les cumuls sont ensuite 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 1 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, enfin plus de 20 mm pour des pluies fortes. Les jours de pluies fortes sont aussi parfois considérés au seuil de 10 mm, il peut arriver que ce seuil soit utilisé. Les jours où les précipitations sont inférieures à 1 mm sont considérés comme des jours secs. Cette méthode de décomposition en apports d'intensité donnée a été décrite par Mounier et Péguy en 1968 afin de montrer l'importance des précipitations intenses (Mounier et Péguy, 1968). Une étude régionale a aussi été menée en utilisant cette méthode pour l'étude des précipitations intenses en Bretagne (Dubreuil *et al*, 1996).

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 car en Bretagne, le nombre de jours de pluie est important mais c'est la pluie forte qui contribue à façonner le régime de recharge.

Pour l'étude des **tendances climatiques**, deux méthodes ont été utilisées : le suivi temporel annuel, c'est-à-dire l'évolution du cumul annuel sur toute la période de la série de données. Et les tendances sur 10 ou 30 ans correspondent à une différence entre la moyenne de la période passée et la période récente ou une différence entre la moyenne de la période future modélisée et la période récente. Cette différence est calculée soit par rapport à la période de référence (1958-2019) soit par rapport à la normale climatique actuelle (1991-2019).

Enfin, les indicateurs d'évolution du **risque de sécheresse et inondation** seront décrits plus en détail en partie 3.3

Une vingtaine d'indicateurs a ainsi été utilisée pour cette étude. Ils permettent une comparaison spatiale, entre les stations et les bassins versants, et temporelle avec une identification des tendances passées observées et futures modélisées.

Tableau 6 - Présentation des indicateurs

		Indicateur	Détail	
Description du climat	1	Cumul de précipitation moyen	Moyenne sur la période de référence (1958-2019), par mois, saison, année..	
	2	Température moyenne mensuelle	Moyenne sur la période de référence (1958-2019)	
	3	Cumul moyen par type de pluie	Moyenne sur la période de référence (1958-2019), par type de pluie (P 1-5; P 5-10; P 10-20 ; P>20)	
	4	Fréquence de type de climat annuel de Köppen sur 30ans	% de type de climat de Köppen	
	5	Part du cumul par type de pluie par rapport au cumul total	% de cumul par type de pluie	
	6	Cumul minimum et maximum par période	Min et max sur la période de référence (1958-2019) par mois et année	
	7	Nombre de jour par type de pluie	Nb de jours ou P 1-5; P5-10; P 10-20 ; P>20	
	8	Nombre de jour sec	Nombre de jours ou P<1	
	9	Suivi du cumul annuel de précipitation	Cumul annuel sur l'ensemble de la période	
	10	Tendance sur 30 ou 10 ans d'évolution des cumuls	Différence entre 2 cumuls moyens sur 30 ans ou 10ans	
	11	Tendance sur 30 ans ou 10 ans des jours de pluie	Différence entre 2 nombres de jours de pluies moyens sur 30 ans ou 10ans	
	12	Tendance sur 30 ans ou 10 ans des températures	Différence entre 2 températures moyennes sur 30 ans ou 10ans	
Risques et événements extrêmes	Inondations	13	Régime probable	Quintile et déciles supérieurs et inférieurs mensuels
		14	Standardized précipitation index	Indice de sécheresse SPI= (P-Pmoy)/EcartType
		15	Nombre de jour de pluie extrême	Nb de jour ou P>50
	Sécheresses	16	Nombre de jour de pluie forte	Nb de jour ou P>20 ou P>10
		17	Diagramme ombrothermique	Diagramme mensuel avec T=2P
		18	Suivi de l'ETP annuelle	ETP annuelle sur l'ensemble de la série disponible
		19	Bilan Hydrique	Suivi de l'état de la réserve utile du sol en fonction de P et ETP
		20	Fréquence mensuelle du déficit du bilan hydrique sur 30 ans	% de mois arides, secs, humides.. En fonction du bilan hydrique
		21	Suivi du déficit d'évapotranspiration annuel	DE annuel sur l'ensemble de la série disponible

3. Les variabilités pluviométriques historiques : un regard rétrospectif sur le climat breton

3.1 Une grande variabilité spatiale de la pluviométrie

Les précipitations annuelles moyennes vont du simple au double de l'est à l'ouest de la Bretagne. L'objectif ici est de préciser et quantifier les différences entre les stations et les bassins versants. Cette étude peut être menée à différentes échelles temporelles : annuelle, saisonnière et mensuelle.

3.1.1 Variabilité sur une année hydrologique :

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. La durée et les dates d'une année hydrologique varient en réalité d'une année à l'autre selon les conditions pluviométriques et thermiques. De plus l'année hydrologique varie aussi spatialement puisqu'elle dépend des conditions météorologiques. L'année hydrologique utilisée ici est théorique, le but n'est pas de rechercher ces dates et sa variation dans le temps mais de trouver une période commune à l'ensemble des stations pour pouvoir comparer les résultats.

En France, généralement elle débute au mois de septembre. Il a été considéré qu'en Bretagne, **l'année hydrologique s'étend du 1er octobre (année n-1) au 30 septembre de l'année suivante (n)**. 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 7* montre le cumul par type de pluie sur la période de référence sur les 14 stations, à noter que les stations sont rangées d'ouest en est. Concernant le cumul total, il y a une décroissance du cumul annuel en allant vers l'Est. Coray est la station la plus arrosée avec en moyenne 1 350 mm par an sur la période de référence (1958-2019). La station la moins arrosée est Rennes St Jacques avec 665 mm. Comme identifié dans la partie 1.1.1, il y a une différence pluviométrique marquée entre l'Est et l'Ouest allant du simple au double. Globalement, le bassin versant de la Rance et de la Seiche ont des cumuls relativement proches situés autour de 700 mm annuels. La station de Merdrignac située plus à l'Ouest et dans l'intérieur des terres et Erbrée, la station la plus à l'Est, ont des cumuls un peu plus importants situés autour de 850 mm. Ensuite, le Blavet présente des cumuls proches de 1 000 mm avec un maximum à Plouay de plus de 1 100 mm. C'est sur ce bassin versant que les contrastes sont les plus importants. Il est marqué par un gradient Nord/Sud de l'ordre de 200 mm lié notamment au relief présent au Nord. L'Odét est le bassin versant le plus arrosé avec plus de 1 200 mm. Mais la situation n'est pas homogène au sein des bassins versants : l'influence maritime peut s'observer particulièrement pour les stations de Quimper et de Lorient avec des cumuls inférieurs de 100 à 200 mm à l'année par rapport aux stations situées sur un même bassin versant. Pour la Seiche, le cumul est moins important en allant de l'amont vers l'aval. Le relief a donc un rôle important dans les différences de cumuls entre les stations. Généralement, **les cumuls annuels sont plus marqués en amont des bassins versants. Ils le sont d'autant plus quand le relief est marqué.**

Le découpage par type de pluie montre que **le cumul de précipitation** des jours de pluie faible (<5mm) et intermédiaire (5-10mm) est relativement similaire pour toutes les stations **en valeur absolue** avec entre 200 et 250 mm chaque année pour l'ensemble de la Bretagne. Mais pour les jours de pluie de plus de 10 mm, des différences apparaissent entre les stations. L'apport de ces épisodes pluvieux est globalement plus important sur le Blavet et l'Odét avec entre 500 et 700 mm apportés

par les pluies intenses (>10mm) contre environ 200 mm sur la Rance et la Seiche. La variation des cumuls de fortes pluies (>20mm) est plus importante avec 80 mm à Rennes Saint Jacques contre près de 500 mm à Coray, soit presque 6 fois plus (cf. *Figure 7*).

En terme relatif, les jours de pluie faible (<5 mm) représentent entre 10 et 25 % du cumul total. La part de ce cumul est plus importante à l’Est de la Bretagne, mais aussi sur les stations littorales. Les jours de pluie forte représentent eux entre 15 et 40 % du cumul total et sont plus importants sur l’Ouest et les stations des hauteurs du massif Armoricaïn. L’importance des fortes pluies semble donc plus grande vers l’Ouest.

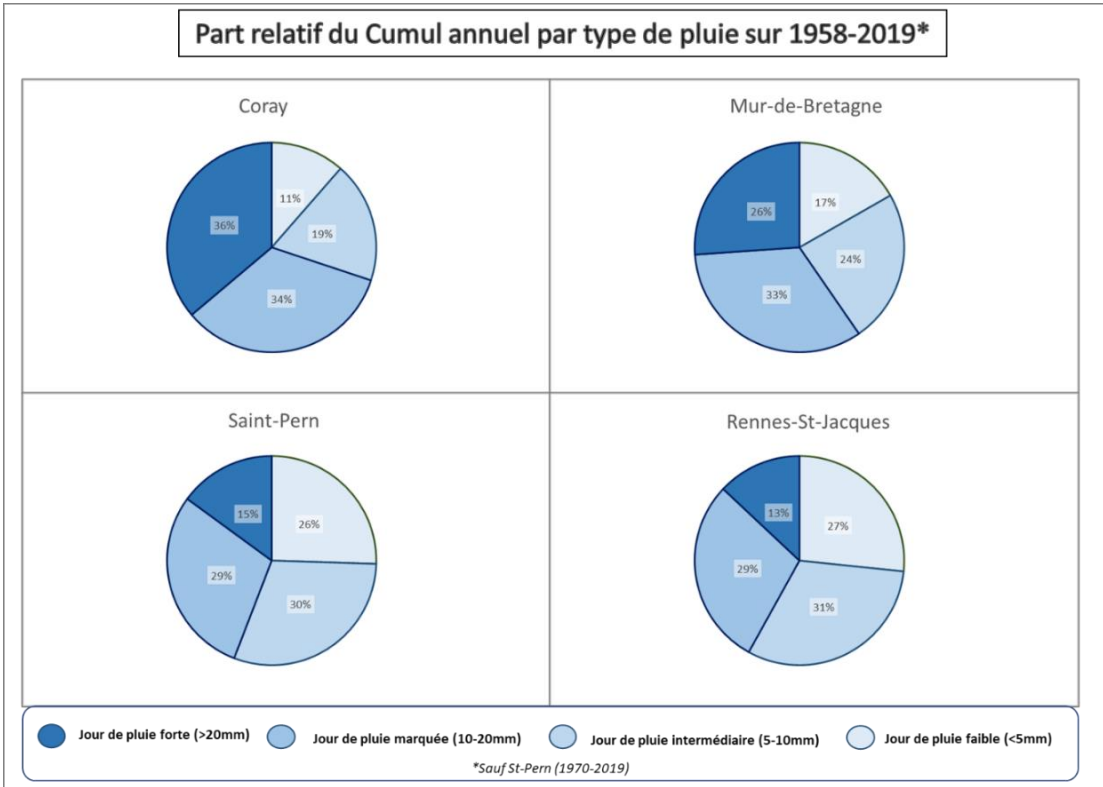
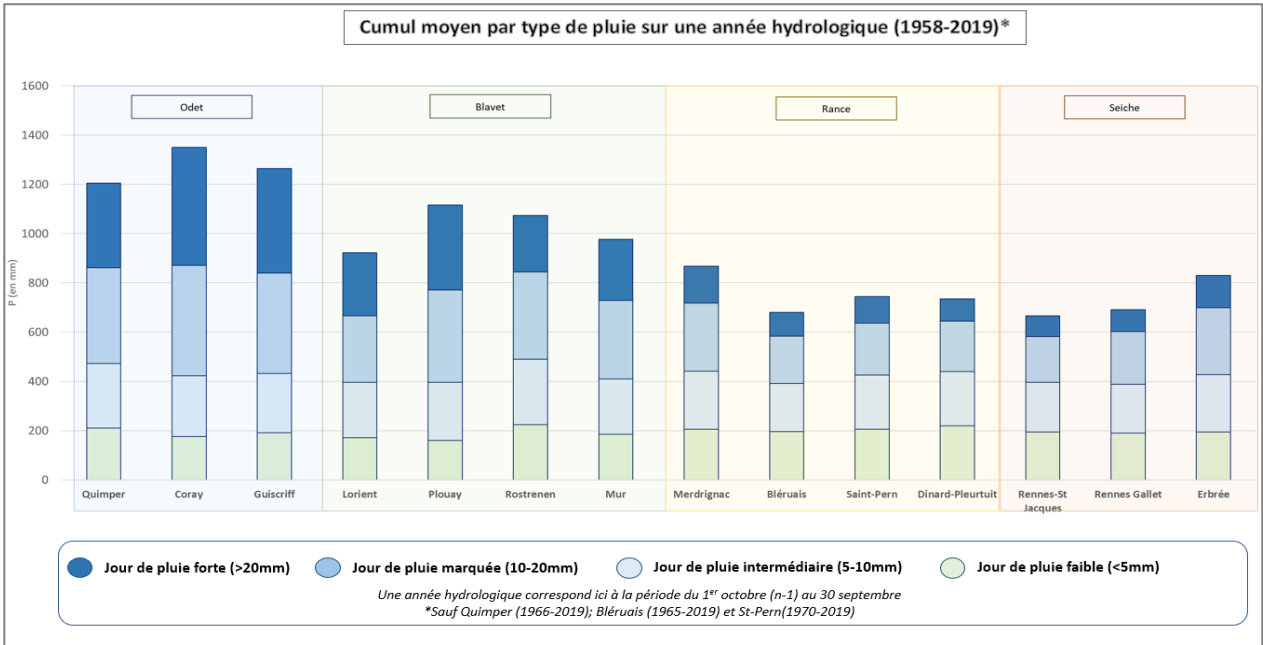


Figure 7 : Cumul absolue et relatif moyen sur une année hydrologique

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'Est et l'Ouest. Contrairement aux pluies faibles qui apportent des cumuls annuels relativement similaire d'une station à l'autre.

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'Ouest et l'Est est moins spectaculaire mais existe. L'écart maximum est de 43 jours de pluie entre Rennes et Coray en moyenne à l'année. Il y a entre 140 et 160 jours de pluies à l'année soit autour de 30 à 40% des jours de l'année (cf. *Figure 8*). Les jours de forte pluie (>20mm) représentent seulement 3 à 12 jours, ils apportent pourtant une importante part de pluie annuelle. Par exemple à Coray, 15 jours de pluie forte apportent 35% du cumul annuel, à Mur de Bretagne, 7 jours de pluie apportent 25% du cumul annuel. Les jours de pluie faible (<5mm) sont majoritaires ou presque sur toutes les stations, mais ils apportent peu de pluie au total. Les jours de fortes pluies sont donc essentiels pour l'apport pluviométrique.

Donc à l'année, quelques jours de forte pluie suffisent à apporter jusqu'à la moitié du cumul total annuel. Et cela est vrai pour l'ensemble des stations sur les quatre bassins versants. L'importance des jours de forte pluie s'accroît en allant vers l'Ouest. Les stations côtières ont des cumuls moins importants, notamment dus à une intensité moins importante des pluies. Par exemple, à Lorient il y a en moyenne 7 jours de forte pluie pour un cumul de 250 mm contre 11 jours à Plouay pour 345mm (cf. Annexe 3 et 4).

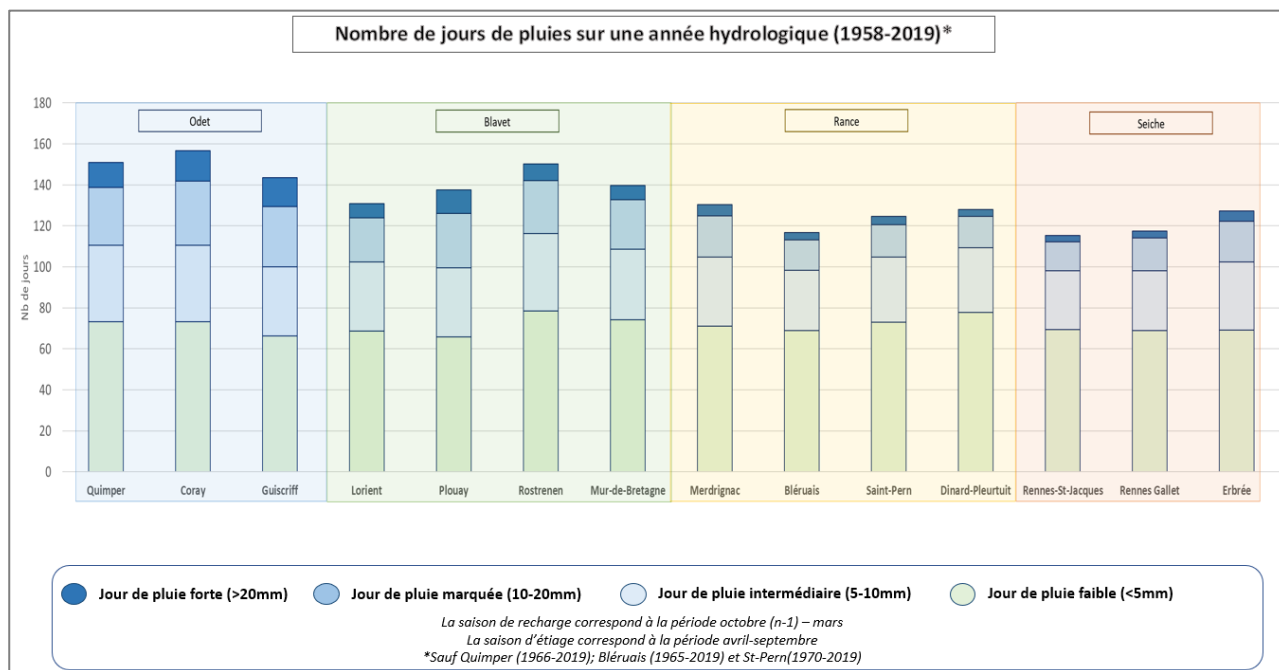


Figure 8 : Nombre de jours de pluie moyen sur l'ensemble des stations

3.1.2 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 octobre-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 ou s'infiltrer dans le sol, une infime partie s'évapore du fait de températures modérées/basses.
- **La saison d'étiage** correspond à la période avril-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.

La saison de recharge représente environ deux tiers du cumul annuel et un tiers pour la saison d'étiage. En terme quantitatif, cela représente entre 400 et 800 mm lors de la saison de recharge et entre 300 et 400 mm sur la saison d'étiage. Avec un écart de près de 400mm entre la saison d'étiage et de recharge sur l'Odet, entre 250 et 300 mm pour le Blavet et environ 100 mm pour la Rance et la Seiche, l'écart saisonnier est bien plus marqué à l'Ouest (cf. Annexe 5).

Il est intéressant d'affiner la comparaison Est-Ouest en prenant deux stations très opposées : Coray station la plus arrosée à l'Ouest et Rennes stations la moins arrosée à l'Est. La *Figure 9* indique le nombre de jours de pluie mis en parallèle avec la part qu'il représente dans le cumul total saisonnier. La différence entre la saison de recharge et d'étiage est nette tant en terme quantitatif que dans le nombre de jours de pluie. Globalement, il y a plus de jours de pluie et particulièrement de forte pluie en saison de recharge. Le nombre de jours de pluie supplémentaires entre la saison de recharge et d'étiage est à peu près équivalent pour les deux stations, à savoir 20 à 30 jours.

À Coray, la saison de recharge se compose en moyenne de 92 jours de pluie, soit 3 mois sur 6. Elle est composée d'une dizaine de jours de pluie forte (> 20 mm) qui représentent plus d'un tiers du cumul total. En saison d'étiage, la situation diffère quelque peu, le cumul est plus équilibré entre les différents types de pluie. C'est principalement les jours de plus forte pluie qui diminuent, les pluies faibles se maintiennent entre 30 et 40 jours pour la saison. Il y a autant de jours de pluie durant la saison d'étiage de Coray que pendant la saison d'étiage à Rennes.

À Rennes, la situation est différente dans la distribution des jours de pluie. D'abord il y a moins de jours de pluie, l'écart entre les deux séries de données est de l'ordre de 30 jours. Ensuite les épisodes de fortes pluies sont moins fréquents et représentent une part minime dans le cumul de la saison de recharge. En saison d'étiage, le nombre de jours de pluie diminue d'une vingtaine de jours. Ce sont principalement le nombre de jours de pluie de moins de 10 mm qui baisse. Les pluies intenses se maintiennent au même niveau en saison d'étiages avec 4 à 5 jours en moyenne de fortes pluies. Le cumul apporté par ces pluies intenses représente une part plus importante dans le cumul total saisonnier par rapport à la saison de recharge.

Les pluies faibles, bien qu'ultra majoritaires en nombre de jours, représentent à peine un tiers du cumul saisonnier pour les deux stations. Les jours de pluie faible sont donc assez peu significatifs

dans le cumul de précipitation indépendamment de la saison et de la station. Les jours de pluie ayant un cumul supérieur à 5 mm sont essentiels pour l’apport de cumul saisonnier.

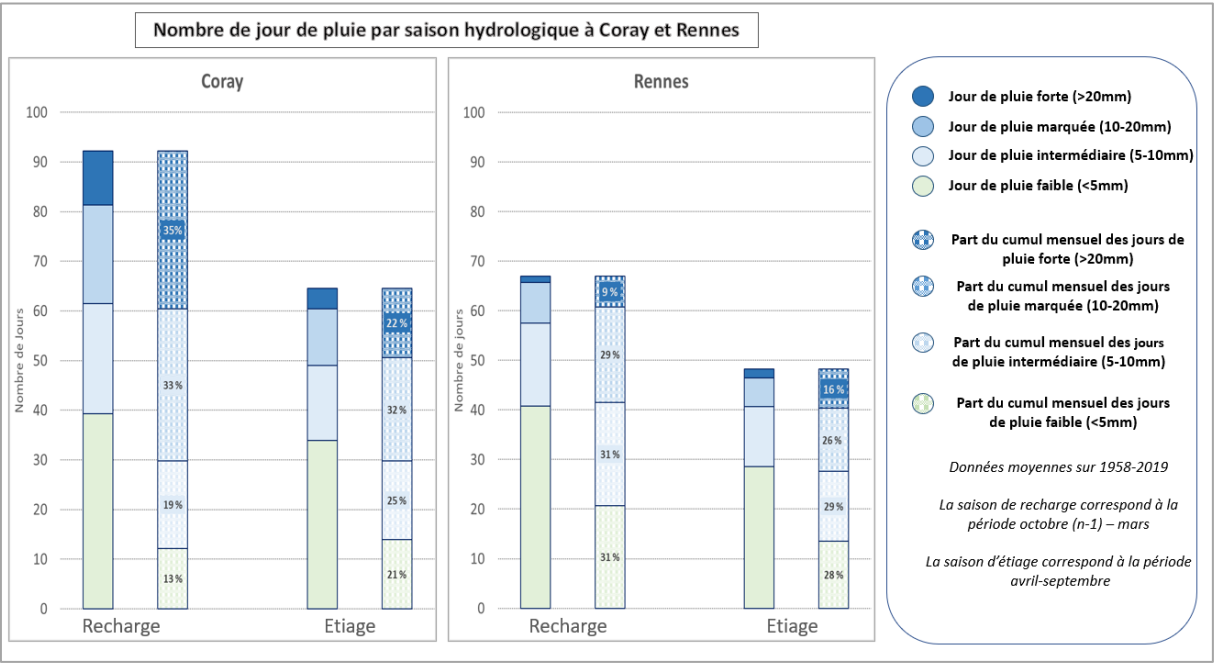


Figure 9 : Nombre de jours de pluie et cumul relatif par saison hydrologique à Coray et Rennes

3.1.3 Variabilité par saison météorologique

Les saisons météorologiques ne correspondent pas aux saisons astronomiques. Elles durent aussi trois mois mais démarrent trois semaines plus tôt au début du mois. Ainsi, les saisons sont les suivantes :

- l'hiver correspond à la période allant du 1^{er} décembre au 28/29 février,
- le printemps démarre le 1^{er} mars et se termine le 30 mai,
- l'été commence le 1^{er} juin et finit le 31 août,
- l'automne correspond à la période allant du 1^{er} septembre au 30 novembre.

En terme quantitatif, le contraste saisonnier est bien marqué entre l'hiver et l'été. Pour les bassins versants de l'Odet et du Blavet, les cumuls sont en moyenne de l'ordre de 400 mm en hiver et entre 150 et 200 mm en été. Les cumuls printaniers et automnaux saisonniers sont assez similaires autour de 250 à 300 mm. Pour la Rance, les cumuls sont de l'ordre de 200 mm en Hiver et 130 à 150 mm en été. Comme pour les saisons hydrologiques, le contraste saisonnier est accentué sur le Blavet et l'Odet (cf. Annexe 5). La *Figure 10* montre le nombre de jours de pluie mis en parallèle avec la part qu'il représente dans le cumul total par saison météorologique. Encore une fois, les stations de Rennes et Coray sont comparées.

À Coray, il y a entre 30 et 50 jours de pluie par saison. Avec en hiver, en moyenne de la pluie un jour sur deux contre un jour sur trois en été, le contraste saisonnier y est bien marqué. Il y a une relative stabilité du nombre de jours de pluie faible autour de 20 jours, tandis que les autres types de pluie sont divisés par deux entre l'hiver et l'été. L'importance des pluies intenses est plus marquée en hiver et en automne avec plus d'un tiers du cumul issu de 5 à 6 jours de fortes pluies. Puis, le cumul des fortes pluies diminue avec le nombre de jours de pluie. En été, ce sont les pluies de 10 à 20 mm qui représentent le cumul le plus important avec 32 % du cumul en 5 jours. En prenant le seuil de 10 mm pour définir un jour de pluie forte, le cumul des pluies de forte intensité est supérieur à 50 % à toutes saisons. Les jours de pluies fortes au seuil de 10 mm ne représentent pourtant que 15 à 20 jours par saison.

À Rennes, il y a entre 20 et 30 jours de pluie par saison. En hiver à Rennes, il pleut en moyenne un jour sur trois contre un jour sur cinq en été. Le nombre de jours baisse entre l'hiver et l'été pour tout type de pluie sauf les pluies fortes en été où il pleut un jour sur cinq. Les pluies de plus forte intensité sont plus fréquentes en été et en automne à Rennes. Pour relativiser, c'est en moyenne un jour de pluie par an en été contre un tous les deux ans en hiver. Cependant, ce jour de forte pluie ($P > 20\text{mm}$) apporte 20% du cumul estival. Avec le seuil de 10 mm à Rennes, le cumul des fortes pluies n'est pas majoritaire, l'été est la saison où il y a un équilibre dans la répartition des cumuls par intensité.

En comparant les situations à Rennes et Coray, il apparaît toujours une importance des pluies intenses sur le cumul saisonnier plus marquée à l'Ouest. Cependant, l'importance des fortes pluies est minimum en été à Coray, là où elle est maximum à Rennes. Il est possible que des orages, plus fréquents vers l'Est apporte des pluies intenses en été, ce qui expliquerait la part importante des pluies fortes en été à Rennes.

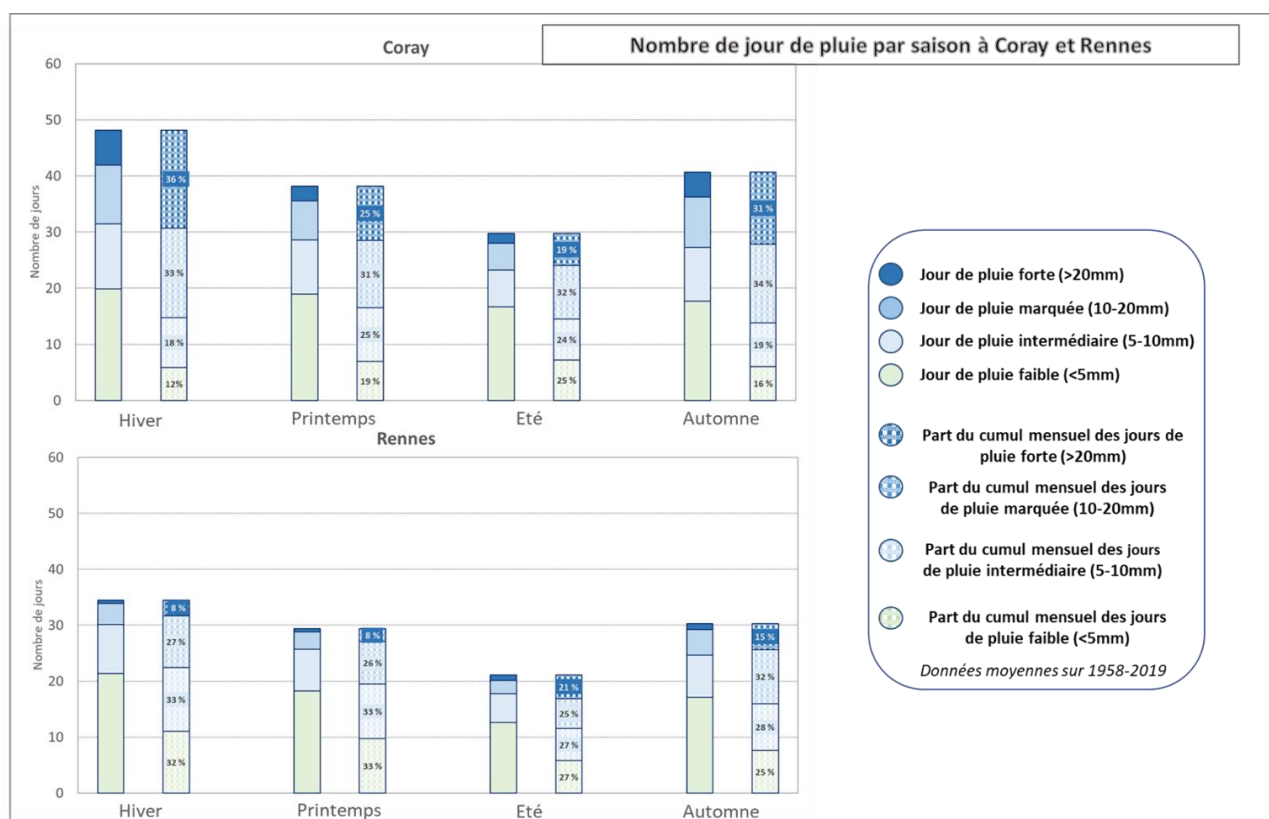


Figure 10 : Nombre de jours de pluies et cumul relatif par saison météorologique à Coray et Rennes

Les résultats par saisons météorologiques sont assez similaires à ceux des saisons hydrologiques. Une analyse par saison hydrologique est donc suffisante ici. Cette analyse peut toutefois être affinée par une analyse mensuelle.

3.1.4 Variabilité mensuelle

En continuant dans ce zoom sur l'échelle temporelle, les cumuls sont maintenant comparés par mois. En restant sur une comparaison entre Rennes et Coray, la *Figure 11* permet une comparaison des régimes pluviométriques des deux extrêmes bretons. En fait, il n'y a qu'un seul régime pluviométrique en Bretagne avec des cumuls de précipitations maximums entre novembre et février et des cumuls minimums en été. Ce régime est beaucoup plus accentué à l'Ouest, avec à Coray un écart de 110 mm entre le mois le plus sec et le mois le plus humide contre 30 mm à Rennes.

Les données des 14 stations montrent clairement un gradient du régime pluviométrique avec une hausse des cumuls en allant vers l'Ouest principalement sur les mois d'hiver (cf. Annexe 5). Le cumul mensuel dépasse les 100 mm pour les mois d'hiver sur le Blavet et l'Odé. Ainsi à Rennes, le cumul du mois de décembre est 2,5 fois plus faible que celui de Coray et 2 fois plus faible qu'à Quimper alors que la différence avec les stations de la Rance est de l'ordre de 10 à 20 mm. À Coray, il y a en moyenne autant de précipitations durant le mois de janvier que durant tout l'été à Rennes. Les mois de janvier et décembre sont d'ailleurs très arrosés à Coray avec au moins 5 jours à plus de 10 mm de pluie dont deux de plus de 20 mm et 17 jours de pluie pour chacun de ces deux mois. Il y a au moins deux jours par mois où le cumul quotidien dépasse les 10 mm et jusqu'à 7 jours pour les mois d'hiver. Pour Rennes, le maximum intervient en novembre avec plus de 70 mm mensuel. L'intensité des pluies est clairement moins marquée avec au maximum deux jours où les cumuls dépassent 10 mm pour le mois de novembre.

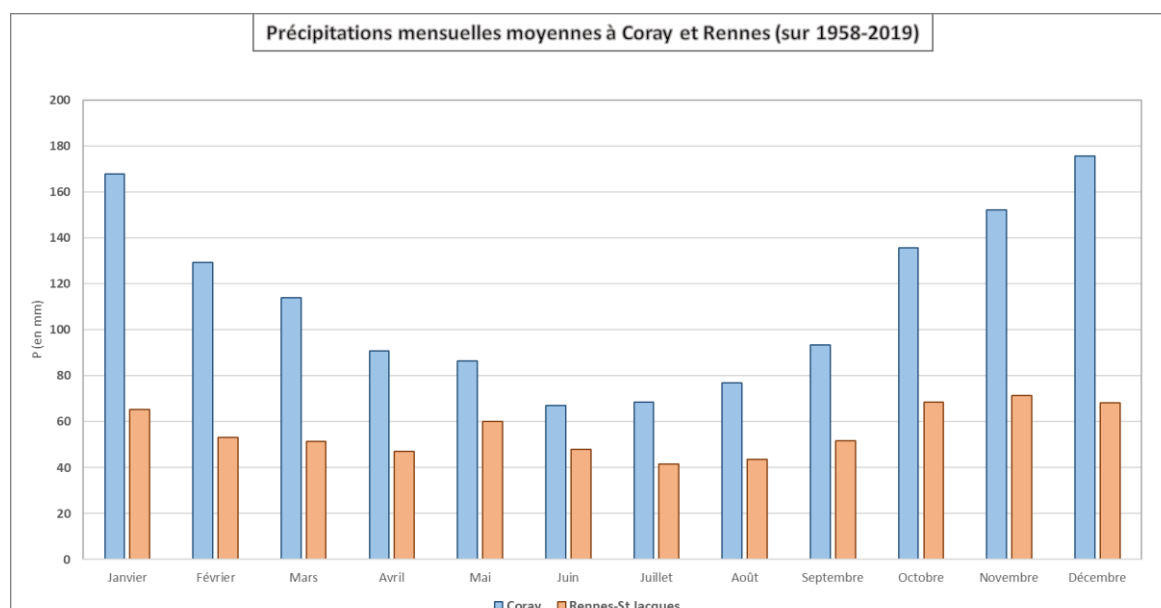


Figure 11: Cumul mensuel moyen à Rennes et Coray

Donc les mois les plus humides sont aussi ceux où les jours de fortes pluies sont les plus fréquents, sans que ce soit pour autant les mois où il y a le plus de jours de pluie.

La *Figure 12* montre le régime hydrique selon l'intensité des pluies. Comme à toutes les échelles de temps explorées ici, **c'est la différence dans l'intensité des pluies qui conduit à une différence marquée entre l'Est et l'Ouest.** À Coray ou Merdrignac, les variations des cumuls de « jours de pluie forte » sont relativement symétriques à la variation du cumul global. Pour Mur et Rennes, c'est plutôt les « jours de pluie marquée » (10-20mm) qui varient comme le cumul global. **Les pluies intenses ont donc un rôle essentiel dans le façonnement du régime pluviométrique (Mounier et Pégy, 1968).** Quelques jours de pluies intenses (>10 mm) suffisent à créer une différence dans le cumul total mensuel qui se répercute sur une différence de 500 à 700 mm à l'année. Cette différence est maximum en hiver où il y a 5 à 7 jours de pluie avec un cumul supérieur à 10 mm sur le Blavet et l'Odet contre 1 à 2 jours sur la Seiche et la Rance.

Un pic de précipitation est observé au mois de mai dans les stations les plus à l'Est, il s'observe bien pour les stations de Rennes et Merdrignac avec des cumuls moyens supérieurs de 10 à 15 mm en mai par rapport à avril et juin. Ce pic peut interroger, surtout qu'il intervient en début de saison d'étiage. Il peut présenter un intérêt pour la gestion quantitative des eaux à cette période. Cependant, l'eau est directement absorbée par la végétation en mai, l'impact de ce pic est donc relativement limité au court terme. Les météorologues expliquent ces pics de pluie au mois de mai par le phénomène des gouttes froides³ lié au climat océanique et fréquent à cette période de l'année sur la moitié nord de la France.

Une analyse des données par semaine entre mi-avril et mi-juin des différentes stations a été menée et est présentée en Annexe 6. Le but était d'identifier la période précise et les évolutions de ce phénomène sur 60 ans mais les résultats sont peu concluants. Ce pic tardif reste secondaire en termes de cumul de pluie et n'entraînerait pas a priori une recharge des eaux souterraines (pas de rebond significatif observé dans les suivis des nappes par le BRGM). Par contre, il peut contribuer au remplissage des retenues d'eau superficielle pour l'alimentation en eau potable car il s'agit de pluies de forte intensité. Toutefois c'est aussi à cette période que les besoins en eau sont importants pour la végétation notamment. La contribution au remplissage n'est donc pas nécessairement si importante. Cette question n'a pas été davantage explorée. Il serait intéressant de savoir comment ce pic évoluerait dans le futur mais une des difficultés de la simulation de ces perturbations est de prévoir avec précision le positionnement des gouttes froides. Le moindre décalage de quelques dizaines de kilomètres peut faire passer une région d'un temps perturbé à un temps calme, et la durée de ce type de dépression est très variable.

³ *Les gouttes froides représentent des masses d'air froid d'altitude isolées dans une masse d'air plus chaud. Elles sont totalement indépendantes (dépressions coupées du rail dépressionnaire). Les précipitations peuvent se montrer intenses lors de formations orageuses (Météo-France).*

Précipitations mensuelles moyennes par type de pluie (sur 1958-2019)

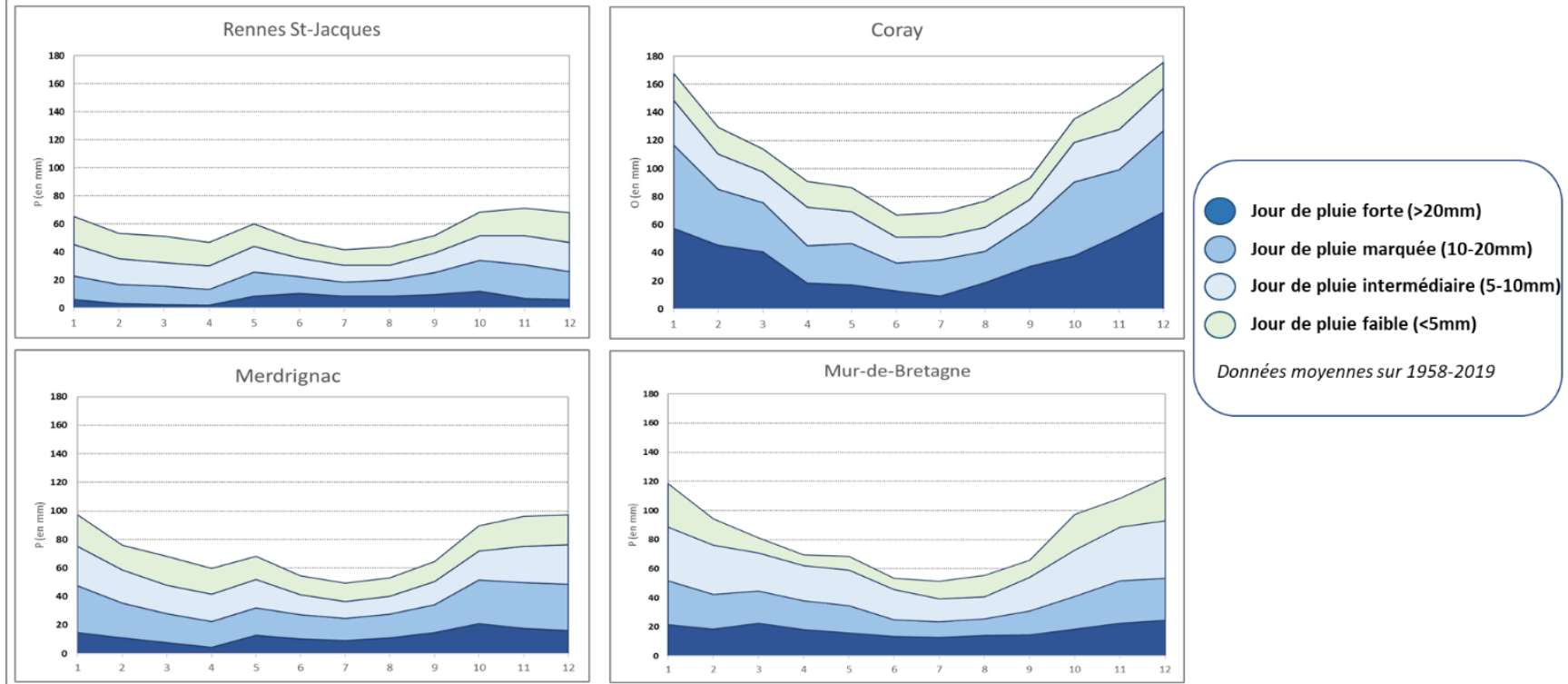


Figure 12 : Régime pluviométrique par intensité des pluies

3.1.5 Les cumuls de précipitation minimums et maximums

Observer les minimums et maximums permet de donner une idée de l'amplitude annuelle des précipitations. La *Figure 13* montre les cumuls minimums et maximums sur une année hydrologique pour toutes les stations d'ouest en est. Les cumuls annuels minimums varient de 700 à 400 mm, la date de cet événement est l'année 1976 ou 1989. Avec plutôt l'année 1976 comme minimum absolu pour les stations du Blavet et de l'Odét et 1989 pour les stations de la Rance et de la Seiche (cf. Annexe 7). Ces années de cumuls minimums correspondent aussi aux années de sécheresses intenses en Bretagne (Lamy, 2013). Les cumuls minimums sont relativement similaires comparés aux maximums qui varient de 1 000 à 2 100 mm, c'est pour l'année 2001 que ce cumul est atteint (sauf pour Dinard où c'est l'année de 1983).

L'amplitude entre le minimum et le maximum donne aussi une idée de la variabilité interannuelle du cumul. Avec plus de 1 500 mm d'écart entre le minimum et le maximum pour les stations de l'Odét, l'amplitude est globalement trois fois plus importante sur l'Odét que sur la Seiche.

Les cumuls maximums par mois sont tout aussi différents entre l'Ouest et l'Est. Le cumul mensuel maximum de Rennes est de 194 mm (en octobre 1966), soit quasiment autant qu'un mois de décembre moyen à Coray (176 mm en moyenne sur la période de référence). À Coray justement, le maximum mensuel est de 415 mm soit plus que le minimum annuel à Rennes (404 mm). Autrement dit, **sur l'ouest du Massif armoricain, il peut pleuvoir autant en un mois que sur une année sèche dans le bassin Rennais.**

Les cumuls maximums sur une journée sont similaires sur toute la Bretagne, entre 70 et 100 mm en un jour. Un des enseignements à tirer de cela est qu'il est possible d'avoir une très forte intensité de pluie en un jour sur toute la Bretagne. Le cumul maximum sur deux jours reste très proche du cumul sur un jour, c'est d'ailleurs dans une majorité de cas, le jour qui suit le maximum quotidien. Il est donc quasiment impossible que deux jours de très fortes pluies se suivent. En regardant le cumul sur cinq jours, c'est à peu près les mêmes conclusions qui peuvent être tirées à l'exception de Guiscriff et Coray où le maximum passe de 100 à 200 mm (cf. *Figure 14*).

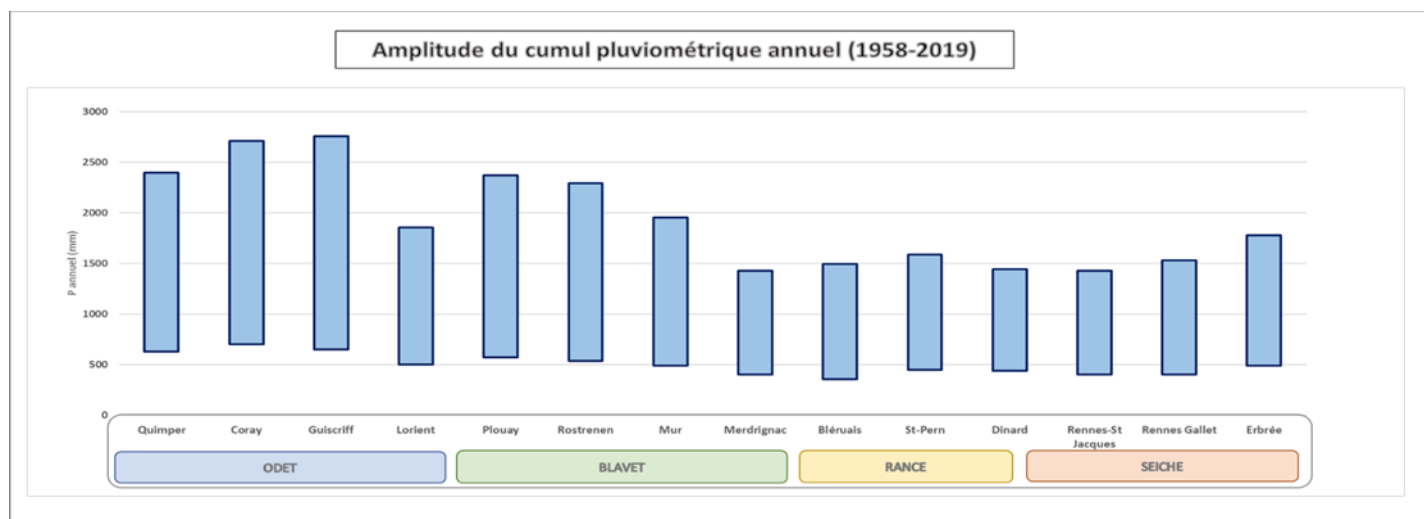


Figure 13 : Minimums et Maximums annuels

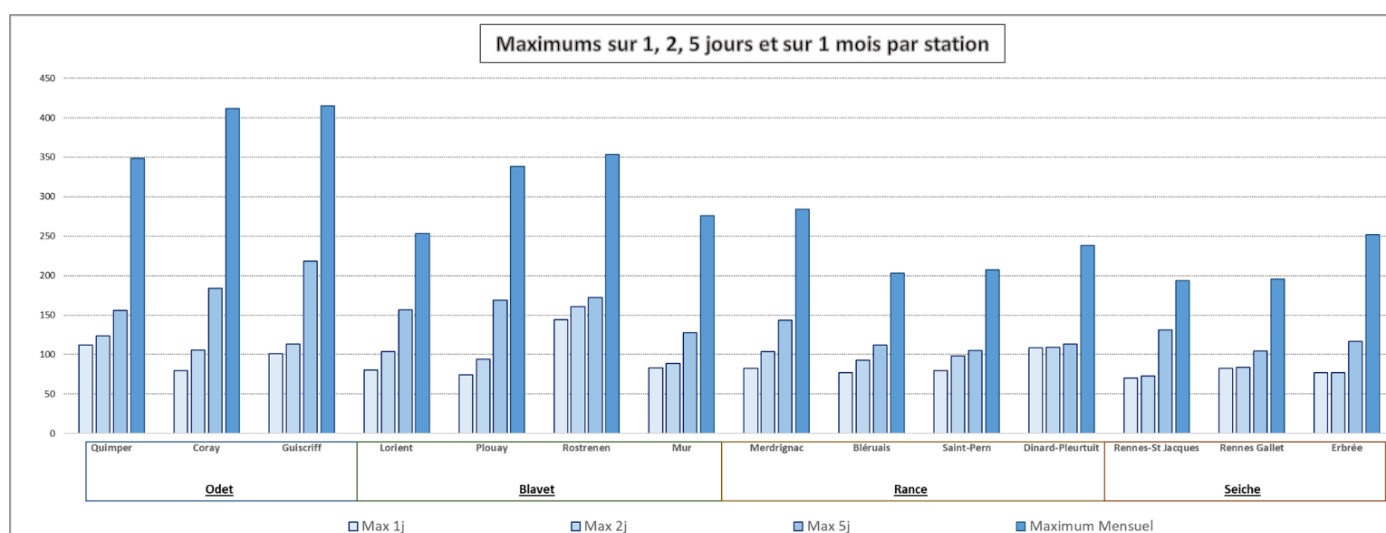


Figure 14 : Cumul de pluie maximum sur différentes périodes

En résumé, les bassins étudiés peuvent se diviser en deux : l'Ouest océanique avec les bassins versants de l'Odette et du Blavet, et l'Est continentale avec les bassins de la Rance et la Seiche. À l'Ouest, le régime pluviométrique est soutenu avec une différence entre la saison d'étiage et de recharge, une vingtaine de jours de pluies fortes (>10mm) en hiver apportent un quart du cumul annuel. À l'Est, le régime est moins soutenu et varie entre 50 et 80 mm par mois.

L'intensité des pluies joue un rôle important dans le façonnement du régime pluviométrique. Une dizaine de jours de pluie intense en Bretagne Ouest entraîne une nette différence en terme quantitatif. L'évolution des jours de pluie de forte intensité et son cumul est un paramètre à étudier.

Ces conclusions sur la faible importance des pluies faibles et l'apport essentiel des pluies intenses est connu, une étude de 1996 sur les précipitations intenses montrait déjà l'important apport de ces quelques jours de pluies fortes sur le régime pluviométrique. Avec notamment une opposition entre les stations littorales où les pluies fortes interviennent davantage en hiver et la Bretagne intérieure où les pluies fortes sont plutôt estivales (Dubreuil *et al.* 1996).

3.2 Les évolutions du climat sur les séries historiques en Bretagne

Les tendances s’observent sur le temps long, ici avec au moins 50 ans de données, les séries sont suffisamment longues pour identifier l’évolution des températures et des précipitations. Un changement climatique est déjà observable en Bretagne, des études sont déjà disponibles sur les effets du changement climatique dans l’Ouest (Merot *et al*, 2012). Les résultats présentés ici sont issus de l’analyse des séries de données sélectionnées (cf. 2.2) jusqu’en 2019.

3.2.1. Évolution des températures

Le changement climatique se traduit par une modification des températures minimales et maximales. Le rapport du GIEC indique un réchauffement de l’ordre de 0,8°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, les températures tendent à augmenter, l’écart entre les moyennes annuelles de 1961-1990 et 1991-2019 est globalement de + 0,9°C. L’augmentation est plus forte à Rennes avec un écart de +0,98°C, cette hausse est similaire à Dinard et Lorient. Cependant pour Quimper, le réchauffement est légèrement plus faible avec + 0,7°C. Mais depuis la décennie 1981-1990, le rythme de réchauffement s’accélère avec en moyenne +0,3°C par décennie sur les quatre stations (cf. Annexe 8), il s’agit du même rythme observé en moyenne en France (Leroy-Ladurié, 2009). Donc même s’il y a un réchauffement différencié parce que les rythmes passés sont différents, la vitesse d’augmentation des températures annuelles semble s’homogénéiser autour de 0,3°C par décennie. Le *Tableau 7* rend compte du réchauffement différentiel saisonnier entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019 pour les quatre stations. Le réchauffement concerne toutes les saisons de l’année. Il est cependant plus marqué en été et au printemps avec au moins + 1°C entre les deux moyennes. Les mois de mai et juin sont les mois où le réchauffement est le plus marqué avec +1,2°C tandis que septembre est le mois où le réchauffement est plus faible avec + 0,4°C à + 0,5°C.

Tableau 7 - Écart de température moyenne saisonnière entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019

	Quimper	Lorient	Dinard	Rennes	Moyenne
Hiver	0,62	0,83	0,86	0,85	0,79
Printemps	1,16	1,07	1,06	1,19	1,12
Été	0,53	0,92	1,01	1,10	0,89
Automne	0,58	0,70	0,71	0,76	0,69
ANNUEL	0,73	0,88	0,91	0,98	0,88

Le réchauffement concerne donc toute la Bretagne avec + 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 et minime en septembre.

3.2.2. Tendances pour les cumuls de précipitation observés en Bretagne

Les tendances s'observent sur différentes échelles temporelles. D'abord, il y a une convergence vers une augmentation des cumuls annuels de précipitations sur l'ensemble de la Bretagne. Cette augmentation est de l'ordre de 2 à 14 % selon la situation. Il ne semble pas y avoir de logique dans la répartition de cette augmentation. Elle est plus forte sur le bassin versant de l'Odet avec une hausse d'au moins 8% mais, le différentiel est plus marqué pour les autres bassins versants. Par exemple, sur la Rance, la hausse est marquée à Bléruais avec + 14 % contre + 2% à Dinard (*Figure 15*). Bléruais est située à la même latitude que Rennes à une cinquantaine de kilomètres à l'Ouest, les tendances sont pourtant plus atténuées sur la Seiche. En terme absolu, la hausse est de plus de 100 mm sur l'Odet soit l'équivalent d'un mois d'hiver en plus. La hausse est de l'ordre de 30 à 60 mm sur les autres stations, plus autour de 90 mm pour Bléruais et Plouay (Annexe 9).

La hausse à l'année n'est donc pas uniforme d'une station à l'autre en Bretagne, elle ne l'est pas non plus selon la saison. Les tendances saisonnières identifiées par la *Figure 16* indiquent une relative stabilité ou baisse des cumuls en hiver et printemps et une hausse marquée en été et en automne :

- En hiver, les cumuls augmentent de 5 % sur l'Odet puis sont stables sur le Blavet et la Rance. Ensuite, la tendance à la hausse reprend en allant vers l'Est. Il semble donc y avoir une logique géographique avec un renforcement des cumuls sur le Sud-Ouest breton et une stabilité sur la Bretagne centrale, tandis que la tendance à la hausse s'accroît vers l'Est-Bretagne en hiver.
- Au printemps, les tendances convergent vers une baisse du cumul saisonnier de près de 5 %. Il n'y a pas d'écart important outre Quimper. La tendance à la baisse concerne toute la Bretagne avec la même intensité.
- En été, les cumuls augmentent de 5 à 25 %. Il y a une importante différenciation régionale dans les tendances estivales : la hausse est moins marquée sur le littoral sud (seulement + 5 % de cumul à Quimper et Lorient), la hausse est aussi plus marquée sur les stations de l'Odet et Blavet Amont ainsi qu'à l'Est Bretagne.
- En automne, la hausse est de l'ordre de + 10 % avec une différenciation spatiale moins marquée que pour l'été.

L'été et l'automne sont donc les saisons sur lesquelles se concentre la tendance à la hausse du cumul pluviométrique. Les différences spatiales de cette hausse sont plus marquées durant ces deux saisons. Tandis que les cumuls printaniers tendent eux à diminuer de façon assez similaire sur tout le territoire breton (sauf à Quimper).

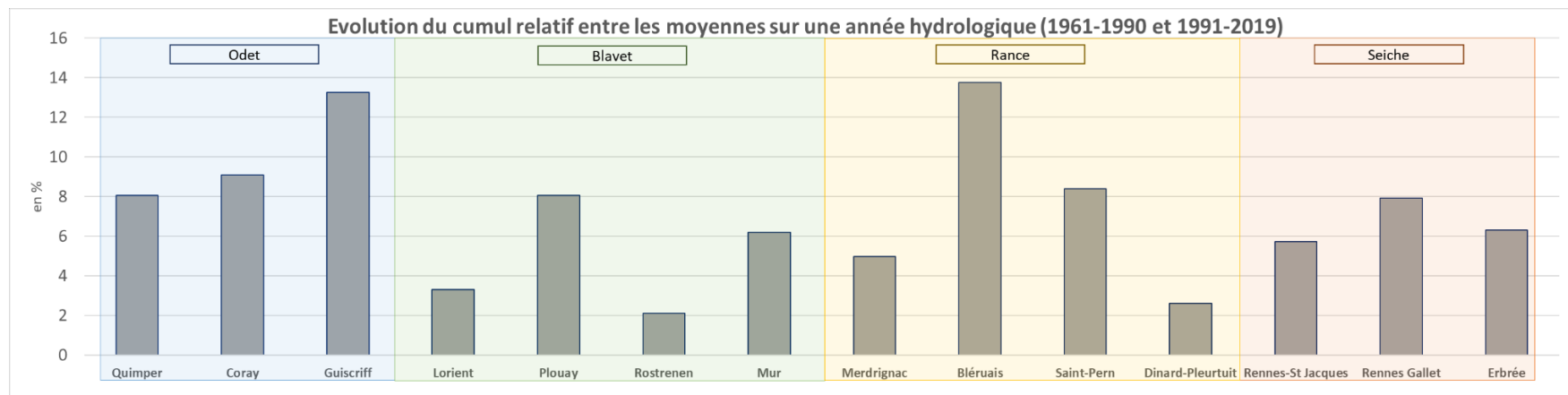


Figure 15 : écart relatif sur une année hydrologique

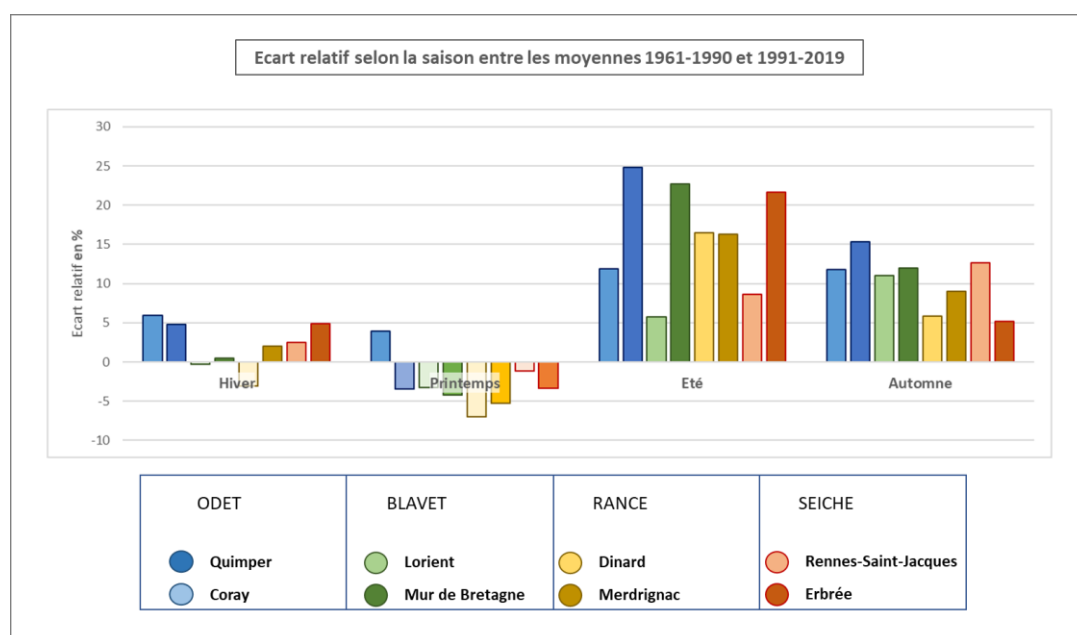


Figure 16 : écart relatif saisonnier

Les tendances sont ensuite étudiées par mois avec un regard croisé entre l'évolution des cumuls mensuels et l'évolution du nombre de jours de pluie mensuel (cf. *Figure 17* et *Figure 18*). L'évolution des cumuls est plus marquée sur les stations où le cumul est déjà important. À Coray, les tendances mensuelles vont de - 29 à + 35 mm alors qu'à Rennes elles vont de - 10 à + 10 mm. La hausse des cumuls est concentrée sur les mois d'été et d'automne ainsi qu'en avril. La hausse est la plus marquée durant le mois de novembre où les cumuls ont augmenté de 10 à 30 %. Les tendances mensuelles montrent une baisse des cumuls en mars et mai. La baisse de cumul printanier n'est donc pas uniforme au sein de la saison. Il est nécessaire de faire le parallèle avec le nombre de jours de pluie pour comprendre si cette hausse globale des précipitations est due (la hausse) à une hausse du nombre de jours de pluie⁴ ou à une intensification des pluies.

Le nombre de jours de pluie tend à augmenter sur l'ensemble des stations avec une dizaine de jours secs en moins sauf à Quimper (- 4), Dinard (- 0,3) et Rennes (- 1,2) (Annexe 4). L'évolution mensuelle de ces jours de pluie suit celle des cumuls, lorsque le nombre de jours de pluie augmente, le cumul augmente aussi. Le nombre de jours de pluie augmente principalement en juillet avec un à deux jours de plus par rapport à la période 1961-1990, et en octobre-novembre, ces mêmes mois sont concernés par une hausse des cumuls. Les mois de mars et mai qui ont une tendance à la baisse du cumul tendent à s'assécher avec un à deux jours de pluie de moins.

Cependant, l'évolution des jours de pluie est certes dans le même sens que les cumuls, néanmoins ce n'est pas nécessairement proportionnel. Par exemple, en comparant l'évolution du cumul et du nombre de jours de pluie en juillet-août, il apparaît des différences non négligeables : à Mur-de-Bretagne, il y a environ deux jours de pluie en plus en juillet et un jour en août pour une hausse de cumul similaire autour de + 12 mm pour les deux mois. Cette situation traduit une intensification des pluies qui se manifeste par une hausse plus rapide des jours de fortes pluies par rapport aux jours de pluie faibles. Ainsi, la hausse de deux jours de pluie en juillet à Mur-de-Bretagne correspond quasi exclusivement à des jours de pluie faibles tandis que la hausse d'un jour de pluie en août est répartie entre les pluies fortes et faibles (cf. Annexe 10.2). La modification du nombre de jours de fortes pluies entraîne donc une modification plus importante du cumul. **L'intensification des pluies est observable sur les données annuelles pour les stations de l'Odéa, à Rostrenen ainsi qu'à Rennes.** Pour les autres stations, la hausse des jours de pluie faibles est plus rapide que celle des jours de pluies fortes (au seuil de 10 mm, cf. Annexe 4), il n'y a donc pas d'intensification des pluies. L'intensification des pluies intervient plutôt en été et en automne avec, par exemple, à Rennes une tendance à la hausse de 0,6 jour de fortes pluies (>10 mm) contre une tendance nulle pour les faibles pluies (1-10 mm). Sur la Seiche et la Rance, l'intensification des pluies est aussi observée en mars malgré une baisse du cumul mensuel. L'intensification des pluies ne signifie donc pas nécessairement une augmentation du cumul mensuel. Elle correspond par contre à une augmentation du risque d'inondation.

La tendance est donc à la hausse des cumuls de pluies sur toute la Bretagne. La hausse n'est pas égale partout. Elle varie de + 2 % à + 14 % du cumul annuel. Cette évolution n'est pas non plus la même selon les saisons. La hausse est concentrée en été et en automne avec notamment une importante hausse du cumul de novembre. Elle s'accompagne d'une intensification des pluies qui intervient principalement sur ces mêmes saisons. Cette intensification des pluies peut entraîner une augmentation du risque d'inondation, même si celui-ci est concentré en hiver.

⁴ Les jours de pluies correspondent aux jours où le cumul quotidien est supérieur à 1 mm

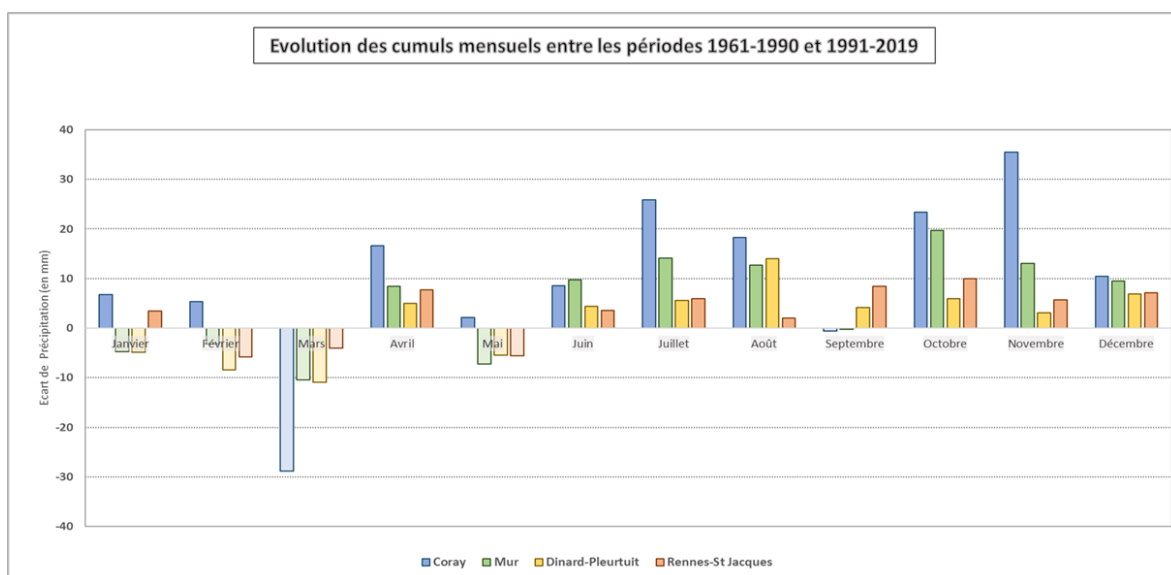


Figure 17 : Évolution des cumuls mensuels de pluie entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019

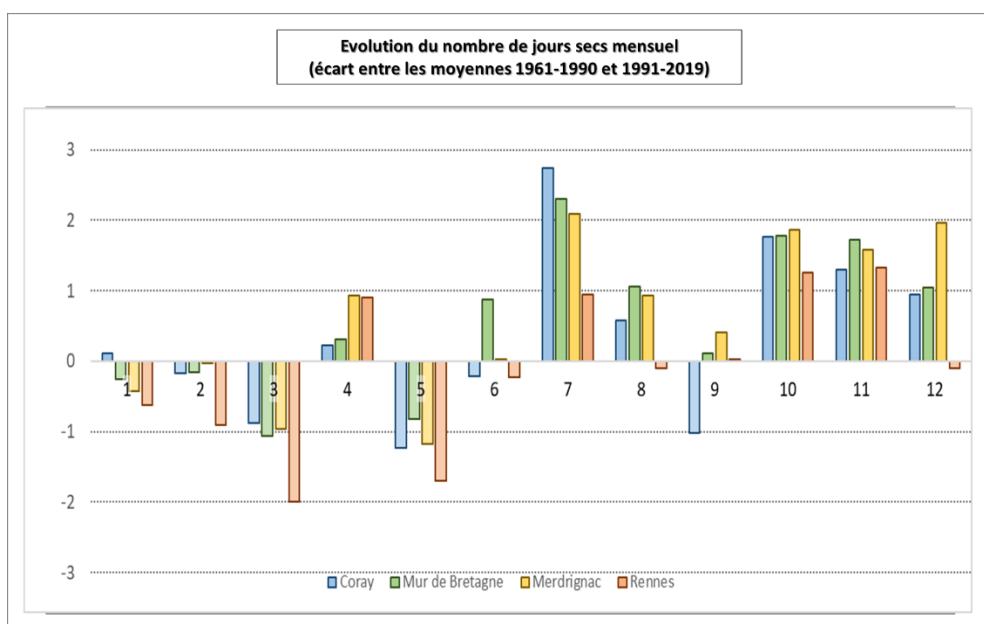


Figure 18 : Évolution du nombre de jours secs entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019

3.2.1. Évolution de la pluviométrie sur la plus longue série : Mur de Bretagne

Mur de Bretagne est la station ayant la plus longue série de données parmi les 14 stations. Les données commencent au 1^{er} janvier 1932, ce qui donne une première idée des tendances concernant l'évolution des précipitations. C'est aussi une longue série dont les données n'avaient jamais été exploitées. D'après ce qui a été mentionné précédemment (cf. 3.1), la station de Mur de Bretagne est dans une situation intermédiaire entre les stations hyper-humides de l'Ouest et les stations du bassin Rennais. Une situation intermédiaire qui permet une bonne approche de la tendance moyenne observée depuis 1932. Sur la *Figure 19*, les moyennes décennales expriment une fluctuation importante des cumuls annuels et une tendance à la hausse des précipitations. Les cumuls à Mur de Bretagne sont de l'ordre de 800 à 900 mm dans les années 1930 contre près de 1 000 mm aujourd'hui. Une hausse de plus de 100 mm qui n'est pas linéaire mais semble intervenir par paliers. Jusqu'à la décennie 1981-1990, les cumuls décennaux sont inférieurs à la moyenne sur la période de référence de 20 à 160 mm. Puis à partir de la décennie 81-90, les cumuls sont toujours supérieurs à la moyenne. La décennie 1941-1950 est la moins arrosée de la série de données avec un cumul inférieur de plus de 160 mm par rapport à la période de référence (1958-2019). Les années 1940 sont en effet réputées comme étant marquées par une série de sécheresse sur l'ensemble du pays (Sanson et Pardé, 1950). La sécheresse de 1949 est d'ailleurs une des sécheresses historiques majeures de ce XX^{ème} siècle en Bretagne (Fouchardière, 1949). Cette décennie très sèche a donc engendré une série de sécheresse mémorable.

Le cumul sur une année hydrologique est marqué par une variabilité interannuelle, c'est-à-dire une variation du cumul d'une année à l'autre. Elle est de l'ordre de 100 à 200 mm d'une année à l'autre. Ce cumul annuel tend à augmenter comme pour les tendances décennales. Le regard sur les cumuls annuels proposés sur la *Figure 20* permet d'identifier rapidement les années les plus et les moins arrosées. **Ainsi les années les moins arrosées à Mur de Bretagne sont : 1934 ; 1938 ; 1944-1945 ; 1949 ; 1959 ; 1976 ; 1989 ; 1996 et 2003. Les années les plus arrosées sont : 1936 ; 1951 ; 1960 ; 2001 et 2014.**

La décomposition par type de pluie indique les tendances selon l'intensité des pluies. Pour rappel, les pluies faibles correspondent aux jours où le cumul est inférieur à 5 mm et les pluies fortes correspondent ici à la somme des cumuls quotidiens où le cumul est supérieur à 20 mm. Les cumuls issus des jours de pluie faible sont moins soumis à une variabilité interannuelle. Ils varient seulement de 10 à 50 mm d'une année à l'autre. Ce cumul a toutefois augmenté de 50 mm entre 1932 et aujourd'hui en passant de 180 mm à 230 mm. La tendance est assez linéaire comparé à celle des jours de fortes pluies. Les cumuls des fortes pluies ($P > 20$ mm) subissent une grande variabilité interannuelle : jusqu'à 300 mm en plus ou en moins d'une année à l'autre. Il faut mettre cela en parallèle avec le faible nombre de jours que cela représente. Un jour de forte pluie supplémentaire ou en moins aura un impact plus fort qu'un jour de faible pluie. Les cumuls des fortes pluies ne suivent pas nécessairement la même tendance que les cumuls des pluies faibles : des pics de pluie forte peuvent intervenir là où le cumul des pluies faibles est minimum. Il n'y a donc pas de lien entre les jours de pluies fortes et les jours de pluie faibles.

Par ailleurs, la variation du cumul des fortes pluies correspond à celle du cumul global. Cela confirme l'importance de ces fortes pluies dans le cumul identifié dans la partie 3.1. Le cumul des fortes pluies tend lui aussi à augmenter, pas de façon linéaire mais suivant la variabilité interannuelle. Les cumuls des fortes pluies ne dépassaient pas les 300 mm avant l'année 1988. Après cette date, le cap est dépassé sept fois et atteint même 450 mm de cumul de forte pluie. Ces pics entraînent le cumul global annuel à la hausse. Les cumuls sont de l'ordre de 1 200 mm lors de fort cumul de forte pluie.

Les données de Mur-de-Bretagne ont permis de dégager la tendance sur les 87 dernières années. Les cumuls annuels tendent à augmenter surtout portés par la hausse du cumul des fortes pluies. Les quelques jours de fortes pluies apparaissent donc comme un élément majeur aussi bien dans la différenciation spatiale des régimes pluviométriques que dans l'évolution temporelle de ceux-ci.

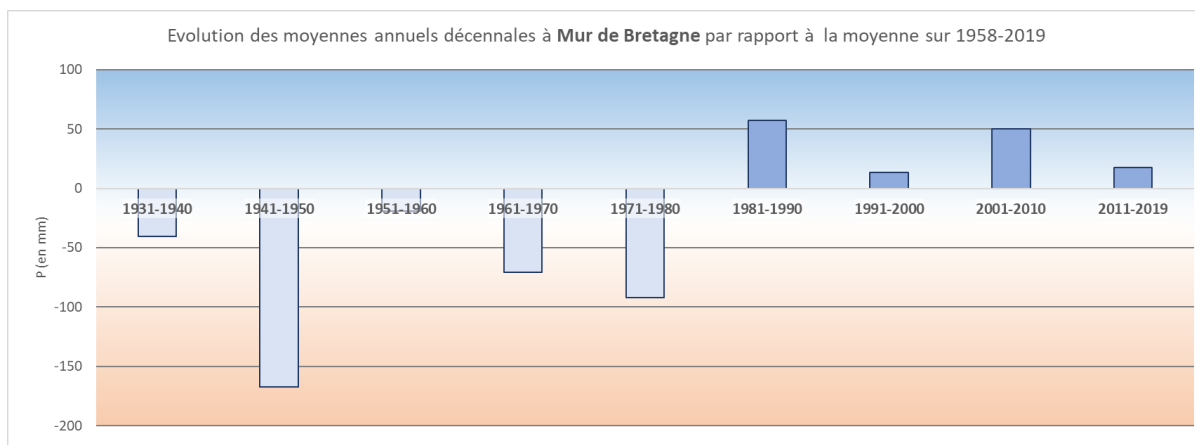


Figure 19 : Tendances décennales à Mur-de-Bretagne par rapport à la période de référence

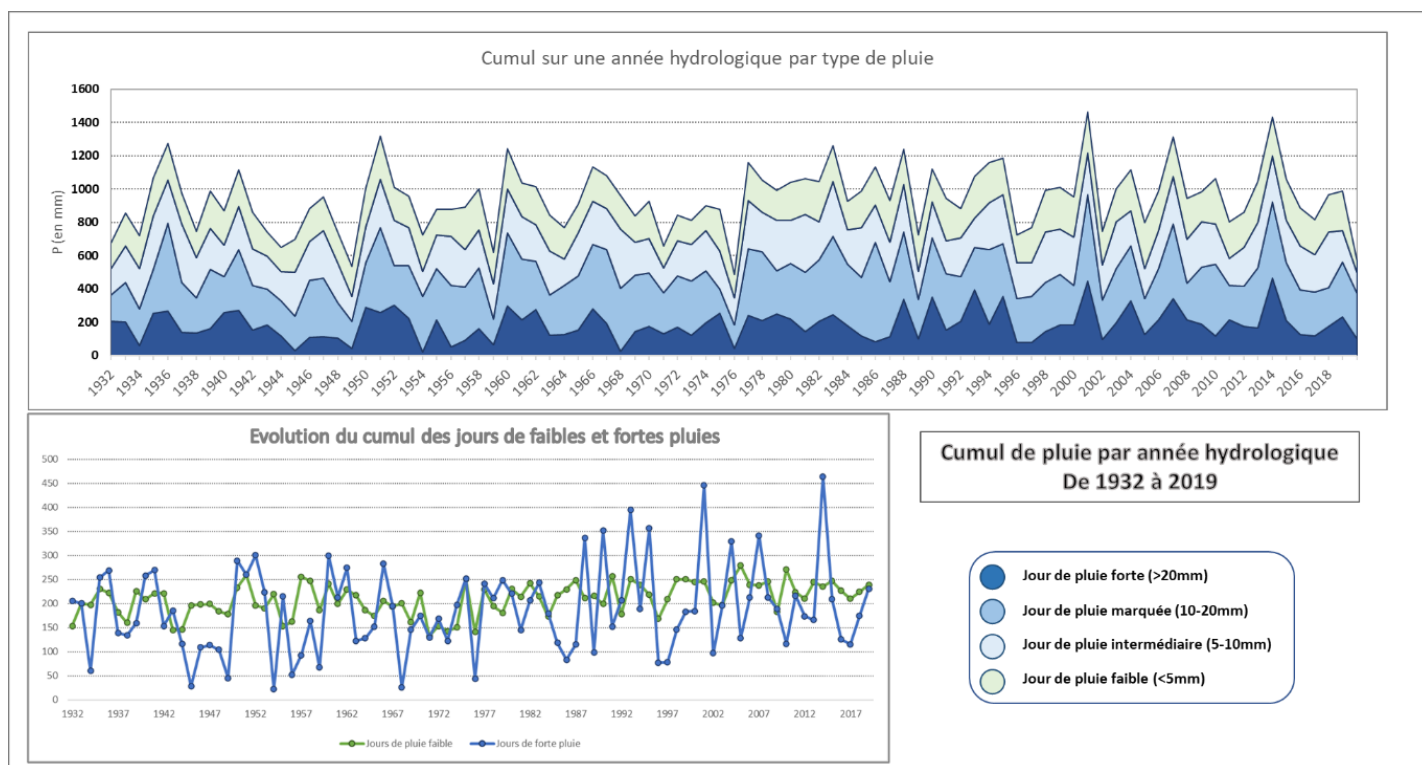


Figure 20 : Évolution du cumul annuel à Mur-de-Bretagne

3.3. Le risque de sécheresse et d'inondation en Bretagne

Il est possible d'identifier les périodes à risque et leurs évolutions de plusieurs manières. Le risque peut d'abord être vu comme un extrême et donc étudié par une approche probabiliste. Il devient alors quantifiable au-delà d'un certain seuil. Le risque peut aussi être approché par des indices climatiques, par exemple le Standardized Precipitation Index (SPI) qui a été testé pour l'ensemble des stations. Enfin pour le risque d'inondation, il est possible d'approcher ce risque en étudiant la situation sur une année très arrosée. Les seuils des années humides peuvent ensuite être transférés et comparés aux données modélisées. Le risque de sécheresse peut être approché par le bilan hydrique qui sera défini ici.

3.3.1. Le régime probable comme approche des extrêmes

Un événement extrême est par définition un événement qui se produit rarement. Ces événements extrêmes peuvent être décrits statistiquement par une approche probabiliste. L'approche probabiliste est notamment utilisée pour définir la fréquence et le temps de retour des crues (Lang et Lavarde, 2007 ; Marty, 2010). Donc elle est plutôt utilisée pour définir le risque d'inondation sur un territoire.

Le régime probable permet d'avoir des informations sur les extrêmes inférieurs et supérieurs. Les déciles et quintiles inférieurs et supérieurs délimitent les maximums et minimums mensuels. Si une série statistique est ordonnée, les déciles sont les valeurs qui partagent la distribution de la série en dix parts égales (INSEE, 2016). Le quintile est la séparation d'une série statistique ordonnée en cinq parts égales. Le décile inférieur correspond ainsi aux 10 % des valeurs les plus faibles de la série, le quintile inférieur correspond aux 20 % des valeurs les plus faibles et inversement pour les quintiles et déciles supérieurs. Pour le régime probable, le décile inférieur correspond donc aux 10 % des mois les plus secs et le décile supérieur aux 10% des mois les plus humides. Pour le quintile inférieur et supérieur, ce sont les 20 % des mois les plus ou moins arrosés. Cette probabilité donne aussi une notion du temps de retour de l'événement. Les cumuls des déciles supérieurs sont par exemple dépassés une fois tous les dix ans, tandis que ceux des quintiles supérieurs sont dépassés une fois tous les cinq ans. L'écart entre les quintiles, déciles et la médiane donne une idée de la variabilité interannuelle de chaque cumul mensuel puisque 60 % des cumuls sont situés entre le quintile inférieur et supérieur et 80 % entre le décile inférieur et supérieur.

La *Figure 21* montre le régime probable mensuel pour une station par bassin versant, l'ensemble des données détaillées sont aussi disponibles en annexe (cf. Annexe 11). Globalement, sur les quatre stations, les quintiles et déciles inférieurs sont assez lisses. Le décile inférieur ne dépasse guère les 50 mm au maximum. L'écart est beaucoup plus réduit sur les stations de la Rance et de la Seiche. Cela indique que dans l'Est Bretagne, les mois les moins arrosés ont des cumuls relativement similaires au cours de l'année, la notion de « mois sec » est donc la même toute l'année. Ce n'est pas le cas sur le Blavet et l'Odet, en effet, les mois secs hivernaux ont un cumul inférieur à 60 mm en hiver contre 30 mm en été. Les différences de régime pluviométrique entre les bassins versants se retrouvent à travers les médianes, les quintiles et les déciles maximums.

Le régime probable est plutôt lisse et resserré sur le bassin versant de la Seiche et de la Rance avec une amplitude maximum entre déciles en novembre avec environ 100 mm. La variabilité interannuelle est donc de moins de 100 mm dans 80% des cas sur ces bassins versants. Les mois dépassant le seuil du décile supérieur sont tous au-delà de 100 mm. Les quintiles et déciles supérieurs sont similaires en été, c'est en hiver que la différence entre les stations se crée. À Mur et encore plus à Guiscriff le régime probable est moins resserré, particulièrement en hiver où les déciles supérieurs atteignent 200, 250 voire 300 mm. Un mois de décembre extrêmement arrosé sur Guiscriff a un cumul deux fois plus important qu'à Dinard ou Erbrée. Sur le Blavet et l'Odet, les cumuls maximums peuvent être deux à trois fois plus importants que ceux de l'été tandis qu'ils sont quasiment similaires

tout au long de l'année sur la Rance et la Seiche. La notion de risque d'inondation ne concerne donc pas le territoire de manière uniforme ou du moins, cela ne correspond pas aux mêmes quantités.

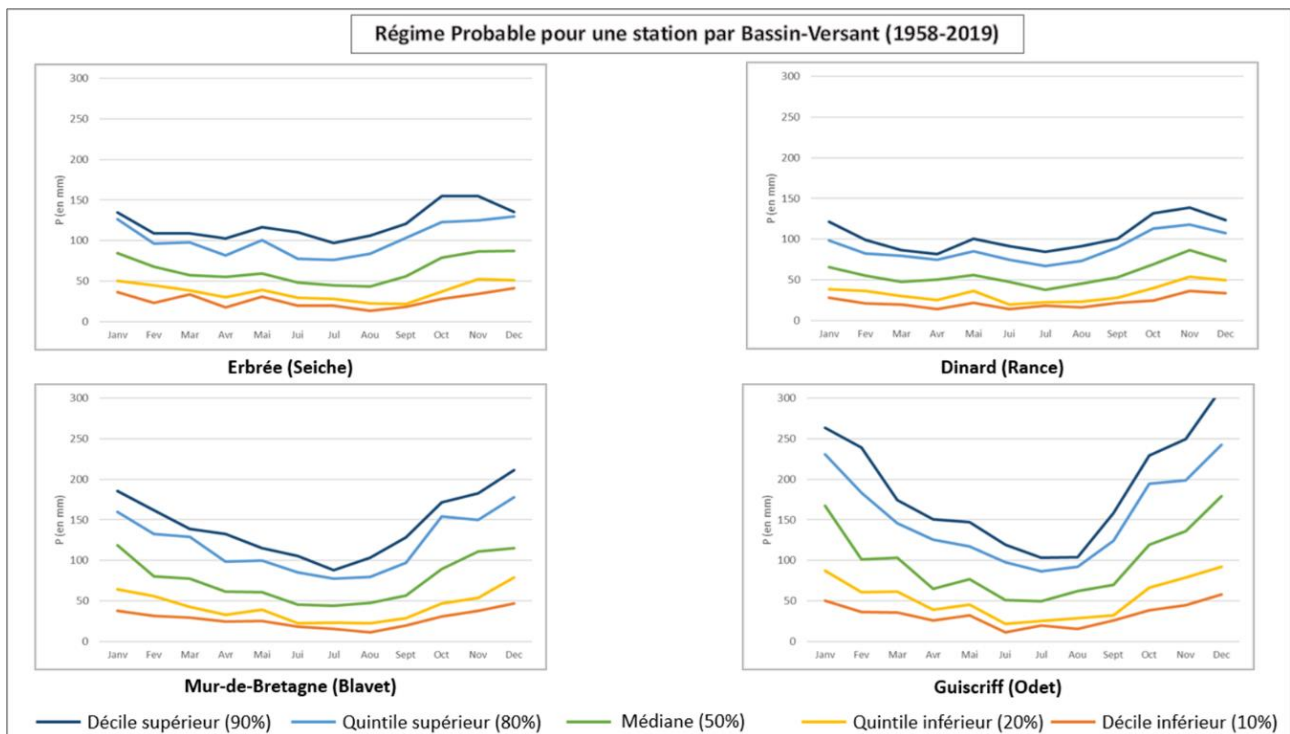


Figure 21 : Régime probable pour 4 stations sur la période de référence

Le régime probable quantifie les cumuls de mois extrêmes humides ou secs. Il montre une différence spatiale et temporelle des extrêmes humides. Globalement les mois extrêmes sont plus élevés en hiver, c'est encore plus vrai vers l'ouest où la limite du décile supérieure est plus de deux fois supérieure en hiver par rapport à l'été sur l'Odet.

3.3.2. 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 (EDO, 2020). 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 :

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

où :

- P Précipitation totale d'une période (mm)
- P_m Précipitation moyenne historique de la période (mm)
- σ Écart-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 8* 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 États-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.

*Tableau 8 - Probabilité d'occurrence des sécheresses selon le SPI (d'après McKee *et al*, 1993 ; OMM, 2012 p.5)*

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 -1,5 à -1,99	Grande sécheresse	5	1 fois tous les 20 ans
< -2,0	Sécheresse extrême	2	1 fois tous les 50 ans

La *Figure 22* permet d'étudier l'évolution du SPI avec une station par bassin versant. Des grandes sécheresses sont plus fréquemment observées à Erbrée et plus rares sur les autres stations. Des sécheresses extrêmes sont observées : en 1976 à Coray lors de la saison d'été et en 1989 à Dinard pendant la saison d'été aussi. Les sécheresses de 1976 et 1989 sont bien visibles avec les deux saisons hydrologiques considérées comme sèches ou très sèches. Le cumul est équivalent sur toutes les stations en 1976 lors de la saison d'été avec environ 200 mm, pourtant cette même période est considérée comme sèche ou très sèche sur les autres stations. À noter, le mois de septembre 1976 qui marque la fin de la sécheresse apporte la moitié de ce cumul saisonnier, le regard saisonnier peut donc être biaisé par la présence d'un mois très humide ou très sec.

Le SPI indique aussi une décennie très humide à Rostrenen particulièrement en 1994 et 1995 où les saisons humides et très humides se suivent et ne se retrouvent pas dans les stations des autres bassins versants. Le SPI ne semble pas présenter une hausse du risque de sécheresse. Le nombre de périodes sèches tendrait même à diminuer et les périodes humides à augmenter, particulièrement depuis les années 1980.

Le SPI mensuel de Mur-de-Bretagne montre la même tendance. Ce suivi est partagé en deux périodes : avant 1976, les mois secs sont plus présents, particulièrement lors de la décennie 1940 ; et après 1976, le nombre de mois secs diminue et il n'y a pas une année sans un mois humide ou très humide. La tendance concerne tous les mois de l'année même mars et mai dont le cumul tend pourtant à diminuer.

D'après le SPI, il y a une baisse du nombre de périodes sèches et une augmentation des périodes humides. Le risque d'inondation tendrait donc à augmenter et le risque de sécheresse tendrait à diminuer.

Cependant cette tendance d'une diminution de la sécheresse ne correspond pas aux résultats des études récentes ni aux ressentis des gestionnaires de la ressource en eau sur ces dernières années. Une revue de presse effectuée via Europresse montre que le risque de sécheresse est très présent ces dernières années en Bretagne : le 13 juin 2020, l'hebdomadaire 20 minutes titrait « pourquoi la Bretagne ne doit pas se croire à l'abri des sécheresses » ; en 2017, un article du journal La Provence indiquait « la Bretagne inquiète de la sécheresse » ; en 2016, deux articles relatent la sécheresse du barrage d'Arzal et du lac de Dresne ; en 2015, pour Le Télégramme « Sécheresse. L'eau sous surveillance. » ou encore en 2010 pour Le Monde, « L'inquiétante sécheresse des Monts D'Arrées ». Ces quelques exemples montrent que le risque de sécheresse ne semble pas diminuer c'est ce qui ressort aussi de récentes études à ce sujet (Lamy 2013, Soubeyroux *et al*, 2011 ; Dubreuil *et al*, 2018). Le SPI semble donc faussé par son approche des périodes de sécheresse uniquement portée sur le cumul de pluie. Il permet par contre de synthétiser les tendances d'évolution des cumuls de pluies.

Cet indice permet donc d'identifier visuellement des périodes sèches ou humides. Il est possible de faire un lien entre les périodes très humides et le risque d'inondation. Mais il ne semble pas adapté pour un suivi du risque de sécheresse.

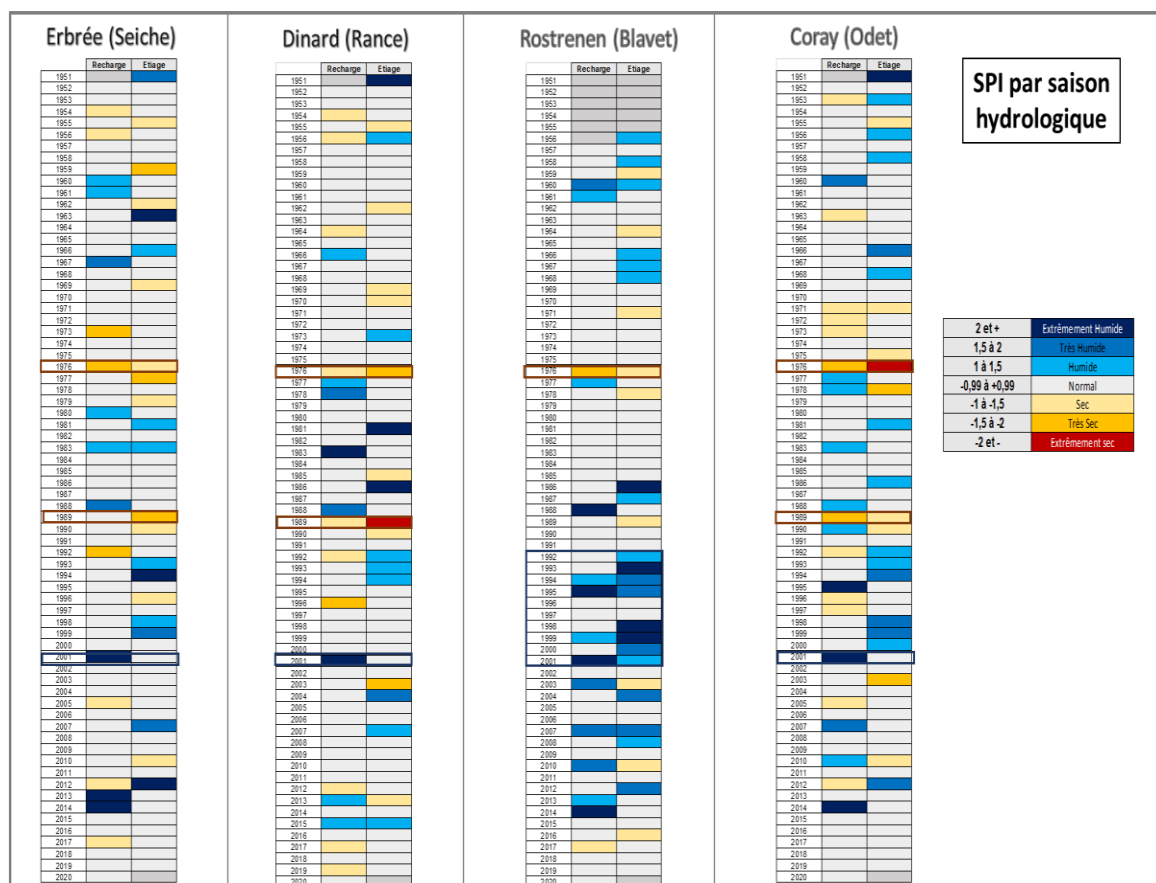


Figure 22 : Le Standardized Precipitation Index sur quatre stations

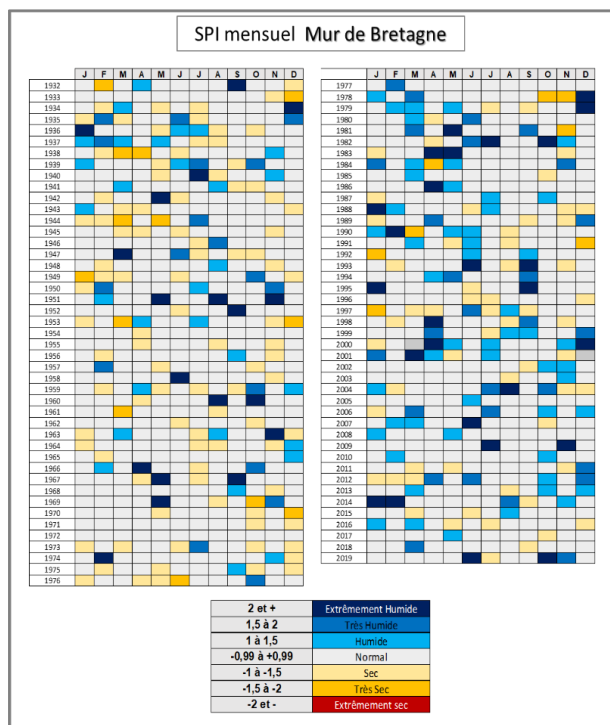


Figure 23 : SPI mensuel à Mur de Bretagne

3.3.3. Approche des inondations par les maximums

Une période d'inondation est issue de précipitations longues et/ou intenses. Les années les plus arrosées sont souvent marquées par des inondations, bien sûr les caractéristiques du sol jouent aussi un rôle important dans ces inondations. L'étude d'une année très humide permet de quantifier et qualifier les caractéristiques pluviométriques qui mènent à des cumuls importants et des inondations.

L'année 2001 est la plus arrosée sur toutes les stations de Bretagne, sauf Dinard avec un hiver 2000-2001 très arrosée qui a entraîné de nombreuses inondations (cf. 1.3.1). L'année hydrologique 2001 est marquée par des cumuls supérieurs de 300 à 700 mm par rapport à la moyenne 1958-2019. Cette année-là, le cumul dépasse 1 000 mm sur toute la Bretagne, il atteint même 2 000 mm sur les stations du Massif armoricain. La disparité régionale pluviométrique s'observe toujours, les cumuls sont toujours globalement deux fois plus élevés sur l'Odet que sur la Seiche (cf. *Figure 24*). L'écart par rapport au cumul de la période de référence est autour de + 50 %. Ce fort cumul s'accompagne de plus de jours de pluie. Il y a eu, en 2001, entre 30 et 40 jours de pluie de plus par rapport à la période de référence. Il s'agit de jours de pluie de plus de 10 mm principalement. Ainsi sur toutes les stations il y a eu au moins 35 jours dans l'année 2001 où le cumul a dépassé les 10 mm. Il y a même une vingtaine de jours de pluie dont le cumul dépasse 20 mm sur l'Odet et près d'une dizaine sur la Seiche. L'importance de ces fortes pluies a déjà été démontrée précédemment, ces fortes pluies contribuent en grande partie au cumul total.

Le cumul par saison hydrologique montre un apport deux à trois fois plus important lors de la saison de recharge par rapport à la saison d'étiage. L'apport de la saison d'étiage correspond à 20 à 30 % du cumul annuel. Les cumuls sur la seule saison de recharge sont supérieurs de 100 à 200 mm au cumul annuel moyen par station. L'importance du cumul des fortes pluies est encore démontrée sur la *Figure 25* : 900 mm apportés par les fortes pluies en saison de recharge à Guiscriff en moins d'une trentaine de jours, 500 mm en 16 jours à Rostrenen et près de 200 mm à Erbrée pour 9 jours. Entre novembre 2000 et mars 2001, il y a eu cinq épisodes de crue majeurs ce qui correspond à la saison de recharge (Huet *et al*, 2001). La concentration des pluies intenses en saison de recharge a entraîné cette situation.

Sur la *Figure 26*, le suivi mensuel du cumul montre clairement une concentration des cumuls en décembre et janvier. À Coray, le cumul mensuel dépasse les 200 mm d'octobre à janvier ainsi qu'en mars. Sur la même période, le cumul mensuel est supérieur à 100 mm à Rennes. La différence entre les deux saisons hydrologiques apparaît clairement même si, en saison d'étiage, le cumul mensuel reste inférieur à 100 mm (sauf en juillet à Coray).

L'année 2001 est marquée par une concentration importante de pluies de forte intensité sur la saison de recharge. Cela apporte un cumul supérieur au cumul annuel moyen. L'évolution future du nombre de jours de pluie forte est donc un paramètre sensible à étudier sur les données futures notamment en hiver pour estimer l'évolution du risque d'inondation. Les données passées montrent déjà une intensification des pluies en Bretagne avec plus de fortes pluies en été et en automne ce qui n'impacte pour l'instant pas le risque d'inondation qui est concentré en hiver en Bretagne (Dupont *et al*, 2012).

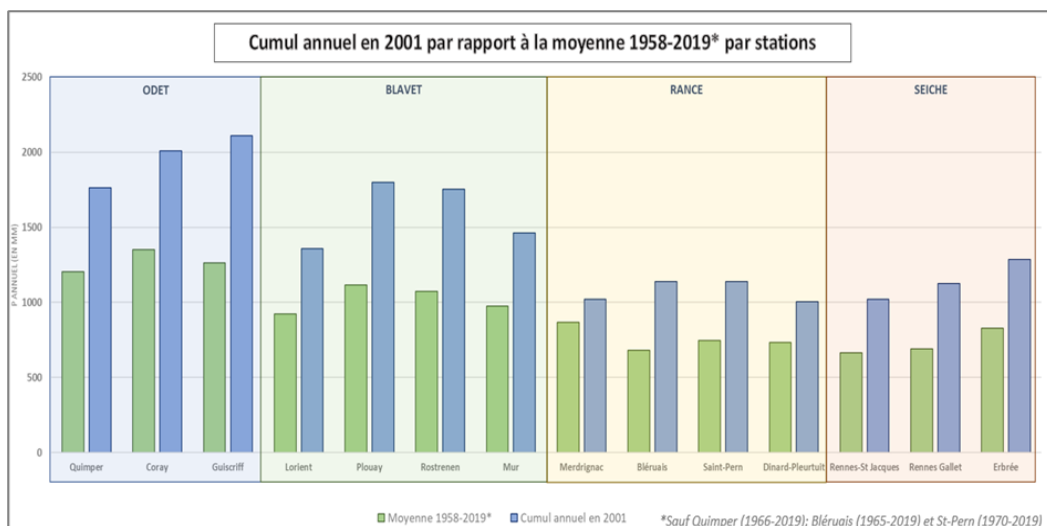


Figure 24 : Cumul sur l'année hydrologique 2001 par rapport à la période de référence

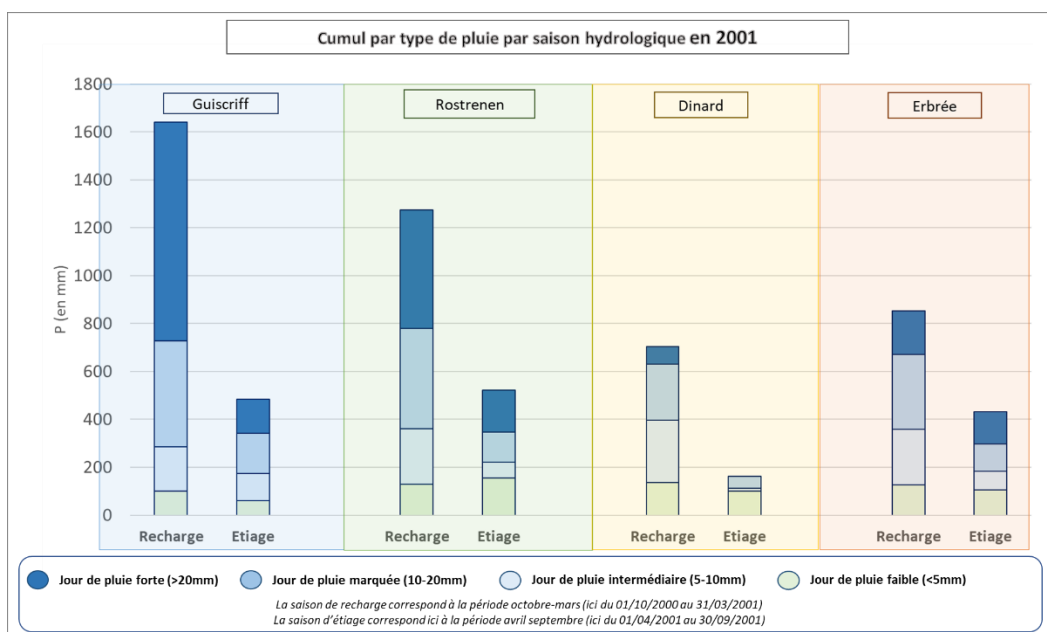


Figure 25 : Cumul selon le type de pluie par saison hydrologique en 2001

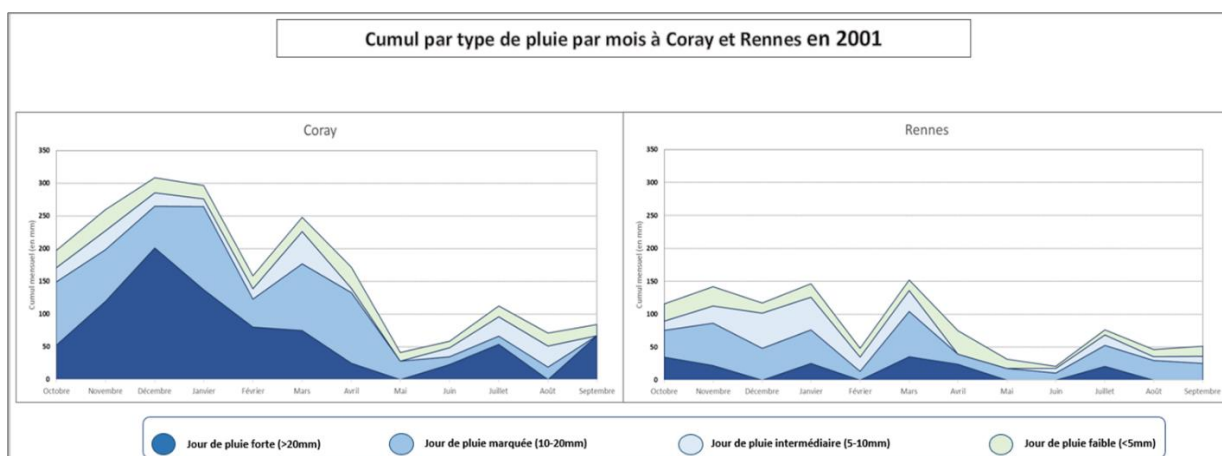


Figure 26 : Cumul mensuel par type de pluie à Coray et Rennes en 2001

3.3.4. Le bilan hydrique comme indicateur de sécheresse

L'étude du risque de sécheresse est essentielle pour la gestion quantitative de la ressource en eau notamment en période d'été. Le SPI, qui est théoriquement un indice de sécheresse, ne permet pas une bonne approche de celle-ci en Bretagne. Outre le SPI, il existe une multitude d'indicateurs permettant une approche de la sécheresse par des indicateurs météorologiques, pédologiques hydrologiques ou encore par télédétection (OMM, 2016). Une des difficultés est de quantifier le phénomène pour pouvoir donner une idée de la sévérité ou non de celle-ci. Mais la sécheresse n'est pas un élément mesurable, son intensité peut être approchée par le SPI.

L'une des premières approches a été la méthode de Gaussen : une période sèche est définie comme une période où les précipitations sont inférieures à deux fois la température moyenne du mois (Bagnouls et Gaussen, 1957). Avec cette approche, il est possible de faire des diagrammes ombrothermiques qui donnent une indication sur le mois où intervient cette sécheresse. Cette première approche montre qu'il n'y a en moyenne pas de mois sec en Bretagne. Il y a toutefois une nette différence entre Rennes et Quimper : à Rennes la courbe des températures est relativement proche des précipitations en juillet et août, c'est-à-dire qu'elle peut presque être considérée comme une période sèche. Au contraire à Quimper, les courbes sont relativement éloignées. L'approche par les diagrammes ombrothermiques montre que le risque de sécheresse est donc plus important à Rennes qu'à Quimper (cf. *Figure 27*). Tous les diagrammes ombrothermiques sont disponibles en Annexe 13.

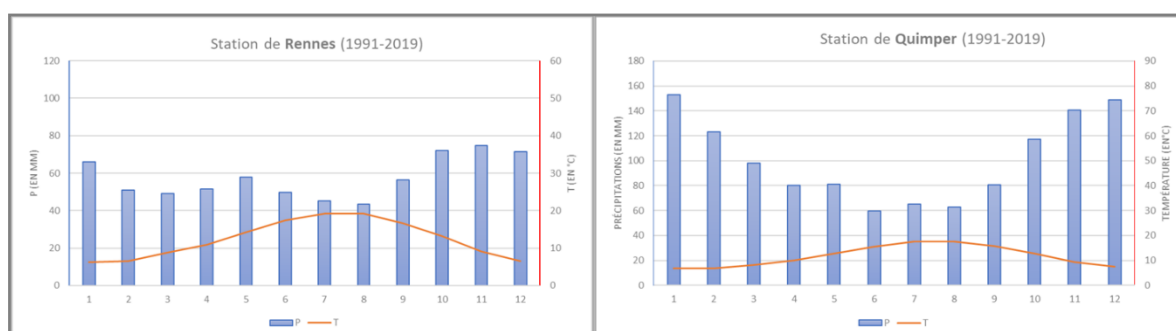


Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques à Rennes et Quimper

Pour une approche plus poussée de la sécheresse, il est recommandé d'utiliser le bilan hydrique. Le bilan hydrique quantifie le manque d'eau en fonction des arrivées d'eau, des besoins en eau et de l'état de la réserve utile du sol. Il s'obtient par un suivi des précipitations en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Avant de montrer les résultats, il est important de bien définir chaque terme et noter qu'il s'agit d'une approche théorique.

L'évapotranspiration potentielle de Météo-France est la quantité maximale de transpiration en eau d'un gazon coupé ras, il permet de caractériser les besoins en eau du sol. L'ETP Météo-France est bornée à 7 mm par jour, ce qui correspond à la quantité maximale que la végétation peut transpirer. Ce n'est pas un paramètre mesurable mais il est possible de l'approcher par un calcul. Il existe trois principales méthodes de calculs d'ETP : la formule de Thornthwaite, la formule de Turc et la formule de Penman. La méthode de calcul recommandée par la FAO est la formule de Penman-Monteith. Météo France utilise une adaptation de cette formule de Penman-Monteith (Ducharne, 2002). Ci-contre, le détail de la méthode de calcul est présenté. L'ETP Météo-France prend en compte les mesures de vent, de rayonnement, de températures ainsi que l'humidité de l'air. Ces paramètres permettent d'estimer les besoins en eau du sol.

Donc l'ETP Météo-France permet une approche des besoins en eau d'un gazon coupé ras. Le bilan hydrique qui combine ETP et précipitations correspond ici au bilan hydrique d'un gazon.

DÉTAIL MÉTHODE CALCUL ETP METEO-FRANCE (d'après Ducharne, 2002 ; Vannier et Braud, 2012)

$$ETP_{météofrance} = ETP1 + ETP2$$

$$ETP1 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{Rn}{\lambda} \quad \text{et} \quad ETP2 = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times \frac{0,26(1 + 0,4 \times U_{10}) \times (e_s - e_a)}{\tau}$$

Avec γ = constante psychométrique = 0,00065 Pa.K⁻¹

λ = chaleur latente de l'eau = 2,45 × 10⁶ J.kg⁻¹

τ = Constante de temps = 86400 s pour 1 jour

U_{10} = Vitesse du vent à 10m (m/s)

Δ = la dérivé de la relation de Clausius-Clapeyron (en Pa.K⁻¹)

$$\Delta = \frac{2504 \times \exp\left(\frac{17,27 \times (T - 273,15)}{T - 35,85}\right)}{(T - 35,85)^2}$$

avec T = Température en Kelvin (°K)

e_s = pression de l'eau à saturation (Hpa) selon la température et la relation de Clausius-Clapeyron

$$E_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times (T - 273,15)}{T - 35,85}\right)$$

e_a = pression de vapeur d'eau (Hpa) = $h \times e_s$ avec h = humidité relative de l'air

Rn = Rayonnement net de surface = $Rn = (1 - \alpha) \times Rg + \varepsilon \times Ra - \varepsilon \times \sigma \times T^4$

avec α = albédo = 0,2 et ε = émissivité de la surface dans l'infrarouge = 0,95

et σ est la constante de Stefan $\sigma = 5,67 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Rg = Rayonnement solaire incident mesuré ou estimé en W.m^{-2}

Ra = rayonnement infrarouge incident $Ra = \frac{1}{0,007 \times 0,0056 \times U_2}$

Avec U_2 = vitesse du vent à 2m = $U_2 = U_{10} \times \frac{4,87}{\ln(678 - 5,42)}$

Pour le bilan hydrique, il est aussi nécessaire de connaître la réserve utile du sol. La valeur universelle de la réserve est de 100 ou 125 mm. Mais une étude approfondie des sols a montré que la réserve utile varie en Bretagne de 10 à 270 mm selon la profondeur et le type de sol (Berthier *et al*, 2011). Le sol est essentiel dans le cycle de l'eau, il a un rôle de transfert et de stockage de l'eau, le ruissellement dépend de la capacité de stockage en eau des sols. Un sol saturé ne peut plus contenir l'eau, elle ruisselle. Le stockage de l'eau dans le sol est aussi un paramètre important pour les végétaux, lorsque leurs besoins en eau sont supérieurs aux arrivées d'eau, les végétaux puisent l'eau dans les réserves. **Pour cette étude, la réserve utile en eau est fixée à 125 mm pour l'ensemble des stations.**

Le bilan hydrique met en parallèle les précipitations (apports d'eau) et l'ETP (les besoins en eau) :

- Lorsque $P > ETP$, le surplus d'eau vient recharger la réserve utile, si la réserve a atteint son maximum (ici 125 mm), les sols sont saturés en eau et le surplus d'eau s'écoule *et* alimente les cours d'eau. Les mois où $P > ETP$ sont considérés comme humides si la réserve se reconstitue et très humides si le surplus d'eau alimente les écoulements.
- Lorsque $P < ETP$, 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). Dès que les précipitations sont inférieures à l'ETP, il y a forcément un DE, même minime. Les mois sont qualifiés de sec à aride selon la hauteur du déficit.

Le bilan hydrique peut se diviser en quatre phases, d'abord une phase de surplus hydrologique les réserves sont pleines et l'eau restante s'écoule, puis il y a une phase de sollicitation de la réserve hydrique avec un déficit minime, puis vient une phase où la réserve ne suffit plus et le déficit devient important (en été surtout), enfin, la réserve hydrique se reconstitue au cours de l'automne. Ces phases correspondent aux saisons hydrologiques. Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETP cela correspond à la saison d'étiage puisque la pluie va d'abord alimenter les besoins en eau du sol et non plus les cours d'eau.

Avant de présenter les résultats, il est nécessaire de rappeler que le calcul de l'ETP est une approche théorique qui ne correspond pas nécessairement à la réalité. Ensuite la réserve utile est fixée à 125mm sur toute la Bretagne, or cette réserve peut varier de 10 à 270 mm. Le bilan hydrique présenté est donc un bilan théorique qui permet de rendre compte de l'évolution du déficit hydrique dans le temps et comparer les stations entre elles.

Les bilans hydriques de Rennes et Rostrenen sont présentés ci-dessous, la différence l'est et l'ouest apparaît encore une fois. Les années de sécheresses sont bien identifiables sur les deux bilans, il y a au moins un mois sec et un mois aride. Le bilan de Rennes montre clairement une augmentation des mois considérés comme secs. Depuis 1989, il n'y a pas eu une année sans mois sec (sauf 2007) et il peut y avoir deux voire trois mois secs par an à Rennes. Les mois arides où le déficit dépasse 100 mm sont aussi de plus en plus fréquents. À Rostrenen le nombre de mois secs est globalement d'un mois sec tous les deux ans et tend plutôt à diminuer à priori, mais la série temporelle est moins longue que pour Rennes. Les tendances concernant le nombre de mois secs sont les mêmes qu'à Rennes pour Lorient et Dinard (cf. Annexe 14).

C'est avec la *Figure 29* que les différences apparaissent plus clairement. En juillet et août, entre 60 et 70 % de ces mois sont secs ou arides à Rennes contre à peine 15 % à Quimper. Le risque de sécheresse est bien plus présent à Rennes qu'à Quimper. Mais cette différence s'observe sur tous les mois : les mois hyper humides sont dominants à Quimper d'octobre à avril alors qu'à Rennes ils le sont de décembre à février. La saison de recharge est donc plus courte à Rennes, elle commence plus tard puisque la recharge de la réserve n'est pas complète en novembre dans plus de 60 % des cas et se termine en mars, lorsque les précipitations deviennent inférieures à l'ETP dans 70 % des cas.

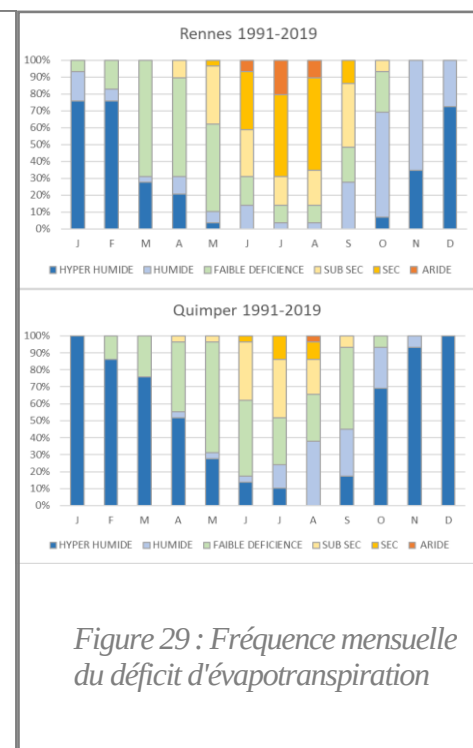
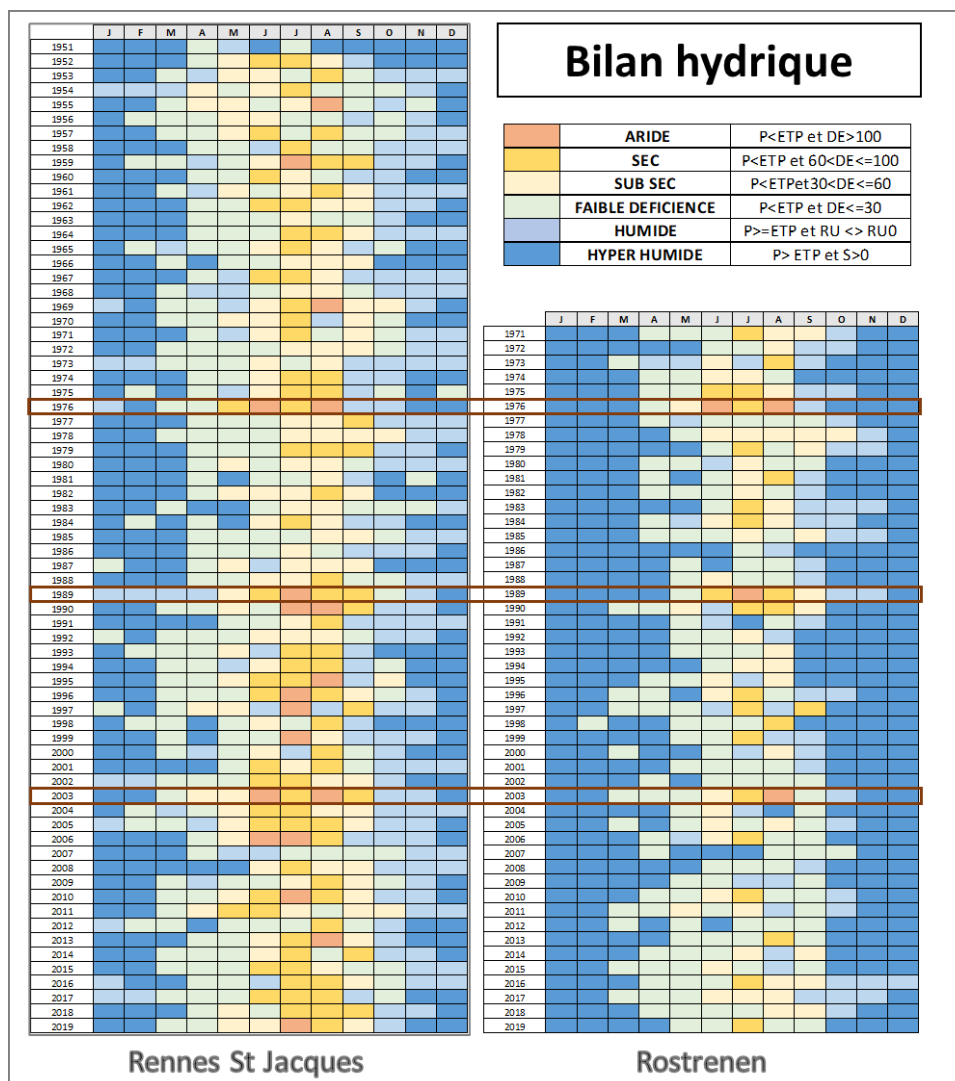


Figure 28 : Bilans hydrique à Rennes et Rostrenen

La sécheresse peut aussi être quantifiée avec le DE, la

Figure 30 et le Tableau 9 synthétisent cette quantification du risque de sécheresse. **Le DE annuel est 2,5 fois plus élevé en moyenne à Rennes qu'à Quimper** et il est relativement similaire à Lorient et Dinard. Le DE varie de 30 à 500 mm à Rennes et de 3 à 275 mm à Quimper. Le déficit maximum calculé à Quimper est équivalent au DE moyen à Rennes. Le suivi annuel du DE montre une tendance nette à l'augmentation sur les quatre stations. **Le DE moyen a augmenté d'au moins 50 mm en 40 ans.** L'augmentation est plus rapide à Rennes mais n'épargne pas Quimper.

La tendance n'est pas la même que celle identifiée par le SPI. Le calcul de l'ETP prend en compte de nombreux paramètres dont la température. La hausse de la température tend à faire augmenter l'ETP. Cela aboutit à une hausse du DE malgré une tendance générale à la hausse des précipitations. La température augmente plus vite en été et au printemps, ce qui tend à augmenter d'autant plus l'ETP. Le risque de sécheresse tend donc à augmenter en Bretagne malgré une hausse marquée des précipitations en été.

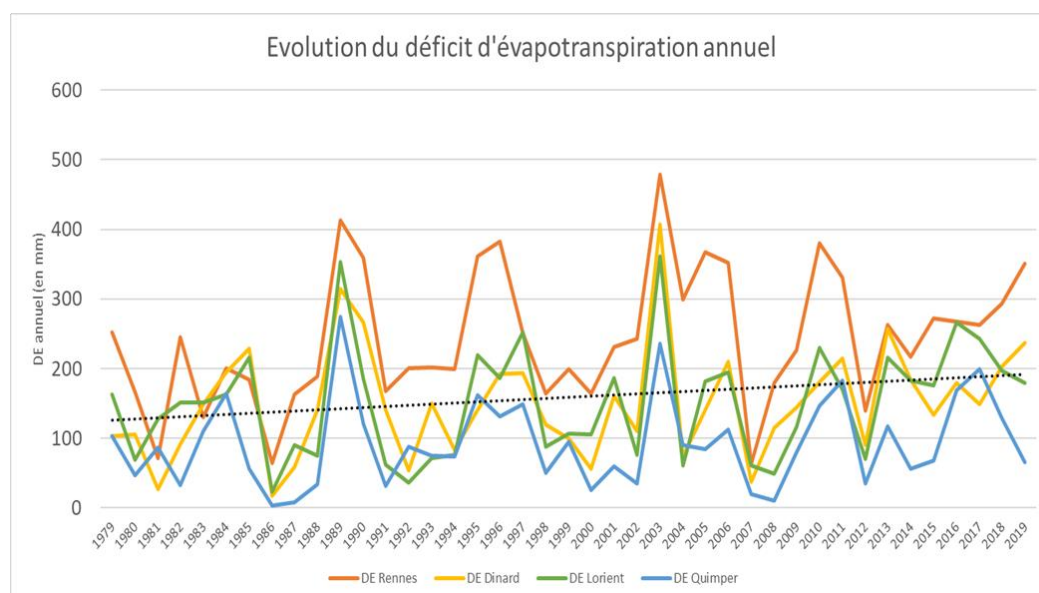


Figure 30 : Évolution du DE annuel

Tableau 9 - Cumuls de DE annuel moyen, minimum et maximum

Cumul annuel Moyen				
Bretagne	DE Rennes	DE Dinard	DE Lorient	DE Quimper
162	259	154	153	96
Cumul annuel Maximum				
ANNEE	DE Rennes	DE Dinard	DE Lorient	DE Quimper
1976	487	387	398	
1989	413	315	353	275
2003	479	408	361	236
Cumul annuel minimum				
ANNEE	DE Rennes	DE Dinard	DE Lorient	DE Quimper
1951	30			
1986	64	17	23	3
2007	63	37	61	20

4. Projection des données avec le portail Drias

4.1 Modèles et scénarios

Pour étudier l'évolution du climat futur, des modèles climatiques sont utilisés, ils permettent une représentation physique simplifiée de la réalité. Les modèles climatiques globaux se développent dans les années 60, ils simulent les mouvements de l'atmosphère jet-stream et la cellule de Hadley, l'insolation, les échanges de chaleur et l'humidité. Ces modèles simulent l'évolution du climat à grande échelle (Dufresne *et al*, 2006). Pour une étude régionale, il n'est pas conseillé d'utiliser ces modèles globaux car l'extrapolation des données au niveau local n'est pas bonne (Boé, 2007). En effet, le climat n'est pas modélisé de manière globale mais par portion de territoire appelé maille. Les mailles des modèles globaux sont de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres. Le climat modélisé est le même pour toute la surface de cette maille. Les conséquences sur l'évolution du climat local et notamment l'évolution des extrêmes sont mal reproduites par les modèles globaux. Les données des modèles globaux ne sont donc pas suffisamment précises pour une étude locale. Pour cette approche des données futures, deux modèles ont été utilisés il s'agit du modèle climatique développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et celui développé par l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Le modèle atmosphérique développé par les CNRM se nomme « Arpège-Climat », c'est une version du modèle de prévision Météo-France adaptée aux études climatiques et le modèle LMDZ est celui de l'IPSL. Ce modèle est utilisé pour l'étude du climat terrestre mais aussi d'autres atmosphères planétaires (Vénus, Mars...). Le modèle atmosphérique est couplé avec un modèle de surface continentale incluant une représentation de la végétation et un modèle océanique qui gère les glaces et mers (Dufresne *et al*, 2006). Les données sont extraites de modèles climatiques régionaux qui sont plus précis. La résolution de chaque grille horizontale est de 12km pour le modèle du CNRM et 15km pour le modèle de l'IPSL (DRIAS, 2014). Ces deux modèles ont donc des caractéristiques différentes qui vont influencer leurs capacités à reproduire le climat passé. La comparaison des données issues des deux modèles va permettre d'identifier les forces et les faiblesses de chaque modèle afin d'améliorer l'exploration du futur. Les données des deux modèles sont ensuite retranscrites dans les mailles de 8 kilomètres de la grille SAFRAN utilisées sur le portail DRIAS (DRIAS, 2014). Ce modèle a été initialement conçu pour évaluer le risque d'avalanche en montagne. Il a ensuite été étendu à l'ensemble de la France parce qu'il prend en compte à la fois les observations du sol et de l'altitude (Météo-France, 2016)

Ces données des modèles régionaux sont issues d'une régionalisation des tendances mondiales climatiques. Cette méthode de régionalisation consiste à améliorer la résolution spatiale des modèles qui est aujourd'hui de 110km pour les modèles globaux à une dizaine de kilomètres. Cela permet de donner les conséquences socio-économiques à échelle plus fine. Cela motive aussi les décideurs locaux et scientifiques à faire des études à échelle d'un territoire. La régionalisation des modèles passe par une descente d'échelle pour prendre en compte l'influence du relief et les processus physiques à échelle régionale avec une désagrégation spatiale des résultats des modèles globaux (Boé, 2007).

Pour tous les modèles, il existe quatre scénarios d'évolutions climatiques introduits par le 5^{em} rapport du GIEC. Ces scénarios « Representative Concentration Pathway » (RCP) sont des projections climatiques dépendant de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et de l'usage des sols. Ils prennent en compte le cycle solaire, la concentration moyenne en aérosols volcaniques. Les 4 scénarios RCP sont les suivants : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5. L'effet de la perturbation du climat est rapporté à un équivalent de forçage radiatif qui modifie le bilan

énergétique de la Terre. Le chiffre correspond au forçage radiatif équivalent en W/m² total pour l'année 2100 par rapport à 1750. C'est-à-dire une énergie issue du rayonnement solaire supplémentaire. Le forçage radiatif est le total d'énergie radiative. Le scénario RCP 2.6 correspond à un scénario d'atténuation avec un pic d'émission avant 2050 et un déclin des émissions le forçage radiatif serait ainsi limité à 2.6 W/m², c'est le scénario le plus optimiste. Le scénario RCP8.5 se caractérise par une augmentation des émissions de GES jusqu'à la fin du siècle sans atténuation, cela correspond à un forçage de 8.5 W/m², c'est le scénario le plus pessimiste (GIEC, 2014). Les scénarios 4.5 et 6.0 sont des scénarios d'émissions intermédiaires.

Ici, deux scénarios d'évolutions ont été testés avec le modèle de l'IPSL et celui du CNRM. L'objectif est d'étudier l'évolution du climat à partir d'un scénario probable, les deux scénarios sont sélectionnés pour leurs probabilités et leurs disponibilités sur Drias. Le scénario 2.6 qui est pourtant celui qu'il faudrait suivre afin de respecter les accords de Paris, ne semble pas réaliste au regard de la situation actuelle. En effet, une étude parue dans Nature Climate Change a montré que la baisse annoncée de 8 % des émissions de gaz à effet de serre n'aurait aucun impact sur l'évolution actuelle du climat à moins d'une nouvelle baisse des émissions les années suivantes (Forster *et al*, 2020). Par ailleurs, les données issues du scénario 2.6 ne sont pas disponibles avec le modèle IPSL. Afin de comparer les modèles, il est nécessaire d'avoir un scénario disponible pour les deux modèles. Le scénario RCP 2.6 a donc été écarté au profit du scénario 4.5. Les scénarios utilisés ici sont donc le RCP 4.5 et le RCP 8.0.

Les modèles régionaux du CNRM et de l'IPSL vont être utilisés pour cette exploration du futur avec les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.0 du GIEC. Avec deux modèles et deux scénarios, c'est donc quatre prospections qui vont être analysées ici. Celles-ci représentent quatre chemins possibles de l'évolution du climat. Le *Tableau 10* synthétise cela :

Tableau 10 - Les modèles et scénarios utilisés

Modèles climatiques			Scénarios d'évolution climatique en fonction des émissions GES (GIEC)	
	avec modèle atmosphérique	résolution maille (grille)	RCP 4.5	RCP 8.0
CNRM	Arpège-Climat	12 km	<i>simulation</i>	<i>simulation</i>
IPSL	LMDZ	15 km	<i>simulation</i>	<i>simulation</i>

4.2 Modèles et incertitudes

4.2.1 Les sources d'incertitudes

La prise en compte de l'incertitude des modèles est indispensable pour appréhender au mieux les données des sorties de modèles. En connaissant les biais des modèles, il est possible de corriger ceux-ci. Mais il ne faut jamais oublier que les données, mêmes corrigées ne représenteront jamais jour pour jour le temps qu'il fera dans dix, vingt ou trente ans. L'objectif de la modélisation est de connaître les tendances générales d'évolution du climat selon le scénario d'émissions. Le but n'est pas de prédire mais de prévenir et avertir les décideurs ainsi que l'ensemble de la population de l'évolution possible du climat. La modélisation porte aussi un intérêt dans un but d'élaborer une stratégie d'adaptation au changement climatique. En connaissant les évolutions futures du climat, il est possible d'envisager une stratégie d'adaptation en fonction de l'intensité des phénomènes.

Les sources d'incertitudes sont diverses et résident d'abord dans **la mesure des données passées** sur lesquelles sont calqués les modèles. Le principal inconvénient concernant ces données passées est la rupture d'homogénéité (cf. 2.2). Il existe différents facteurs d'hétérogénéisation des mesures de données : la rupture de l'homogénéité peut être causée par le déplacement de l'appareil mesureur, un changement de hauteur de l'appareil. Il peut y avoir jusqu'à 50 % de différences entre un appareil situé à 1,2m du sol et un appareil au sol. Une modification de l'environnement anthropique ou naturel, ou bien des erreurs dans la mesure des précipitations est également un facteur de rupture d'homogénéité (Le Goulven, 1988). Tous ces facteurs augmentent le risque d'hétérogénéisation des données qui faussent le suivi temporel de ces données. Étant donné la masse immense d'informations que représentent les données mesurées au niveau international, les erreurs dans la mesure ou la transcription sont aussi une source d'incertitude pour les modèles climatiques. Les sources d'erreurs dans la mesure ou la transcription des données de mesure de précipitations peuvent être nombreuses :

- Il peut y avoir une erreur de mouillage, l'eau doit glisser au fond du pluviomètre pour être comptabilisée. L'erreur de mouillage est par défaut inférieure à 0,1 mm.
- L'erreur peut aussi être due à l'évaporation à deux niveaux : sur le cône du pluviomètre surtout si celui-ci est chauffé par le soleil et dans le réceptacle. L'erreur est souvent de l'ordre de 0,2mm.
- L'erreur provient aussi de l'efficacité de la captation. Sans vent, les précipitations tombent à la verticale, si la surface de captation est à l'horizontale, l'erreur est de 0,5 % maximum. Il y a une marge d'erreur importante qui augmente avec le vent. Elle est d'environ 10 % pour un vent de 5 m/s et 25 % pour un vent de 10 m/s. À noter que des pluviomètres sont parfois enterrés pour limiter ce biais.
- Enfin, l'erreur de lecture ou une erreur grossière de relevé ne peuvent être exclues dans la masse des données passées (Leroy, 2000).

Les sources d'incertitudes des modèles sont aussi dues au modèle en lui-même. Il y a d'abord une grande incertitude sur l'évolution des paramètres démographiques, économiques et technologiques qui influencent directement les émissions de gaz à effet de serre. Ensuite, le processus du cycle du carbone est encore mal connu, notamment en lien avec les aérosols. La vitesse de transfert et le temps de concentration des gaz à effet de serre peuvent être affectés par des paramètres encore inconnus aujourd'hui qui peuvent modifier le bilan carbone. Les incertitudes résident aussi dans le modèle climatique, notamment les hypothèses physiques qui sont avancées avec des approximations et sans compter la variabilité naturelle du climat qui est difficilement modélisable. Enfin, les incertitudes persistent avec la méthode de régionalisation des données qui induit encore une fois des approximations statistiques (Boé, 2007).

Bien que les données aient été corrigées préalablement par la méthode quantile-quantile, une incertitude persiste toujours sur les données. **Il est donc nécessaire de confronter les données observées aux données modélisées pour avoir une idée de cette incertitude.** Ce travail a été effectué sur quatre stations pour les températures et huit pour les précipitations. Les écarts de températures et de précipitations entre la moyenne observée et la moyenne modélisée sont présentés ici pour le modèle de l'IPSL et du CNRM.

4.2.2 Reproduction des températures

Concernant les températures, elles sont globalement sous-estimées pour les deux modèles sur les quatre stations. L'écart est situé autour de $-0,5^{\circ}\text{C}$ pour le modèle CNRM et $-0,75^{\circ}\text{C}$ pour le modèle IPSL. Il y a une légère différence dans ces écarts de température selon les stations de $0,1$ à $0,3^{\circ}\text{C}$. Cette différence minimale d'écart de température moyenne est surtout due à une plus forte variabilité dans la reproduction des températures minimums. La *Figure 31* montre que cette sous-estimation est plus importante pour les températures maximums, celles-ci sont en moyenne inférieures de plus de 1°C et cette sous-estimation est plus marquée pour le modèle IPSL. Pour les températures minimums annuelles, elles sont globalement très proches à Rennes et à Quimper. Les températures minimums sont sous-estimées à Rennes, Dinard et Lorient mais surestimées à Quimper. L'écart mensuel moyen de températures minimums est toujours situé entre -1 et $+1^{\circ}\text{C}$. Les températures minimums des mois de février, mai et octobre sont sous-estimées d'au moins $0,5^{\circ}\text{C}$ pour les deux modèles. Inversement, les températures minimums du mois de novembre sont surestimées de près de 1°C . Pour les mois de juin et de décembre les deux modèles ne s'accordent pas : le modèle IPSL sous-estime les températures minimums de juin alors qu'elles sont surestimées par le modèle CNRM et inversement en décembre. Pour les températures minimums, il n'y a pas de saisonnalité et pas d'homogénéité entre les modèles mais l'écart de température minimum reste plus faible que celui des températures maximums. Tous les écarts entre les modèles et les données mesurées sont disponibles à l'annexe 15 pour les quatre stations.

Concernant l'écart de température maximale mensuelle moyenne, celui-ci est compris entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ et -2°C pour le modèle CNRM et entre $-0,5^{\circ}$ et -3°C pour le modèle IPSL. Les tendances sont les mêmes pour les deux modèles avec une sous-estimation sur tous les mois de l'année et un maximum de sous-estimation en juin. Il y a donc **une importante sous-estimation des températures maximums** qui tend à diminuer les canicules et les périodes de chauds extrêmes. Les données de température issues des modèles ont par la suite été corrigées dans l'objectif d'avoir des données les plus proches possible sur la période historique. Cette correction s'effectue en soustrayant ces données avec l'écart moyen sur 1971-2005. Ainsi $T_{corr} = T_{mod} - \Delta T_{moy} (1971 - 2005)$.

Les modèles ont tendance à sous-estimer les températures observées d'au moins $0,5^{\circ}\text{C}$. La sous-estimation est plus marquée pour les températures maximums notamment en été. Ces données ont ensuite été corrigées pour limiter les biais d'interprétations.

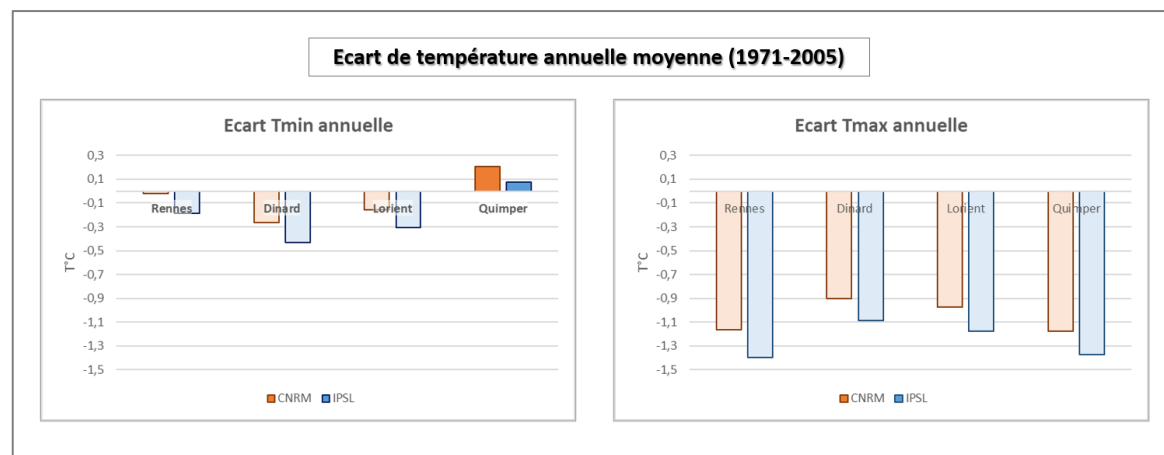


Figure 31 : Écart de température annuelle moyen entre les données observées et modélisées

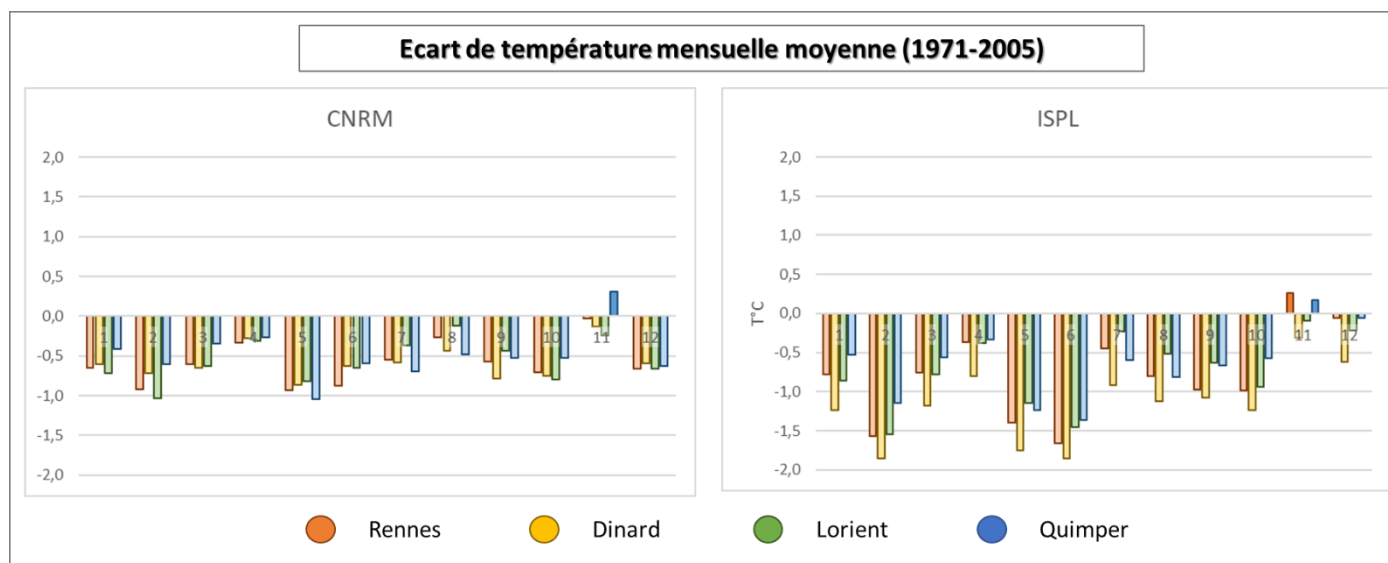


Figure 32 : Écart de température mensuelle moyen entre les données observées et modélisées

4.2.3 Reproduction des précipitations :

La pluie est un paramètre plus difficile à modéliser car les différences de pluviométrie sont déjà à la base plus importantes et les données sont modélisées à partir d'une large échelle. La variabilité spatiale de la pluviométrie est moins présente. En Bretagne, il y a déjà une grande hétérogénéité spatiale de pluviométrie avec un gradient Est/Ouest et un gradient Terre/Mer (cf.1.1). La pluie est un paramètre climatique très sensible aux éléments locaux, ces mêmes éléments qui sont peu représentés dans les modèles globaux.

Pour les deux modèles utilisés, l'écart de précipitation est plus hétérogène spatialement et entre les modèles. Pour les deux modèles, la *Figure 33* expose une sous-estimation globale des cumuls annuels. Celle-ci est plus importante à l'Ouest qu'à l'Est sauf à Lorient où les cumuls sont surestimés de près de 100 mm. Il semble y avoir des écarts plus conséquents sur les stations littorales (Dinard, Lorient et Quimper). Pour les stations très arrosées sur le Massif armoricain comme Coray, la sous-estimation est aussi importante puisqu'elle est d'au moins 50 mm. Les écarts annuels sont assez similaires entre les deux modèles. Le modèle IPSL est toutefois généralement plus humide avec 10 à 40 mm de plus à l'année en moyenne par rapport au CNRM selon la station. La différence entre les deux modèles reste donc assez faible au niveau annuel. Sur l'ensemble des stations, malgré des écarts mensuels qui peuvent être importants, le régime pluviométrique est bien reproduit avec des maximums en hiver et des minimums en été pour les deux modèles. Les données issues des modèles ont par la suite été corrigées en soustrayant ces données avec l'écart moyen sur 1971-2005. Cependant à l'échelle mensuelle, les deux modèles ne reproduisent pas les cumuls de la même façon :

- Le modèle du CNRM a des écarts mensuels allant de – 20 à + 20 mm. Il y a une sous-estimation importante des cumuls en mars et en avril puis une surestimation en mai et juin et à nouveau une sous-estimation en juillet-août. Il n'y a pas de logique saisonnière dans ces écarts, ni de logique spatiale. La station de Lorient se démarque par la surestimation de ces données tous les mois de l'année. Le modèle du CNRM a une très bonne reproduction moyenne des mois de janvier, février, septembre et novembre. Au niveau saisonnier, les cumuls sont sous-estimés sur toutes les saisons, principalement en hiver et au printemps (cf. Annexe 16.1).
- Le modèle de l'IPSL est marqué par des écarts bien différents de l'autre modèle. Ils sont en général plus faibles que ceux du CNRM sauf pour le mois de septembre et de novembre où les écarts sont conséquents. Le modèle a une très bonne reproduction de décembre à avril. La sous-estimation des données intervient en mai, en juillet et surtout en septembre tandis que le mois de mars est légèrement surestimé. Les cumuls du mois de novembre sont amplement surestimés par l'IPSL. Comme pour le modèle CNRM, à Lorient les données sont surestimées chaque mois. Pour le modèle IPSL, les écarts entre l'observé et le modèle sont globalement plus faibles outre le mois de septembre sous-estimé de 20mm et le mois de novembre toujours surestimé d'au moins 20 mm (cf. Annexe 16.2).

Ainsi les données issues des modèles ont été corrigées : $P_{corr} = P_{mod} - \Delta P_{moy} (1971 - 2005)$.

Les deux modèles ont des écarts annuels de 10 % maximum, ils sont assez proches l'un de l'autre. Le modèle IPSL est le plus proche des données observées surtout pour les stations les plus humides.

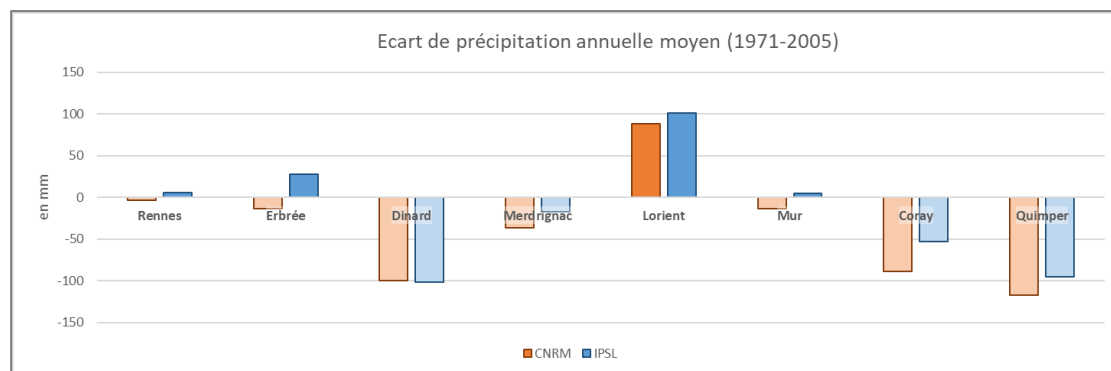


Figure 33 : Écart de précipitations annuel selon le modèle (1971-2005)

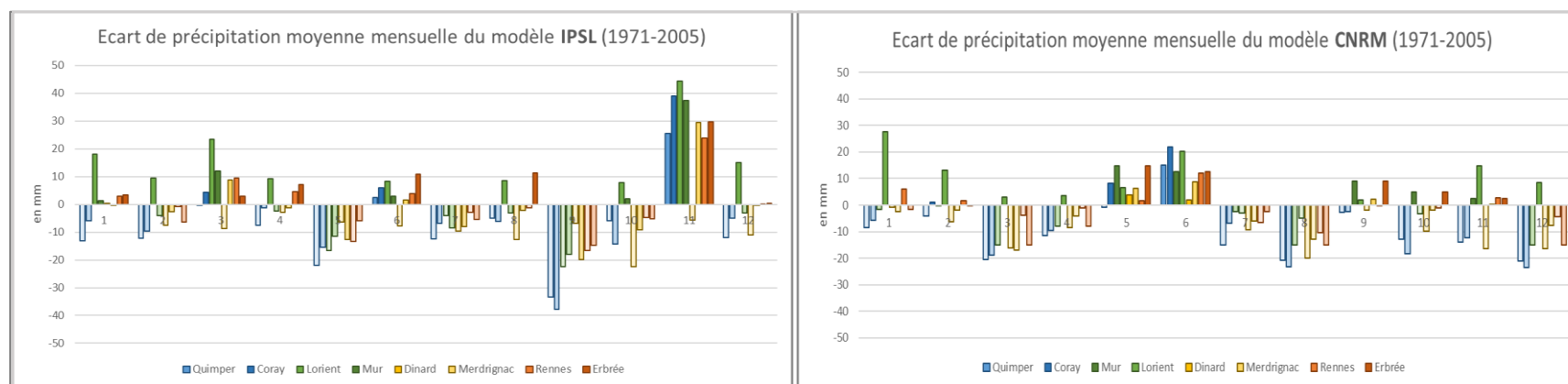


Figure 34 : Écart mensuel moyen de précipitation selon le modèle (1971-2005)

Les données issues des modèles IPSL et CNRM ont été utilisées pour cette approche exploratoire des scénarios climatiques. Ils sont bien différents : le modèle IPSL est globalement plus frais et humide que celui du CNRM. Ces divergences sur le passé peuvent amener des différences climatiques importantes sur le climat futur pour un même scénario RCP, notamment à horizon lointain. L'évolution du climat futur avec deux modèles permet un regard plus complet sur l'évolution future du climat. Celle-ci est pleine d'incertitudes mais si les modèles convergent sur certains points, il est intéressant de les relever.

4.3 Les évolutions du climat breton selon les modèles

Il est nécessaire de préciser que ces tendances ont été corrigées par rapport aux écarts moyens entre les données observées et les données modélisées pour chaque station. Cela vaut pour les températures et les cumuls de précipitation, pas pour le nombre de jours de pluie. Malgré cela, les incertitudes restent importantes, de ce fait, ces résultats ne doivent pas être pris comme une vérité absolue.

4.3.1. Une hausse généralisée des températures

Pour l'évolution des températures, comme au niveau international (GIEC, 2014) et national (Jouzel *et al*, 2014), au niveau de la Bretagne il y a une convergence des deux modèles vers une poursuite de la hausse des températures (*Figure 35*). Le rythme de hausse est plutôt linéaire avec globalement + 0,5°C par décennie pour le RCP 8.5 et + 0,15°C par décennie pour le RCP4.5. Avec le scénario le plus pessimiste, la température de Rennes serait en fin de siècle autour de 16°C soit l'équivalent de la température de Bastia. Avec le RCP4.5, la température moyenne devrait se stabiliser autour de 14°C. À Quimper, la température moyenne annuelle devrait atteindre 14°C selon le RCP8.5 et entre 12 et 13°C avec le RCP 4.5. Le modèle IPSL montre un réchauffement moins marqué pour les deux stations. Les données sont synthétisées sur le *Tableau 11*. Pour le modèle CNRM, il y a un réchauffement différentiel entre les températures minimums et maximums. Les températures maximums tendent à se réchauffer plus vite, surtout à horizon lointain. D'après le modèle CNRM et le scénario RCP 8.5, le réchauffement serait de + 3,5°C en moyenne pour les températures maximums et + 2,9°C pour les températures minimums, par rapport à la moyenne sur la période 1991-2019. Pour le modèle IPSL, le réchauffement est plus égalitaire entre les températures minimums et maximums. Il est aussi inférieur de 0,5°C par rapport au CNRM.

Les données de Rennes disponibles en Annexe 17 montrent un réchauffement plus marqué en été et particulièrement en juillet et en août :

- Pour le modèle CNRM, l'écart est proche de + 4°C à horizon lointain en juillet et en août avec le RCP 4.5 alors que ce réchauffement ne dépasse pas + 2°C sur les autres mois. Il est de + 6°C avec le RCP 8.5 sur ces mêmes mois de juillet-août. La température moyenne de ces mois atteindrait à Rennes 24°C contre environ 18°C aujourd'hui. Tandis que les autres mois ont une hausse de + 2 à + 4°C.
- D'après le modèle IPSL, le réchauffement atteindrait + 2°C en juillet-août et aussi septembre contre + 1°C sur les autres mois de l'année avec le RCP4.5. L'autre scénario indique un réchauffement plus marqué avec autour de + 4°C sur ces mêmes mois, tandis que le réchauffement est situé autour de 2 à 3°C.

Ainsi, d'après les deux modèles le réchauffement se poursuit, aussi bien pour les températures minimums que pour les maximums. Ce réchauffement sera deux fois plus marqué en fin d'été que sur le reste de l'année. Cependant, ce n'est pas vraiment ce qui est observé sur la série historique. Pour l'instant, le réchauffement des températures est plus marqué en fin de Printemps et minime en fin d'été (cf. 3.2.1).

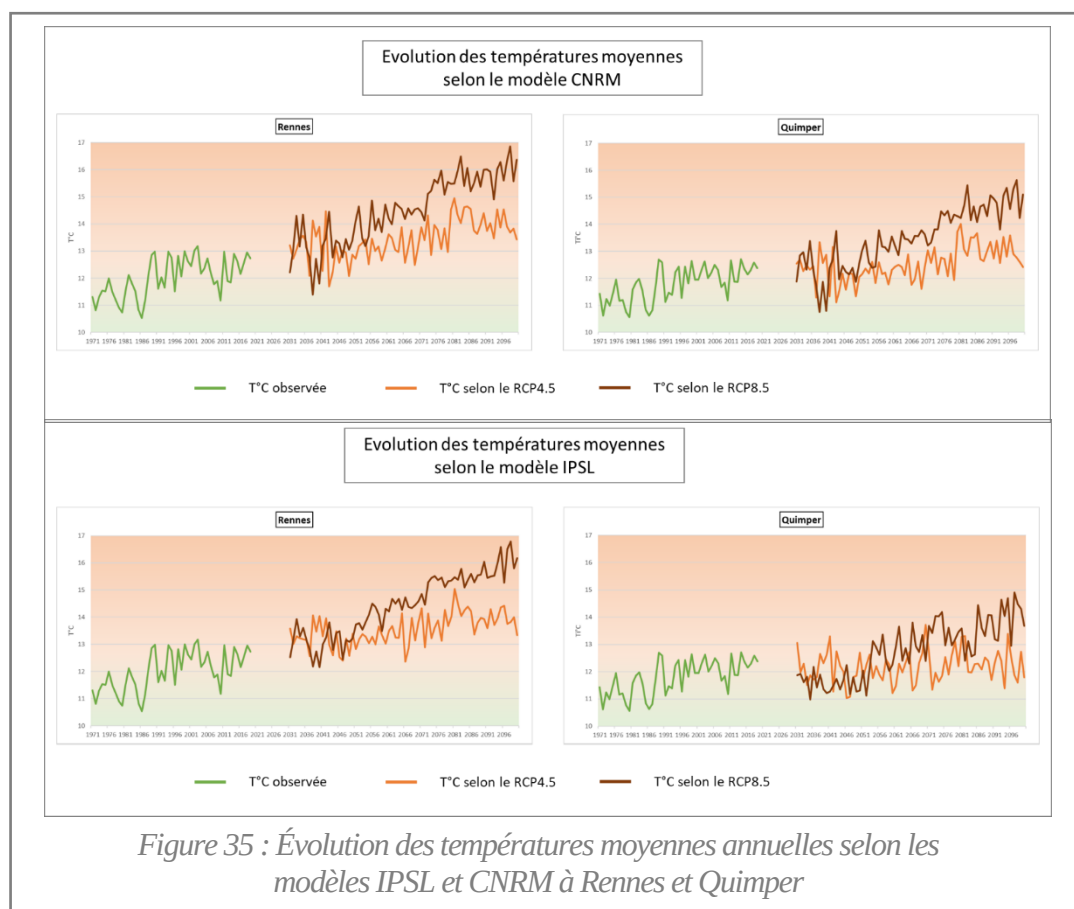


Tableau 11 - Synthèse de l'évolution des températures moyennes en Bretagne par rapport à 1991-2019

	Modèle CNRM			
	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Horzion Moyen	Horizon Lointain	Horzion Moyen	Horizon Lointain
T MIN	+ 0,6°C	+ 1,4°C	+ 1°C	+ 2,9°C
T MAX	+ 0,6°C	+ 1,6°C	+ 1°C	+ 3,5°C
T MOY	+ 0,6°C	+ 1,5°C	+ 1°C	+ 3,1°C

	Modèle IPSL			
	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Horzion Moyen	Horizon Lointain	Horzion Moyen	Horizon Lointain
T MIN	+ 0,7°C	+ 1,1°C	+ 0,7°C	+ 2,5°C
T MAX	+ 0,5°C	+ 0,8°C	+ 0,3°C	+ 2,2°C
T MOY	+ 0,7°C	+ 1°C	+ 0,5°C	+ 2,4°C

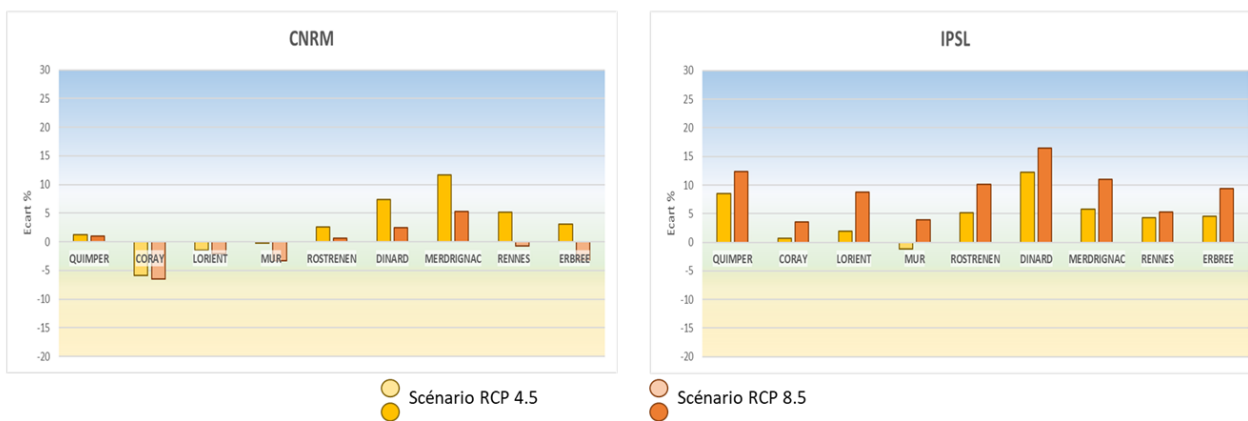
4.3.2. Une divergence des modèles sur l'évolution des cumuls pluviométriques annuels

L'évolution des cumuls de précipitations est d'abord étudiée par année. Avec la *Figure 36* plusieurs observations peuvent être faites :

- Le modèle CNRM tend vers une réduction des cumuls annuels à horizon lointain avec les deux scénarios. Avec le scénario RCP 8.5 les cumuls tendent à diminuer plus fortement. En détail, à horizon moyen les cumuls n'évoluent pas de façon homogène : ils tendent à baisser sur l'Ouest Bretagne avec jusqu'à -5 % à Coray tandis qu'à l'Est les cumuls tendent à augmenter autour de 5 %. À horizon lointain, la tendance à la baisse est plus homogène. Celle-ci est située autour de -5 % pour le RCP 4.5 soit entre -20 et -75 mm, cette tendance est plus amplifiée à Coray avec -138 mm. Pour le RCP 8.5, la baisse du cumul annuel est de l'ordre de 10 % sur l'ensemble des stations. L'équivalent du cumul d'un mois d'hiver en moins à l'année. Cette baisse est plus forte à Coray avec -223 mm et pour Erbrée. La baisse du cumul affecte davantage les stations de l'Ouest Bretagne avec une baisse dès l'horizon moyen. Les stations très arrosées sont encore plus affectées par cette baisse. La baisse du cumul concerne moins les stations de la Rance mais s'amplifie en allant vers l'Est.
- Le modèle IPSL tend vers une hausse des cumuls sur l'ensemble des stations. Cette hausse concerne toute la Bretagne dès l'horizon moyen, avec une différence géographique marquée. La hausse concerne moins les stations arrosées de l'Ouest-Bretagne et plus celles du bassin versant de la Rance. L'écart entre les deux scénarios est assez faible, la hausse du cumul est globalement de + 5 % à l'horizon moyen. À horizon lointain, l'écart entre les deux scénarios est plus important. Le scénario RCP 4.5 a globalement une hausse de + 5 % soit la même que pour l'horizon moyen. Pour le scénario 8.5, les cumuls vont augmenter d'au moins 10 % avec même + 30 % à Dinard et Erbrée ce qui représente environ 200 mm en plus. La tendance est donc à une hausse puis se stabilise pour le RCP 4.5 et une forte hausse continue pour le RCP 8.5. Dinard est particulièrement concerné par cette hausse, dès l'horizon moyen.

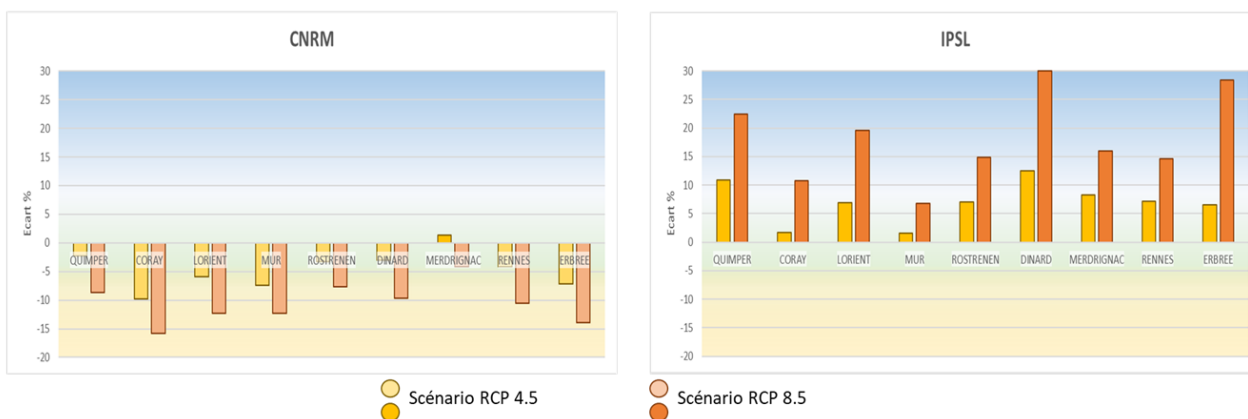
Les deux modèles divergent donc largement sur l'évolution des cumuls annuels. Cette divergence est plus marquée à l'horizon lointain. Pour le détail des données, il est disponible à l'Annexe 18. L'évolution simulée par le modèle CNRM est contraire à celle qui est observée depuis 1951. À Mur-de-Bretagne, il a été montré une tendance nette à la hausse des cumuls depuis 1932 (cf. 3.2.1). Mais d'après le modèle CNRM, le cumul en fin de siècle devrait être équivalent à celui observé dans les années 1960. Ou alors il devrait continuer d'augmenter mais à un rythme plus lent d'après le modèle IPSL. Derrière cette divergence importante entre les deux modèles, il est possible d'identifier une tendance à horizon moyen pour Dinard. Les deux modèles indiquent une hausse des cumuls annuels à Dinard et Merdrignac. Plus généralement, la Bretagne Est ne devrait pas subir une baisse des cumuls à horizon moyen. Les modèles divergent par contre largement sur l'évolution des cumuls sur les autres stations.

Evolution du cumul annuel moyen à horizon moyen selon les différents modèles



*Ecart relatif entre les moyennes observées sur 1991-2019 et 2031-2060 pour horizon moyen et 2071-2100 pour horizon lointain

Evolution du cumul annuel moyen à horizon lointain selon les différents modèles



*Ecart relatif entre les moyennes observées sur 1991-2019 et 2031-2060 pour horizon moyen et 2071-2100 pour horizon lointain

Figure 36 : Évolution du cumul relatif annuel à horizon moyen et lointain selon le modèle CNRM et IPSL (en %)

4.3.3. ... Mais une convergence sur l'évolution des cumuls saisonniers

Les tendances des deux modèles à l'échelle des saisons hydrologiques sont plus convergentes (cf. *Figure 37 et Figure 38*). L'ensemble des données sont disponibles en Annexe 19 pour un regard approfondi sur ces tendances.

Pour la saison de recharge, les modèles convergent clairement vers une hausse des cumuls. À l'horizon moyen, cette hausse est située autour de + 10% du cumul saisonnier avec quelques différences dans l'intensité et la distribution spatiale de cette hausse selon le modèle. C'est à peu près l'équivalent du cumul d'un mois de pluie hivernal en plus sur la seule saison de recharge. À horizon moyen, la convergence est nette vers une hausse de cumul selon les deux modèles et deux scénarios. Cependant quelques différences apparaissent dans la distribution et l'intensité de cette hausse :

- D'après le modèle du CNRM, la hausse est plus forte sur l'Est-Bretagne et notamment sur la Rance. Le cumul augmenterait de 20% à Dinard avec le scénario RCP 4.5 contre + 5 % à Rostrenen par exemple. Avec le scénario 8.5 les cumuls augmenteraient deux fois moins à horizon moyen.
- Pour le modèle de l'IPSL, la hausse est plus marquée. Il y a une différence spatiale importante dans la distribution de cette hausse. Pour le modèle IPSL, la hausse de cumul est plus importante sur les stations littorales, elle est aussi amplifiée avec le scénario RCP 8.5

À l'horizon lointain, la convergence est moins nette :

- Le modèle CNRM tend vers une stagnation des cumuls à horizon lointain ou légère augmentation. La hausse concerne davantage les stations à l'est Bretagne, notamment Merdrignac. Il n'y a pas de différence entre les deux scénarios.
- Le modèle IPSL montre une hausse marquée des cumuls. Celle-ci est de l'ordre de + 10% pour le scénario RCP 4.5 et de l'ordre de + 20% avec le RCP 8.5. La hausse est encore plus marquée sur les stations littorales, seule la station d'Erbrée présente une hausse inférieure à 10 %.

Pour la saison d'étiage, les modèles convergent vers une baisse des cumuls. À horizon moyen, la baisse est de l'ordre de 8 % avec une différence plus importante entre les modèles :

- Selon le modèle CNRM, la baisse est de près de 10 % durant cette saison d'étiage. Elle concerne surtout les stations de Coray avec -14 % et Erbrée -9 à -14 % selon le scénario. La différence entre les scénarios est assez minime.
- Selon le modèle IPSL, la baisse de cumul concerne surtout l'ouest Bretagne avec une baisse équivalente à celle du modèle CNRM. Mais à l'Est, la tendance à horizon moyen est plutôt à une hausse des cumuls, principalement à Dinard, Rennes et Erbrée. Cette différence de tendance est amplifiée avec le scénario RCP 8.5

À horizon lointain, encore une fois la convergence est moins nette :

- Selon le modèle CNRM, la baisse de cumul reste toujours assez uniforme sur l'ensemble de la région et reste plus importante à Coray et Erbrée. La baisse est de l'ordre de -15 % du cumul pour le RCP 4.5 et -25 % pour le RCP 8.5. Les cumuls sur la saison d'étiage tendraient donc à diminuer fortement.
- Le modèle IPSL est toujours marqué par une différenciation Est/Ouest. À l'Ouest, les cumuls tendent à diminuer de 5 à 10 % tandis qu'ils augmentent à l'Est, notamment à Dinard et Erbrée. La hausse est amplifiée avec le scénario 8.5, elle atteint par exemple + 40 % du cumul.

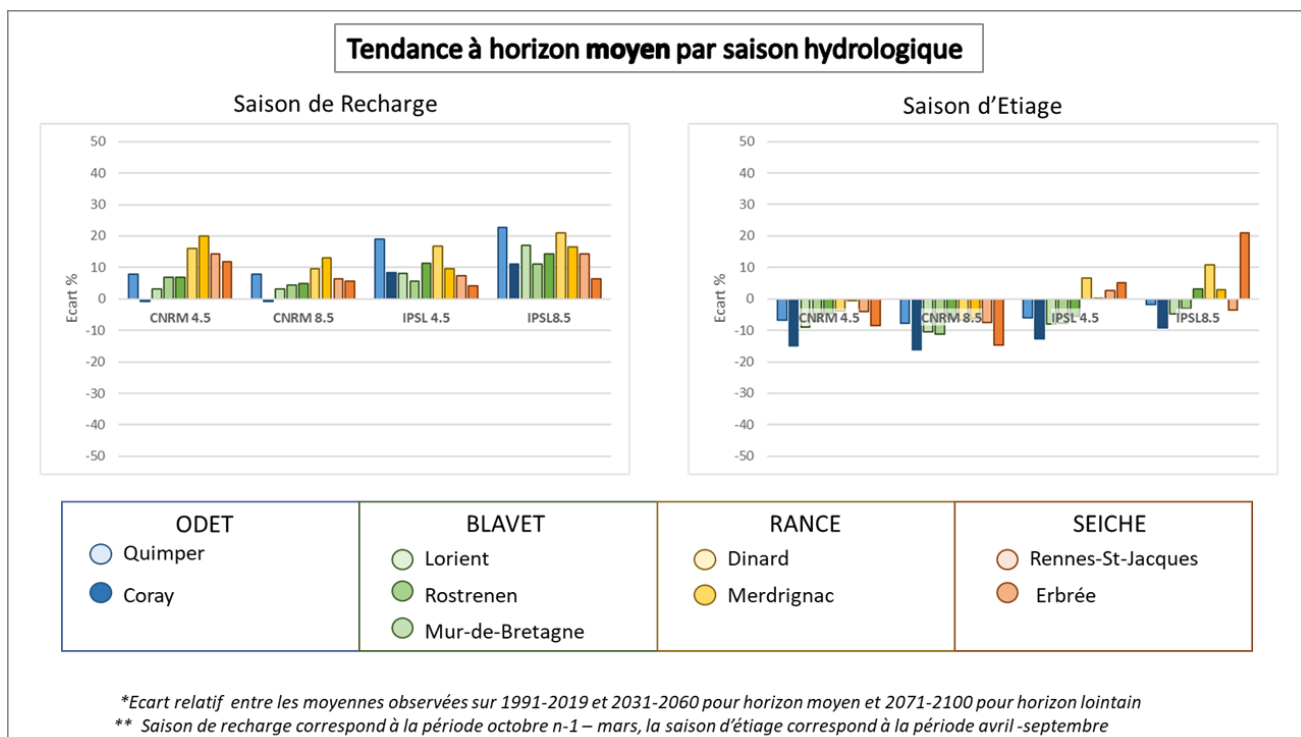


Figure 37 : Évolution du cumul relatif par saison hydrologique à Horizon moyen (en %)

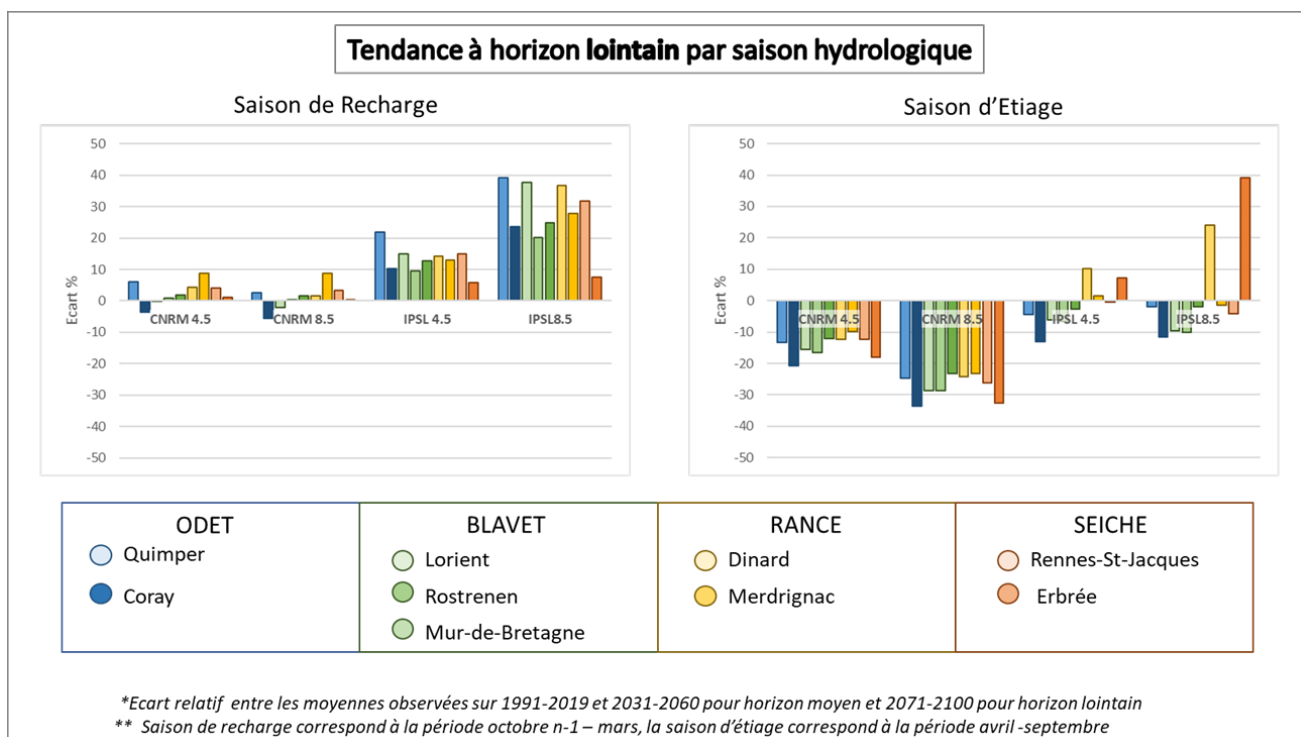


Figure 38 : Évolution du cumul relatif par saison hydrologique à horizon lointain (en %)

Donc, il y a une convergence nette concernant l'évolution des cumuls saisonniers à l'horizon moyen. Les cumuls devraient augmenter d'environ 10 % sur toute la Bretagne en saison de recharge et diminuer en saison d'étiage. La baisse devrait intervenir d'abord à l'Ouest. À horizon lointain, les incertitudes sont trop grandes pour identifier clairement une tendance.

4.3.4. Évolution des cumuls mensuels selon les modèles

L'évolution des cumuls mensuels mérite d'être précisée pour chaque modèle. Sur la *Figure 39* l'évolution mensuelle est précisée selon le modèle puis le scénario à horizon moyen et lointain. L'ensemble des données concernant cette évolution mensuelle sont disponibles à l'Annexe 20. Les tendances ne sont pas identiques même si quelques points communs apparaissent pour certains mois :

- **Le modèle du CNRM** indique une baisse des cumuls mensuels globalement entre avril et novembre. Cette baisse est maximum en juillet-août, elle atteint -20 % à horizon moyen et jusqu'à -50 % sur les stations de l'Ouest à horizon lointain. À l'inverse le cumul tend à augmenter en février, mars et décembre indépendamment du scénario. Le scénario RCP 4.5 présente globalement une baisse moins importante et moins étendue que pour le RCP 8.5. La baisse est supérieure à 10 % en mai, juillet, août et septembre. Avec le scénario RCP 8.5, la diminution ne concerne d'abord que mai, juillet et août à horizon moyen. Puis elle concerne la période allant de mars à novembre avec au moins -10% de cumul mensuel. Les stations de Rennes et Dinard sont globalement plus épargnées par cette baisse par rapport à Quimper et Lorient.
- **Le modèle de l'IPSL** présente une situation différente. Le cumul tend globalement à augmenter de septembre à mars, particulièrement en janvier et en décembre. La baisse des cumuls intervient principalement entre avril et juin. Le mois de juin est concerné par une baisse des cumuls d'au moins 10 % à horizon moyen et 15 % à horizon lointain indépendamment du scénario. La différence entre les deux scénarios réside dans l'intensité de ces tendances. La hausse est plus intense avec le RCP 8.5. Avec le scénario RCP 4.5, le cumul tend à augmenter en hiver, et en septembre et en octobre. Cette hausse est très inégale selon le lieu et le mois. Elle concerne plus Quimper et Lorient sur les mois d'hiver et plus Dinard et Rennes sur les mois d'automne ainsi qu'en juillet. En juillet, les cumuls augmentent de près de 20 % dans ces deux stations. Cette situation s'observe aussi avec le RCP 8.5. Cette situation mériterait d'être plus amplement étudiée pour comprendre si cette hausse de cumul provient de pluies intenses orageuses ou d'une augmentation du nombre de jours de pluie. Autre point à noter, le mois de novembre est d'abord concerné par une baisse du cumul de près de 20 % du cumul à horizon moyen puis une hausse du cumul à horizon lointain.

Les modèles ne simulent pas la même évolution au pas de temps mensuel. **Les seuls points communs sont une hausse du cumul en mars et décembre et une baisse en juin.** Mais l'intensité et la répartition spatiale de ces évolutions sont trop grandes pour parler de convergence sur ces mois. La seule convergence notable s'observe à échelle des saisons hydrologiques.

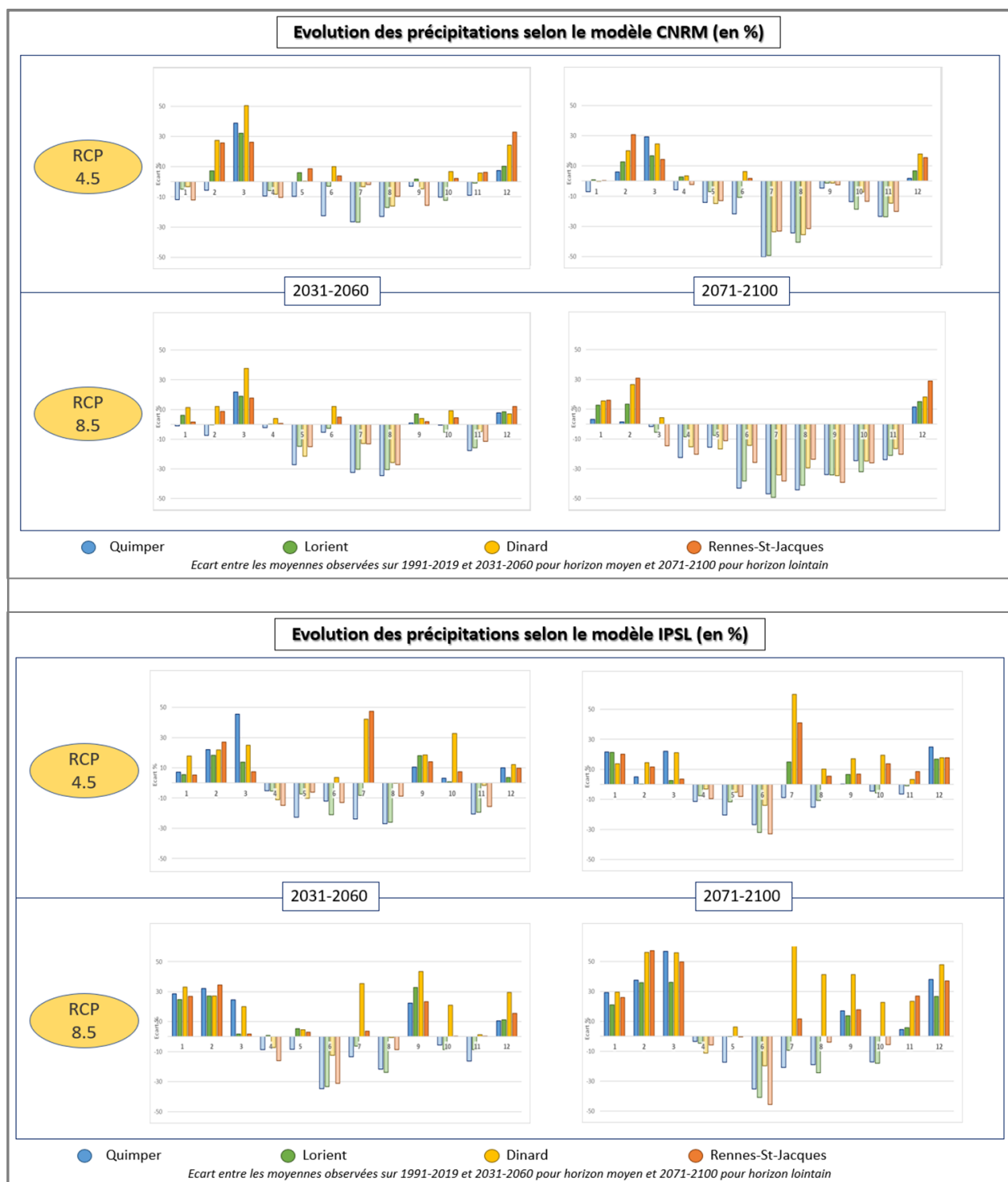


Figure 39 : Évolution des cumuls mensuels selon le modèle et le scénario

4.3.5. Regard sur l'évolution du nombre de jours de pluie

Le nombre de jours de pluie est un paramètre qui n'a pas été corrigé contrairement aux cumuls et températures. L'évolution constatée est donc issue des données brutes de modèles qui sont disponibles à l'Annexe 21. Celle-ci est assez logique au regard des évolutions du cumul, avec la *Figure 40* plusieurs commentaires peuvent être faits :

- Le modèle CNRM indique une baisse à horizon lointain du nombre de jours de pluie. D'abord, à horizon moyen, la différence Est/Ouest apparaît clairement avec une dizaine de jours de pluie supplémentaire sur un an à l'Est et à Mur-de-Bretagne contre une tendance à la baisse sur les stations de l'Ouest. À horizon lointain, cette baisse concerne davantage stations de l'Ouest Bretagne avec au moins 10 jours de pluie en moins. Le scénario RCP 8.5 amplifie cette baisse avec environ 10 jours secs supplémentaires par rapport au RCP 4.5 en fin de siècle.
- Le modèle IPSL indique une tendance à la hausse du nombre de jours de pluie dès l'horizon moyen. Celle-ci est de l'ordre d'une dizaine de jours de pluie supplémentaire à l'année. La différence entre les scénarios est faible à horizon moyen comme à horizon lointain. La tendance est similaire sur toutes les stations, seul Mur-de-Bretagne se démarque avec une vingtaine de jours de pluie en plus. À horizon lointain, la tendance est quasiment similaire, ce qui indique une stagnation des jours de pluie entre horizon lointain et moyen. Les jours de pluie tendraient donc à augmenter puis à se stabiliser.

Les tendances en termes de jours de pluie sont donc plutôt similaires à celles observées pour l'évolution des cumuls pluviométriques. Avec quelques différences toutefois, notamment une importante hausse du nombre de jours de pluie pour les deux modèles à Mur-de-Bretagne qui ne se traduit pas par une forte hausse de cumul. Il y a aussi une homogénéité spatiale pour les tendances du modèle IPSL alors que ce modèle présentait une disparité régionale importante concernant les tendances en termes de cumul.

Le découpage des jours de pluie selon l'intensité du cumul a été effectué à nouveau pour les données modélisées. Contrairement aux tendances observées, il n'y a pas à priori d'intensification des pluies pour les stations de l'Odé, à Rostrenen et Rennes (cf. partie 3.2.2). Celle-ci s'observe par contre à Quimper, Lorient et Dinard pour les deux modèles et scénarios (cf. Annexe 21). Cependant il est nécessaire de rappeler que ces stations littorales sont aussi les plus difficiles à modéliser. Ces espaces à l'interface entre la terre et la mer ont un climat particulier qui est très difficile à reproduire. Difficile donc de dire si cette évolution est réellement significative. En analysant l'évolution des cumuls par type de pluie, une stabilité de ces cumuls apparaît sur toutes les stations. Par exemple, pour les fortes pluies⁵, celles-ci représentent entre 9 et 10 % du cumul annuel total pour les deux modèles et scénarios, sauf pour l'IPSL scénario RCP8.5. Les autres types de pluies ne varient pas non plus selon le scénario et l'horizon. Même situation à Coray où le cumul des fortes pluies représente toujours 30 % du cumul annuel, sans aucune variation pour le modèle CNRM et tend à augmenter légèrement pour le modèle IPSL (cf. Annexe 22). Si ces cumuls varient peu, il est possible que ce soit dû à la méthode de correction des modèles dans Drias. Cette méthode quantile-quantile induirait ainsi une homogénéisation de l'intensité des pluies avec une suppression des extrêmes pluviométriques. Ou alors cette stabilité impliquerait une absence de signal climatique claire concernant l'évolution de l'intensité des pluies. Ce paramètre est difficilement modélisable car il ne dépend que de la variation de quelques jours de fortes pluies.

⁵ Jours où le cumul quotidien dépasse 20 mm

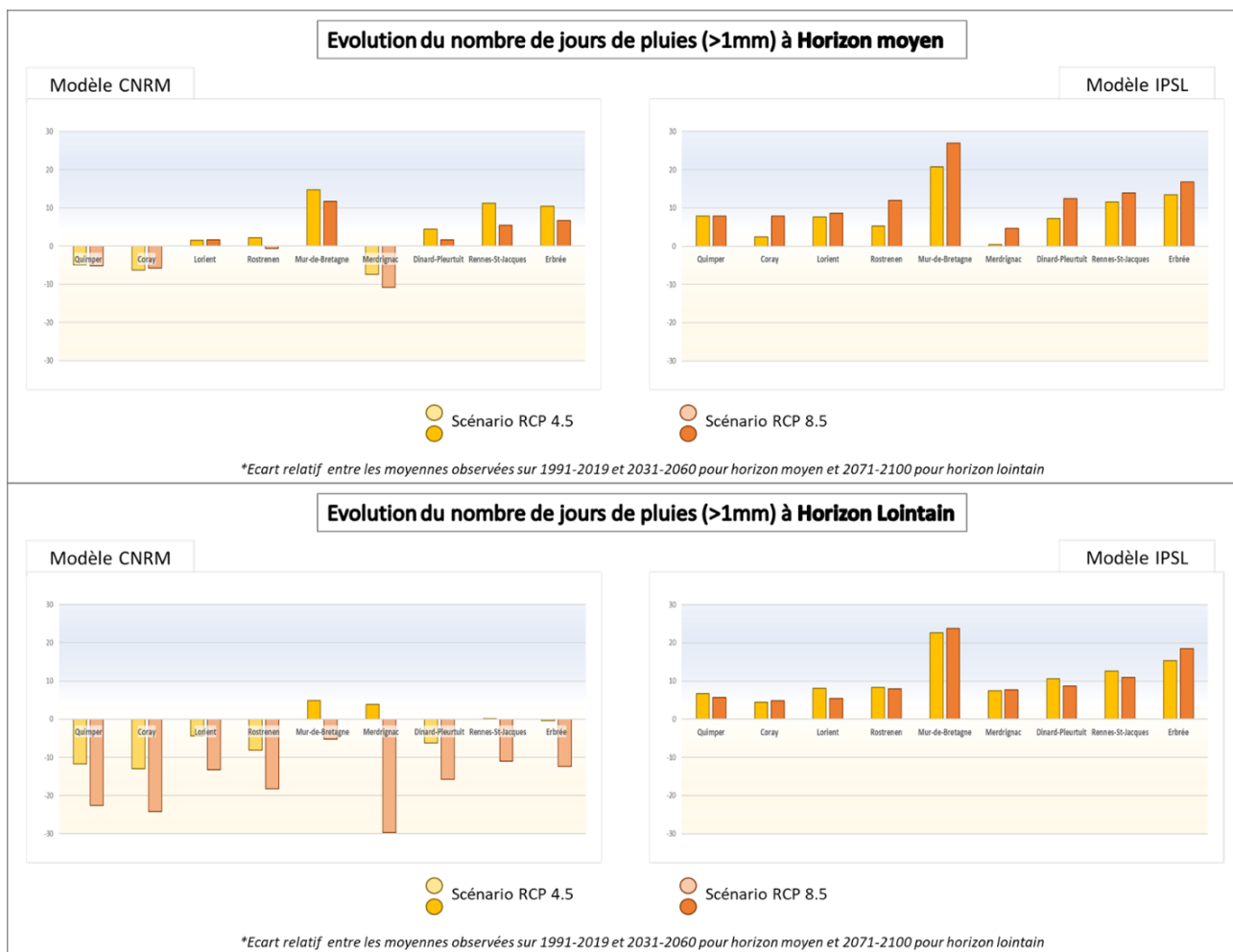


Figure 40 : Évolution du nombre de pluie selon le modèle et le scénario

Le nombre de jours de pluie ne semble pas être un paramètre à prendre en compte. La méthode de correction quantile-quantile utilisée sur le portail Drias induit une homogénéisation de l'intensité des pluies. Le paramètre sensible qu'est l'évolution du nombre de jours de fortes pluies ne peut pas être étudié, cela nécessite une étude plus approfondie.

4.3.6. Un changement climatique selon la typologie des climats de Köppen

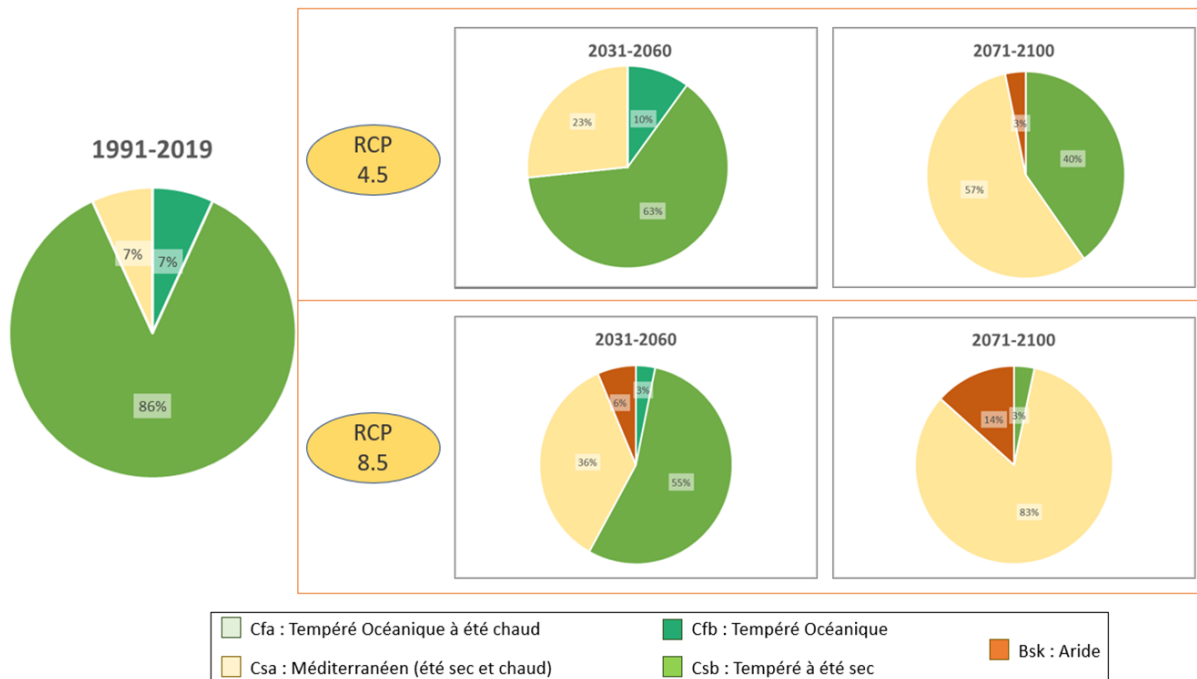
L'évolution des températures et des précipitations entraîne un changement dans les types de climats annuels de Köppen (TCA). Cette méthode permet de synthétiser l'évolution climatique observée en combinant températures et précipitations selon des seuils définis à l'annexe 1. Cette classification a déjà été utilisée pour qualifier le changement climatique en France depuis 1951 (Eveno *et al*, 2016) ou encore au Brésil (Dubreuil *et al*, 2017). Au niveau régional, aujourd'hui, le climat le plus fréquent en Bretagne est le climat de type Csb c'est-à-dire un climat tempéré à été sec (cf. 1.1.1)

- D'après la *Figure 41* le modèle CNRM montre que le climat de Bretagne tend à devenir un climat méditerranéen de type Csa. Dès l'horizon moyen, le climat méditerranéen représente un quart à un tiers des années à Rennes contre 7 % aujourd'hui. Le climat tempéré océanique quant à lui laisserait sa place en fin de siècle au climat aride à Rennes. Pour Quimper, il n'y aurait pas de climat aride mais les années tempérées océaniques de type Cfb diminuent fortement. En fin de siècle, le climat méditerranéen s'impose aussi à Quimper. Il représente plus de la moitié des années à Rennes et près d'un tiers à Quimper avec le scénario RCP 4.5. Le scénario 8.5 montre une domination absolue du climat méditerranéen qui représenterait 75% des années à Quimper et plus de 80% à Rennes à horizon lointain. À titre de comparaison, le climat de Rennes deviendrait équivalent à celui de Montpellier et Quimper proche de celui de Bordeaux d'après le RCP 8.5 (Eveno *et al*, 2016).
- D'après la *Figure 42*, pour le modèle IPSL, les années de types méditerranéennes ont aussi tendance à être plus fréquentes mais moins intenses. Le climat de type Csb reste le plus fréquent à Rennes et à Quimper avec le RCP 4.5. Le climat Cfb censé représenter le climat breton reste aussi bien présent malgré une baisse en fin de siècle au profit du climat méditerranéen. Avec le scénario RCP 8.5 la hausse de fréquence des climats méditerranéens est plus nette. Il devient majoritaire à Rennes en fin de siècle et représente une année sur trois à Quimper.

Les deux modèles ont une tendance similaire, le climat de type méditerranéen va devenir de plus en plus fréquent pour être majoritaire en fin de siècle. Pour le modèle CNRM cela va intervenir plus rapidement et avec plus d'intensité. La baisse de cumul prévue selon le modèle CNRM entrainerait même l'apparition d'année de type Bsk au climat aride. Il n'y a pas, dans la série historique, Bsk selon les critères choisis (cf. Annexe 1). Dans d'autres études, l'année 1989 apparaît comme étant une année de type Bsk (Dubreuil *et al*, 2018). Ces années très peu arrosées feront leur apparition en fin de siècle d'après le RCP 4.5 et dès l'horizon moyen d'après le RCP 8.5. Le modèle IPSL montre une persistance du climat Cfb jusqu'en fin de siècle avec apparition du climat Cfa marqué par des étés chauds mais pas de saison sèche. Ainsi le climat méditerranéen devient plus fréquent à Rennes et fait son apparition à Quimper dans les deux modèles et scénarios.

Le changement climatique se traduit par un renforcement du climat de type méditerranéen en Bretagne. Celui-ci devrait devenir à terme majoritaire à Rennes et assez fréquent à Quimper.

Evolution de la fréquence de TCA à Rennes selon le modèle CNRM



Evolution de la fréquence de TCA à Quimper selon le modèle CNRM

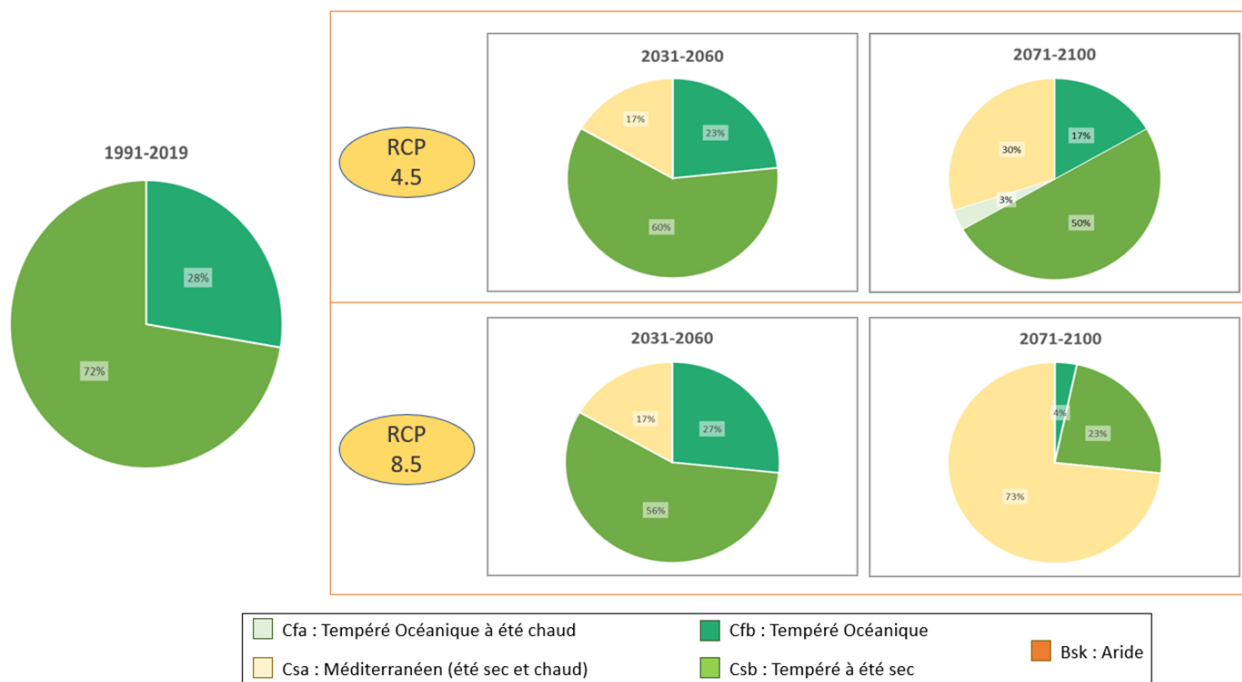
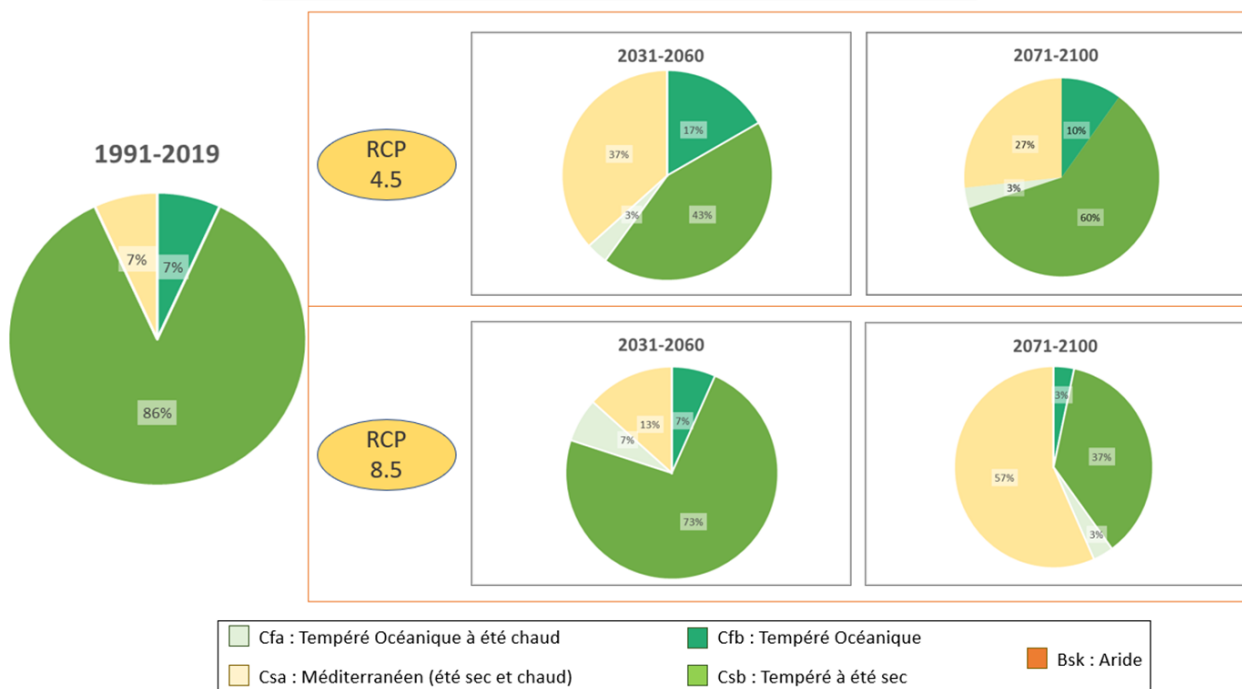


Figure 41 : Evolution de la fréquence de type de climat annuel à horizon moyen et lointain à Rennes et Quimper d'après le modèle CNRM

Evolution de la fréquence de TCA à Rennes selon le modèle IPSL



Evolution de la fréquence de TCA à Quimper selon le modèle IPSL

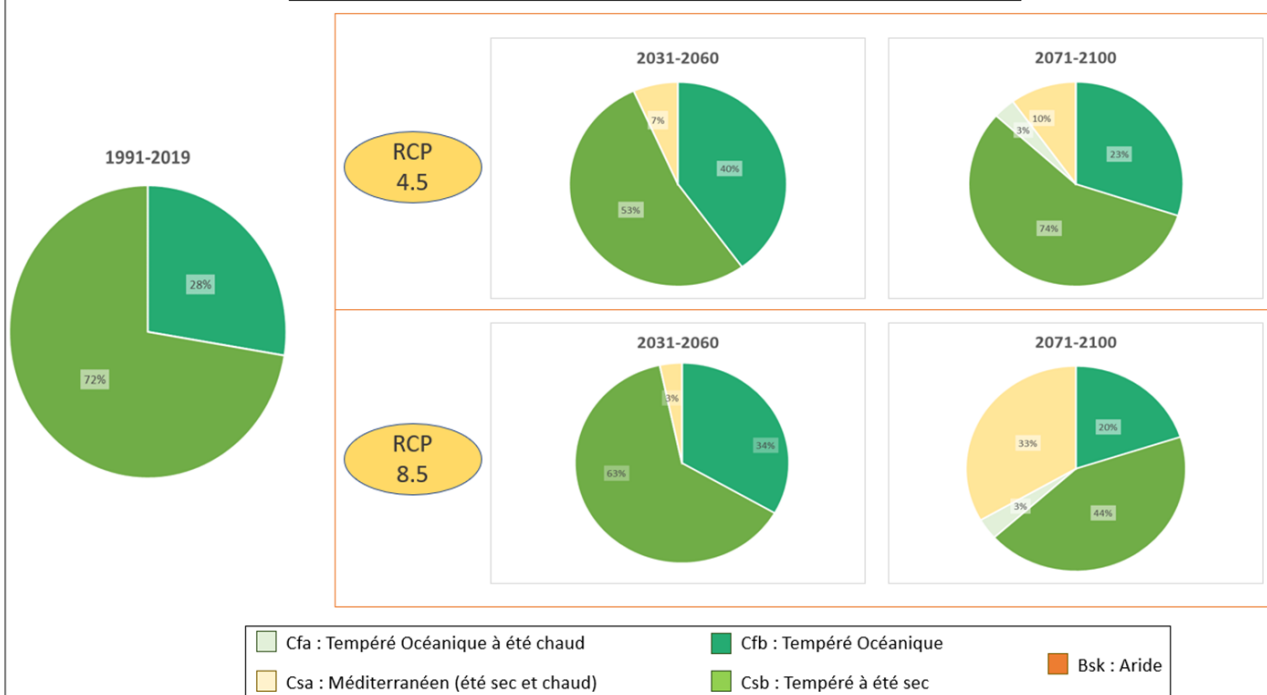


Figure 42: Evolution de la fréquence de type de climat annuel à horizon moyen et lointain à Rennes et Quimper d'après le modèle IPSL

4.4 Tentative de modélisation du risque de sécheresse

L'étude de l'évolution du risque de sécheresse a été appréhendée par le bilan hydrique. Cette partie se concentre sur une comparaison Rennes/Quimper car ces stations sont les deux opposées en termes de risque de sécheresse. Le SPI et les diagrammes ombrothermiques présentés pour la série historique (cf parties.3.3.2 et 3.3.4) ont aussi été testés. Les observations peuvent être brièvement résumées ici :

- Le SPI montre une tendance à la hausse des périodes sèches à Rennes et Quimper avec le modèle CNRM. Avec le modèle IPSL ce n'est pas aussi visible et dépend du scénario. Le scénario 4.5 tend vers une hausse des périodes humides tandis qu'il n'y a pas réellement de tendance avec le RCP 8.5 (cf. Annexe 23).
- Les diagrammes ombrothermiques montrent l'apparition de saisons sèches à Rennes et Quimper pour le CNRM. Celles-ci concerneraient les mois de juillet et août. Avec le modèle IPSL, pas de période sèche d'après ces diagrammes ombrothermiques, la courbe des températures est cependant très proche des cumuls pluviométriques ($P \pm 2T$) (cf. Annexe 24).

Ce bref résumé permet de supposer une augmentation du risque de sécheresse en Bretagne. Une augmentation qui serait plus marquée à l'Est Bretagne et amplifié par le scénario 8.5. Ces premiers éléments ne permettent pas une quantification de l'événement ni une quantification de son évolution. Le bilan hydrique a vocation à préciser cette évolution du risque de sécheresse. Avant de présenter les résultats, la méthode de calcul de l'ETP est présentée.

4.4.1. Une approche de l'ETP par estimation du rayonnement

L'ETP est un paramètre qui ne peut pas être modélisé aujourd'hui, les biais sont trop importants. Il doit donc être calculé avec les données des sorties de modèle. La formule utilisée par Météo-France induit l'usage de nombreux paramètres climatiques tels que le vent, l'humidité ou le rayonnement. Ils sont disponibles avec le modèle du CNRM. Mais l'usage de ces nombreux paramètres revient à multiplier les incertitudes issues de la modélisation. De plus l'objectif est de comparer les sorties des deux modèles. Pour ces raisons, la recherche de l'ETP s'est tournée vers d'autres méthodes que celle de Météo-France.

Toute la recherche autour de la méthode d'ETP est disponible en Annexe 25 avec d'abord une partie sur la recherche de la formule (cf. 25.1) et des précisions sur la méthode utilisée (cf. 25.2). Ici une synthèse de ces résultats est présentée :

L'objectif est de trouver une méthode de calcul de l'ETP qui soit la plus proche possible de celle utilisée par Météo-France. Cela s'est traduit par des tests de sensibilités des différentes formules d'ETP afin de limiter la marge d'erreur et trouver ou adapter une formule pour modéliser au mieux son évolution. L'ETP Météo-France est calculée à partir d'une adaptation de la formule de Penman (Ducharne, 2002) est considéré comme la référence. Cette ETP de référence est ainsi comparée avec les données calculées selon les formules de Turc et Thornthwaite. Ces deux méthodes ont l'avantage d'être assez simples d'utilisation et de ne dépendre que d'un paramètre.

La méthode de Thornthwaite est l'une des premières à avoir été utilisée. D'anciennes études locales employaient l'ETP Thornthwaite pour faire des bilans hydriques (Mounier, 1965). C'est une approche de l'ETP avec la température comme seule variable (Thornthwaite, 1948). L'évolution du rayonnement est estimée par un facteur correctif mensuel. Ainsi, dépendre d'une seule variable limite les risques d'erreurs et la marge d'erreur induite dans l'utilisation des différents paramètres des modèles climatiques. L'ETP Turc dépend des températures moyennes et du rayonnement global, elle peut se calculer à échelle quotidienne ou échelle mensuelle (Turc, 1955). L'ETP Turc est ici calculée au pas de temps mensuel.

Les formules des deux méthodes sont décrites ci-dessous :

ETP Thornthwaite	
$ETP_{th} = 16 \times \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a \times k$	
Avec T = Température moyenne mensuelle (en °C) I = indice thermique annuel, c'est la somme des indices thermiques mensuelles $I = \sum_{i=1}^{12} i \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$ $a = (6,75 \times 10^{-7} \times I^3) - (7,71 \times 10^{-5} \times I^2) + (1,79 \times 10^{-2} \times I) + 0,49$ k = coefficient correctif mensuel obtenu par une table spécifique	
ETP Turc	
$ETP_{turb} = n \times 0,013 \times (Rg \times 50) \times \left(\frac{t}{t + 15} \right)$	
Avec n = nombre de jours Rg = Rayonnement global (en cal/cm²/jour) t = température moyenne de l'air sur la période (°C)	

La *Figure 43* montre les écarts entre ETP Météo-France, ETP Thornthwaite et ETP Turc :

L'ETP Thornthwaite a tendance à sous-estimer l'ETP MF d'au moins 50 mm à l'année. La sous-estimation est plus forte lors de la saison d'été avec un écart inférieur de plus de 20 mm en avril. Ce qui n'est pas optimal en vue de calculer un bilan hydrique. Les tendances sont les mêmes pour les deux stations. La forme des écarts ne semble pas due au hasard. Une courbe en forme sinusoïdale laisse penser que les écarts sont issus d'une mauvaise reproduction du rayonnement. De plus, l'ETP Thornthwaite varie très peu d'une année à l'autre. Une étude comparant neuf formules à partir de données de 33 stations réparties dans sept pays a démontré que les formules fondées essentiellement sur la température sous-estiment l'ETP, notamment en été. Cela s'explique par variations de température qui ont environ un mois de retard sur celle du rayonnement solaire (Choisnel *et al.*, 1992). L'ETP Thornthwaite n'est d'ailleurs pas recommandé pour faire le bilan hydrique en Bretagne (Dubreuil, 1994).

Avec l'ETP Turc, l'écart est opposé entre Rennes et Lorient. Alors qu'à Rennes l'ETP est sous-estimée toute l'année, elle est surestimée à Lorient d'avril à octobre. Il est à noter que l'écart reste moins important que pour Thornthwaite. L'ETP Turc en tant que tel n'est pas adaptée à la modélisation principalement parce que les tendances ne sont pas les mêmes d'une ville à l'autre. L'ETP Turc annuelle reproduit bien la variabilité interannuelle avec une sous-estimation moyenne de 50 mm.

Donc la formule de Turc apparaît comme étant la plus proche de celle de Météo-France. Pour la modélisation, le problème concerne la reproduction du rayonnement. Les données de rayonnements sont mesurées par Météo-France par différents appareils qui mesurent le rayonnement total ou diffus. Pour le rayonnement global, les données sont mesurées par un pyranomètre qui mesure le rayonnement direct et diffus venant de toutes les directions. Les données sont fournies en J/cm², pour avoir le rayonnement en cal/cm² comme précisé dans la formule de l'ETP Turc, il suffit de diviser les données Météo-France par 4,18.

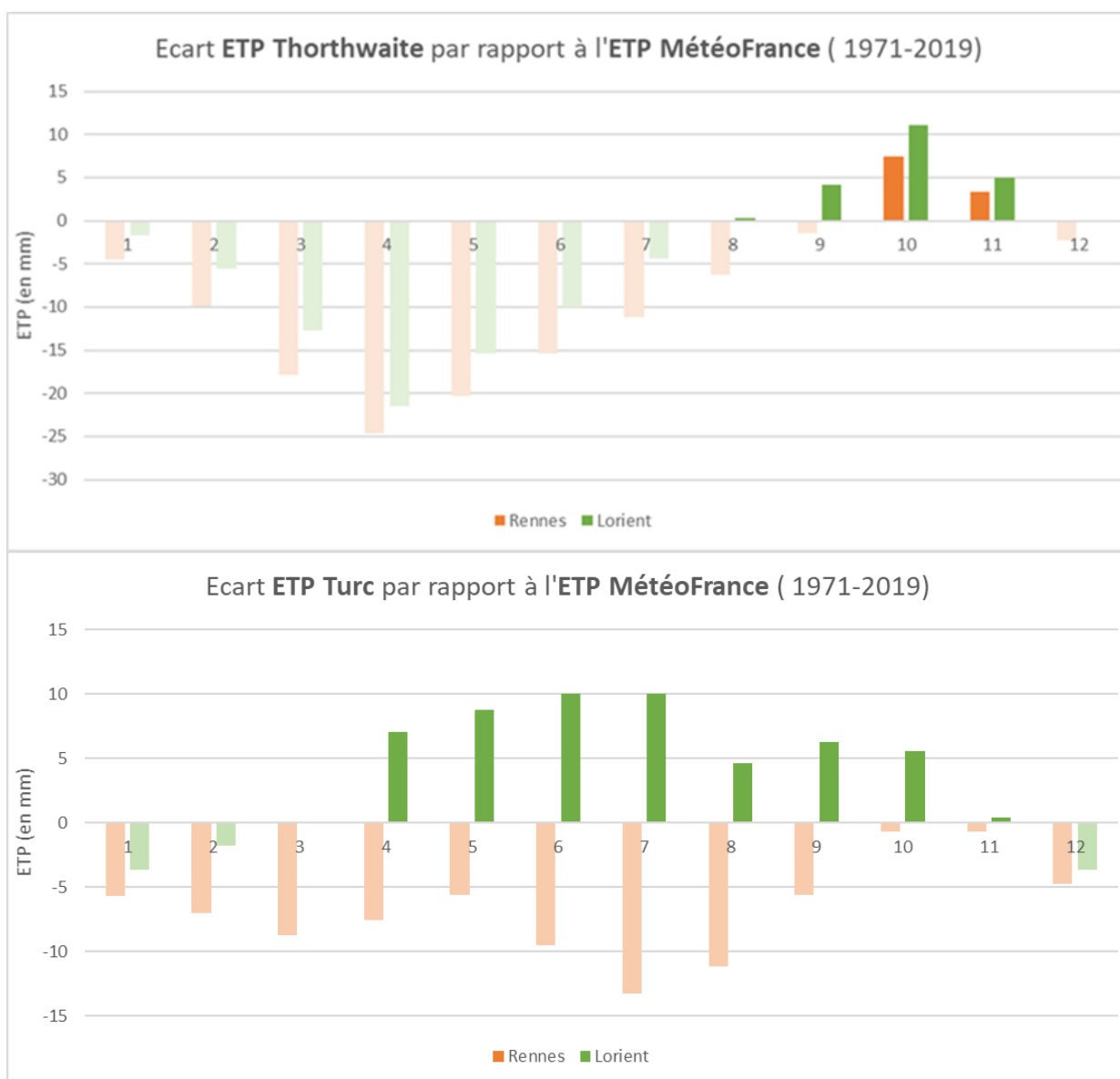


Figure 43 : Écart entre l'ETP Météo-France , ETP Thorthwaite et ETP Turc à Rennes et Lorient

Les **données de rayonnement** sont en effet nécessaires pour ce calcul d'ETP. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour approcher ce rayonnement futur avec d'abord un travail sur les données moyennes issues de rayonnements moyens mesurés en France (Lebourgeois et Piedallu, 2005). Cette approche du rayonnement ne donne pas de résultats satisfaisants. La variabilité interannuelle de l'ETP Turc devient très faible puisque les données de rayonnement sont stables dans le temps. Cela revient finalement à s'affranchir de ce paramètre rayonnement et à faire varier l'ETP uniquement avec la température. Autrement dit, il n'y a plus de différence avec l'ETP Thornthwaite, c'est pourquoi les variations entre ces ETP sont d'ailleurs très similaires (cf. Annexe 25).

Finalement une méthode de calcul du rayonnement a été trouvée à partir de l'amplitude thermique de chaque mois. Pour être précis, **le rayonnement est estimé à partir d'une relation préexistante entre le rayonnement mensuel mesuré et l'amplitude thermique mensuelle**. Le calcul de l'ETP Turc est basé sur une estimation du rayonnement établi par une régression linéaire entre l'insolation mesurée et l'amplitude thermique moyenne mensuelle. La régression linéaire s'effectue avec les données mesurées sur la série historique entre l'écart de température et l'insolation (INST). D'abord estimé à l'année, le rayonnement a par la suite été estimé mensuellement.

Pour Quimper, les résultats de cette méthode ne sont pas satisfaisants en utilisant les formules de rayonnement issues de la régression à Quimper. L'ETP augmente beaucoup trop vite en dépassant même le niveau de Rennes. Le risque de sécheresse deviendrait même plus élevé à Quimper qu'à Rennes, ce qui paraît très improbable. Cela peut s'expliquer par le fait que l'amplitude thermique est beaucoup moins variable spatialement selon les modèles. Or ce paramètre est essentiel pour le calcul du rayonnement et donc de l'ETP. L'amplitude thermique est donc quasiment égale à Rennes et à Quimper selon les deux modèles. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé : l'amplitude thermique est plus élevée à Rennes de 1 à 2°C notamment en été.

Cette homogénéité spatiale de l'amplitude thermique explique en partie la mauvaise reproduction de l'ETP à Quimper. En effet, l'amplitude thermique est plus faible sur les données observées que sur les données modélisées à Quimper. Or, la relation entre rayonnement et amplitude thermique est basée sur ces données observées. La formule de Quimper a donc un coefficient multiplicateur plus important qu'à Rennes ce qui fait augmenter plus rapidement l'ETP en cas d'augmentation de l'amplitude. Cette homogénéité de l'amplitude modélisée crée donc un différentiel d'ETP important. Cependant, il est possible d'utiliser les formules de rayonnement de Rennes à Quimper.

Les formules de rayonnement de Rennes ont donc été utilisées pour l'estimation du rayonnement à Quimper. Les résultats moyens présentés par la *Figure 44* sur la période 1991-2019 montrent une proximité importante entre l'ETP Météo-France moyenne et l'ETP Turc moyenne pour les deux stations. Les écarts sont au maximum de 10 mm mensuel en été. L'ETP tend à être légèrement surestimée en été à Rennes, ce n'est pas le cas à Quimper où elle est sous-estimée de quelques millimètres tous les mois de l'année à part en août. **L'ETP Turc avec rayonnement estimé est donc très proche en moyenne de l'ETP Météo-France en moyenne sur la série historique.**

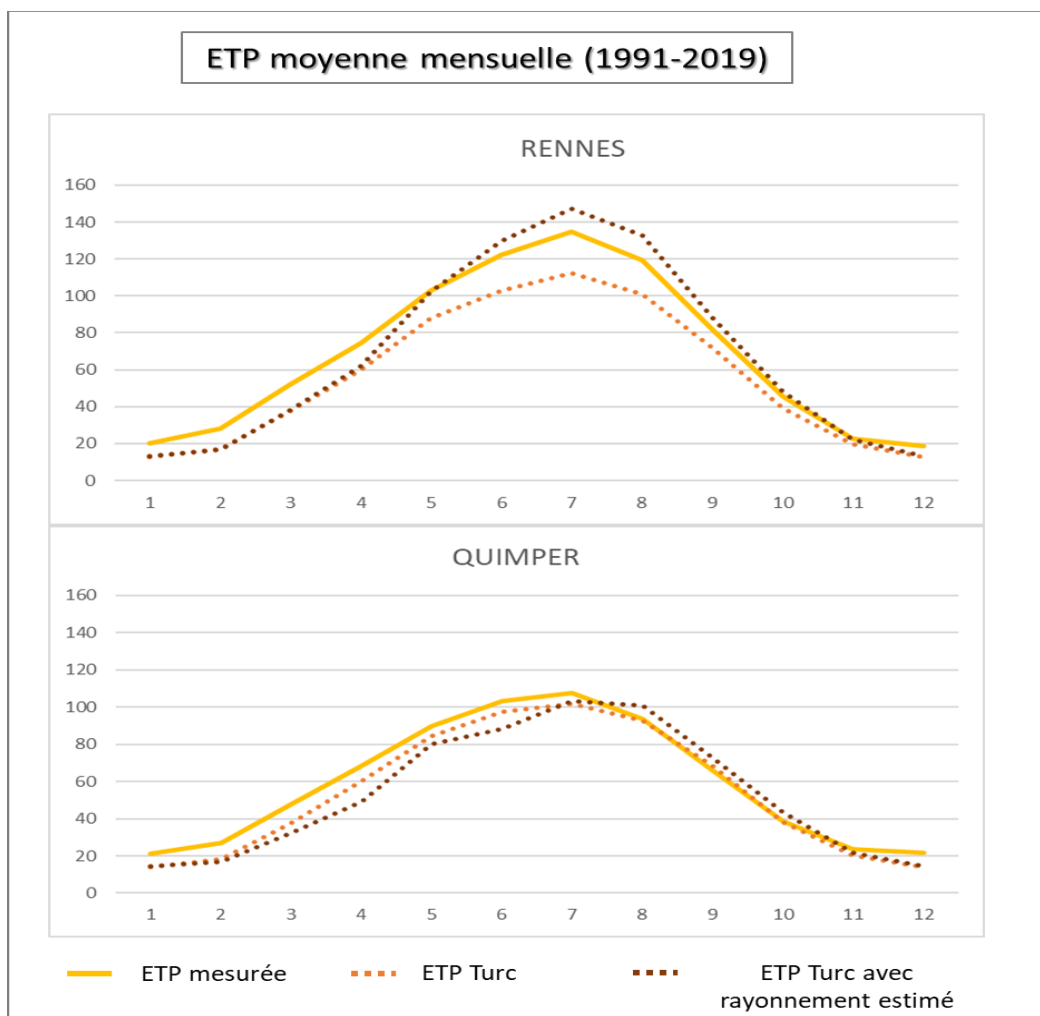


Figure 44 : Comparaison des ETP Météo-France, ETP Turc et ETP Turc avec rayonnement estimé

L'ETP future est ensuite calculée à partir des températures modélisées selon le scénario et le modèle. Les températures sorties de modèles sont préalablement corrigées selon les biais identifiés par modèles et par stations qui sont précisées en Annexe 15.

Les Figure 45 et Figure 46 montrent l'évolution de l'ETP annuelle selon les modèles et les scénarios :

- Le **modèle CNRM** affiche une augmentation marquée de l'ETP, entre + 200 et + 250 mm d'ici la fin du siècle selon le scénario. L'ETP maximale de 2003 serait dépassée quasi systématiquement après 2050 d'après le RCP 8.5. L'ETP de Quimper atteindrait même le niveau de 2003 de Rennes en fin de siècle. Avec le RCP 4.5, une année sur trois sera au niveau ou supérieur au maximum.
- Le **modèle IPSL** présente un biais de 100 mm environ entre la série historique et la série modélisée. Ce biais est peut-être dû à la sous-estimation de l'amplitude thermique (cf. Annexe 25). Les tendances sont aussi à la hausse de l'ETP annuel à hauteur de + 50 à + 100 mm selon le scénario. Cette hausse est aussi moins marquée à Quimper. Il y a donc une diversité spatiale dans l'intensité de la hausse de l'ETP.

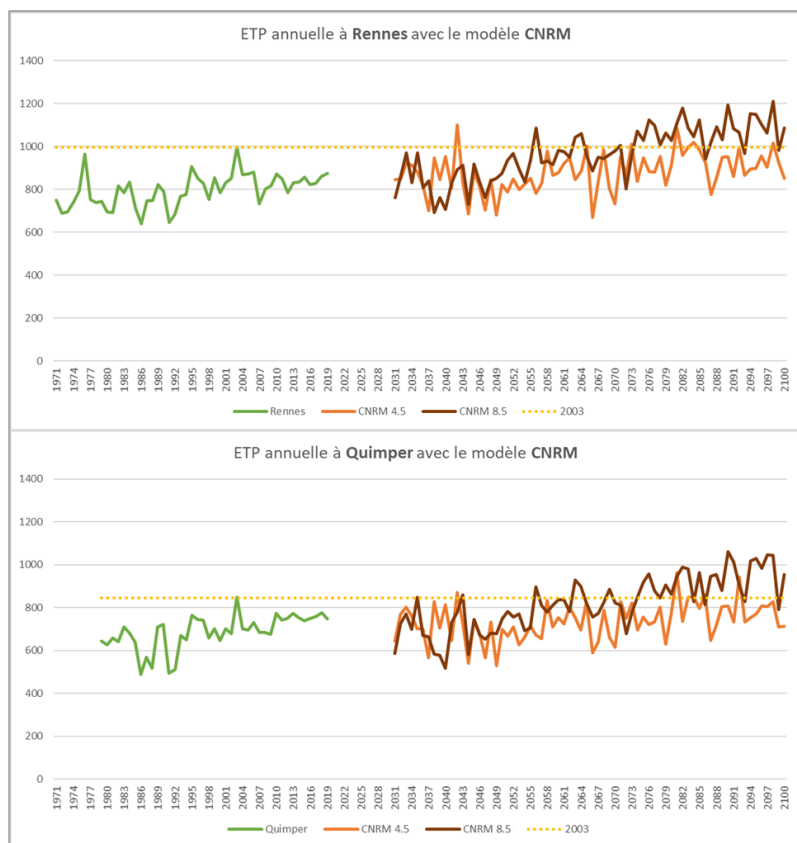


Figure 45 : Évolution de l'ETP annuelle à Rennes et Quimper avec le modèle CNRM

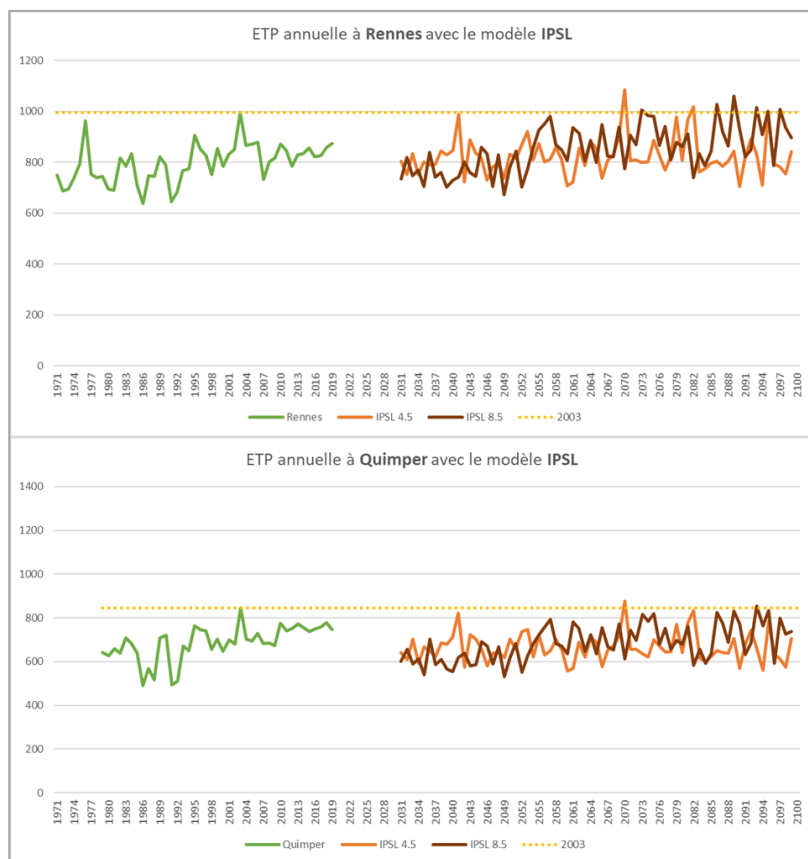


Figure 46 : Évolution de l'ETP annuelle à Rennes et Quimper avec le modèle IPSL

L'ETP est donc calculée selon la méthode de Turc avec un rayonnement estimé sur la base d'une relation préexistante entre le rayonnement et la température avec les mesures sur la série historique. Cette méthode est celle qui apporte des résultats proches de l'ETP Météo-France. Il ne faut cependant pas oublier qu'il s'agit d'une approche théorique et les sources d'incertitudes restent grandes. La marge d'erreur est de moins de 10 % sur la série historique mais rien n'indique que celle-ci soit au même niveau avec les modélisations futures.

4.4.2. Une grande incertitude sur l'évolution du risque de sécheresse

Les bilans hydriques ont été calculés à partir des précipitations des sorties de modèles sans corrections ainsi qu'avec l'ETP dont la méthode de calcul a été précisée précédemment. Les bilans hydriques de Rennes et Quimper sont disponibles aux annexes 26 et 27. Les résultats sont présentés à titre indicatif car les biais sont importants du fait de l'approche de l'ETP et de la modélisation en elle-même. D'autres études plus poussées sur le sujet en prenant en compte la nature du sol ont montré une tendance à la hausse du risque de sécheresse en Bretagne (Lamy, 2013 ; Dubreuil, 1993 ...).

Le risque de sécheresse tend clairement à augmenter, c'est ce qui ressort des bilans hydriques présentés ci-après. L'intensité du phénomène n'est cependant pas la même selon le scénario et le modèle. Pour les deux modèles, le scénario RCP4.5 montre un déficit d'évapotranspiration moins élevé mais qui tend à augmenter. Le scénario RCP 8.5 est plus alarmant, il présente une forte hausse de DE. La valeur maximum de DE atteinte en 1976 ou 1989 serait fréquemment dépassé en fin de siècle pour les deux modèles.

Le **modèle CNRM** est très alarmant quant à l'évolution du risque de sécheresse. Dans les deux scénarios, une situation type sécheresse 1976 ou 1989 deviendrait la norme en fin de siècle. Dès l'horizon moyen, au moins la moitié des mois de juillet et d'août sont considérée comme « aride ». La situation empire en fin de siècle avec au moins 70 % de ces mois considérés comme arides, et même presque 100 % pour le RCP 8.5. Des années avec quatre mois arides pourront même être observées. La recharge complète des réserves se retarde, celle-ci intervient en décembre-janvier pour Rennes en fin de siècle soit un recul de deux mois et octobre pour Quimper. Et tous les mois de la saison d'étiage sont concernés par une hausse du déficit d'évapotranspiration. La hausse du risque de sécheresse est donc observée sur toute la Bretagne.

Pour le **modèle IPSL**, la situation est moins intense mais la hausse du DE s'observe aussi clairement à Rennes. La hausse est surtout visible avec le RCP8.5. Les fréquences de mois secs et arides sont équivalentes à celles observées à horizon moyen et tendent à augmenter à Rennes à horizon lointain. Des années avec trois mois arides sont observables à Rennes. Pour Quimper, il y a une relative stabilité de la sécheresse avec le 4.5 et une légère augmentation avec le 8.5.

Donc il y a une convergence des deux modèles vers une hausse du risque de sécheresse à la fin du siècle. Dans tous les cas, il semble que des années critiques avec trois ou quatre mois arides interviennent à Rennes au cours du siècle. À Quimper, cela dépend du modèle puisque le modèle IPSL montre une plus grande disparité dans l'évolution de ce risque. La tendance y est bien plus forte à Rennes qu'à Quimper là où le modèle CNRM présente une hausse assez homogène des sécheresses. Les résultats en termes quantitatifs sont à regarder avec prudence car la méthodologie présente de nombreux biais et nécessiterait une approche plus poussée de la question.

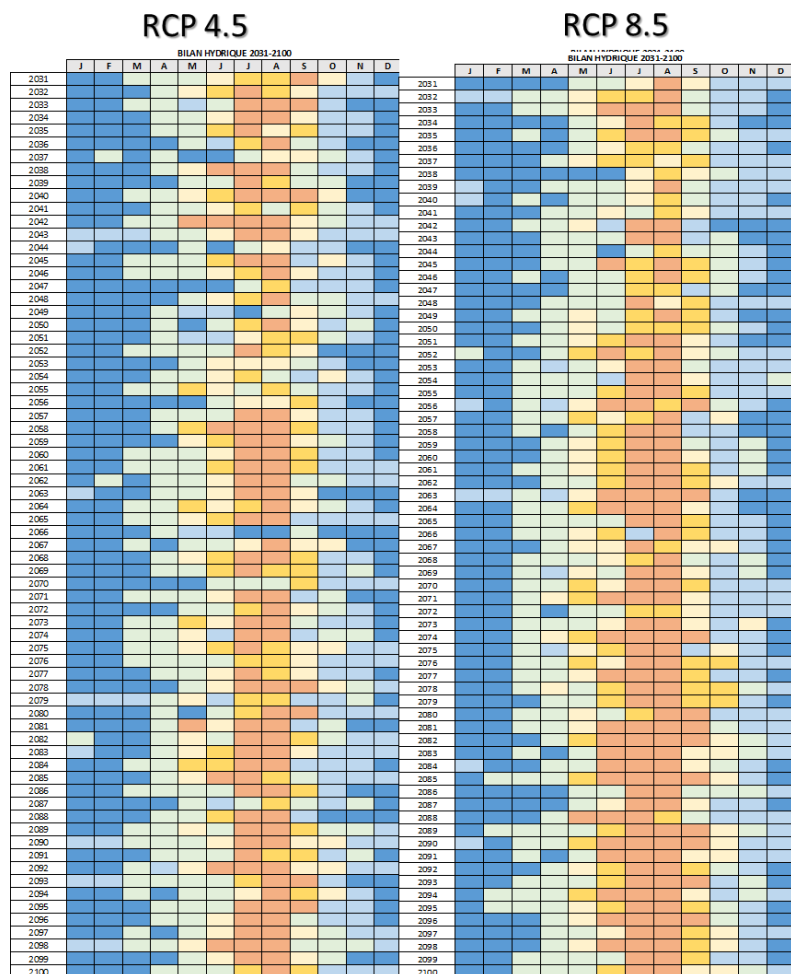


Figure 48 : Évolution du bilan hydrique à Rennes selon le modèle CNRM

ARIDE	P<ETP et DE>100
SEC	P<ETP et 60<DE<=100
SUB SEC	P<ETPet30<DE<=60
FAIBLE DEFICIENCE	P<ETP et DE<=30
HUMIDE	P>=ETP et RU <= RU0
HYPER HUMIDE	P> ETP et S>0

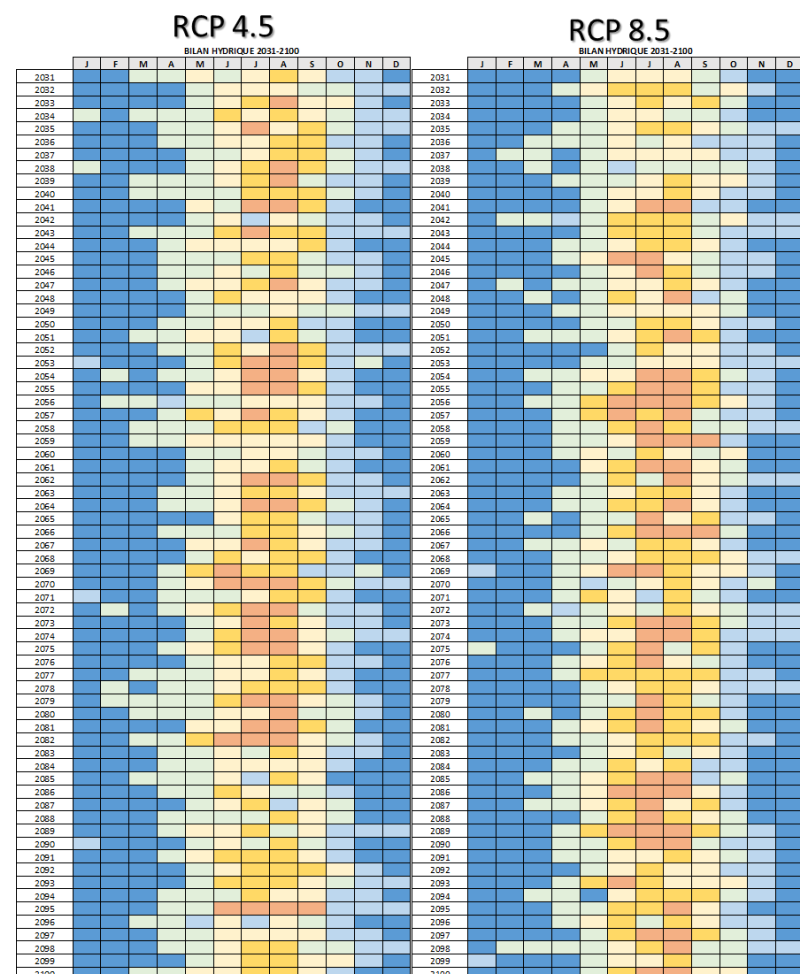


Figure 47 : Évolution du bilan hydrique à Rennes selon le modèle IPSL

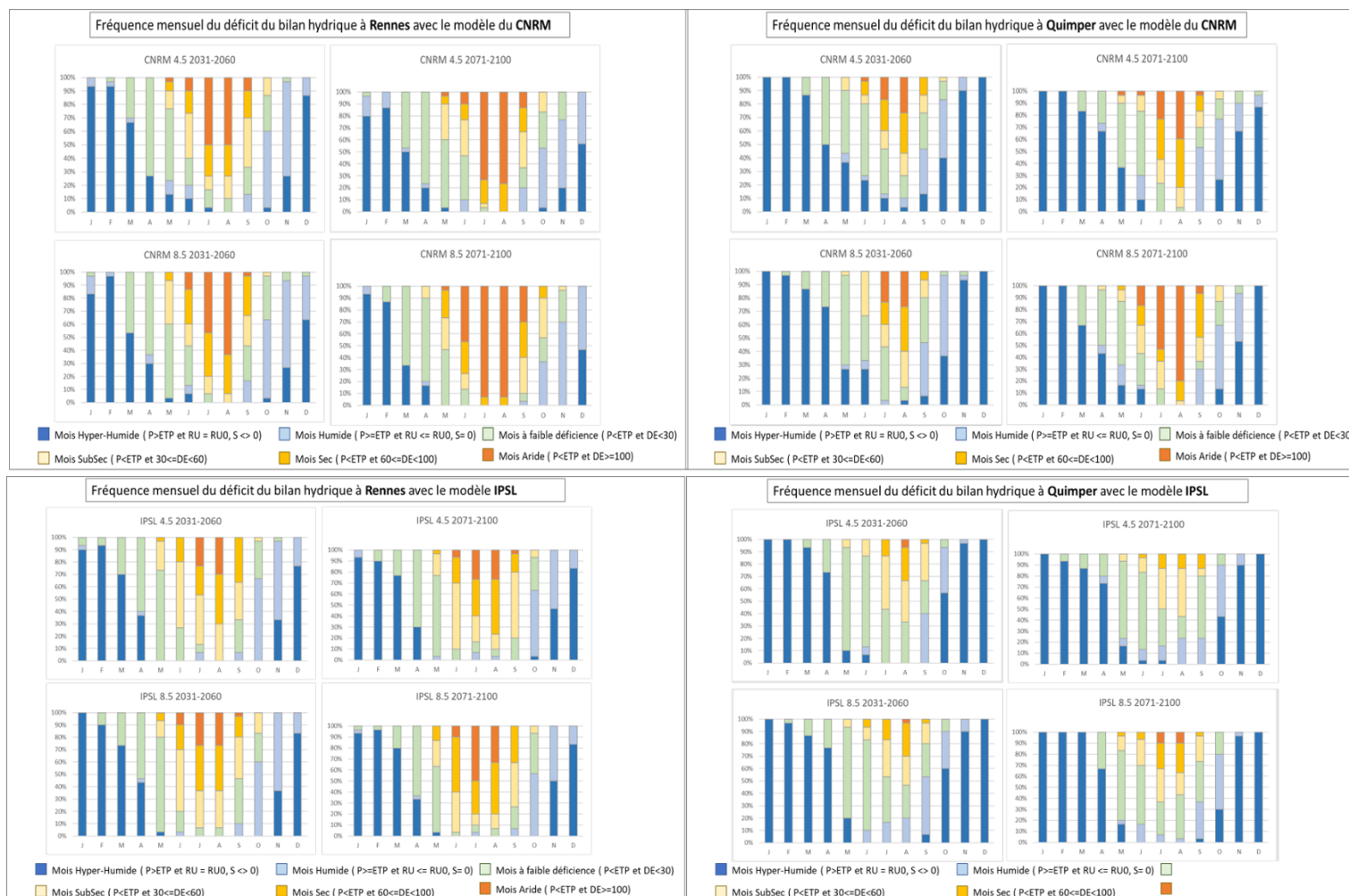


Figure 49 : Fréquence mensuelle de déficit du bilan hydrique à Rennes et Quimper selon le modèle et le scénario

5. Discussion des résultats

5.1. Quels indicateurs pertinents ?

Après avoir présenté l'ensemble des indicateurs et leurs résultats pour les quatre bassins versants, il est possible de définir la pertinence de ceux-ci. La pertinence des indicateurs n'a pas été évaluée statistiquement. Cependant il ressort de l'étude des indicateurs et éléments qui sont plus pertinents pour analyser l'évolution de la pluviométrie.

D'abord il a été montré l'importance des jours de forte pluie dans le cumul total. La **décomposition des jours de pluie selon l'intensité de ces pluies** s'avère essentielle pour mener un suivi temporel. C'est notamment le cas pour l'étude du risque d'inondation. Le nombre de jours de forte pluie est un paramètre sensible dont la fluctuation influence grandement le cumul total. La variabilité interannuelle des cumuls pluviométriques est fortement influencée par ces quelques jours de pluie forte. De plus, la succession de jours de pluie forte entraîne un fort apport d'eau qui peut engendrer des inondations. Le seuil de ces fortes pluies peut être de 20 mm ou 10 mm. La décomposition des pluies peut d'ailleurs être effectuée en deux classes seulement : les pluies « faibles » où le cumul est situé entre 1 et 10 mm et les pluies « fortes » supérieures à 10 mm quotidiens.

Au niveau des échelles temporelles, les cumuls peuvent s'observer à trois niveaux : annuel, saisonnier et mensuel. Pour les cumuls annuels, il est préférable d'observer les résultats à échelle des années hydrologiques qui sont plus proches de la réalité observée pour les débits. Par exemple, l'année 1976 n'est pas parmi les années civiles les moins arrosées. Pourtant il s'agit d'une année à sécheresse majeure. Cette même année est la première ou deuxième moins arrosée à échelle de l'année hydrologique. Concernant les cumuls saisonniers, les résultats sur les saisons météorologiques (cf. 3.1.3) sont relativement similaires à ceux des saisons hydrologiques (cf. 3.1.2). Les saisons hydrologiques correspondent plus à la réponse des cours d'eau par rapport à cette pluviométrie, les résultats par saisons hydrologiques suffisent donc à comprendre cette évolution. Cette remarque est valable pour l'ensemble des indicateurs, y compris pour les tendances. Donc les tendances climatiques peuvent s'observer à échelle de l'année hydrologique, des saisons hydrologiques et des mois.

Les tendances sont identifiables soit entre deux périodes à durée égale, soit sur un suivi temporel continu. Il est recommandé d'utiliser des durées de 30 ans pour des écarts moyens entre deux périodes (OMM, 2017). Pour la modélisation, l'écart relatif est meilleur pour indiquer des évolutions convergentes ou divergentes selon le modèle ou la station.

Sur le risque de sécheresse en Bretagne l'approche par le SPI ne donne pas de résultats satisfaisants. Il permet une approche simpliste du risque en ne prenant en compte que les précipitations. Mais les résultats du SPI ne sont pas en accord avec les tendances observées et ressenties ni avec les résultats d'études à ce sujet. Il est préférable d'utiliser le bilan hydrique pour estimer le risque de sécheresse. Cet indicateur est plus performant parce qu'il permet une réelle quantification du manque d'eau. D'autres indicateurs peuvent être utilisés pour illustrer le potentiel manque d'eau comme par exemple les diagrammes ombrothermiques.

Enfin, **la typologie des climats de Köppen** donne un bilan global du changement climatique. Il permet de synthétiser sans détail les effets du changement climatique.

5.2. Limites

Cette étude présente de nombreux biais qui tendent à augmenter l'incertitude sur la validité des résultats. Ces incertitudes proviennent de différents choix faits tout au long de l'étude afin de synthétiser l'évolution climatique.

Sur le choix des bassins versants et stations, le choix a été fait de se limiter à quatre bassins versants. Ceux-ci représentent la diversité climatique bretonne, cependant il manque tout de même la côte Nord-Bretagne qui n'est pas représentée. La diversité des stations a montré un fort gradient entre l'Est et l'Ouest qui peut s'observer aussi bien sur la série historique que sur les tendances modélisées. Toutefois il n'a pas été possible de détecter la présence d'un gradient entre le Nord et le Sud, notamment entre deux stations situées à une même longitude. La disponibilité des séries de données est aussi un facteur limitant pour toutes études climatiques. Les critères de sélection des stations (cf. partie 2.2) doivent être respectés pour identifier au mieux les tendances. L'homogénéité de la série de données est un facteur essentiel pour une analyse de l'évolution temporelle. Or, aujourd'hui, il existe peu de longues séries de données homogénéisées. En tout cas autour des bassins versants sélectionnés il n'y a pas plus de stations que celles qui sont utilisées. De plus les stations sélectionnées ne sont pas nécessairement situées dans le bassin versant mais proches de celui-ci. Même si les stations sont toutes assez proches des bassins versants d'étude, cela peut engendrer des biais d'interprétation au niveau du bassin versant. Le faible nombre de séries de données homogénéisées rend donc difficile des études climatiques à échelle des bassins versants. Cela nécessite une rigueur dans la sélection des stations, il ne faut pas prendre un maximum de station mais ne garder que celles qui ont été homogénéisées.

Les tendances d'évolution des cumuls pluviométriques ne sont pas forcement significatifs. En effet, les tendances sont principalement observées par l'écart entre deux moyennes sur des périodes de trente ans. Or, cela donne parfois des résultats contradictoires avec l'évolution observée d'année en année, notamment au pas de temps mensuel. Cela traduit des tendances qui ne sont pas significatives. Même si les stations sont homogénéisées, les évolutions naturelles de pluviométrie ne suivent pas forcément une logique identifiable et n'ont pas forcément une évolution significative. Les évolutions de pluviométries sont influencées par la variabilité climatique interannuelle dont dépendent des phénomènes complexes. La présence d'années très arrosées ces dernières années donne ainsi une tendance à la hausse que ce soit par l'écart de deux moyennes ou le suivi annuel. Cependant, les années les moins arrosées restent elle au même niveau au cours du siècle. À Mur-de-Bretagne par exemple, les années les moins arrosées sont toutes autour de 700 mm (*Figure 20*). La significativité des tendances peut être définie par des tests statistiques.

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 générale définie au pas de temps horaire (CEREMA, 2014). 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.

La modélisation climatique implique beaucoup de biais et incertitudes qui ont été en partie corrigés dans cette première approche exploratoire des données. Cette incertitude est encore plus forte à horizon lointain, ce qui rend les données en fin de siècle peu exploitables. La divergence des modèles sur l'évolution à l'horizon lointain témoigne de cette grande incertitude. L'évolution des

cumuls en elle-même est difficile à modéliser. Il est encore plus difficile d'identifier des tendances claires et significatives pour le futur. La variation de ce cumul est fortement influencée par le nombre de jours de pluie de forte intensité. Or ces jours de fortes pluies sont assez peu fréquents et leurs nombres sont réduits d'où la difficulté d'identifier une tendance. Ces fortes pluies sont aussi parfois très localisées, notamment les pluies orageuses, ce qui rend le phénomène encore plus complexe à identifier. La période où interviennent ces fortes pluies est aussi importante à identifier pour savoir la part qui va recharger la réserve en eau du sol et la part qui va ruisseler. Si ces épisodes de fortes pluies ont tendance à augmenter en hiver, ils iront majoritairement dans les cours d'eau. Ce n'est pas ce qui est identifié pour l'instant. Sur la série historique, une intensification des pluies est observable plutôt en été et en automne. L'étude des données issues des modèles n'a pas permis d'identifier une tendance nette. La méthode de correction issue de la régionalisation des modèles induit une homogénéisation de la répartition des cumuls et moins de pluies extrêmes. Pour s'affranchir de cette homogénéité des jours de pluie, il faudrait étudier les résultats d'autres modèles n'utilisant pas la même méthode de correction. L'utilisation d'autres modèles permettrait ainsi de définir si cette stabilité des jours de pluie selon l'intensité est bien induite par la méthode de correction. Ou cela est dû à une absence de signal climatique clair ou encore une incapacité des modèles à faire évoluer les fortes pluies.

Il y a aussi une grande incertitude sur les données des stations littorales. En effet, le climat sous influence maritime est complexe (Planchon, 1993). Les modèles ont des difficultés à reproduire cette interface terre/mer (Boé, 2007). Avec la descente d'échelle des modèles, les incertitudes sur le littoral sont concentrées sur les mailles littorales et leurs voisines.

Sur la méthode de calcul de l'ETP donc du risque de sécheresse : les approximations du rayonnement par l'amplitude thermique donnent des résultats satisfaisants avec la série historique. Mais l'amplitude thermique tend à augmenter pour les deux modèles ce qui entraîne une importante hausse du rayonnement donc de l'ETP. Cette approximation de l'ETP donne des résultats très incertains du fait de la méthode d'estimation du rayonnement (cf. Annexe 25). Cela mériterait des recherches plus approfondies pour estimer au mieux le rayonnement puis l'ETP.

Mener une étude climatique à échelle des bassins versants n'est donc pas si simple. Cela nécessite d'avoir des longues séries de données homogénéisées à disposition et des indicateurs pertinents. Malgré cela, des doutes persistent sur l'évolution future du climat. L'utilisation de deux modèles climatiques a montré une importante divergence de l'évolution des cumuls, particulièrement à horizon lointain.

6. Conclusion

Cette étude a d'abord dressé le tableau du climat breton actuel et de son évolution. La diversité des climats bretons a été précisée avec un fort contraste entre l'Est et l'Ouest en termes de pluviométrie. Les cumuls de pluies sont généralement deux fois plus élevés sur le Massif armoricain que sur le bassin Rennais. L'apport de ce cumul provient majoritairement des jours de pluie forte. La différence entre l'Est et l'Ouest se crée sur quelques jours de pluie où le cumul dépasse les 10 mm apport. Le cumul des jours de forte pluie représente un paramètre important dont l'évolution doit être suivie puisqu'une évolution de quelques jours suffit à créer une différence importante en termes d'apport pluviométrique. Pour préciser, ce paramètre doit être approché au pas de temps saisonniers, les jours de fortes pluies sont concentrés en saison de recharge.

Cependant concernant la modélisation, les résultats présentent de grandes incertitudes sur l'évolution des cumuls pluviométriques. L'usage des deux modèles a tout de même permis d'identifier une tendance convergente concernant l'évolution des cumuls saisonniers. Ils tendraient à augmenter en saison de recharge et diminuer en saison d'étiage. L'amplitude saisonnière devrait donc davantage s'amplifier avec les risques correspondant chaque saison : le risque d'inondation pour la saison de recharge et le risque de sécheresse pour la saison d'étiage. Les deux modèles ont aussi une reproduction différente de la disparité régionale. Le modèle IPSL semble reproduire plus correctement ces disparités avec une incertitude sur les stations littorales. Globalement les stations littorales sont marquées par des biais plus importants.

Concernant l'évolution du risque de sécheresse, plusieurs approches ont été testées afin de définir une tendance. Le risque de sécheresse devrait continuer d'augmenter au cours du siècle, cependant aucune approche du risque ne permet de quantifier l'évolution de ce phénomène. Les résultats concernant l'évolution future du climat méritent d'être approfondis afin de limiter les approximations.

L'évolution future de la pluviométrie est donc pleine d'incertitude. Ce premier travail exploratoire rend compte de toute la difficulté de mener une étude climatique. Il va être complété par un guide méthodologique à destination des gestionnaires de l'eau. Le guide devra communiquer toutes les étapes de la mise en place de ce diagnostic climatique : la sélection des stations, la sélection des indicateurs, l'analyse de la série historique puis l'évolution du climat futur. L'objectif est de donner les clés aux gestionnaires pour mener des études climatiques cohérentes et conscientes des biais et incertitudes du climat futur.

Table des matières

Préambule.....	5
Index des sigles	6
Sommaire :	7
Introduction :	8
1. L'eau en Bretagne une ressource abondante mais convoitée.....	13
1.1 Le climat breton : une abondance de la ressource en eau.....	13
1.1.1 Quel climat en Bretagne ?	13
1.1.2 Les éléments qui influencent le climat breton	16
1.1.3 Changement climatique en Bretagne : Un regard rétrospectif sur le climat	18
1.2 Les usages de l'eau en Bretagne.....	20
1.3 Les risques climatiques liés à l'eau : définition et synthèse des connaissances dans la région.....	22
1.3.1 Les inondations en Bretagne :	22
1.3.2 Les sécheresses en Bretagne :	24
1.4 La gestion de l'eau en France	26
1.5 Le SDAGE et le SAGE, des outil réglementaire des usages de l'eau	28
1.5.1 Le SDAGE :.....	28
1.5.2 Le SAGE	29
2. Méthode	31
2.1 Les objectifs et attendus des acteurs	31
2.2 Choix des lieux d'études	32
2.2.1 Blavet.....	32
2.2.2 Odet	34
2.2.3 Rance	35
2.2.4 Seiche.....	36
2.2. Choix des stations.....	37
2.3. Choix des indicateurs climatiques :	40
3. Les variabilités pluviométriques historique : un regard rétrospectif sur le climat Breton.....	43
3.1 Une grande variabilité spatiale de la pluviométrie	43
3.1.1 Variabilité sur une année hydrologique :	43
3.1.2 Variabilité par saison hydrologique	46
3.1.3 Variabilité par saison météorologique	48
3.1.4 Variabilité mensuelle	51
3.1.5 Les cumuls de précipitation minimums et maximums.....	54
3.2 Les évolution du climat sur les séries historiques en Bretagne.....	59

3.2.1.	Evolution des températures	59
3.2.2.	Tendances pour les cumuls de précipitation observés en Bretagne.....	60
3.2.1.	Evolution de la pluviométrie sur la plus longue série : Mur de Bretagne	64
3.3.	Le risque de sécheresse et d'inondation en Bretagne	67
3.3.1.	Le régime probable comme approche des extrêmes	67
3.3.2.	Le SPI pour identifier les périodes sèches et humides	69
3.3.3.	Approche des inondations par les maximums	72
3.3.4.	Le bilan hydrique comme indicateur de sécheresse	74
4.	Projection des données avec le portail Drias	81
4.1	Modèles et scénarios.....	81
4.2	Modèles et incertitudes	83
4.2.1	Les sources d'incertitudes	83
4.2.2	Reproduction des températures	84
4.2.3	Reproduction des précipitations :	86
4.3	Les évolutions du climat breton selon les modèles.....	88
4.3.1.	Une hausse généralisée des températures	88
4.3.2.	Une divergence des modèles sur l'évolution des cumuls pluviométriques annuels.....	90
4.3.3.	... Mais une convergence sur l'évolution des cumuls saisonniers	92
4.3.4.	Evolution des cumuls mensuel selon les modèles	94
4.3.5.	Regard sur l'évolution du nombre de jours de pluie	96
4.3.6.	Un changement climatique selon la typologie des climats de Köppen.....	98
4.4	Tentative de modélisation du risque de sécheresse	101
4.4.1.	Une approche de l'ETP par estimation du rayonnement	101
4.4.2.	Une grande incertitude sur l'évolution du risque de sécheresse.....	107
5.	Discussion des résultats	111
5.1.	Quelles indicateurs pertinents ?.....	111
5.2.	Limites	112
6.	Conclusion	114
	Table des matières	116
	Table des figures	118
	Table des Tableaux :	119
	Table des cartes	119
	Bibliographie :	120

Table des figures

Figure 1: Répartition de l'eau sur Terre.....	8
Figure 2 : Le cycle de l'Eau en Bretagne (moyenne 1980-2014 ; OEB, 2019).....	9
Figure 3 : Températures et pluviométrie annuelle moyenne (Météo-France, 2012)	13
Figure 4 : Fréquence TCA Köppen sur 4 stations bretonnes	15
Figure 5 : Les différents usages de l'eau en Bretagne	21
Figure 6 : Regroupements lithologiques (Mougin et al., 2008 - Projet SILURES du BRGM)	31
Figure 7 : Cumul absolu et relatif moyen sur une année hydrologique	44
Figure 8 : Nombre de jours de pluie moyen sur l'ensemble des stations	45
Figure 9 : Nombre de jours de pluie et cumul relatif par saison hydrologique à Coray et Rennes ...	47
Figure 10 : Nombre de jours de pluie, cumul relatif par saison météo à Coray et Rennes	49
Figure 11: Cumul mensuel moyen à Rennes et Coray	51
Figure 12 : Régime pluviométrique par intensité des pluies.....	53
Figure 13 : Minimums et Maximums annuels	55
Figure 14 : Cumul de pluie maximum sur différentes périodes.....	55
Figure 15 : écart relatif sur une année hydrologique	61
Figure 16 : écart relatif saisonnier.....	61
Figure 17 : Évolution des cumuls mensuels de pluie entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019 ...	63
Figure 18 : Évolution du nombre de jours secs entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019	63
Figure 19 : Tendances décennales à Mur-de-Bretagne par rapport à la période de référence	65
Figure 20 : Évolution du cumul annuel à Mur-de-Bretagne	65
Figure 21 : Régime probable pour 4 stations sur la période de référence.....	68
Figure 22 : Le Standardized Precipitation Index sur quatre stations	71
Figure 23 : SPI mensuel à Mur de Bretagne	71
Figure 24 : Cumul sur l'année hydrologique 2001 par rapport à la période de référence	73
Figure 25 : Cumul selon le type de pluie par saison hydrologique en 2001	73
Figure 26 : Cumul mensuel par type de pluie à Coray et Rennes en 2001	73
Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques à Rennes et Quimper	74
Figure 28 : Fréquence mensuelle du déficit d'évapotranspiration.....	78
Figure 29 : Bilan hydrique à Rennes et Rostrenen.....	78
Figure 30 : Évolution du DE annuel	79
Figure 31 : Écart de température annuelle moyen entre les données observées et modélisées	85
Figure 32 : Écart de température mensuelle moyen entre les données observées et modélisées.....	85
Figure 33 : Écart de précipitation annuel selon le modèle (1971-2005).....	87
Figure 34 : Écart mensuel moyen de précipitation selon le modèle (1971-2005)	87
Figure 35 : Évolution des températures annuelles selon les modèles à Rennes et Quimper	89
Figure 36 : Évolution du cumul relatif annuel à horizon moyen et lointain (en %)	91
Figure 37 : Évolution du cumul relatif par saison hydrologique à Horizon moyen (en %).....	93
Figure 38 : Évolution du cumul relatif par saison hydrologique à horizon lointain (en %)	93
Figure 39 : Évolution des cumuls mensuels selon le modèle et le scénario	95
Figure 40 : Évolution du nombre de jours de pluie selon le modèle et le scénario	97
Figure 41 : Evolution de la fréquence de TCA à Rennes et Quimper d'après le modèle CNRM.....	99
Figure 42: Evolution de la fréquence de TCA à Rennes et Quimper d'après le modèle IPSL	100
Figure 43 : Écart entre l'ETP Météo-France , ETP Thorthwaite et ETP Turc à Rennes et Lorient .	103
Figure 44 : Comparaison des ETP Météo-France, ETP Tur, ETP Turc avec rayonnement estimé	105
Figure 45 : Evolution de l'ETP annuelle à Rennes et Quimper avec le modèle CNRM.....	106
Figure 46 : Evolution de l'ETP annuelle à Rennes et Quimper avec le modèle IPSL	106
Figure 48 : Evolution du bilan hydrique à Rennes selon le modèle CNRM.....	108
Figure 47 : Évolution du bilan hydrique à Rennes selon le modèle IPSL	108

Figure 49 : Fréquence mensuelle de déficit du bilan hydrique à Rennes et Quimper selon le modèle et le scénario.....	109
--	-----

Table des Tableaux :

Tableau 1- Synthèse des inondations majeures en Bretagne depuis les années 1950.....	23
Tableau 2 - Sécheresses majeures en Bretagne observées par dendrochronologie.....	25
Tableau 3 - Synthèse des caractéristiques des bassins versants :.....	36
Tableau 4 - Données disponibles par stations.....	39
Tableau 5 - Détail des manques et dates de débuts des données pluviométriques	39
Tableau 6 - Présentation des indicateurs.....	41
Tableau 7 - Écart de températures saisonnières entre les périodes 1961-1990 et 1991-2019	59
Tableau 8 - Probabilité d'occurrence des sécheresses selon le SPI	69
Tableau 9 - Cumuls de DE annuel moyen, minimum et maximum.....	79
Tableau 10 - Les modèles et scénarios utilisés	82
Tableau 11 - Synthèse de l'évolution des températures moyennes en Bretagne.....	89

Table des cartes

Carte 1 : Le Bassin versant du Blavet.....	32
Carte 2: Le bassin versant de l'Odét.....	34
Carte 3 : Le Bassin versant de la Rance.....	35
Carte 4 : Le Bassin versant de la Seiche	36
Carte 5 : Les 14 stations source des séries de données	38

Bibliographie :

Documents administratifs

ADEME. (2013). Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique 63p

Agence de l'eau Loire-Bretagne (2016). Le Sdage Loire-Bretagne 2016-2021 et son programme de mesures associé, L'Eau en Loire-Bretagne, n°90, Mai 2010, 90p

Agences de l'Eau. (2012). Le Bassin Versant

SAGE Blavet. (2014) Plan d'Aménagement et de Gestion Durable, approuvé par la CLE le 21 février 2014

SAGE Rance. (2013). Rapport d'évaluation environnementale du SAGE Rance Frémur baie de Beaussais révisé, approuvé par arrêté préfectoral du 9 décembre 2013

SAGE Vilaine. (2013). Synthèse de l'État des lieux adopté en CLE le 31 mai 2013

SIVALODET. (2016). Sage de l'Odet, Rapport de présentation, document adopté par le CLE le 05/12/2016

Articles Universitaires et scientifiques

Angot A., (1903.) La variation de la température moyenne avec l'altitude . Etudes sur le climat de la France : la température moyenne. *Annales du Bureau central météorologique*. pp119-121

Bagnouls F., Gaussen H., (1957). : Saison sèche et indice xérothermique. Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, 88, 193-239.

Belleguic K., Conseil C., Eveno T., Lorge S., Baraer F. (2012). Le Changement climatique en Bretagne. Meteo-France

Berthier L. Le Bris A-L. Lemerrier B. Moussa I. Walter C. (2011). Spatialisation de la réserve utile en eau des sols en région Bretagne

Bonnet J. (2004). "Risques urbains et sociétaux : la vulnérabilité des grandes villes". La géographie des risques dans le monde, *Ellipses*, Paris, pp. 421-442.

Brisse H. Grandjourdan R. De Ruffray P. (1982). Les types de climats annuels, un mode d'expression des gradients climatiques intégrant les variations interannuelles. *La Météorologie*, VIe série, 31, 39-81.

Cantat O. (2004). Analyse critique sur les tendances pluviométriques au XX^{em} siècle en Basse-Normandie : réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. *Annales de l'association internationale de climatologie*. Vol 1. pp.11-32

Choisnel E. De Villele O. Lacroze F. (1992). Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la communauté européenne, *Luxembourg : Office des Publications officielles des Communautés européennes II*, 178 p.

Cosgrove W. J., Rijsberman F.R (2000). World Water Vision, Making Water Everybody's Business, *World Water Council*. London: Earthscan Publications Ltd

- Douguedroit A., (1980.) L'évolution de recherches des méthodes quantitatives : exemple du gradient thermique en altitude. *Bulletin de l'Association de Géographes français*, 468-469 pp.145-150
- Dubreuil V., Fante K., Planchon O., Santa'Anna Neto J L., (2017). Les types de climats annuels au Brésil : une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015, *EchoGéo*
- Dubreuil V., Huon F., Lejeune C., (1996). Les précipitations intense en Bretagne , *Noréis* , n°170 , pp.395-406
- Dubreuil V., Lamy C., Planchon O., (2018). Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur, Les risques naturels dans le contexte de changement climatique., Mar 2018, Cluj, Roumanie. pp.15-21.
- Dufresne J-L., Salas y Melia D., Denvil S., Tyteca S., Arzel O., Bony S., Braconnot P., Brockmann P., Cadule P., Caubel A., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Fairhead L., Fichefet T., Foujols M-A., Friedlingstein P., Grandpeix J-Y., Guérémy J-F., Hourdin F., Idelkadi A., Krinner G., Levy C., Madec G., Marquet P., Marti O., Musat I., Planton S., Royer J-F., Swingedouw., Voldoire A., (2006). Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL, *La Météorologie*, n°55, novembre 2006, pp.45-59
- Erdlenbruch K., Loubier S., Montignoul M., Morardet S., Lefebvre M., (2013). La gestion du manque d'eau structurel et des sécheresses en France, *Sciences Eaux & Territoires*, n°11 2013/2 pp78-85
- Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V., Quénol H., (2016). Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : analyse au moyen de la classification de Köppen et des "types de climats annuels", *Climatologie* [en ligne]
- Field C., Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D., Bilir T. E., Chatterjee M., Ebi K. L., Estrada Y. O., Genova R. C., Girma B., Kissel E. S., Levy A. N., MacCracken S., Mastrandrea P. R., et White L. L., (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
- Forster P.M., Forster H.I., Evans M.J., Gidden M.J., Jones C.D., Keller C.A., Lamboll R.D., Le Quéré C., Rogeli J., Rosen D., Schleussner C-F., Richardson T.B. Smith C.J Turnock S.T. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19, *nature climate change*
- Fouchardière C., (1949). La Sécheresse de 1949 eb Haute Bretagne, *Revue forestière française*, II.II.4, pp.271-273
- Giblin B., (2003). L'eau : une question géopolitique en France aussi, *Hérodote*, n° 110, La Découverte, 3e trimestre 2003, pp9-28
- Grujard E., (2003). La gestion de l'eau à l'épreuve des territoires, *Hérodote*, 2003/3 n°100, pp47-69
- Guillerme A., (1984). "L'eau et ses vapeurs", *Urbanisme*, n°201, pp.54-55
- Held I. M., et Soden, B. J., (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 5686–5699.

Lang M., Cœur C., Bard A., Bacq B., Becker T., Merle C., (2013). Les inondations remarquables en France : premiers éléments issus de l'enquête EPRI 2011. *La Houille Blanche* – Revue internationale de l'eau, EDP Sciences, 2013, 44p.

Le Roux R., De Rességuier L., Katurji M., Zawar-Reza P., Sturman A., Van Leeuwen, Quénot H., (2017). Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de Saint-Emilion, Pomerol et leurs satellites, *Climatologie* [En ligne]

Lebourgeois F., Piedallu C., (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices biométriques, *Revue Forestière*, LVII, 2005-4 pp.331-356

Marchand J-P., Bauquin F., Letondoux P., (1986). Les calamités agricoles d'origine atmosphérique : le cas de l'Ille-et-Vilaine, *Géocarrefour* 61-3 pp. 319-328

Margat J., (1997). Répartition des ressources et des utilisations d'eau dans le monde : disparités présentes et futures. *La Houille Blanche*. n°2 pp40-51

McKee T-B. Doesken N-J . Kleist. J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, *American Meteorological Society*, pp.179–184

Moisselin J-M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., (2002). Les changements climatiques en France au Xx^{em} siècle : Etude des longues séries homogénéisées de données de température et précipitations, *La météorologie*, n°38 août 2002, pp. 45-56

Morel J., (2007). Les ressources en eau sur Terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature.

Mounier J., (1965). Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application en Bretagne, *Norois*, 48, pp.437-448

Mounier J. (1977). Aspect et fréquences de la sécheresse en Bretagne : essai de définition de la sécheresse en Europe océanique, *Géocarrefour*, 52-2, pp.167-176

Mounier J., et Peguy P., (1968). Une méthode de recherche climatique : l'analyse fréquentielle des précipitations tombées en 24 heures, annales de géographie, *Annales de géographie*, n°424 pp. 711-720

Mutin G., (2000)., De l'eau pour tous ?, *Documentation photographique*, 18 p.

Pettitt, (1979)., A non parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*. 28. pp.126-135

Planchon O., Dubreuil V., Damato F., Gouéry P., Decaux S., (2004). « Recherche sur les types de temps associés aux brises de mer », *Norois* , 191 | 2004/2 23p.

Planton S., Bopp L., Brun E., Cattiaux J., Chauvin F., Chevallier M., Ciais P., Douville H., Giraud G., Soubeyroux J-M, Terray L. (2015). Evolution du climat depuis 1850. *La Météorologie* .n°88 pp.48-55

Reynaud A., (2008). Impact économique de la sécheresse sur l'agriculture. INRA Sciences Sociales n°4-5 Septembre 2008

Robine J.-M., Cheunga S. L. K., Le Roy S. *et al.* (2008). Death toll exceeded 70 000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*. vol. 331. pp. 171-178.

Rouxel M., (2013). La population en Bretagne à l'horizon 2040 : cinq scénarios alternatifs , INSEE , *Octant Analyse* n°43

Sanson J. et Pardé M., (1950). La sécheresse des années 1942-49 en France, *Revue de Géographie Alpine*, 38-2 pp. 369-404

Savelli E., (2016). Les inondations en Bretagne. *Bretagne environnement*. n°11

Thorthwaite C-W., (1948). An approach toward a rational classification of climate, *The geographical review*, vol. XXXVIII, n° 1, p. 55-94.

Trewartha G.T., (1937). An introduction to weather and climate. *McGraw-Hill Book Company*, New York, 373 p

Turc L., (1955). Le bilan de l'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement, *Annales agronomiques*, vol. 6, n° 1, 1955, pp. 3-133.

Vannier O., Braud I., (2012)., Calcul d'une évapotranspiration de référence spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France. *IRSTEA* 22p.

Actes de colloques

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.

Foissard X., Dubreuil V. et Quénot H., (2012) Variabilité de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération rennaise à partir des projections des modèles régionaux de 2030 à 2100. *25^{ème} colloque de l'Association internationale de Climatologie*, Grenoble

Foissard X., Quénot H., Dubreuil V., (2011). L'influence de la variabilité des facteurs météorologiques sur l'occurrence et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à Rennes en 2010. *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 24, 261-266.

Le Goulven P., (1988). Homogénéisation des données pluviométrique, acte de colloque, *"Diamundial de la Meteorologta" Instituto Nacional de Meteorologfa e Hidrologta INAMIII*, Quito,

Planchon O. (1993). À propos de la notion de climat maritime, L'air du temps échelles spatiales fines et pas de temps courts en climatologie, *Journées de la commission « Climat et Société » du Comité National de Géographie*, Poitier, 25-26 novembre 1993 pp. 120-130

Xanthoulis S., (2008). L'eau comme facteur d'essor urbain et instrument de cohérence territoriale, *Séminaire de recherche doctorale de la Chaire CPDT-Région Wallonne, Gestion des Paysages, Urbanisme et Aménagement du Territoire*, FUSAGx, Gembloux, 29 & 30 mai 2008

Rapports Technique et scientifique

- ADEME. (2004). Indicateurs régionaux d'efficacité en CO2 et de développement des énergies renouvelables, Cahier technique n°3
- Ambroise B., (1999). La dynamique de l'eau dans un bassin versant -Processus, Facteurs, Modèles-, édition H*G*A
- Brisson N., Levraut F., (2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME. 336 p.
- Croiset N., Lopez B. (2012). HYPE Outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines . Manuel d'utilisation. BRGM.
- CRCI (Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie de Bretagne). (2009). Guide de la gestion de l'eau en entreprise
- DRAAF Bretagne (2016). Tableau de l'agriculture bretonne
- DRIAS (2014). Simulations climatiques - CNRM2014 - ARPEGE / ALADIN52
- DRIAS (2014). Simulations climatiques - IPSL2014 - IPSL -CM5A / WRF
- Ducharne A., (2002). Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP, GICC-Seine
- Eau & Rivières de Bretagne. (2012). Spécial eau et agriculture, n°159 Avril 2012
- Eau Seine Normandie. L'eau et l'industrie, Les usages de l'eau pp.71-76
- EDO. (2020). Standardized Precipitation Index, EDO indicator factsheet, European Commission
- FAO. (2013). Faire face à la pénurie d'eau, un cadre d'action pour l'agriculture et la sécurité alimentaire, Rapport FAO sur l'eau n°38, 80p.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Huet P., Roussel P., Martin X., Guellec J., Monadier P., Sauzey P., Teyssier A., (2001). Mission d'expertise sur les crues de décembre 2000 et janvier 2001 en Bretagne
- IFEN. (2000). "Qu'est-ce qu'un indicateur?"
- Jouzel J., Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard S., (2014). Le climat de la France au XXIe siècle Volume 4 scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, *Direction générale de l'Energie et du Climat*
- Kieny V., Climatologie selon Köppen , Météo-France / ENM , fiche 71
- Leroy M., (2000)., Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations, note interne de la DSO Météo-France, n°42, Octobre 2000, 12p.
- Létard V., Flandre E-H., Le Peltier S. (2004), La France et les Français face à la canicule. Les leçons d'une crise, rapport d'information n° 195 (2003- 2004), Sénat, Paris
- Meteo-France. (2016). Présentation générale du modèle de surface.

Observatoire des effets du changement climatique. (2010). Ville et adaptation au changement climatique. Rapport au premier ministre et au Parlement

Office international de l'eau. (2009). Organisation de la gestion de l'eau en France

OMM. (2011). Guide des pratiques climatologiques, OMM-n°100

OMM. (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, OMM-N°1090

OMM. (2016). Manuel des indicateurs et indices de sécheresses, Programme de gestion intégrée des sécheresses, OMM-N°1173

OMM. (2017). Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques, OMM-N° 1203

Organisation mondiale de la Santé et le Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF). (2017). Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et estimations des ODD

OTHU, (2011). Méthodologies d'analyse de tendances sur de longues séries hydrométéorologiques . Fiche Technique OTHU N°23

Poquet J., Dubreuil V., Bouriau E., (2019). Vulnérabilités et atouts du bassin rennais : quelle adaptation face au changement climatique ?, Note de l'AUDIAR (Agence d'Urbanisme Rennes Bretagne)

Soubeyroux J-M., Vidal J-P., Najac J., Kitova N., Blanchard M., Dandin P., Martin E., Pagé C., Habets F. (2011.) Projet Climsec, Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. *Rapport final du projet*. Météo-France

Ouvrages

Dauphiné A., (2001). Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin, Collection U Géographie, Paris, 288p.

Denhez F., (2008.) Une brève histoire du climat. L'oeil neuf

Dupont N., Grelot F., Van Tilbeurgh V., Valy J., Favier R., Granet-Abisset A-M., Tanguy J-F., Quesseveur E., (2012). Quand les cours d'eau débordent : les inondations dans le bassin de la Vilaine du XVIIIe siècle à nos jours. Presses Universitaires de Rennes, 267p.

Gazzaniga J-L., Larrouy-Castera X., Marc P. Ourliac C J-P., (2011). Le droit de l'eau, éditions LexisNexis Litec, 3e édition, Paris, 547p.

Hufty A. (2001). Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. (Presses Université Laval). 542p.

Lang M., Lavabre J., (2007). Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations, Edition Quae, 232p.

Lambert R., (1996). Géographie du cycle de l'eau, presse universitaire du Mirai, pp. 37-82.

Leone F. et Vinet F., (2006). La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques, Géorisques, n°1, coll. de l'Équipe d'Accueil GESTER, Publications de l'Université Paul Valéry – Montpellier III, 140p.

Leroy-Ladurie., (2009). Histoire du climat depuis l'an mil, Flammarion edition 2020, 671p.

Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., (2012). Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions. Presses universitaires de Rennes, 458p

Sainteny G., (2019). Le climat qui cache la forêt, comment la question climatique occulte les problèmes de l'environnements. L'écopoche, pp31-52

Van Gameren V., Weikmans R., Zaccai E. (2014). L'adaptation au changement climatique. Edition La Découverte

Textes législatifs

Loi 84-512 de 1984 relative à la pêche en eau douce et la gestion des ressources piscicoles paru au JORF du 30 juin 1984, p. 2039

Loi n° 2004-338 du 21 avril 2004 portant transposition de la directive n°2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, parue dans le JORF n°95 du 22 avril 2004 p. 7327

Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement

Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, paru dans le JORF n°303 du 31 décembre 2006 p.20285

Loi n°64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution paru au JORF du 18 décembre 1964, p. 11258

Loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau paru au JORF du 4 janvier 1992, p. 187

Thèses

Boé J., (2007). *Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Climatologie*. Université Paul Sabatier - Toulouse III

Bonnefoy C., (2013). *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*. Géographie. Université Rennes 2

Dayon G., (2016). *Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*. Thèse de doctorat en Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III

Dubreuil V., (1994.) *La sécheresse dans la France de l'ouest : étude au moyen des bilans hydriques et des données NOAA-AVHRR*, Thèse de Doctorat de Géographie

Lamy C., (2013). *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*. Thèse de doctorat de Géographie. Université Rennes 2

Marty R., (2010). *Prévision hydrologique d'ensemble adaptée aux bassins à crue rapide, Elaboration de prévisions probabilistes de précipitations à 12 et 24 h., Désagrégation horaire conditionnelle pour la modélisation hydrologique., Application à des bassins de la région Cévennes Vivarais*, Thèse en hydrologie, Université de Grenoble

Valy J., (2010). *Croissance urbaine et risque inondation en Bretagne*. Thèse de doctorat de Géographie. Université Rennes 2; Université Européenne de Bretagne

Veyrac-Ben Ahmed V., (2012). *Les agriculteurs face aux sécheresses : adaptation des pratiques et impacts environnementaux : étude à travers l'exemple du bassin versant du Lemboulas (Bas-Quercy, Midi-Pyrénées)*. Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2012.

Articles de Presse

20 Minutes, Pourquoi la Bretagne ne doit pas se croire à l'abri d'une sécheresse, 13 juin 2020, Europresse

Hynault J-Y., (2013). Il y a 40 ans, un orage meurtrier sur la ville. Ouest France, 03/07/2013

La Provence, La Bretagne inquiète de la sécheresse, 26 février 2017, Europresse

Le Bagousse B., Le télégramme (Bretagne)-Lorient , Barrage d'Arzal. La sécheresse se fait sentir, 10 septembre 2016, Europresse

Pouchard Y., Aujourd'hui en France, L'inquiétante sécheresse des monts d'Arrée, 25 mai 2010, Europresse

Simon G., Le Télégramme (Bretagne)-Lorient, Sécheresse. L'eau sous surveillance, 25 juillet 2015, Europresse

Tanguy R., Le Télégramme (Bretagne)-Quimperlé, Sécheresse. Le lac du Drennec en souffrance, 9 novembre 2016, Europresse

Résumé :

Le climat change, c'est le constat qui est fait depuis déjà plusieurs décennies par les scientifiques du monde entier. Les tendances d'évolutions des températures sont bien connues avec +1,1°C en France depuis 1900. Cependant les tendances en termes d'évolution des précipitations ne sont pas aussi facile à déterminées. Une grande incertitude plane sur l'évolution future de la ressource en eau. En Bretagne, région réputée bien arrosée, le manque d'eau peut exister et inquiète les gestionnaires notamment en vue de la gestion future de cette ressource notamment en période d'étéage.

Cette étude vise à élaborer une méthode d'analyse des effets du changements climatique sur la ressource en eau en région Bretagne. Différents indicateurs sont présentés pour suivre l'évolution des cumuls pluviométriques ou du risque de sécheresse. Il y a deux phases de travail : d'abord un regard sur les données passées et les tendances observées, puis une approche du climat futur avec des modélisations issues du portail Drias.

Abstract :

Climate is changing. This is the observation made by scientists from all over the world since decades. Patterns of temperature changes are well known, +1,1°C in France since 1900. However, trends in terms of changes in precipitation are not so easy to determine. The future evolution of water resource is clouded in great uncertainty. In Brittany, a region know to be very rainy, lack of water can exist. Managers are worried with the circumstances of the future management of this ressource, including in low-water periods.

This study aims to develop a method to analyse the effects of climate change on water resource in Brittany. Different indicators are shown in order to follow the evolution of cumulative rainfall or risk of drought. There are two work phases : first, a look at past data and trends observed, then an approach to future climate with modelling fom the Drias portal.