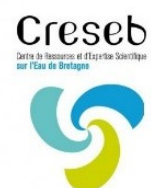




Diagnostic Climatique Territorial

Focus « ressource en eau »

Guide méthodologique



En collaboration avec



DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL

FOCUS « RESSOURCE EN EAU »

Guide méthodologique

Auteur : **Louis Amiot**

sous la coordination de : **Vincent Dubreuil** (Université de Rennes 2, UMR LETG (Littoral - Environnement - Télédétection – Géomatique)), **Josette Launay et Elodie Bardon** (Creseb), **Florence Massa et Enora Keromnes** (Conseil régional de Bretagne)

Publication Juillet 2021

Ce guide méthodologique est une valorisation du mémoire de Master 2 ***Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias***, de Louis AMIOT, encadré par Vincent Dubreuil (Université de Rennes 2, UMR6554 CNRS – LETG) et Franck Baraer (Météo-France, DIRO/PREVI Rennes) en collaboration avec Guillaume Pajot et Josette Launay (Creseb), coordinateurs d'un groupe de réflexion régional sur " Gestion quantitative de la ressource en eau et changement climatique"

Sommaire

Introduction et objectifs	5
Quel est l'objectif de ce guide ?	5
Quel apport du volet C dans la globalité de l'étude HMUC ?	5
Quel est le contenu du Diagnostic Climatique Territorial (DCT) ?	6
Étape 1 : Réussir l'acquisition des données	8
Sélection des séries de données	8
Vérification et préparation des données	9
Étape 2. Étude des séries historiques	11
Description du climat actuel	11
Événements exceptionnels : les indicateurs pour repérer leurs fréquences et intensités sur la période passée	14
Les tendances observées	16
Synthèse de l'évolution du climat local passé : répartition des fortes pluies et des cumuls	17
Étape 3. Étude des données futures simulées	18
Les indicateurs du climat futur fournis par le portail Drias ne sont pas suffisants	18
Extraction des données sur le portail Drias : choix des scénarios et des modèles	19
Biais et vigilance sur la modélisation climatique du portail Drias	19
Les tendances modélisées à horizon 2100	20
Évolution du risque de sécheresse future et disponibilité en eau	21
Synthèse de l'évolution locale possible du climat	22
Conclusion	23
Fiches méthodologiques	26

Introduction et objectifs

1. Quel est l'objectif de ce guide ?

Ce guide méthodologique a été élaboré pour accompagner les animateurs de SAGE bretons à la réalisation du volet C des études H.M.U.C (Hydrologie, Milieux, Usages, Climat) prévues au chapitre 7 du SDAGE Loire Bretagne 2016-2021.

Il s'agit dans ce volet Climat de réaliser un **Diagnostic Climatique Territorial (DCT)** afin de mieux caractériser la disponibilité future de la ressource en eau sur ces territoires. Ces résultats aideront les acteurs locaux à construire une définition locale du partage durable de la ressource en eau pour contribuer à anticiper les effets du changement climatique par une gestion équilibrée et économe de la ressource en eau.

Ce Diagnostic Climatique Territorial a donc pour objectif d'apporter un regard précis et local sur le climat sous la dimension "ressource en eau". Il a été élaboré suite à un stage de Master réalisé à l'Université de Rennes 2 qui a permis de développer une méthode pour comparer l'évolution climatique de 4 territoires bretons à partir de données historiques locales et des données nationales modélisant le changement climatique (données du portail Drias).

Ce document a pour vocation de décrire la méthode proposée. Il fait également référence aux fiches qui décrivent plus finement les différentes étapes du diagnostic.

2. Quel apport du volet C dans la globalité de l'étude HMUC ?

Pour rappel, les études H.M.U.C prévues au chapitre 7 du SDAGE Loire Bretagne 2016-2021 permettent une analyse des conditions hydrologiques (H), des milieux (M), des usages (U) et du changement climatique (C) propre à chaque territoire de SAGE et peuvent être un préalable nécessaire afin de :

- **Satisfaire** les besoins en eaux agricoles, industrielles, résidentielles, touristiques et pour l'écosystème ;
- **Anticiper** les évolutions de ces besoins en eau et de la ressource globale du territoire ;
- **Aider à la concertation** autour de la gestion future de la ressource en eau ;
- **Adapter la gestion de l'eau actuelle** aux évolutions identifiées pour le futur.

Elles doivent être mises en place comme une aide à la décision afin de construire un plan d'adaptation concernant les usages de l'eau. Plus précisément, elles peuvent permettre :

- D'ajuster les débits objectifs d'étiage (DOE) et/ou les niveaux objectifs d'étiage (NOE) ;
- De préciser des conditions de prélèvement les plus adaptées au territoire du SAGE en période d'étiage (orientations 7B et 7C) ;

- De préciser les conditions de prélèvement les plus adaptées au territoire du SAGE pour le remplissage des réserves en période hivernale (orientation 7D).

Le volet C des analyses H.M.U.C. doit s'appuyer sur les états des lieux réalisés dans les volets H.M.U. pour réaliser une étude prospective sur l'évolution de la ressource à 30 ans.

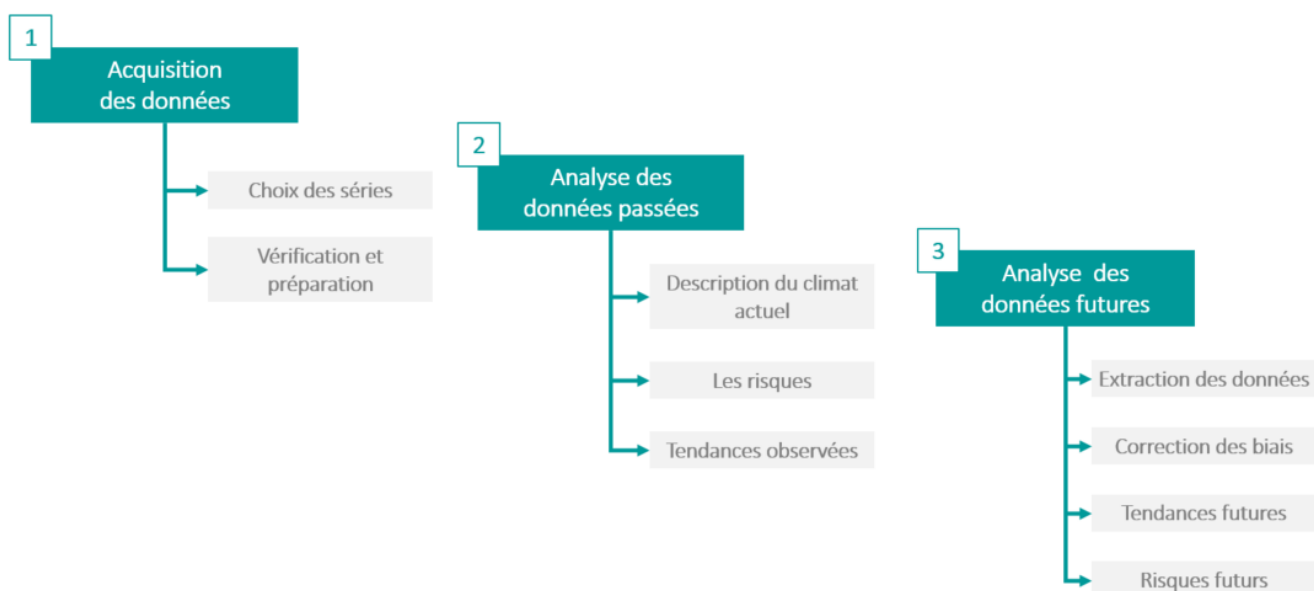
3. Quel est le contenu du Diagnostic Climatique Territorial (DCT) ?

Le Diagnostic Climatique Territorial (**DCT**) est une étude climatologique, c'est-à-dire une étude de l'évolution des conditions météorologiques moyennes et de leur variabilité sur un territoire donné. La climatologie est l'étude des moyennes des paramètres météorologiques, de ses variations et de ses extrêmes, mais aussi de ses incidences sur diverses activités.

Il contribue à évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Il doit décrire le contexte climatique local actuel, son évolution passée et future, au moyen d'indicateurs climatiques déclinés à l'échelle des territoires des SAGE.

Parmi les paramètres analysés, la **pluviométrie** et sa variabilité spatiale et temporelle est le plus impactant car elle influence directement les quantités d'eau disponibles à court et moyen terme.

Le diagnostic climatique territorial se déroule en trois temps décrits **dans le schéma ci-dessous** :



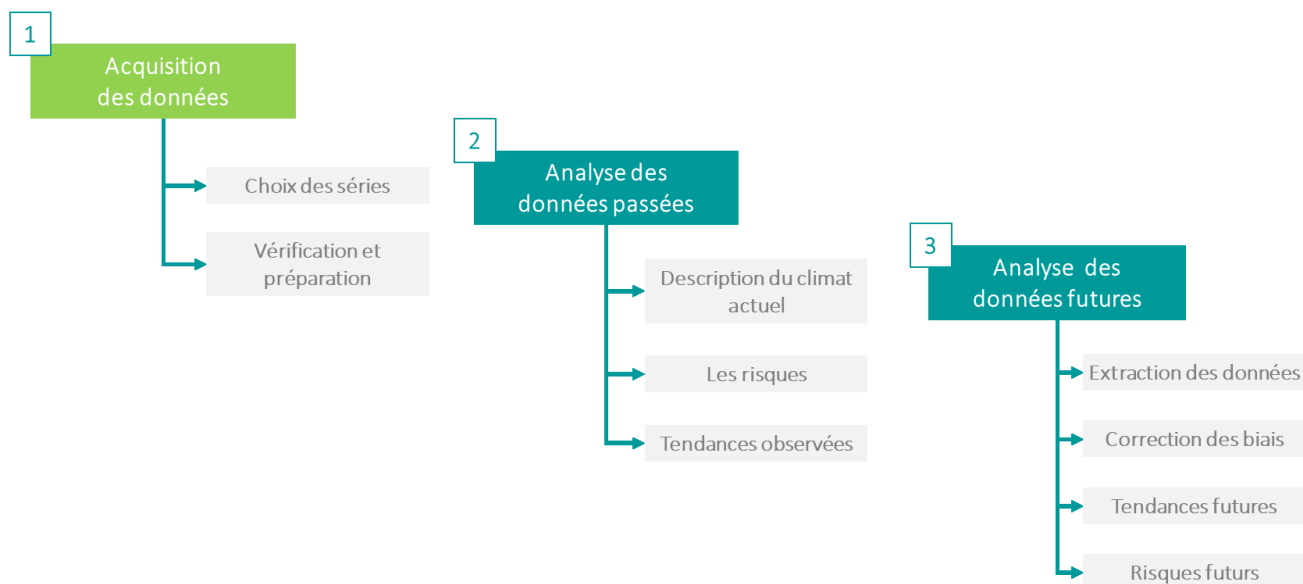
La première étape du diagnostic climatique territorial consiste à **acquérir des données climatiques existantes et observées sur une période si possible de 60 ans**. Ces séries de données sont nécessaires pour l'analyse du climat actuel et passé, mais aussi pour l'analyse des tendances futures simulées.

La seconde étape consiste à **analyser ces données sur les décennies passées**. Cette analyse va permettre de caractériser le climat actuel et son évolution passée afin d'évaluer son impact sur la disponibilité de la ressource en eau (débits des cours d'eau, stocks des nappes souterraines) à l'échelle locale.

Enfin, la troisième étape consiste à **analyser l'évolution future probable du climat** à partir des données modélisées du climat (température, pluie, évapotranspiration) pour les prochaines décennies. Cela permettra d'anticiper les impacts potentiels du changement climatique à un horizon proche ou lointain sur la disponibilité de la ressource en eau (évolutions spatiales et temporelles), à l'échelle du territoire étudié.

Ces différentes étapes du **Diagnostic Climatique Territorial** sont précisées dans ce guide. Des **Fiches méthodologiques** permettent une meilleure compréhension des termes climatologiques ainsi qu'une description des indicateurs préconisés.

Étape 1 : Réussir l'acquisition des données



1. Sélection des séries de données

Viser un historique de 60 ans, des stations représentatives et des données quotidiennes pour la pluviométrie

La première phase consiste à acquérir les données nécessaires à l'étude. Un **Diagnostic Climatique Territorial** nécessite l'analyse conjointe de différents paramètres : **précipitations, températures, évapotranspiration potentielle (ETP) et éventuellement de rayonnement**.

Des **critères géographiques** de sélection des données sont à prendre en compte. Trois ou quatre stations de mesure disposant de données quotidiennes de pluviométrie et une ou deux stations de mesure pour les autres paramètres (une même station pouvant disposer d'un suivi sur l'ensemble des paramètres) doivent être sélectionnées pour un territoire de SAGE. Le choix des stations de mesure doit permettre une bonne représentation des différentes situations géographiques du territoire considéré (amont-aval, proximité littorale, relief) (*cf. Fiche A4 : Acquérir les séries de données climatiques*).

Des **critères de qualité** des données sont aussi à prendre en compte. Les séries de données à considérer doivent être le plus complètes possible et homogénéisées, sur une **période d'au moins 60 ans** (*cf. Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*). Les séries de données **quotidiennes** permettent une analyse suffisamment détaillée de la pluviométrie pour un diagnostic territorial. Elles offrent notamment la possibilité de **décomposer les cumuls selon l'intensité des pluies** et **d'identifier les biais des modèles**, analyses qui permettront aussi de réaliser les projections dans le futur. Malgré un coût plus élevé que des séries mensuelles, il est important d'avoir au moins une série de données quotidiennes sur le territoire d'étude afin de permettre cette approche

détaillée de la pluviométrie et de son évolution (*cf. Fiche A3 : Pourquoi des séries de données quotidiennes pour la pluviométrie ?*).

Une soixantaine de séries de données pluviométriques sont disponibles sur un temps long (plus de 50 ans) en Bretagne, dans la publithèque de Météo-France. La *fiche A4 : Acquérir les séries de données climatiques* vise à aider au choix des séries de données à considérer par SAGE.

Récapitulatif des étapes

- Sélection des séries de données bien réparties géographiquement (*cf. Fiche A1 : Sélectionner les stations représentatives*) selon les critères de qualité (*cf. Fiches A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles, A3 : Pourquoi des séries de données quotidiennes pour la pluviométrie ?*).
 - 3 à 4 séries de données de pluviométrie pour un bassin versant d'environ 1000 km²
 - 1 à 2 séries de données de température, ETP, rayonnement
 - Acquisition et achat des données sur la publithèque (ou autre) (*cf. Fiche A4 : Acquérir les séries de données climatiques*)
-

2. Vérification et préparation des données

Une étape fastidieuse mais nécessaire pour renforcer l'interprétation des résultats

Les analyses climatiques doivent être réalisées sur des séries de données complètes, à savoir des chroniques sans ruptures et lacunes. Une phase de vérification des données est nécessaire afin de valider et/ou de compléter sous certaines conditions les séries de données identifiées. La série de données peut présenter des **manques de données**, dans ce cas, il est possible de combler ces données manquantes mais cela n'est pas obligatoire (*cf. fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*). Les données manquantes peuvent ainsi être complétées par les données de la station voisine sur la période considérée ou par la moyenne de la station.

Le diagnostic climatique territorial repose sur le calcul et l'analyse de différents indicateurs climatiques. Selon l'objectif recherché dans l'analyse, les indicateurs peuvent ou doivent être calculés sur différentes échelles de temps :

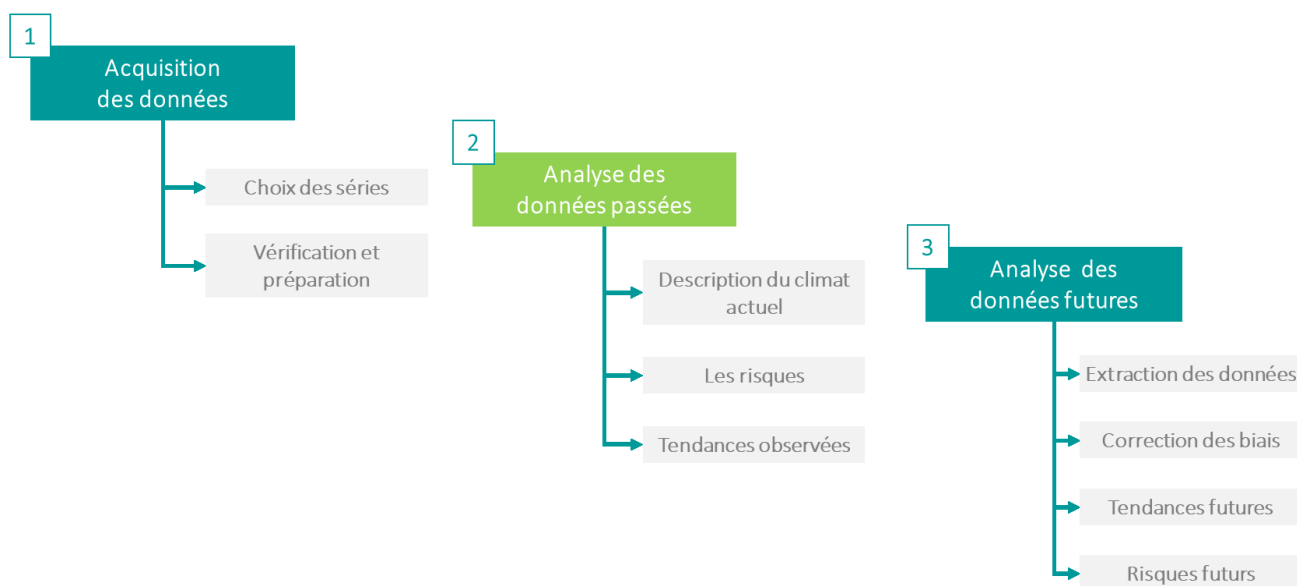
- Pluviométrie
 - Échelles temporelles – jours, mois, saison hydrologique et année hydrologique (*cf. Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie*), Intensité des pluies (*cf. Fiche B3 : La décomposition des pluies*)
- ETP/ températures :
 - Échelle temporelle : mois et année civile

Afin de préparer ces analyses, les données peuvent être extraites selon ces critères.

Récapitulatif des étapes

- Vérifier les séries de données : en cas de périodes manquantes, celles-ci peuvent être complétées (*cf. Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*)
 - Trier les données de pluviométrie dans différentes tables : par mois, par saison hydrologique et par année hydrologique (*cf. Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie*). Les séries de données sont désormais prêtes pour être analysées.
 - Décomposition des jours de pluie selon l'intensité sur plusieurs colonnes (*cf. Fiche B3 : La décomposition des pluies*)
 - Trier les données d'ETP et température (si la station possède les données citées) par mois et année civile (*cf. Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*)
-

Étape 2. Étude des séries historiques



Avant de s'intéresser à l'évolution future du climat, il est nécessaire d'avoir un regard sur le climat passé. Ce regard rétrospectif permet de décrire l'évolution historique sur le territoire et d'affiner l'analyse des tendances à une échelle fine. En effet, l'intérêt du diagnostic climatique territorial est **de préciser la diversité de la répartition des pluies et son évolution dans le temps** à l'échelle du territoire considéré. L'analyse des moyennes est la base d'une étude climatique.

1. Description du climat actuel

Une étape nécessaire pour prévoir le climat futur basée sur le calcul de moyennes

Décrire le climat actuel revient à définir les conditions climatiques moyennes actuelles. Il s'obtient en calculant les indicateurs climatiques en moyenne, sur la période de référence. Des analyses statistiques basiques permettent de décrire le climat moyen sur les différentes stations, mais aussi de les comparer entre-elles, ou de les comparer aux autres stations de France. Afin de décrire le climat moyen, nous préconisons l'usage de différents indicateurs décrits dans le tableau ci-dessous.

Indicateurs préconisés pour décrire le climat moyen

Indicateur	Détail	Echelle					Données nécessaires	Fiche
		AH	AC	SH	S	M		
Les cumuls pluviométriques								
Cumul de précipitation moyen , minimum et maximum	Cumul moyen, minimum et maximum sur la période de référence	X		X		X	P	B1
Cumul moyen par type de pluie	Cumul moyen selon l'intensité des pluies (faible, moyenne, intense, très intense)	X		X		X	P	B3
Part du cumul par type de pluie par rapport au cumul total	% de cumul par type de pluie	X		X		X	P	B3
Nombre de jours de pluies								
Nombre de jours secs moyen	Nombre de jours ou P<1 en moyenne sur la période de référence	X		X		X	P	B4
Nombre de jours de pluie moyen	Nombre de jours ou P>=1 en moyenne sur la période de référence	X		X		X	P	B4
Nombre de jour par type de pluie moyen	Nb de jours ou P 1-5; P5-10; P 10-20 ; P>20 en moyenne sur la période de référence	X		X		X	P	B3-B4
Autres paramètres								
ETP Moyenne	EvapoTranspiration Potentielle moyenne sur la période de référence		X		X	X	ETP	B1
Pluies efficaces moyennes	P-ETP moyen sur la période de référence	X		X		X	P, ETP	B4
Température moyenne	Température moyenne sur la période de référence		X		X	X	T°C	B1
Synthèse climat								
Type de climat annuel	Type de climat annuel selon les critères annuels de Köppen		X				P, T°C	B5
Fréquence de type de climat annuel de Köppen sur 30ans	% de type de climat de Köppen sur 1991-2020		X				P, T°C	B5

Echelles temporelles : AH = Année hydrologique, AC = Année civile, SH = Saison hydrologique, SM = Saison météorologique, M = mensuel. Données nécessaires : P = Précipitations (en mm), T°C = Températures (en °C), ETP = Evapotranspiration potentielle (en mm)

La description du climat actuel s'appuie sur les indicateurs de **cumuls moyens de précipitation**, et **nombre moyen de jours de pluie**. Il est aussi intéressant d'analyser des moyennes **d'autres paramètres** tels que les données d'ETP et température pour avoir une approche complète du climat. Enfin, la description du climat peut être synthétisée par la classification de Köppen.

Fiche B1 : Le calcul de moyennes en climatologie

L'analyse des cumuls moyens de précipitation et du nombre moyen de jours de pluie doit être effectuée en premier. Dans le cadre du diagnostic climatique, les données moyennes de pluviométrie permettent de définir le **régime pluviométrique** et d'effectuer une comparaison temporelle et spatiale sur la base des cumuls moyens mensuels ou annuels.

Il est nécessaire de considérer une période **d'au moins 30 ans** pour le calcul des moyennes. Celle-ci doit s'effectuer sur 3 échelles de temps (année hydrologique, saison hydrologique et mois) afin de comparer les données entre stations sur les différentes périodes de l'année. Cette comparaison permet de spatialiser la pluviométrie moyenne selon l'échelle temporelle sur le territoire considéré (cf. [Fiche B1 : Le calcul de moyennes en climatologie](#)).

Fiches B2 : Le nombre de jours de pluie & B3 : La décomposition des pluies l'importance des jours de pluie forte

L'analyse des cumuls moyens de précipitation constitue une étape essentielle du diagnostic climatique territorial mais elle n'est pas suffisante pour décrire le climat. Elle doit être renforcée par l'analyse **d'indicateurs caractérisant l'intensité et la répartition des pluies** (décomposition des cumuls et du nombre de jours de pluie selon son intensité). Ces indicateurs permettent de préciser l'organisation du régime pluviométrique, la répartition spatiale et temporelle des précipitations ou encore d'identifier une éventuelle intensification des pluies (*cf. Fiches B2 : Le nombre de jours de pluie ; B3 : La décomposition des pluies*).

Fiches B4 : Les pluies efficaces & B5 : Les types de climats annuels de Köppen

D'autres paramètres peuvent aussi être étudiés afin de compléter l'analyse climatique, par exemple:

- **Les pluies efficaces** qui intègrent les précipitations et les températures au moyen de l'évapotranspiration. Cet indicateur témoigne de la quantité de précipitation qui peut réellement recharger les cours d'eau et nappes. L'intérêt est de déterminer les périodes de tension de la ressource en eau (*cf. Fiche B4 : Les pluies efficaces*).
- La description du climat synthétisée par le **type de climat annuel (TCA) de Köppen** permet de caractériser le climat de chaque année selon les températures moyennes et les précipitations (*cf. Fiche B5 : Les types de climats annuels de Köppen : une synthèse de l'évolution du climat*).

Pour une analyse permettant de définir plus précisément les fortes périodes de tension sur la disponibilité des ressources en eau, il est conseillé de compléter avec **des indicateurs de risque d'événements exceptionnels** de type sécheresse ou crue (voir ci-après).

Récapitulatif des étapes

- Définir la période de référence des calculs selon la longueur des séries de données (*cf. Fiche B1 : Le calcul de moyennes en climatologie*)
 - Calculer les cumuls de précipitation moyens, minimums et maximums (*cf. Fiche B1 : Le calcul de moyennes en climatologie*) sur les trois échelles de temps sur la période de référence (*cf. Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie*)
 - Calculer le nombre moyen de jours de pluie (*cf. Fiche B2 : Le nombre de jours de pluie*) sur les trois échelles de temps sur la période de référence et/ou sur les périodes 1991-2020
 - Calculer les cumuls et le nombre moyen de jours de pluie selon l'intensité des pluies (*cf. Fiches B2 : Le nombre de jours de pluie ; B3 : La décomposition des pluies*) sur les trois échelles de temps sur la période de référence et/ou sur les périodes 1991-2020)
 - Mettre en parallèle le nombre de jours de pluie par rapport à la part du cumul (*cf. fiche B3 : La décomposition des pluies*) sur les différentes échelles de temps
 - Synthétiser les résultats de manière homogène pour l'ensemble des stations
 - Comparer les données moyennes entre les différentes stations
 - Calculer les pluies efficaces : cumuls moyens, minimums et maximums sur les trois échelles de temps sur la période de référence 1991-2020 (*cf. Fiche B4 : Les pluies efficaces*) sur une ou deux stations
 - À partir des types de climats annuels, calculer les fréquences de type de climat annuel pour les périodes 1961-1990 et 1991-2020 (*cf. Fiche B5 : Les types de climats annuels de Köppen : une synthèse de l'évolution du climat*)
-

2. Approche climatique des risques inondations et sécheresses

L'évolution climatique peut se traduire par une accentuation des événements exceptionnels de type **sécheresse** ou **inondation**. Il est important de bien connaître ces événements et leur évolution (fréquence, intensité) sur la période historique. En effet, c'est à partir de l'étude de ces phénomènes et l'évaluation de leurs probabilités d'occurrence que s'effectue la politique de gestion de l'eau et de prévention des risques.

Indicateurs préconisés pour définir les risques liés à l'eau et leurs évolutions

Indicateur	Détail	Echelle					Données nécessaires	Fiche
		AH	AC	SH	S	M		
Approche probabiliste du risque								
Centiles des cumuls	Centiles des cumuls	X		X		X	P	C1
Régime probable	Centiles 10, 20, 50, 80 et 90 moyen des cumuls mensuels sur la période de référence					X	P	C1
SPI	Standardized precipitations index			X	X	X	P	C2
Risque inondation								
Nombre d'épisodes de fortes pluies	Seuils à déterminer, par exemple : 50 mm en 1 jour ; 100 mm en 10 jours ; 200 mm en 20 jours	X					P	C3
Centiles quotidiens supérieurs	Centiles 90,95 et 99 sur la période de référence	X				X	P	C3
Risque de sécheresse								
Diagramme ombrothermique	Diagramme mensuel avec T=2P					X	P, T°C	X
Suivi de l'ETP annuelle	ETP annuelle sur l'ensemble de la série disponible		X				ETP	D1
Bilan Hydrique	Suivi de l'état de la réserve utile du sol en fonction de					X	P, ETP	C4
Fréquence mensuelle du déficit du bilan hydrique sur 30 ans	% de mois arides, secs, humides.. En fonction du bilan hydrique					X	P, ETP	C4
Suivi du déficit d'évapotranspiration annuel	DE annuel sur l'ensemble de la série disponible		X				P,ETP	C4

Echelles temporelles : AH = Année hydrologique, AC = Année civile, SH = Saison hydrologique, SM = Saison météorologique, M = mensuel. Données nécessaires : P = Précipitations (en mm), T°C = Températures (en °C), ETP = Evapotranspiration potentielle (en mm)

Le risque peut d'abord être vu comme un extrême, et donc étudié par une **approche probabiliste** qui permet de **délimiter les périodes extrêmes de précipitation** selon leurs probabilités d'occurrence. Le **régime probable** est l'indicateur le plus adapté pour définir les seuils extrêmes des cumuls mensuels de précipitation, et pour analyser la répartition et l'amplitude de ces cumuls extrêmes (*cf. Fiche C1 : Une approche probabiliste du risque*).

Concernant le risque de crue, il est intéressant de quantifier et qualifier les caractéristiques pluviométriques qui mènent potentiellement à des inondations. Ceci peut se faire en étudiant la répartition des cumuls de précipitation **sur une année passée très humide** et/ou en examinant les valeurs seuils de cumul sur plusieurs jours qui ont entraîné ce type d'événement, lors de plusieurs années très humides connues telles que 1951, 1966, 1994, 2001, 2014 (*cf. Fiche C3 : Approche du risque d'inondation*). Les mêmes seuils peuvent être considérés pour le suivi du risque inondation futur. Cependant, il faut rappeler qu'il existe de nombreux biais et incertitudes induits par la modélisation (les cumuls maximums sont souvent sous-estimés).

Pour une meilleure approche du risque, l'analyse climatique peut être couplée à une analyse des débits sur les périodes identifiées.

Concernant plus spécifiquement le risque de sécheresse, celui-ci peut être approché par des indicateurs climatiques tels que le Standardized Precipitation Index (**SPI**) ou le Bilan hydrique pour le risque de sécheresse.

L'indicateur **Standardized Precipitation Index (SPI)** peut être utilisé pour identifier, sur les stations considérées, les périodes extrêmes (humides ou sèches) du climat passé, sur différentes échelles temporelles (1, 2, 3, 6 mois ou plus). Les différentes représentations du SPI permettent également de mettre en évidence les tendances d'évolution par rapport à la moyenne sur la période étudiée. Cet indicateur repose uniquement sur l'analyse des précipitations, il n'intègre pas la température et donc l'évapotranspiration (*cf. Fiche C2 : Standardized Precipitation Index (SPI)*).

Le bilan hydrique est l'indicateur le plus pertinent pour étudier le risque de sécheresse. Il permet de quantifier le déficit d'eau par rapport aux précipitations, à l'évapotranspiration (ETP) et l'état de la réserve utile du sol. Le bilan hydrique en lui-même peut être complété par la fréquence du déficit mensuel moyen sur 30 ans ou encore le suivi du déficit d'évapotranspiration annuel (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*).

Récapitulatif des étapes

- Calculer les centiles 10, 20, 50, 80 et 90 des cumuls mensuels et représenter le régime probable (*cf. Fiche C1 : Une approche probabiliste du risque*)
 - Calcul du SPI (*cf. Fiche C2 : Standardized Precipitation Index (SPI)*) pour l'ensemble des stations sur 1 mois, 3 mois et 6 mois.
 - Définir des seuils de cumuls maximums et compter la fréquence d'apparition sur la période de référence (*cf. Fiche C3 : Approche du risque d'inondation*)
 - Calculer les centiles de cumul quotidien sur la période de référence (*cf. Fiche C3 : Approche du risque d'inondation*)
 - Calculer le bilan hydrique (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*) pour la station qui a des données de pluie et d'ETP
 - À partir du bilan hydrique, calculer la fréquence mensuelle selon le déficit d'évapotranspiration des mois arides, secs, à faible déficience, humides et hyper-humides sur la période 1961-1990 et 1991-2020 pour identifier l'évolution du risque de sécheresse (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*).
 - Représenter l'évolution du déficit d'évapotranspiration (DE) annuel (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*).
-

3. Les tendances observées

Une fois que le climat actuel a bien été décrit et analysé, il est nécessaire de s'intéresser aux tendances passées. Dans le cadre du diagnostic climatique territorial, il est conseillé d'appréhender l'évolution des cumuls et jours de pluie par un **écart de moyenne** et une régression linéaire. L'objectif est de quantifier l'évolution et de comparer les deux méthodes. Si, l'évolution est similaire dans les deux cas, la tendance peut être considérée comme significative. Des tests statistiques permettent de valider cette significativité des tendances (ou pas). Les tendances pluviométriques sont, en effet, plus rarement significatives que celles des températures du fait de la grande variabilité de la pluie (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*).

Ces tendances sont à étudier **d’abord station par station** pour identifier des périodes critiques dans l’année. Puis, les tendances sont à comparer entre les stations pour identifier les différences au sein du territoire.

Récapitulatif des étapes

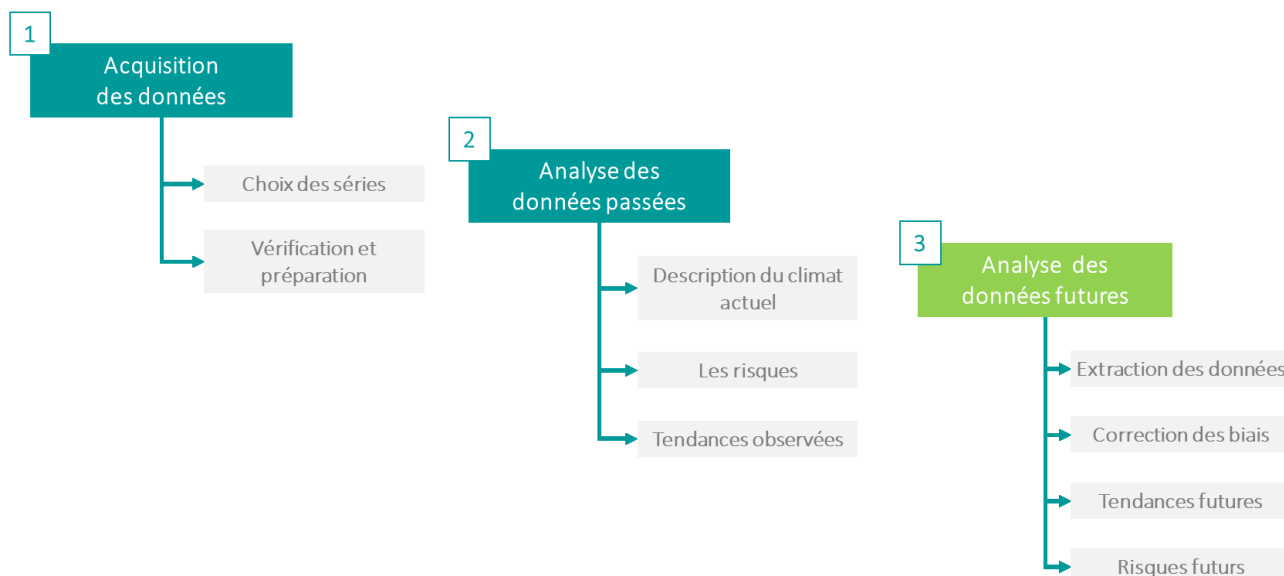
- Représenter l’évolution du cumul par année hydrologique
 - Calculer la différence entre les cumuls moyens des périodes 1961-1990 et 1991-2020 sur les trois échelles temporelles
 - Calculer la différence entre les jours de pluie moyens des périodes 1961-1990 et 1991-2020 sur les trois échelles temporelles
 - Calculer la différence entre les jours de pluie moyens selon l’intensité des pluies des périodes 1961-1990 et 1991-2020 sur les trois échelles temporelles et identifier s’il y a une intensification des pluies
 - Synthétiser les résultats de façon uniforme d’une station à l’autre
 - Comparer les résultats entre stations
-

4. Synthèse de l’évolution du climat local passé : répartition des fortes pluies et des cumuls

Dans le cadre du Diagnostic Climatique Territorial, la synthèse reprendra les éléments de caractérisation du climat local avec une détermination du régime pluviométrique réalisée en comparant les résultats d’une station à l’autre, notamment la répartition des fortes pluies. La synthèse doit aussi faire état de l’évolution observée des cumuls de pluie et du nombre de jours de pluie. Il faut désigner les périodes où une intensification des pluies est observée ainsi que les périodes où le cumul diminue de manière significative.

Concernant les risques, il est important de caractériser le risque de sécheresse principalement grâce au bilan hydrique. Le risque d’inondation sur le territoire s’identifie en comptant le nombre d’épisodes de fortes pluies et leur évolution dans le temps.

Étape 3. Étude des données futures simulées



1. Les indicateurs du climat futur fournis par le portail Drias ne sont pas suffisants

Le portail Drias propose des indicateurs qui sont directement disponibles sur la plateforme. Les indicateurs disponibles sont les suivants :

- Cumul de précipitations
- Précipitations moyennes des jours de pluie (quand $P > 1$ mm)
- Pourcentage de précipitations intenses (part de cumul apporté par les jours de pluie au-delà du centile 90)
- Nombre de jours de pluie
- Nombre de jours de fortes précipitations ($P > 20$ mm)
- Nombre maximum de jours de pluie consécutifs
- Période de sécheresse

Cependant, il n'est pas conseillé de les prendre en compte car cette liste n'est pas suffisante (*cf. Fiche D3 : Identifier des tendances climatiques futures*).

2. Extraction des données sur le portail Drias : choix des scénarios et des modèles

Le climat futur s'analyse à partir de données modélisées. Le portail Drias, développé par Météo-France, donne gratuitement accès aux données climatiques **modélisées** issues de différents modèles climatiques, et ceci en fonction de différents scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (RCP).

Afin de couvrir la gamme d'évolution climatique possible selon les caractéristiques des modèles, l'utilisation des modèles du **CNRM** et de l'**IPSL** est recommandée pour la Bretagne.

Afin d'obtenir des résultats contrastés, les **scénarios RCP 4.5 et 8.5** sont à privilégier.

L'usage d'au moins deux modèles et deux scénarios contrastés permet d'identifier les divergences ou convergences entre les modèles et scénarios : des résultats convergents renforcent les prédictions d'évolution du climat futur (*cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias*)

Récapitulatif des étapes

- Choix des modèles à extraire (*cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias*)
 - Déterminer les points de la grille Safran correspondant aux stations du bassin versant.
 - Extraire de façon groupée les données modélisées sur la période de référence et la période future (2006-2100) pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Il y a donc au minimum 6 extractions de données par station (2 modèles, 2 périodes, 2 scénarios).
 - Trier les données dans différentes tables : par mois, par saison hydrologique et par année hydrologique (*cf. Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie*)
-

3. Biais et vigilance sur la modélisation climatique du portail Drias

Les données issues du portail Drias ne doivent pas être analysées au format brut. Elles doivent faire l'objet d'une **correction préalable** à partir des biais calculés en confrontant les données passées mesurées aux données passées modélisées (*cf. Fiche D3 : Identifier des tendances climatiques futures*). La correction s'effectue par rapport aux écarts moyens entre les données modélisées et observées sur la période 1976-2005.

Récapitulatif des étapes

- Avec les données observées, calculer les moyennes de précipitations sur la période 1976-2005 sur les trois échelles temporelles (mois, saisons hydrologiques et années hydrologiques). Calculer aussi les moyennes de température pour la ou les stations qui possèdent ces données
 - Avec les données modélisées de chaque modèle (CNRM et IPSL) sur la période de référence Drias, calculer les moyennes des données de précipitation sur 1976-2005 sur les trois échelles temporelles. Calculer aussi les moyennes de température correspondant à la ou les stations qui possèdent les données de température
 - Comparer les moyennes des données modélisées aux moyennes observées sur la même période 1976-2005
 - Les écarts moyens sont considérés comme étant les biais des modèles et constituent la base pour corriger les données futures modélisées.
-

4. Les tendances modélisées à horizon 2100

Une fois que les données modélisées extraites de Drias ont été corrigées pour les 2 modèles choisis, les tendances peuvent être analysées entre la normale climatique actuelle observée (1991-2020), l'horizon moyen (2031-2060) et l'horizon lointain (2071-2100). Le but est de montrer l'évolution du climat sur le territoire selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 avec deux modèles contrastés (*cf. Fiche D3 : Identifier des tendances climatiques futures*).

Un suivi par régression linéaire peut aussi être mené sur la période 2031-2100 en prenant en compte la notion de significativité des tendances (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*).

Récapitulatif des étapes

- Représenter l'évolution du cumul de précipitation sur une année hydrologique de 2031 à 2100. Il peut être borné par les cumuls minimum et maximum mesurés dans le passé. L'évolution de la température moyenne annuelle peut aussi être représentée pour les deux modèles et scénarios.
 - Prendre les données modélisées sur la période 2031-2100 et calculer les cumuls moyens sur les trois échelles temporelles (mois, saison, année) à horizon moyen (2031-2060) et horizon lointain (2071-2100) et les comparer aux moyennes observées sur 1991-2020, pour les deux modèles et scénarios.
 - Prendre les données modélisées sur la période 2031-2100 et pour chaque scénario, calculer le nombre moyen de jours de pluie par année hydrologique, à horizon moyen (2031-2060) et horizon lointain (2071-2100) par rapport aux moyennes observées sur 1991-2020.
 - Synthétiser, de manière homogène pour chaque indicateur, les écarts entre les moyennes obtenues pour chaque modèle et chaque scénario.
 - Comparer les tendances sur les 3 échelles temporelles sur l'ensemble des stations, selon le modèle afin d'identifier les convergences et divergences entre les modèles
-

5. Évolution du risque de sécheresse future et disponibilité en eau

L'estimation du risque de sécheresse future est importante pour répondre à l'interrogation sur la **disponibilité en eau en période d'été**. Cependant, les valeurs d'ETP future doivent être calculées car le portail Drias ne fournit pas ces données. La méthode recommandée est celle de "**l'ETP Turc**" avec un rayonnement estimé d'après une relation préexistante entre l'insolation et l'amplitude thermique diurne. Cette méthode donne des résultats assez satisfaisants, avec un écart de moins de 10 % par rapport aux données estimées par Météo-France.

Cependant, les résultats doivent être interprétés avec une grande prudence car l'estimation de l'ETP future donne un bilan hydrique **très théorique** (*cf. Fiche D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ?*)

Récapitulatif des étapes

Estimation de l'ETP future :

- Préparer les données observées de rayonnement et de température minimums, maximums et moyennes mensuelles.
- Calculer l'amplitude thermique mensuelle diurne pour chaque mois
- Pour la station qui possède des données observées de température et rayonnement : noter les formules des régressions linéaires préexistantes entre l'amplitude thermique et le rayonnement
- Préparer et corriger les données modélisées futures de température minimums, maximums et moyennes mensuelles
- Calculer le rayonnement mensuel à partir des formules relevées précédemment et de l'amplitude thermique modélisée
- Calculer l'ETP selon la formule de Turc d'après les températures modélisées corrigées et le rayonnement calculé de 2031 à 2100

Bilan hydrique futur :

- Calculer le bilan hydrique futur à partir des cumuls modélisés et de l'ETP calculée de 2031 à 2100 pour les deux scénarios et chaque modèle
 - À partir du bilan hydrique, calculer la fréquence mensuelle d'avoir des mois arides, secs, à faible déficience, humides et hyper-humides sur la période 2031-2060 et 2071-2100, pour identifier l'évolution du risque de sécheresse
 - Pour chaque modèle, comparer la fréquence identifiée par le scénario RCP4.5 et RCP8.5 à horizon moyen et lointain
 - Représenter l'évolution du déficit d'évapotranspiration (DE) annuel de 2031 à 2100, borné par le DE annuel maximum sur les données observées
-

6. Synthèse de l'évolution locale possible du climat

Sur la modélisation climatique, il est important d'abord de rappeler les biais des différents modèles. Ensuite, il faut synthétiser l'évolution de la pluviométrie future en désignant les convergences et divergences des modèles.

Sur le risque inondation, on pourra évoquer son évolution au moyen de l'étude des épisodes de pluies extrêmes.

Sur le risque de sécheresse, son évolution sera synthétisée grâce au bilan hydrique et à l'évolution du déficit d'évapotranspiration.

Conclusion

Le diagnostic climatique territorial permet une approche complète du climat et de son évolution à l'échelle d'un territoire. Il s'insère dans la partie climatique des études HMUC. Ce document a présenté de nombreux indicateurs pour une analyse complète, et il n'est pas nécessaire de tous les prendre en compte. Cependant, la trame du guide doit être respectée avec d'abord **l'étude des données passées** (description des conditions climatiques actuelles, étude des risques inondation et sécheresse à l'échelle du territoire et étude des tendances climatiques). Puis **l'étude des données futures** avec la correction des biais des modèles, **l'étude des tendances** à différents horizons et **l'étude des risques** futurs.

L'objectif final étant de montrer l'impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau.

Les fiches méthodologiques qui suivent permettent de préciser certaines notions climatiques ainsi que certains indicateurs. Le but est de faciliter la compréhension et la mise en œuvre du Diagnostic Climatique Territorial.



Diagnostic Climatique Territorial

Focus « ressource en eau »

Fiches méthodologiques



En collaboration avec



DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL

FOCUS « RESSOURCE EN EAU »

Fiches méthodologiques

Auteur : **Louis Amiot**

sous la coordination de :

Vincent Dubreuil (Université Rennes 2, UMR6554 CNRS - LETG (Littoral - Environnement - Télédétection – Géomatique)

Josette Launay et Elodie Bardon (Creseb)

Florence Massa et Enora Keromnes (Conseil régional de Bretagne)

Publication Juillet 2021

Ces fiches méthodologiques sont une valorisation du mémoire de Master 2 ***Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias***, de Louis AMIOT, encadré par Vincent Dubreuil (Université de Rennes 2, UMR6554 CNRS – LETG) et Franck Baraer (Météo-France (DIRO/PREVI Rennes) en collaboration avec Guillaume Pajot et Josette Launay (Creseb), coordinateurs d'un groupe de réflexion régional sur " Gestion quantitative de la ressource en eau et changement climatique"

Fiches méthodologiques

Les fiches méthodologiques visent à compléter et préciser les points énoncés dans le guide pour un diagnostic climatique territorial. Elles permettent de préciser les notions qui y figurent et décrivent plus finement les différentes étapes du diagnostic.

Il y a 4 groupes de fiches :

- Les **fiches A** expliquent les notions de base et points de vigilance relatifs aux données en elles-mêmes. Ce groupe de fiches synthétise les questionnements autour de la série de données : Comment choisir et obtenir des bonnes séries de données ? Quelles échelles de temps dans l'analyse de ces données ? Qu'est-ce que la modélisation climatique ?
- Les **fiches B** précisent comment décrire le climat avec la présentation des indicateurs de cumul de précipitations ou nombre de jours de pluie.
- Les **fiches C** montrent comment étudier les risques climatiques liés à la ressource en eau. Elles présentent des indicateurs permettant de définir les risques de sécheresse et inondation.
- Enfin, les **fiches D** présentent comment étudier une tendance climatique passée et future modélisée.

Avertissement

Ces fiches sont illustrées principalement avec les données de Mur-de-Bretagne. Cette station située en centre-Bretagne correspond à une situation intermédiaire dans la région. Cette série est aussi une des plus longues séries quotidiennes de qualité en Bretagne.

Les résultats présentés avec cette série ne doivent cependant pas être extrapolés pour l'ensemble de la région. La pluviométrie est un paramètre très variable et nécessite une analyse à l'échelle fine du territoire considéré.

Sommaire

FICHES A - SÉRIE DE DONNÉES	28
A1 : Sélectionner les stations représentatives	29
A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles	33
A3 : Pourquoi des séries de données quotidiennes pour la pluviométrie ?	40
A4 : Acquérir les séries de données climatiques	43
A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie	50
A6 : Des repères sur la simulation climatique	56
FICHES B - INDICATEURS DESCRIPTIFS	61
B1 : Le calcul de moyennes en climatologie	62
B2 : Le nombre de jours de pluie	67
B3 : La décomposition des pluies	71
B4 : Les pluies efficaces	79
B5 : Les types de climat annuel de Köppen : une synthèse de l'évolution du climat	83
FICHES B - INDICATEURS SUR LES RISQUES INONDATIONS ET SÉCHERESSES	88
C1 : Une approche probabiliste du risque	89
C2 : Standardized Precipitation Index (SPI)	95
C3 : Approche du risque d'inondation	100
C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse	108
FICHES D - TENDANCES CLIMATIQUES	119
D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique	120
D2. Extraction des données modélisées sur le portail Drias	127
D3. Identifier des tendances climatiques futures	131
D4. Comment approcher le risque de sécheresse future ?	140

FICHES A - SÉRIE DE DONNÉES

Avant de réaliser des analyses pour le diagnostic climatique, il est nécessaire de vérifier la donnée climatique en elle-même. Cette série de fiches introductives a pour but de donner des définitions et de préciser la phase de sélection des données.

L'objectif de cette famille de fiches est de donner des éléments pour définir les séries de données à utiliser et rappeler les enjeux forts autour du choix de ces données qui conditionne le résultat final du diagnostic qui sera réalisé.

A1 : Sélectionner les stations représentatives	29
A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles	33
A3 : Pourquoi des séries de données quotidiennes pour la pluviométrie ?	40
A4 : Acquérir les séries de données climatiques	43
A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie	50
A6 : Des repères sur la simulation climatique.....	56

FICHE A1

SELECTIONNER LES STATIONS REPRESENTATIVES

La première étape du diagnostic climatique territorial consiste à identifier un ensemble de stations de mesures représentatif des différentes situations géographiques du territoire de SAGE considéré.

Les paramètres climatiques

Les paramètres nécessaires à la caractérisation du climat sont les suivants : précipitations, température, évapotranspiration potentielle (ETP) et rayonnement.



Les précipitations sont le premier paramètre à considérer lorsque l'on s'intéresse à l'impact du climat sur la ressource en eau en Bretagne. En effet, les sols peu perméables sur le territoire breton induisent une forte corrélation entre les précipitations et les débits. Comme près de 80 % de l'eau potable en Bretagne est prélevée dans les eaux superficielles, cela signifie que la ressource en eau disponible dépend directement de ces précipitations. La **pluviométrie** est l'étude des cumuls de pluie (ou de neige). Elle se mesure avec un pluviomètre, et son unité de mesure est le millimètre (mm)¹. Les données de précipitations quotidiennes sont nécessaires pour la suite ([cf. fiche A3 : Pourquoi des séries de données quotidiennes pour la pluviométrie ?](#)).



La température (T) permet de rendre compte du réchauffement climatique. Elle est aussi un élément clé dans le calcul de l'évapotranspiration et l'évolution du risque de sécheresse ([cf. fiche D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ?](#)). Les données de températures moyennes, minimales et maximales mensuelles sont nécessaires pour la suite.



L'évapotranspiration potentielle (ETP, ou potentiel d'évaporation) correspond à l'eau qui s'évapore du sol et à la transpiration des plantes. Elle est nécessaire pour calculer le bilan hydrique du bassin versant ([cf. fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse](#)), c'est-à-dire la différence entre les apports (pluie) et les pertes naturelles en eau (stockage dans le sol, consommation-transpiration par la végétation, évaporation). Elle est utile pour évaluer les réserves en eau disponibles et les risques de déficit. Pour ce paramètre, les données mensuelles peuvent suffire, elles sont estimées par calcul (cf. encadré 1).



Le rayonnement est un paramètre secondaire utilisé en vue d'estimer l'évolution du risque futur de sécheresse ([cf. fiche D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ?](#)). Pour ce paramètre, les données mensuelles peuvent suffire.

➤ Encadré 1 – À savoir

L'évapotranspiration potentielle n'est pas un paramètre mesurable mais estimé par un calcul. Pour son calcul, la référence prise par Météo-France est la quantité maximale de transpiration en eau d'un gazon coupé ras. L'ETP Météo-France est bornée à 7 mm par jour, ce qui correspond à la quantité maximale que la végétation peut transpirer.

Cette donnée n'est pas disponible pour toutes les stations météorologiques.

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.

La sélection des stations de mesure climatique

Ces stations de mesure ne doivent pas être sélectionnées au hasard, et leur **répartition géographique est essentielle**. Les stations sélectionnées doivent être situées au sein ou à proximité du bassin versant étudié. Cela permet de décrire les phénomènes climatiques propres au territoire, et éventuellement de le comparer à d'autres territoires. L'idéal est que la répartition des stations sélectionnées permette d'avoir une bonne représentation des potentielles variations locales des précipitations : entre l'amont (intérieur) et l'aval (littoral), voire en fonction du relief ou d'un gradient est-ouest selon la taille et l'orientation du bassin versant. Si le territoire présente un relief marqué, il est important d'avoir des stations de mesure à des altitudes différentes. En effet, bien que peu marqué en Bretagne (384 m pour le point culminant), le relief modifie les paramètres climatiques 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 notables dans la différenciation des climats bretons.

Si le nombre de stations de mesure disponibles sur le territoire étudié n'est pas suffisant, des stations un peu plus éloignées, mais restant toutefois dans un rayon cohérent avec ce qui est connu du climat local, pourront être sélectionnées.

➤ Encadré 2 – À savoir

Généralement, la plus grande ville du bassin versant possède une station de mesure suivant l'ensemble des paramètres : précipitations, température, évapotranspiration potentielle (ETP) et rayonnement.

❶ À retenir

Un diagnostic climatique territorial nécessite **l'analyse conjointe de différents paramètres : précipitations, températures, évapotranspiration potentielle et rayonnement**.

Pour une bonne description du climat sur un territoire de SAGE, il est préconisé de **sélectionner trois ou quatre stations de mesure disposant de données quotidiennes de pluviométrie et une ou deux stations de mesure pour les autres paramètres** (une même station pouvant disposer d'un suivi sur l'ensemble des paramètres).

Le choix des stations de mesure doit permettre une bonne représentation des différentes situations géographiques du territoire (amont-aval, proximité littoral, relief).

Sources bibliographiques

Amiot L., (2020), Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne : approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias, Mémoire de Master, Université Rennes 2

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

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

Ducharne A., (2002). Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP, *GICC-Seine*

OMM. (2011). Guide des pratiques climatologiques, *OMM-n°1*

FICHE A2

VALIDER LA QUALITE DES SERIES DE DONNEES DISPONIBLES

La pertinence du diagnostic climatique territorial (analyse du climat et des tendances d'évolution) est directement liée à la qualité des séries de données disponibles sur les stations de mesures sélectionnées. Sur chaque station, il est essentiel de vérifier **la longueur de la série de données disponible, la non-interruption des données et l'homogénéité statistique de la série.**

La longueur de la série de données

L'analyse du climat nécessite de considérer des périodes relativement importantes, et donc de disposer de **séries de données qui soient les plus longues possible**. La frise chronologique ci-contre présente les possibilités de calculs d'indicateurs climatiques au regard des chroniques de données de référence, il faut une série de données d'au moins 30 ans (OMM, 2017). Pour une analyse des tendances climatiques, il est préférable d'avoir **une série de données de 60 ans** (cf. encadré 3).

L'exploitation des données climatiques selon la longueur de série



La longueur de la série de données disponibles doit être **similaire sur l'ensemble des stations de mesure sélectionnées sur le territoire**. Cela permet notamment une comparaison des paramètres climatiques et de leur évolution au sein du territoire (par exemple entre l'amont et l'aval). Si les séries démarrent toutes à la même date, la période de référence correspond à la période de mesure. Mais il est rare d'avoir l'ensemble des séries de données avec la même date de démarrage.

En revanche, dans la phase d'identification des tendances d'évolution du climat (cf. [fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique](#)), la station de mesure disposant de la plus longue série de données peut être analysée indépendamment des autres afin d'avoir une interprétation plus fine.

➤ Encadré 3 – À savoir

Une série de :

- **Moins de 30 ans de données** : ne permet pas de calculer une normale climatique de référence. Les tendances identifiées par les modèles seront donc faussées puisque comparées à des valeurs mesurées trop courtes. À partir de dix ans, il est possible de calculer une moyenne décennale, mais qui ne donnera pas d'informations essentielles puisqu'il y a une grande variabilité interannuelle sur dix ans.
- **30 ans** : permet de calculer une normale climatique, mais ne permet pas d'identifier une tendance de long terme du climat passé ainsi qu'une comparaison avec les tendances futures.
- **60 ans et plus** : permet d'étudier une tendance en comparant deux normales climatiques (moyenne sur les deux périodes de trente ans). Aujourd'hui, près de 70 stations sont disponibles au pas de temps quotidien depuis 1961 pour la Bretagne.

Dates-clés

- **Avant 1945** : Le réseau d'observation météorologique a été touché par les guerres, les séries de données ininterrompues commençant avant cette date sont rares.
- **1976** : Sur le portail Drias, la période de référence des données modélisées est 1976-2005. Une comparaison entre les données passées simulées et observées permet d'identifier les biais des modèles. Il faut au moins une série de données démarrant en 1976 (ou avant) pour calculer ce biais et corriger les données modélisées passées avant de les comparer aux données futures modélisées (*cf. fiche FICHE D3*)

La non-interruption de la série de données

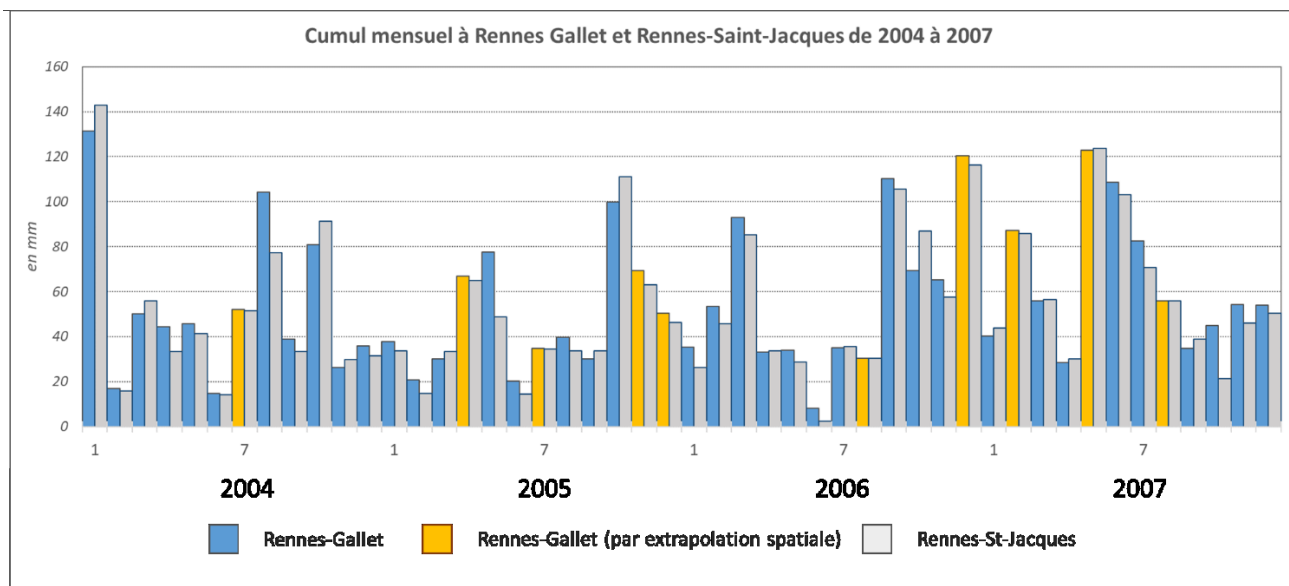
Lorsque de longues séries de données sont considérées, et notamment des données quotidiennes, il est probable d'observer des ruptures (manque de données ou données aberrantes) dans la continuité des mesures.

Ces **ruptures** peuvent fausser les calculs de certains indicateurs (comme les cumuls mensuels, saisonniers et annuels) et donc **altérer la qualité de l'analyse climatique**. Il est donc conseillé de ne pas intégrer les séries de données incomplètes dans les calculs d'indicateurs.

Néanmoins, les ruptures observées dans les séries de données peuvent être complétées par extrapolation :

- **Extrapolation temporelle** : la donnée manquante peut-être complétée par celle de la période précédente ou suivante. Ou bien, par la moyenne de la période manquante. Par exemple, s'il manque le mois de février 1992, il est possible de remplacer cette donnée par celle du mois de février 1991 ou 1993 ou bien par la moyenne des mois de février sur 1991-2020.
- **Extrapolation spatiale** : la donnée manquante peut être complétée par la donnée issue d'une station de mesure voisine. Il est alors possible d'appliquer un facteur correctif à cette donnée selon l'écart moyen calculé entre ces deux stations pour la période manquante.
Par exemple, il y a plusieurs mois de données manquants pour la station Rennes-Gallet entre 2004 et 2007. Ceux-ci ont été complétés par les données de la station voisine Rennes-Saint-Jacques (*cf. figure ci-dessous*). Les données ne sont pas prises au format brut, mais corrigées

en prenant en compte les écarts moyens calculés sur la période de référence entre les deux stations. Le tout donnant un résultat cohérent avec les autres observations mensuelles.



Si le choix est fait de compléter les données manquantes, il est préférable d'utiliser **toujours la même méthode**. De plus, il est **nécessaire de préciser**, lors de l'analyse climatique, quelles sont les données manquantes ou extrapolées.

➤ Encadré 4 – À savoir

Les informations sur les données manquantes sont disponibles sur la publitheque de Météo France. Elle répertorie l'ensemble des données Météo France disponibles sur une période donnée. Pour chaque station de mesure, il est possible de vérifier la chronique ainsi que la continuité des données disponibles, en renseignant les dates de début et de fin de période.

Site de Météo-France à l'adresse suivante :

<https://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>.

➤ Encadré 5 – À savoir

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) considère qu'il faut au moins 80% des données annuelles pour le calcul de normales climatiques sur 30 ans. Pour un indicateur mensuel, le seuil maximal de données manquantes accepté est de 11 jours sur un mois, ou moins de 5 jours consécutifs manquants dans un mois. Dans certains cas, le seuil de 5% de données quotidiennes manquantes est proposé pour considérer une période (mensuelle ou annuelle) comme inexploitable.

L'homogénéité statistique de la série de données

Afin d'étudier l'évolution du climat sur une longue période, il est essentiel de s'assurer de l'homogénéité statistique de la série de données considérée. Cela consiste à vérifier si la série a fait l'objet d'une **homogénéisation par Météo-France** (cf. encadré 6).

En effet, la mesure de la pluviométrie est très sensible à une modification du système de mesure ou de l'environnement. Un déplacement de l'appareil mesureur, un changement d'appareil, une erreur dans la saisie de données, une modification de l'occupation du sol peuvent engendrer des ruptures dans la série de mesures. Une rupture dans la série de mesure signifie que les données mesurées après la date de rupture sont différentes. Des écarts de mesures de précipitations de plus de 20 % entre les données avant et après la date de rupture sont parfois observés pour des stations bretonnes.

Ces ruptures peuvent fausser une analyse temporelle puisque les tendances identifiées ne sont pas dues à l'évolution du climat.

Analyser une longue série de données non homogénéisée, c'est prendre le risque d'identifier des tendances qui ne sont, par exemple, pas dues aux évolutions des précipitations, mais à des facteurs anthropiques ou à des modifications du système de mesure.

Avec toutes les sources d'erreurs possibles et les autres facteurs d'hétérogénéité, aucune station de mesure météorologique ne produit de véritables séries de données homogènes. Cela ne signifie pas pour autant que la série de données est inexploitable puisque certaines ruptures sont minimales ou s'annulent entre elles. Cependant, l'incertitude sur le caractère naturel des tendances persistera. **Il est donc déconseillé d'utiliser des séries qui n'ont pas été homogénéisées par Météo-France.**

➤ Encadré 6 – À savoir

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. **Des séries de données de pluviométrie ont été homogénéisées pour une soixantaine de stations de mesure en Bretagne.** Selon le niveau de correction qui a pu être apporté lors du travail d'homogénéisation, Météo France a attribué un **code qualité à chaque série de données**. Pour sélectionner les séries de données exploitables, il est nécessaire de s'appuyer sur ce code qualité (cf. [Fiche A4 : Acquérir les séries de données climatiques](#)).

Les séries de données climatiques sont disponibles sur le site de Météo-France à l'adresse suivante : <https://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>.

À retenir

Afin de réaliser un diagnostic climatique territorial fin, **les séries de données à considérer doivent être les plus complètes possible et homogénéisées, sur une période d'au moins 60 ans.**

Les données peuvent être complétées sous certaines conditions rappelées ci-dessus.

Sources bibliographiques

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.

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

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

Leroy M., (2000)., Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations, note interne de la DSO météo-France, n°42, Octobre 2000, 12p.

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

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

FICHE A3

POURQUOI DES SERIES DE DONNEES QUOTIDIENNES POUR LA PLUVIOMETRIE ?

Le diagnostic climatique territorial recourt à une analyse détaillée des précipitations. Pour ce faire, **disposer de séries de données quotidiennes de pluviométrie est indispensable**, notamment pour calculer certains indicateurs climatiques, identifier les tendances de pluviométrie et les biais des modèles climatiques.

Pour proposer une analyse climatique précise

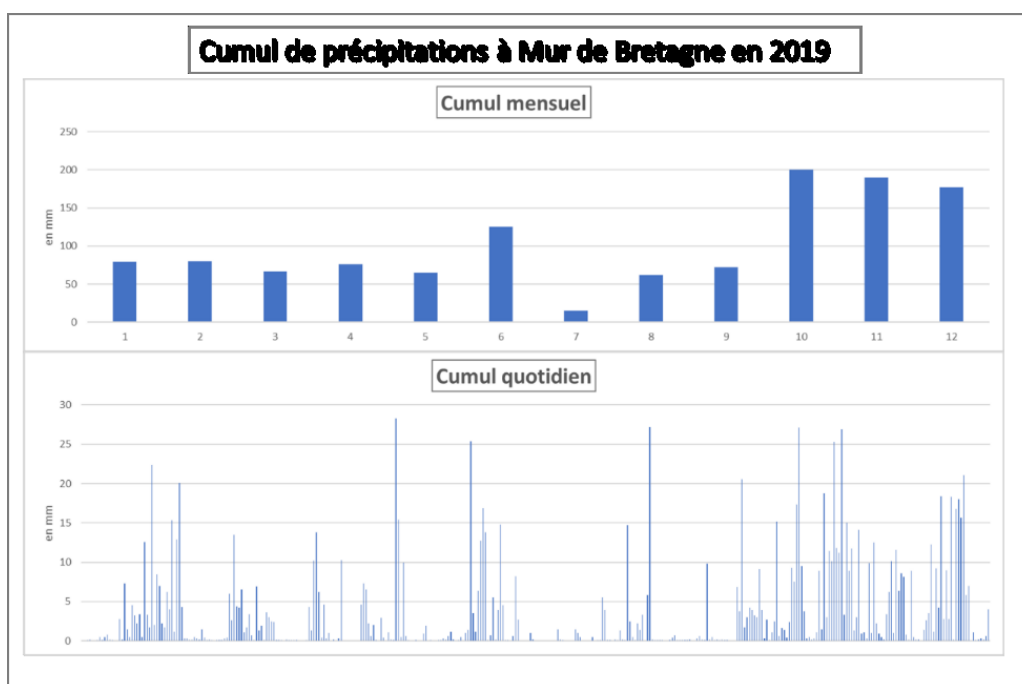
La pluviométrie se mesure à plusieurs pas de temps :

- Toutes les 6 minutes
- Horaire
- Quotidien
- Mensuel

Pour un diagnostic climatique territorial, les données quotidiennes sont les plus adaptées, et permettent d'obtenir une bonne précision de l'analyse climatique.

Si les données horaires ou à 6 minutes sont trop précises pour des analyses climatiques sur le long terme, les cumuls mensuels masquent une grande disparité des précipitations à échelle quotidienne et ne sont donc pas pertinents pour un diagnostic climatique.

Par exemple, à Mur-de-Bretagne du 18 août au 8 septembre 2019 il n'y a pas eu de jours de pluie, soit 21 jours secs en continu. Cette période sèche est très lissée avec les cumuls mensuels, les cumuls d'août et septembre sont de 62 et 72 mm ce qui ne laisse pas supposer cette longue période sans pluie (cf. graphique ci-dessous).



Pour calculer les indicateurs climatiques nécessaires au diagnostic climatique territorial

Les différents indicateurs climatiques attendus dans le diagnostic climatique territorial nécessitent des séries de données quotidiennes de pluviométrie :

- Le **nombre de jours de pluie** (cumul > 1 mm/jour) et leur répartition dans l'année, la saison ou le mois qui donnent une indication sur la répartition des pluies (cf. [Fiche B2 : Le nombre de jours de pluie](#))

- La **décomposition des cumuls pluviométriques** selon l'intensité des pluies. Cette décomposition des cumuls est intéressante pour rendre compte de l'importance des **fortes pluies** ainsi que de leur évolution (*cf. Fiche B3 : La décomposition des pluies*).

Pour préciser les tendances de pluviométrie

L'utilisation de série de données quotidiennes permet une évaluation précise des tendances d'évolution de la pluviométrie.

Elle permet notamment de qualifier une **intensification des pluies** sur une période particulière en mettant en parallèle évolution du cumul et évolution du nombre de jours de pluie.

➤ Encadré 7 – À savoir

Une analyse précise des événements pluvieux extrêmes (fortes pluies) et de leur évolution peut être menée grâce à l'étude des cumuls quotidiens maximums. Par exemple, à Mur-de-Bretagne, il y a eu 23 jours où le cumul quotidien a dépassé 50 mm entre 1932 et 2019. Un tiers de ces cumuls a été observé après 2000. L'augmentation de ces cumuls quotidiens extrêmes ces 20 dernières années n'est pas sans conséquence sur la ressource en eau et sur la gestion des dégâts engendrés (inondations potentielles, ruissellement et érosion des sols).

Identifier les biais des modèles climatiques

Afin de simuler le climat futur, les modèles climatiques reposent notamment sur la modélisation de séries de données quotidiennes de pluviométrie pour la période passée et pour la période à venir jusqu'en 2100 (*cf. fiche D2. Extraction des données modélisées sur le portail Drias*)

Afin d'évaluer les biais de ces modèles, il est nécessaire de comparer les séries de données quotidiennes de pluviométrie observées aux séries de données quotidiennes simulées par le modèle.

❗ À retenir

Les séries de données quotidiennes permettent une **analyse suffisamment détaillée de la pluviométrie pour un diagnostic territorial**. Elles offrent notamment la possibilité de décomposer les cumuls selon l'intensité des pluies et d'identifier les biais des modèles, analyses qui permettront aussi de réaliser les projections dans le futur.

Il est important d'avoir au moins une série de données quotidiennes sur le bassin versant afin de permettre cette approche détaillée de la pluviométrie et de son évolution.

FICHE A4

ACQUERIR LES SERIES DE DONNEES CLIMATIQUES

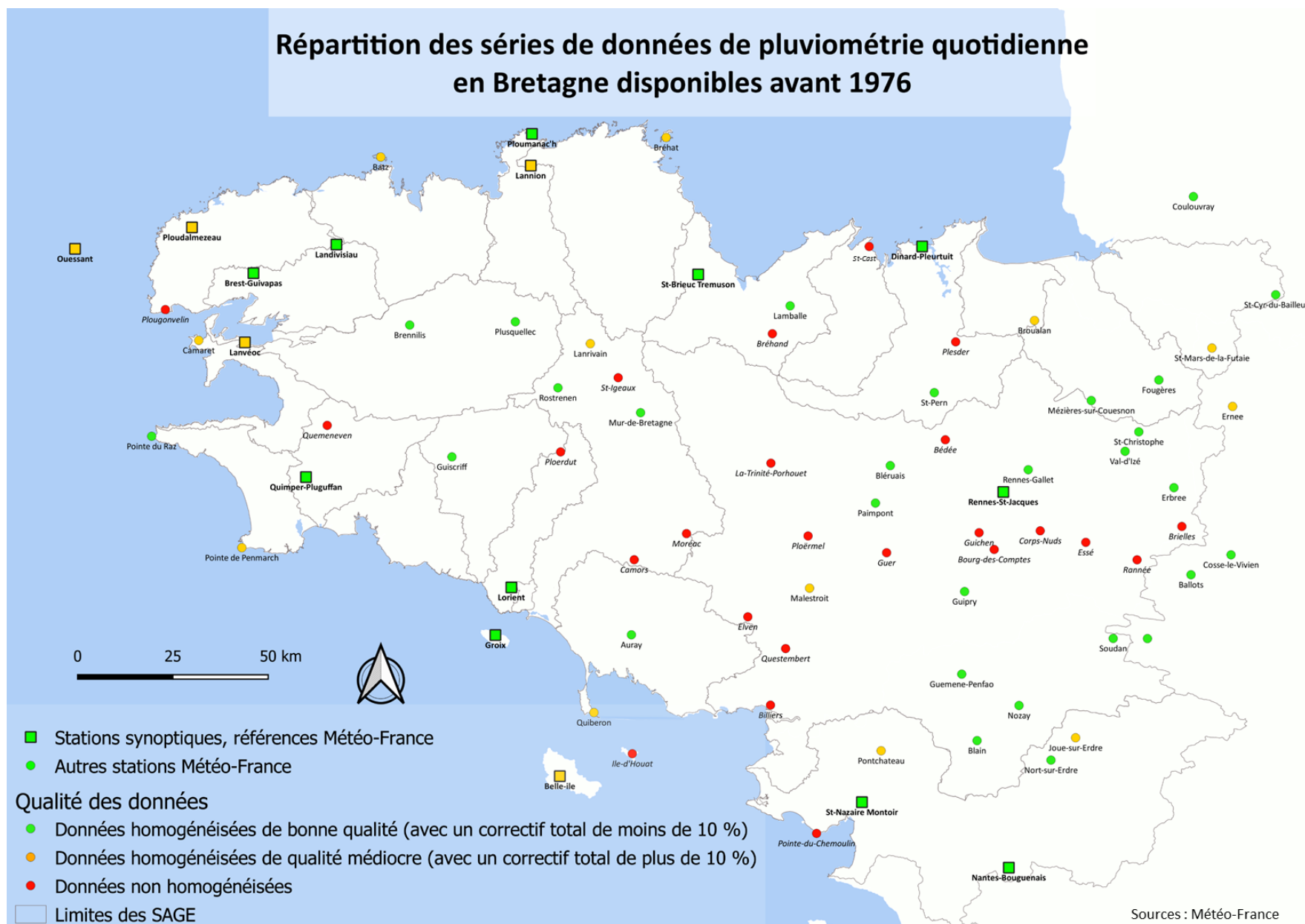
Météo France est le principal producteur de données climatiques sur le territoire. Concernant le paramètre pluviométrie, il y a des centaines de stations de mesures proposant des séries de données quotidiennes en Bretagne et aux alentours. Cependant, parmi toutes ces séries disponibles, **seules 70 respectent les critères de qualité requises pour un diagnostic climatique territorial.**

Répartition des stations et des séries de données de pluviométrie disponibles

La carte ci-contre rend compte de la **répartition des stations Météo France** disposant de séries de données quotidiennes pour le paramètre pluviométrie sur les territoires de Sage bretons. La moitié d'entre elles est située dans le territoire du SAGE de la Vilaine. La répartition des stations est ainsi **assez inégale**. Le nord de la Bretagne est globalement moins bien couvert. Les stations synoptiques (qui donnent une vue générale) font partie du réseau météorologique mondial et mesurent de manière uniforme les paramètres climatiques depuis des décennies. Les stations synoptiques sont donc à sélectionner en priorité, puis les séries homogénéisées (en vert). Mais il est nécessaire de compléter par des séries de moins bonne qualité, voire même non homogénéisées pour avoir une bonne couverture spatiale du territoire.

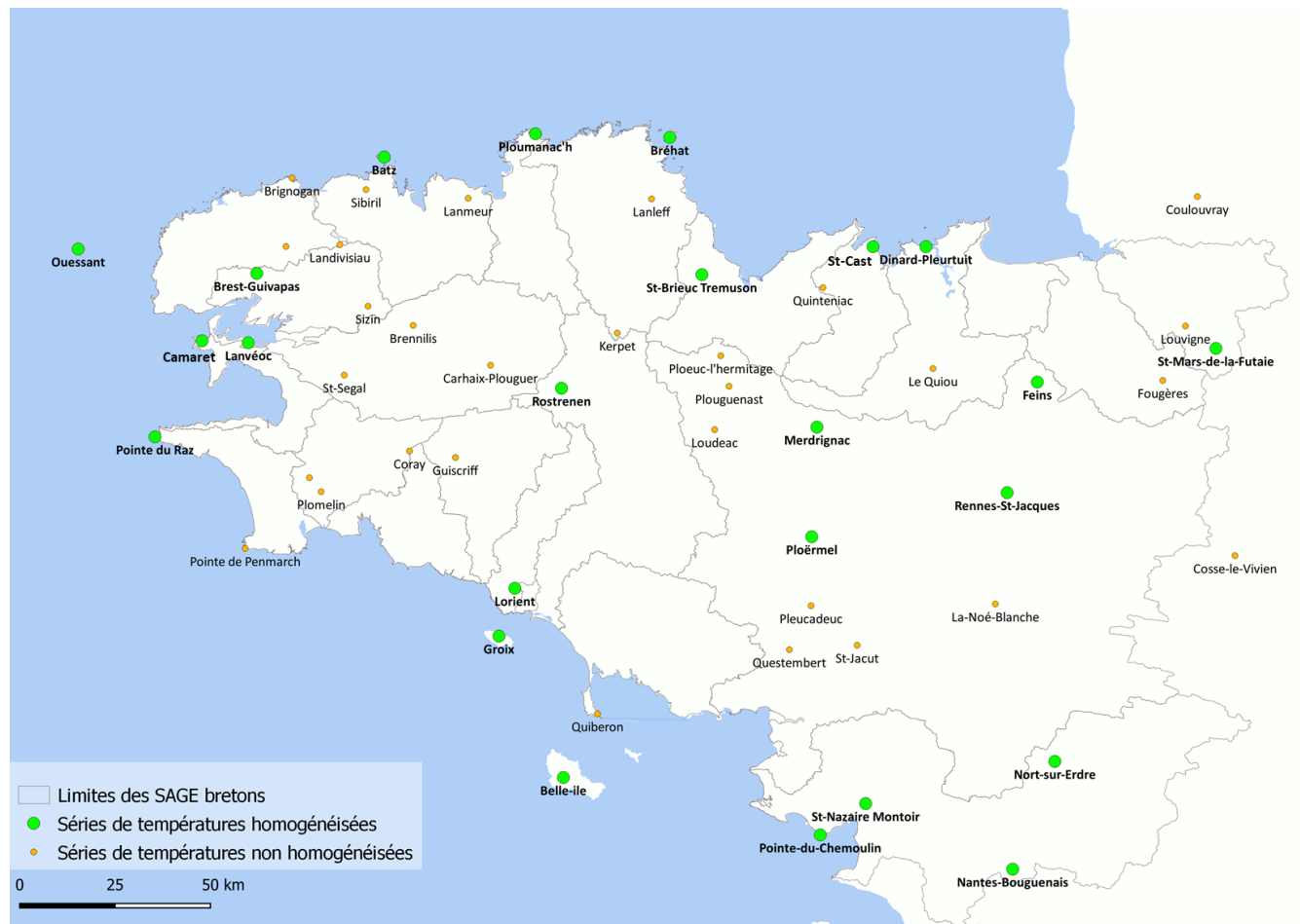
Dans les quelques cas où il n'y a pas ou trop peu de stations représentatives sur le territoire (*cf. fiche A1 : Sélectionner les stations représentatives*) ou lorsque les séries disponibles ne correspondent pas aux critères de qualité requis (*cf. fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*), il est recommandé de considérer une/des station(s) disponible(s) sur un territoire voisin. Par exemple, pour le SAGE Sud-Cornouaille qui ne présente aucune longue série de données sur son territoire, il est envisageable de prendre les données des stations de Quimper, Guiscriff et Lorient situés à proximité du territoire.

Répartition des séries de données de pluviométrie quotidienne en Bretagne disponibles avant 1976



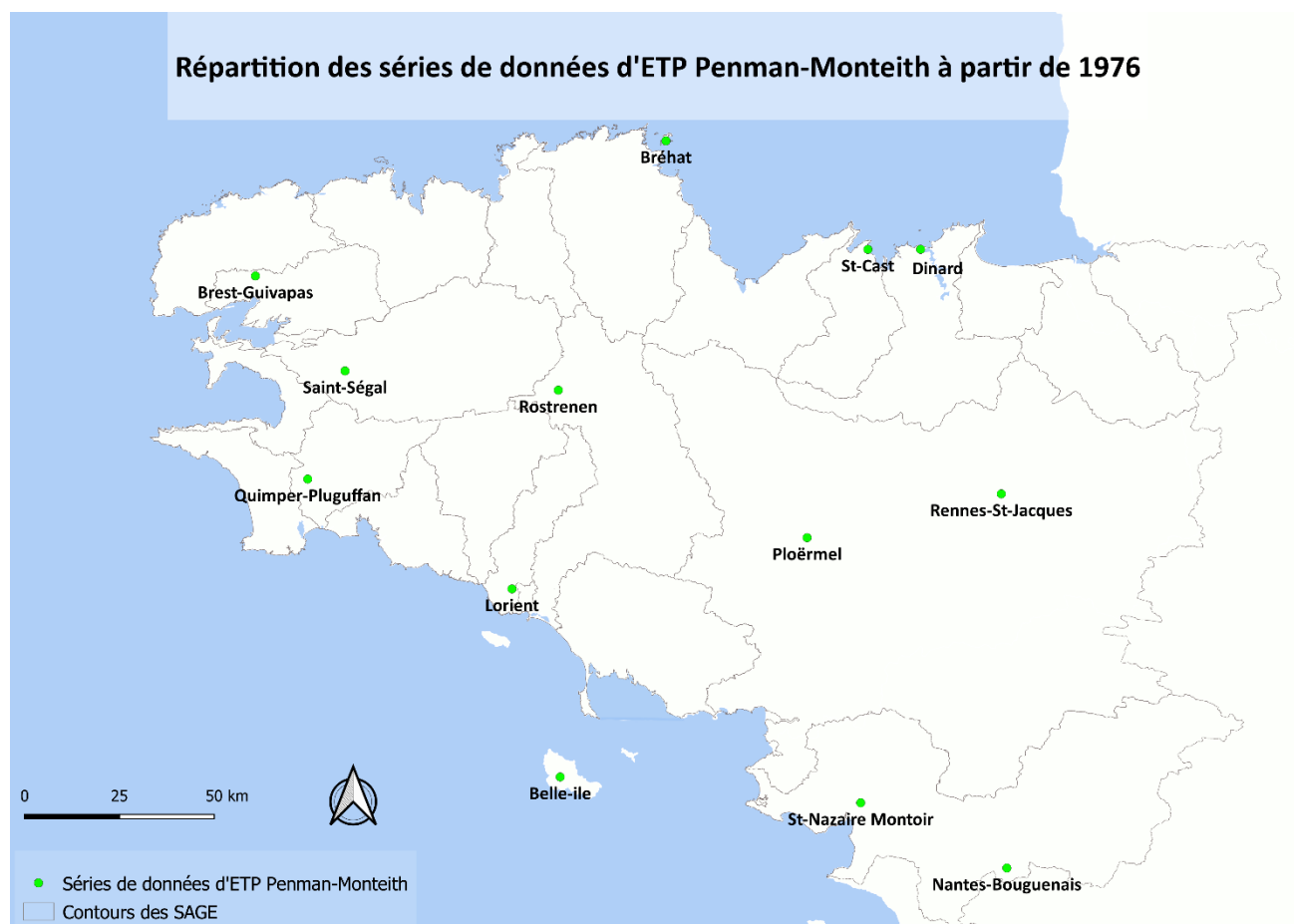
Disponibilité des autres paramètres

Température :

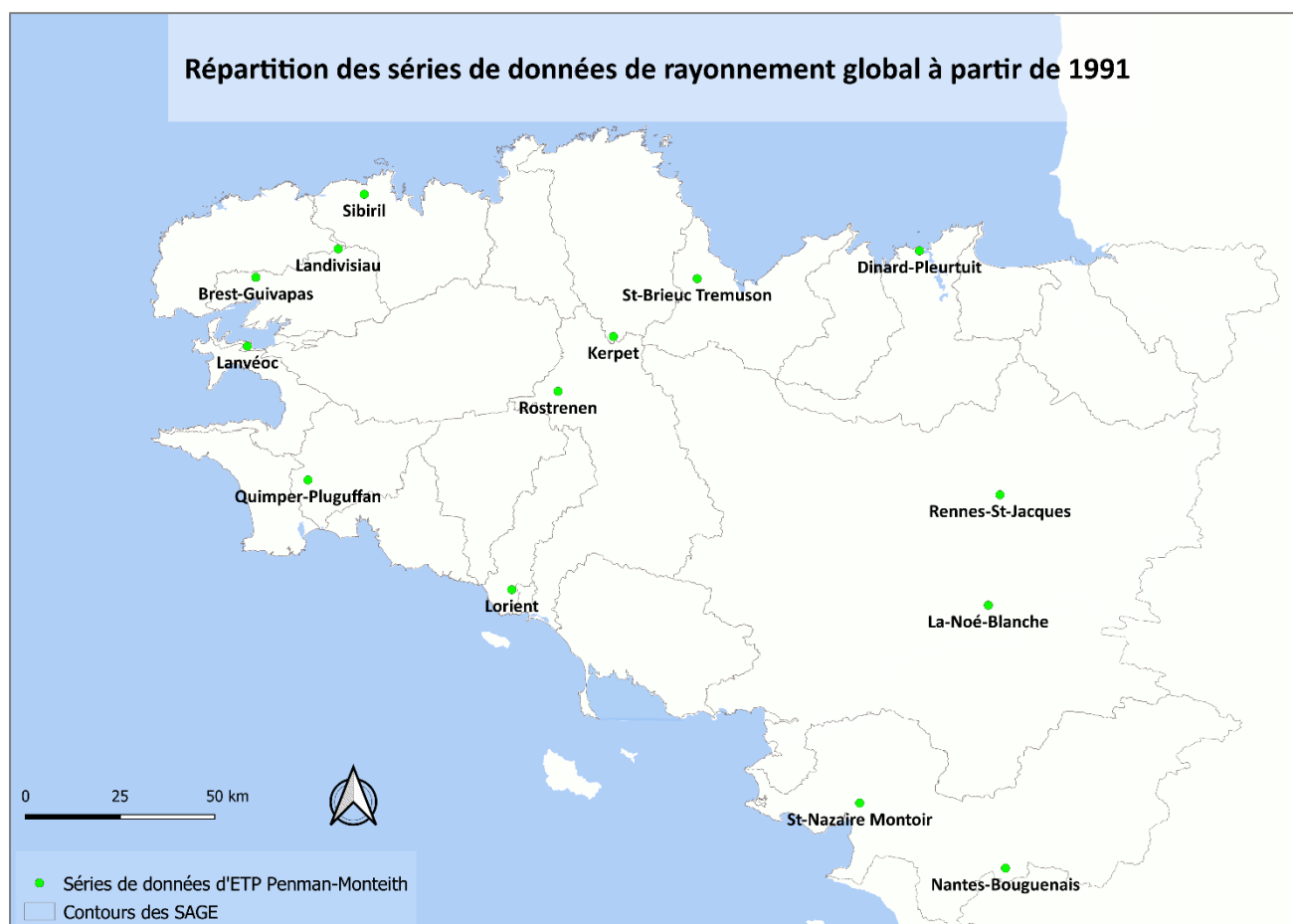


Concernant les températures, il y a plus d'une vingtaine de séries de données homogénéisées disponibles. Celles-ci sont bien réparties sur le territoire. On peut compter sur la présence d'une station homogène à proximité de tous les territoires de SAGE. **Une ou deux stations suffisent pour réaliser un diagnostic climatique territorial.**

ETP :



Les séries d'ETP Monteith sont plus rares sur le territoire. Cependant la variabilité de l'ETP est moins importante que celle des précipitations. Il est tout à fait envisageable de considérer la série de données la plus proche.

Rayonnement :**Comment acquérir les données ?**

Les séries de données disponibles sont téléchargeables sur la publitheque de Météo France : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>. Pour chaque station de mesure, il est possible de vérifier la chronique ainsi que la continuité des données disponibles.

Afin d'explorer le catalogue de données Météo France, il est nécessaire de créer préalablement un compte. À noter que les données ne sont pas en accès libre, mais vendues sur la base de 10 centimes d'euros la donnée (cf. encadré 8).

Pour les aides relatives à la commande des données depuis la publitheque, un guide est disponible et téléchargeable : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=rubrique>

➤ Encadré 8 – À savoir

L'acquisition de séries de données telle que nous le préconisons pour un diagnostic climatique territorial est d'environ 2 700€ (3 séries de données quotidiennes de précipitations sur 60 ans + les données mensuelles P, T et ETP).

Données quotidiennes

Cumul des hauteurs de précipitations quotidiennes du 01/01/1951 au 31/12/2020 pour 3 stations
= 3 x 867,2€ = 2 601,6€

Données mensuelles

Cumul mensuel des hauteurs de précipitations + moyenne mensuelle des températures minimales + moyenne mensuelle des températures maximales + somme des ETP Penman du 01/1951 au 12/2020 pour une station synoptique : **134,4 €**

TOTAL Max : 2 736 €

À retenir

Une **soixantaine de séries de données** de pluviométrie sont disponibles sur un temps long (plus de 50 ans) en Bretagne. Les séries de données climatiques sont disponibles sur le site de Météo-France à l'adresse suivante :

<https://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>.

Avant de les télécharger, il est nécessaire de vérifier la qualité des séries données disponibles sur les stations représentatives de son territoire, à savoir le niveau de correction apporté lors de l'homogénéisation par Météo France.

FICHE A5

LES DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS POUR L'ANALYSE DE LA PLUVIOMETRIE

Le diagnostic climatique territorial repose sur le calcul et l'analyse de différents indicateurs climatiques décrits dans les fiches B, C, D. Selon l'objectif recherché dans l'analyse, les indicateurs peuvent ou doivent être calculés sur différentes échelles temporelles.

Échelle annuelle

L'analyse de la pluviométrie s'appuie sur de nombreux indicateurs calculés sur 12 mois : cumul moyen de précipitation, cumul de précipitation minima et maxima, cumul de jours de fortes pluies, etc. En matière d'hydrologie, **considérer l'année civile ou l'année hydrologique** pour le calcul d'un indicateur peut engendrer des **différences significatives en termes de résultats**.

L'**année hydrologique** correspond à une période continue de 12 mois pendant laquelle se produit un cycle climatique complet. Le début de l'année hydrologique correspond au début de la reconstitution des stocks d'eau des bassins versants, c'est-à-dire à la reprise des précipitations au début de l'automne. En Bretagne, le début de l'année hydrologique est couramment fixé au **1^{er} octobre**, les premières précipitations automnales significatives ayant généralement lieu à partir de début octobre. L'année hydrologique s'étend donc du 1^{er} octobre (année n-1) au 30 septembre de l'année suivante (n), et intègre l'ensemble des précipitations hivernales qui représentent la majorité des précipitations annuelles. En ce qui concerne **l'année civile** (du 1^{er} janvier au 31 décembre), les périodes de précipitations hivernales sont réparties sur 2 années : novembre-décembre de l'année n, et janvier-février-mars de l'année n+1.

Par conséquent, dans une analyse pluriannuelle, les indicateurs pluviométriques calculés sur une année civile, tels que le Cumul annuel des précipitations, risquent de **masquer les événements extrêmes** liés soit aux années sèches, soit aux années humides (cf. encadré 9). Dans le cadre du changement climatique, il est important de voir si la fréquence de ces événements extrêmes, à l'origine de fortes tensions sur la gestion de la ressource en eau (excès ou manque) a tendance à augmenter.

Il est conseillé de travailler à l'échelle de l'année hydrologique pour le calcul des indicateurs pluviométriques. Cette échelle rend mieux compte du régime pluviométrique annuel impactant le fonctionnement hydrologique des bassins versants, et donc, **la disponibilité de la ressource en eau**.

➤ Encadré 9 – À savoir

Pour une année donnée, l'écart entre un cumul annuel de précipitations calculé sur une année civile et sur une année hydrologique peut aller **jusqu'à ± 300 mm**. Cela peut fausser l'interprétation des cumuls minimums et maximums si l'on considère les cumuls en année civile ou année hydrologique.

L'année **2001**, correspondant à une année humide extrême avec des inondations hivernales, ou l'année **1976**, correspondant à une année de sécheresse très marquée (de l'hiver jusqu'en fin d'été) sont mieux représentées en année hydrologique.

Sur la station Mur-de Bretagne en 1976 (date de sécheresse historique), le cumul est de 750 mm sur l'année civile, contre 489 mm pour l'année hydrologique, soit 260 mm de plus. Cela s'explique par le fait que l'année civile intègre l'automne et début d'hiver 1976 qui ont été assez arrosés. Le tableau ci-dessous montre que le classement des 5 années les plus pluvieuses ou les plus sèches ne met pas en évidence les années 2001 et 1976 lorsque l'indicateur est calculé en année civile.

Cumul minimum et maximum à Mur-de-Bretagne par année civile et hydrologique (1932-2020)

Cumul maximum par année hydrologique ou civile			
Année Hydro	Cumul max-Hydro	Cumul max-Civil	Année civile
2001	1461,4	1336,8	2014
2014	1433,4	1322,5	1951
1951	1316	1274,3	1960
2007	1313,2	1251,6	1982
1936	1274,5	1226,3	1986
Cumul minimum par année hydrologique ou civile			
Année Hydro	Cumul min-Hydro	Cumul min-Civil	Année civile
1976	488,8	638,7	1949
1949	533,7	657,8	1971
1959	617,1	670,8	1973
1944	648,1	682,5	1945
1971	658,9	696,7	1953

Sur la station de Mur-de-Bretagne il manque les données de Mars 2000 et Décembre 2001

Échelles saisonnières

L'échelle saisonnière vient compléter et préciser un indicateur calculé sur une échelle annuelle. Elle peut être définie selon les saisons météorologiques ou les saisons hydrologiques.

Les **saisons météorologiques** durent trois mois et démarrent au 1^{er} du mois, contrairement aux saisons astronomiques qui démarrent 3 semaines plus tard. Ainsi, chaque saison météorologique correspond à **3 mois entiers** :

- L'hiver = décembre, janvier et février
- Le printemps = mars, avril et mai
- L'été = juin, juillet et août
- L'automne = septembre, octobre et novembre.

Les **saisons hydrologiques** sont étroitement liées au cycle de l'eau, dont l'hydrologie des cours d'eau, mais aussi au cycle végétal. Ainsi deux saisons hydrologiques se distinguent :

- La **saison de recharge (octobre à mars)** des nappes et des cours d'eau correspond à la période la plus arrosée de l'année, avec une végétation en dormance. Les précipitations viennent recharger les réserves en eau de surface ou s'infiltrer dans le sol. Une infime partie s'évapore du fait de températures modérées/basses.
- La **saison d'étiage (avril à septembre)** est la saison où 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.

➤ Encadré 10 – À savoir

Concernant le découpage saisonnier, le **SDAGE Loire-Bretagne** fixe la saison d'étiage du 1^{er} avril au 31 octobre et la saison de recharge du 1^{er} novembre au 31 mars. **En Bretagne**, nous nous basons sur le découpage de l'année hydrologique, en démarrant la **saison de recharge au 1^{er} octobre (n-1)**.

En ce qui concerne les indicateurs pluviométriques, une analyse par saisons hydrologiques rend mieux compte des enjeux de gestion de l'eau. En effet, 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. La différence entre l'analyse saisonnière hydrologique et météorologique peut s'observer au niveau de l'indicateur des cumuls de précipitations sur le long terme (*cf.* encadré 11).

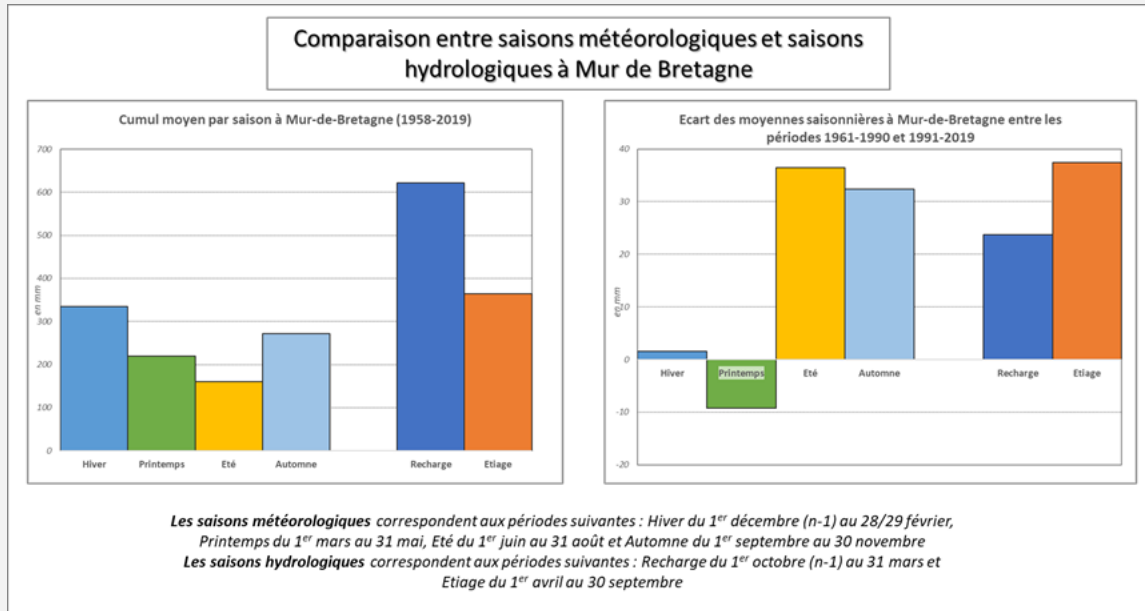
L'échelle de la saison météorologique peut être utilisée pour des indicateurs d'ETP et de température.

➤ Encadré 11

Comparaison saison hydrologique et météorologique

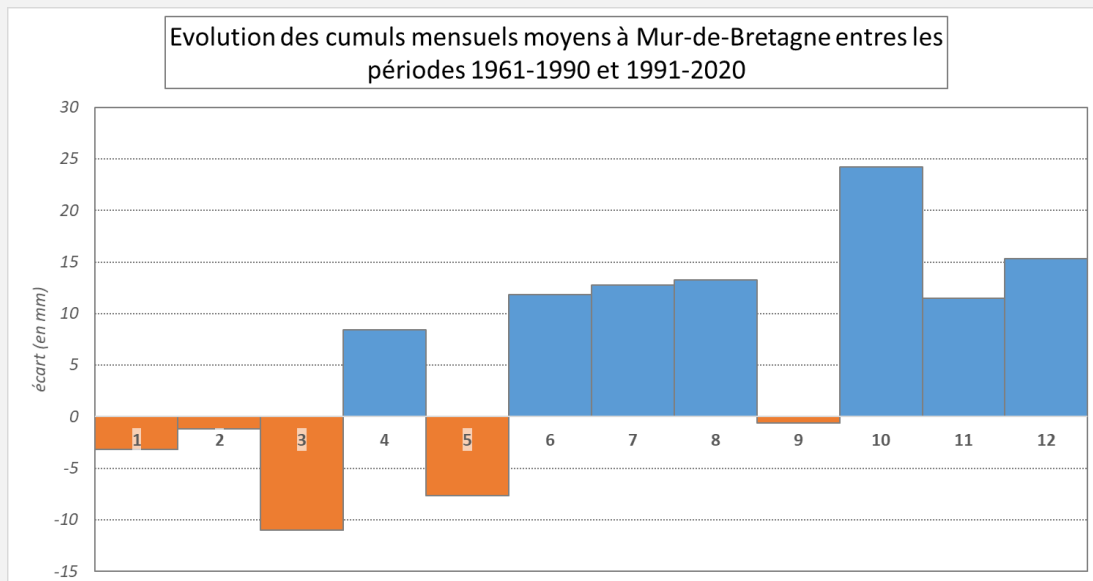
Les cumuls et tendances pluviométriques calculés sur des **saisons météorologiques et hydrologiques** donnent des **résultats parfois différents**, voire contradictoires.

La figure ci-dessous met en parallèle le cumul moyen et l'écart de cumul moyen par saison hydrologique et météorologique à la station Mur-de-Bretagne.



Concernant les cumuls moyens par saison météorologique, le cumul hivernal est en moyenne deux fois plus élevé que le cumul estival, tandis que le printemps et l'automne sont dans une situation intermédiaire. Le facteur 2 se retrouve pour les saisons hydrologiques : le cumul en saison de recharge est en moyenne deux fois plus élevé que le cumul en saison d'étiage.

Concernant les tendances (écart moyen), une hausse de plus de 20 mm des cumuls est observée pour les deux saisons hydrologiques. La situation est plus contrastée pour les saisons météorologiques : la hausse concerne surtout l'été et l'automne.



Les tendances et cumuls en saison météorologique présentent un intérêt limité quand l'étude porte sur la pluviométrie. Les tendances observées en saison météorologique se retrouvent à échelle mensuelle. Une analyse plus fine au pas de temps mensuel (Écart moyen du cumul moyen mensuel calculé sur deux périodes trentennales (1961-1990 / 1991-2019)) montre que l'augmentation des précipitations en saison de recharge a lieu essentiellement en octobre-novembre alors qu'en période d'étiage, cette augmentation s'étale davantage sur l'ensemble de la saison (sauf mai et septembre).

L'échelle mensuelle

L'échelle mensuelle est à utiliser pour **l'ensemble des indicateurs**. Elle permet de préciser les observations faites à l'échelle saisonnière et d'affiner le régime pluviométrique ainsi que la variabilité mensuelle. Elle est également pertinente pour caractériser par exemple l'allongement (ou pas) des périodes d'étiage.

Dans le cadre d'un diagnostic climatique territorial appliqué à l'échelle d'un Sage, il est important d'utiliser l'échelle mensuelle pour affiner le diagnostic climatique pour décrire le régime pluviométrique et son évolution ainsi que **l'évolution des périodes extrêmes**.

À retenir

Les **échelles temporelles** à considérer pour le calcul des indicateurs pluviométriques dans le cadre d'un diagnostic climatique territorial sont :

- L'année hydrologique pour caractériser le régime pluviométrique annuel,
- La saison hydrologique pour répondre aux enjeux de la gestion de l'eau,
- L'échelle mensuelle pour caractériser finement le climat de référence et l'évolution observée

Ces trois échelles sont utilisables pour l'ensemble des indicateurs descriptifs de pluviométrie. Pour les autres paramètres climatiques (température et ETP), les échelles mensuelles, saisons météorologiques et année civile peuvent être utilisées.

FICHE A6

DES REPERES SUR LA SIMULATION CLIMATIQUE

Plusieurs modèles climatiques permettent de simuler l'évolution climatique future. Les données relatives aux différents paramètres climatiques issues de ces modèles sont disponibles et accessibles en ligne sur le portail Drias (cf. <http://www.drias-climat.fr/>).

Y sont associés des documents explicatifs qui aident à la compréhension de la simulation climatique. Il est cependant nécessaire de rappeler ici certains éléments essentiels à l'utilisation de ces données modélisées.

Une modélisation pour quoi faire ?

La modélisation permet de simuler les **tendances générales d'évolution du climat** selon un scénario d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) particulier. Les données modélisées, mêmes corrigées, ne **représenteront jamais exactement les données qui seront observées** dans dix, vingt ou trente ans.

L'objectif de la modélisation n'est pas de prédire, mais de **prévenir et d'avertir** les décideurs, ainsi que l'ensemble de la population, de l'évolution possible du climat. Elle permet également d'élaborer une stratégie d'adaptation au changement climatique ajustée à l'intensité des phénomènes pouvant être attendus.

Les modèles climatiques

Les modèles climatiques permettent une représentation physique simplifiée de la réalité (climat passé et actuel) et des climats futurs possibles. Ils reposent sur **un couplage de 3 modèles** :

- Un modèle **atmosphérique** qui représente la circulation des masses d'air
- Un modèle de **surface continentale** qui inclut notamment le relief et l'occupation du sol.
- Un modèle **océanique** qui intègre notamment les glaces et mers.

Pour la modélisation, la surface du globe est découpée dans une grille. Le découpage horizontal est appelé **maille** et le découpage vertical niveau. C'est sur chacune de ces mailles que des conditions météorologiques moyennes sont modélisées. Plus cette surface de maille est faible et plus le modèle est performant. Cette surface correspond à la **résolution spatiale**. La résolution spatiale de ces modèles climatiques est variable.

Les modèles climatiques globaux simulent l'évolution du climat à grande échelle avec des mailles de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres (le climat modélisé est le même pour toute la surface de cette maille). Ces données permettent d'identifier des grandes tendances mondiales. Mais elles ne sont pas exploitables pour des études climatiques locales.

Des modèles climatiques régionaux, à haute résolution spatiale, ont été développés à partir de données issues d'une régionalisation des tendances mondiales climatiques. Cette méthode permet de simuler l'évolution du climat sur des mailles de 10 à 20 kms.

Les données disponibles sur le portail Drias sont issues de modèles régionaux projetés sur la grille Safran² dont la maille est de 8 km de côté. Les données sont donc disponibles pour plusieurs centaines de points pour toute la France.

² Safran est un système d'analyse des variables atmosphériques à petite échelle ce qui permet d'affiner les modèles

Les simulations climatiques futures

Les scénarios « Representative Concentration Pathway » (**RCP**) sont des projections climatiques établies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Elles dépendent de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et de l'usage des sols. Dans ces projections, l'effet de la perturbation du climat est rapporté à un équivalent de forçage radiatif qui modifie le bilan énergétique de la Terre. Le **forçage radiatif** est le surplus d'énergie disponible apportée par le piégeage du rayonnement infrarouge par les GES.

Quatre scénarios d'évolutions climatiques RCP sont définis dans le 5^{ème} rapport du GIEC : **RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5**. Le chiffre correspond au forçage radiatif total, équivalent en W/m^2 , pour l'année 2100 par rapport à l'année 1750.

Le scénario RCP 2.6 correspond à un scénario d'atténuation avec un pic des émissions de GES avant 2050 suivi d'un déclin. Le forçage radiatif serait ainsi limité à $2.6 W/m^2$. 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 radiatif de $8.5 W/m^2$. C'est le scénario le plus pessimiste.

Les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 sont des scénarios d'émissions de GES intermédiaires.

➤ Encadré 12 – À savoir

Pour tous les modèles disponibles sur le portail DRIAS, les données du climat futur sont produites pour les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5, sur **un pas de temps quotidien**.

Ces données modélisées sont disponibles sur la période historique de 1951 à 2005 et la période « future » de 2006 à 2100. Cette période future peut se découper en horizons. L'horizon correspond à une période future qui sert de référence. Il y a généralement **3 horizons : proche, moyen et lointain**. L'évolution du climat futur est le plus souvent étudiée à horizon moyen, c'est-à-dire pour la période 2031-2060, et à horizon lointain, à savoir la période 2071-2100.

Plus d'infos sur les données disponibles : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/40>

Plus d'infos sur l'extraction des données Drias : *cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias.*

Les incertitudes liées à la modélisation climatique

La modélisation climatique induit de **nombreuses incertitudes** dans l'analyse climatique. Il est nécessaire d'en prendre conscience et d'**en tenir compte** pour appréhender au mieux les données des sorties de modèles, ainsi que pour l'interprétation des indicateurs d'évolution possible du climat futur.

Les premières incertitudes relèvent des modèles utilisés. En effet, ils sont calés sur des données passées mesurées *in situ*. **Or, la qualité de ces données mesurées est variable**. Les principaux inconvénients concernant ces données passées sont la rupture d'homogénéité et la couverture partielle des territoires par le réseau de mesure (cf. [fiche A4 : Acquérir les séries de données climatiques](#)).

Par ailleurs, les incertitudes résident dans le modèle climatique, notamment sur les **hypothèses physiques** qui sont avancées avec des approximations, ou sur la variabilité naturelle du climat difficilement modélisable.

La **méthode de régionalisation des données** induit également des approximations statistiques et une incertitude persiste sur les données modélisées malgré les corrections apportées (cf. encadré 13).

Il existe également des incertitudes liées aux scénarios d'évolutions climatiques RCP. En effet, la modélisation des émissions de gaz à effet de serre repose sur **l'évolution des paramètres démographiques, économiques et technologiques**, paramètres sur lesquels de nombreuses incertitudes persistent.

Enfin, des incertitudes liées au **manque de connaissance** sur certains processus existent. En effet, 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.

Plus d'infos : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/177>

➤ Encadré 13 – À savoir

Les données issues des modèles sont corrigées par la méthode ADAMONT, reposant sur un procédé quantile/quantile. Cette méthode permet de corriger les extrêmes et la fréquence des jours de pluie. Cependant, cette correction automatique ne signifie pas que les données sont directement exploitables. Afin d'identifier les biais persistants, il est **nécessaire de confronter les données modélisées aux données observées** (cf. [Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias](#)).

À retenir

Les données issues de modélisation, et disponibles sur le portail Drias, sont à utiliser dans la phase d'analyse des tendances d'évolution du climat futur du diagnostic climatique territorial. Ces données proviennent de modèles régionaux et sont disponibles au pas de temps quotidien pour 3 des 4 scénarios RCP du GIEC.

La modélisation climatique induit de nombreuses incertitudes qui nécessitent une **prudence** dans l'analyse des données futures.

Sources bibliographiques

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

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., Fichet 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

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. 2017 : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, Geosci. Model Dev., 10, 4257-4283

Rapport Drias : Drias. (2020) Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole

Rapport GIEC : 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.

FICHES B - INDICATEURS DESCRIPTIFS

Les **indicateurs climatiques** permettent de donner une vision synthétique du climat et de son évolution. L'utilisation des mêmes indicateurs climatiques sur l'ensemble d'un territoire (ex. Bretagne) permet une comparaison spatiale et/ou temporelle des résultats obtenus, concernant autant la description du climat passé que la modélisation des tendances futures.

Les indicateurs présentés ici sont ceux **préconisés dans le cadre du diagnostic climatique territorial** afin de décrire le climat passé et actuel. Cette description portant principalement sur l'évolution de la pluie, les indicateurs sont principalement des indicateurs de pluviométrie.

L'objectif de cette famille de fiches est de présenter les indicateurs à retenir pour décrire les conditions climatiques actuelles.

B1 : Le calcul de moyennes en climatologie	62
B2 : Le nombre de jours de pluie	67
B3 : La décomposition des pluies	71
B4 : Les pluies efficaces	79
B5 : Les types de climats annuels de Köppen	83

FICHE B1

LE CALCUL DE MOYENNES EN CLIMATOLOGIE

En première approche, la climatologie s'intéresse aux valeurs moyennes des paramètres météorologiques, à leur dispersion autour de cette moyenne, aux valeurs extrêmes et à leur durée de retour. **Le calcul de moyennes est donc la base de l'analyse climatique.**

Les calculs de moyennes

Le calcul de moyennes permet de décrire le climat actuel et d'effectuer des comparaisons spatiales et temporelles. Les moyennes sont également utilisées pour confronter les données observées et modélisées du climat actuel et identifier les biais des modèles (*cf. fiche D2. Extraction des données modélisées sur le portail Drias*). Différents indicateurs de moyenne peuvent être calculés au regard des périodes de temps considérées (avec un minimum de 10 années consécutives).

Le Règlement technique de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) contient les définitions suivantes :

- **Moyenne d'une période** : moyenne des données climatologiques calculées pour toute période d'au moins dix ans commençant le 1er janvier d'une année se terminant par le chiffre 1 (2001-2010 ; 2011-2020...).
- **Moyenne sur la période de référence** : moyenne calculée sur la plus longue période commune à toutes les stations de mesures considérées.
- **Normale climatique** : valeur moyenne calculée sur une période de 30 ans et qui sert de référence pour caractériser le climat. Les climatologues considèrent qu'afin de lisser les variations interannuelles et mettre en évidence une tendance d'évolution sur les paramètres climatiques, il est nécessaire de considérer une **période de 30 ans**. Le calcul des normales climatiques concerne toutes les variables du climat (température, pluviométrie, vent, ensoleillement...), on peut la calculer pour les minimums, maximums et moyennes. **Météo France recalcule ces normales climatiques tous les dix ans**. Actuellement, les normales climatiques de référence en vigueur sont calculées sur la période 1981-2010. En 2021, Météo-France lance donc une opération de mise à jour de ces normales, sur la période 1991-2020³. Avec des séries de données suffisamment longues (> 60 ans), il est possible de calculer des normales sur des périodes passées (ex. 1961-1990) ou, grâce à la modélisation, sur des périodes futures (2031-2060 futur proche, 2071-2100 futur lointain).

Définir le climat de référence

Le climat de référence correspond au climat moyen actuel, c'est-à-dire à partir des valeurs moyennes des différents paramètres climatiques. Le climat de référence peut être calculé à partir de la période de référence (chronique de données disponibles) ou à partir de la normale climatique, selon la durée considérée dans le calcul des moyennes. Le climat de référence actuel est calculé à partir des données disponibles sur la dernière période de normale climatique (1991-2020).

Définir le climat de référence revient à déterminer le **régime thermique**, qui correspond aux températures moyennes minimums et maximums mensuelles, et le **régime pluviométrique**, qui correspond aux cumuls de précipitations moyens mensuels. Les régimes thermiques et pluviométriques peuvent être affinés par différents indicateurs descriptifs du climat (ex. cumul de précipitation mensuel moyen, décomposition des cumuls selon l'intensité des pluies, etc.).

³<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/la-une/2021-de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en>

Dans le cadre du diagnostic climatique territorial, l'analyse est concentrée sur la pluviométrie et son évolution. Le climat de référence est donc surtout déterminé par le **régime pluviométrique**. Ce dernier donne une idée de la **variabilité temporelle de la pluviométrie au cours d'une année**. C'est un paramètre essentiel dans une problématique de gestion de la ressource en eau. L'analyse de l'apport pluviométrique sur une station à différentes échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, annuelle – cf. [Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles](#)) permet de définir cette variabilité.

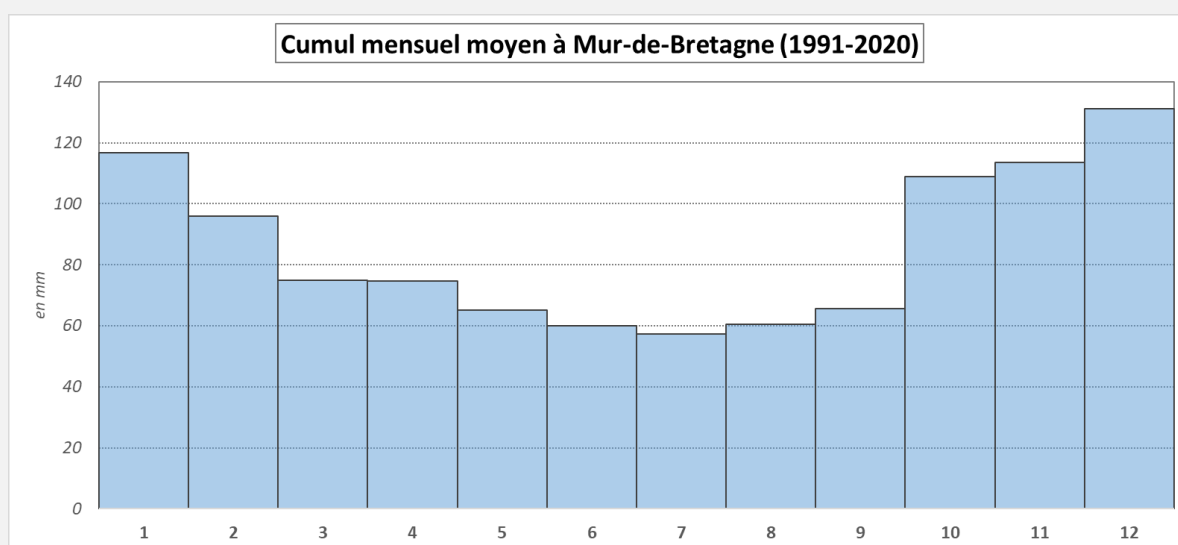
Observer les minimums et maximums permet de donner une idée de l'**amplitude annuelle** des précipitations. L'amplitude entre le minimum et le maximum donne également une idée de la variabilité interannuelle du cumul. Mais cela peut être précisé par une approche probabiliste (cf. [Fiche C1 : Une approche probabiliste du risque](#)).

Le régime pluviométrique peut être précisé par **décomposition des cumuls selon l'intensité des pluies** (cf. [Fiche B2 : Le nombre de jours de pluie](#)). Cela permet de caractériser l'importance des faibles et fortes pluies.

➤ Encadré 14

Régime pluviométrique sur la station Mur-de-Bretagne

Le cumul moyen de précipitations mensuelles calculé sur la normale climatique 1991-2020 à Mur-de-Bretagne varie de 58 à 127 mm, avec des cumuls minimums en juin et maximum en décembre. Le cumul mensuel dépasse les 100 mm d'octobre à janvier.



Mener des analyses comparatives grâce aux moyennes

Le calcul de moyennes permet d'effectuer des comparaisons spatiales (entre stations) ou temporelles (entre deux périodes ou par rapport à la normale). Il est également possible de comparer des régimes pluviométriques afin d'analyser leur variation dans le temps et l'espace.

Comparaison spatiale

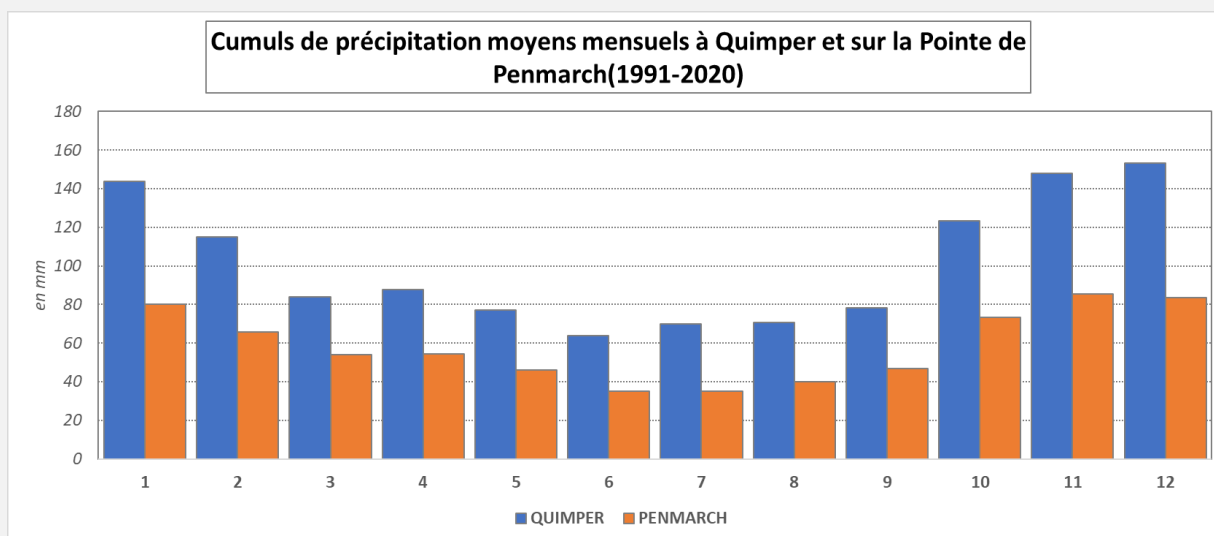
La **comparaison spatiale** consiste à **confronter les données moyennes calculées sur différentes stations**. Plus il y a de stations, plus la comparaison spatiale est pertinente pour identifier des variations sur le territoire. Il est possible de distinguer un gradient est/ouest ou littoral/intérieur des terres. Concernant les cumuls de précipitation, la connaissance de cette répartition est essentielle puisque la **pluviométrie est un paramètre très variable géographiquement**. Elle permet d'identifier les secteurs plus ou moins arrosés sur le territoire et d'avoir une meilleure appréhension de la modélisation climatique.

Les écarts de cumul moyen entre les stations d'un même territoire de SAGE peuvent dépasser les 20 % sur une même période, et plus de 50 % à l'échelle régionale entre l'Est et l'Ouest.

➤ Encadré 15

Comparaison des cumuls moyens mensuels à Penmarch et Quimper

La confrontation des données de précipitations mensuelles moyennes à la pointe de Penmarch et Quimper sur la même période permet de rendre compte de la différence d'apport pluviométrique entre les deux lieux. Dans les deux cas, les cumuls minimums sont en été et cumuls maximums en fin d'automne / début d'hiver. Cependant, à Penmarch, les cumuls moyens s'échelonnent de 35 à 83 mm contre 62 à 150 mm à Quimper. Ils sont donc **deux fois plus faibles** à Penmarch qu'à Quimper **pourtant seulement 30 km séparent les deux stations**.



Comparaison temporelle

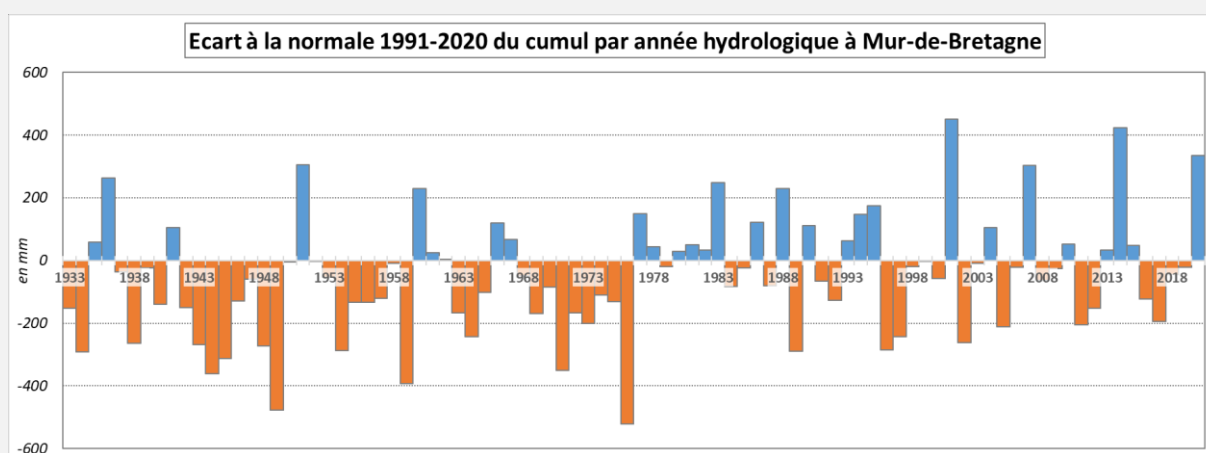
La **comparaison temporelle** des moyennes permet de distinguer la tendance d'évolution du climat. Avec des séries de données suffisamment longues (> 60 ans), il est possible de calculer des normales sur des périodes passées (ex. 1961-1990) et sur des périodes futures (2031-2060 futur proche, 2071-2100 futur lointain). Une comparaison peut alors se faire entre deux moyennes sur deux périodes différentes, mais de même durée (par exemple 30 ans), ou entre le cumul annuel de l'année n et la moyenne des cumuls annuels sur la période de référence (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*). Cet écart à la normale permet aussi d'identifier les **années extrêmes**. Par exemple, l'année 2001 qui est l'année la plus arrosée sur la Bretagne depuis 1951

présente un cumul annuel supérieur de 50 à 60 % à la moyenne 1958-2019 et 20 à 30 jours de pluie en plus.

➤ Encadré 16

Exemple : écart à la normale à Mur-de-Bretagne

Le graphique ci-dessous montre l'écart à la normale des cumuls annuels de pluie calculés sur une année hydrologique à Mur-de-Bretagne. Les cumuls peuvent varier de plus de 500 mm d'une année à l'autre. Il n'y a pas de tendance nette concernant l'évolution du cumul annuel avec cette représentation. Toutefois, avant 1980, il semblerait que les années « sèches » soient plus fréquentes et plus marquées (en orange) par rapport à la normale 1991-2020 ; et donc qu'il y ait **des années plus pluvieuses ces dernières décennies**.



❶ À retenir

Le calcul de moyenne est la **base d'une étude climatique**. Dans le cadre du diagnostic climatique, le calcul de moyenne permet d'abord de décrire le climat de référence du territoire. Ici, les données moyennes de pluviométrie permettent de définir le **régime pluviométrique** et d'effectuer une **comparaison temporelle et spatiale sur la base des cumuls moyens mensuels ou annuels**. Il est nécessaire de considérer une période d'au moins 30 ans pour le calcul des moyennes.

L'analyse des cumuls moyens n'est pas suffisante pour décrire le climat, mais constitue une étape essentielle du diagnostic climatique territorial. Elle doit être renforcée par des indicateurs caractérisant l'intensité et la répartition des pluies (*cf. Fiche B2 : le nombre de jours de pluie et Fiche B3 : la décomposition des pluies*).

Sources bibliographiques

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

OMM. (2017). Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques, OMM-N° 12

FICHE B2

LE NOMBRE DE JOURS DE PLUIE

L'analyse de la fréquence et de la répartition des jours de pluie permet d'évaluer la saisonnalité des pluies, et la possible intensification de ces pluies. En effet, il est intéressant de connaître si la pluie est concentrée sur quelques jours ou s'il pleut de façon régulière. Cette répartition des jours de pluie dans l'année influence la gestion de la ressource, car **si ces pluies sont bien réparties sur l'année**, cela réduit les risques de sécheresse et peut assurer une bonne recharge de la réserve en eau. Les gestionnaires ressentent une modification du régime des pluies au cours de l'année avec une **augmentation de pluies intenses et une accentuation de la période sèche**. Il est important de quantifier ce phénomène pour une meilleure connaissance du climat actuel et son évolution par rapport au climat passé. Cela permet aussi d'une part, des comparaisons spatiales et d'autre part, d'identifier si l'évolution observée aura tendance à se poursuivre dans le futur.

Il peut y avoir des différences de répartition des types de pluies sur le territoire. Il est important de faire ressortir la diversité des situations, et donc des **enjeux associés en termes de gestion**.

Observer la répartition des jours de pluie

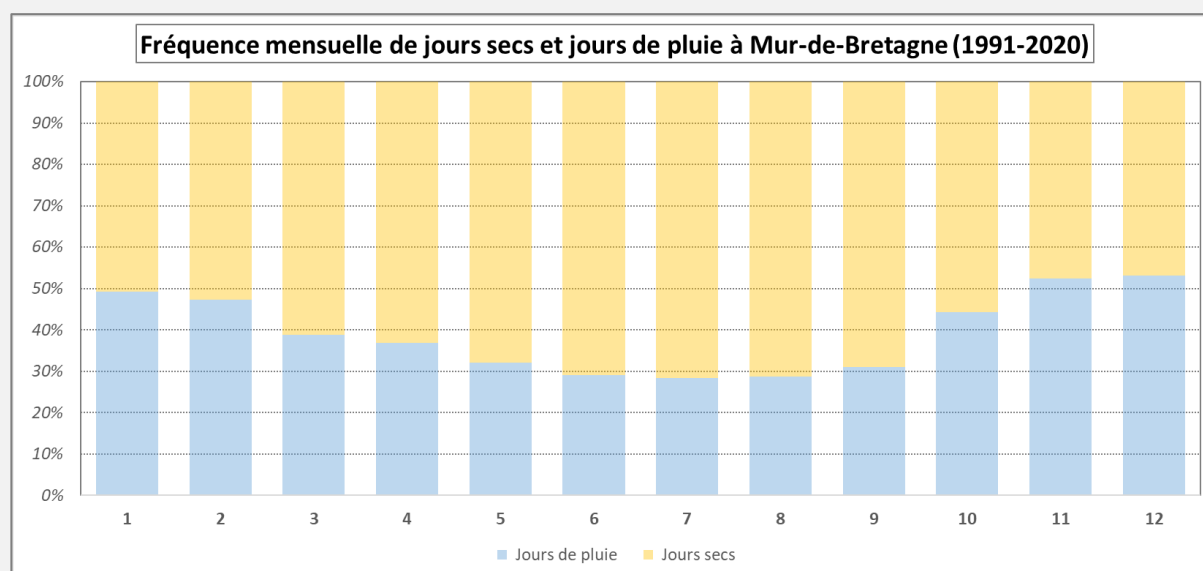
Les jours de pluie correspondent aux jours où le cumul de pluie est supérieur ou égal à 1 mm. En deçà de ce seuil, les incertitudes sont trop grandes pour savoir s'il a plu ou si le cumul enregistré est dû à l'humidité. Les **jours dits « secs »** sont donc ceux ayant un cumul inférieur à 1 mm.

L'analyse en nombre de jours de pluie donne une idée de la **fréquence et de la répartition des pluies** et indique donc la **saisonnalité des pluies**. Cette saisonnalité est plus ou moins marquée selon la position de la station.

Encadré 17

Analyse de la répartition des jours de pluie à Mur-de-Bretagne

Le graphique ci-dessous montre qu'il y a une saisonnalité concernant le nombre de jours de pluie sur la station de Mur-de-Bretagne. En moyenne, il y pleut un jour sur deux en novembre-décembre-janvier contre moins d'un jour sur trois en été. Le nombre de jours de pluie n'est pas constant dans l'année et encore moins d'une année à l'autre.



Évaluer l'intensification des pluies

Une comparaison des tendances d'évolution du **nombre de jours** de pluie et des **cumuls** de pluie donne une vision plus complète de l'évolution de la pluie sur un territoire, et permet d'identifier une possible **intensification des pluies**.

L'**intensification des pluies** se traduit par une tendance à la **hausse des cumuls** alors qu'il y a une tendance à la **baisse ou la stagnation du nombre de jours de pluie**. Cela signifie que les quantités de pluie augmentent, mais sur un nombre de jours réduit ou équivalent.

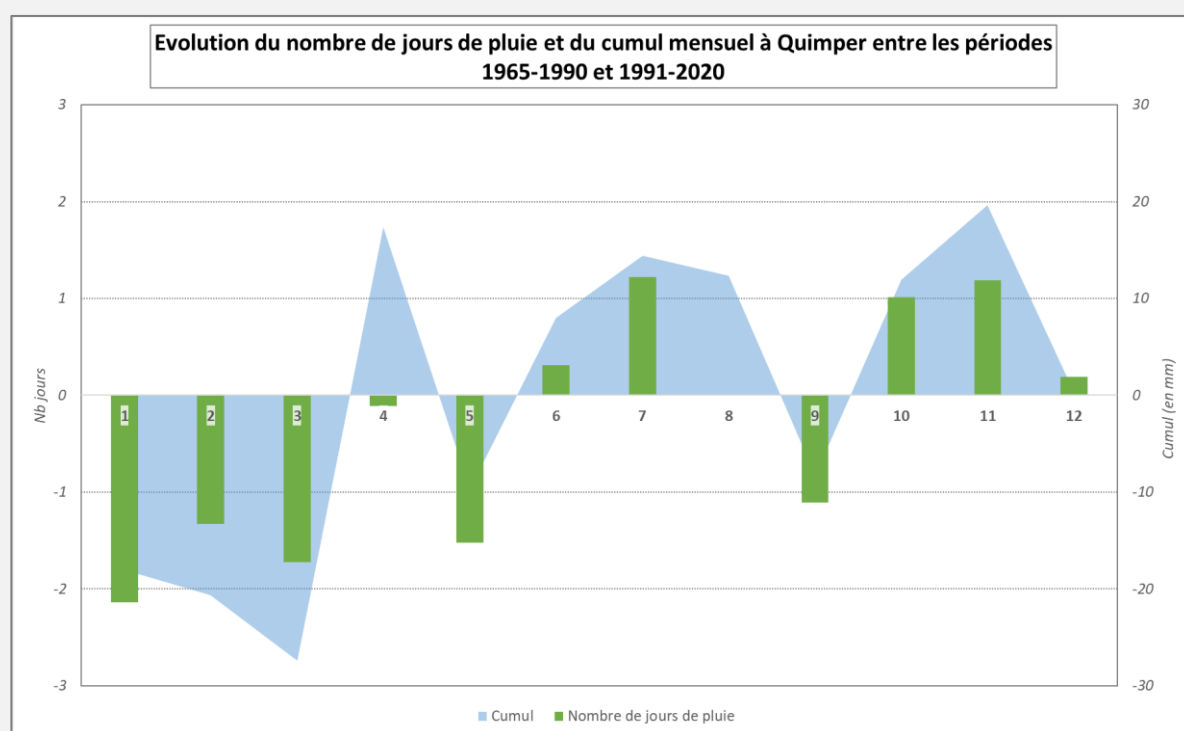
Une potentielle intensification des pluies signifie une augmentation du **risque inondation**. Ces analyses pourront aussi être réutilisées pour étudier le lien pluie/débit en mettant en lien les jours de fortes pluies avec les débits.

Elle peut aussi être étudiée par la décomposition des pluies : l'intensification des pluies intervient ainsi lorsque le nombre de jours de forte pluie augmente plus vite que le nombre de jours de pluie faible.

➤ Encadré 18

Évolution du cumul et du nombre de jours de pluie à Quimper

Le graphique ci-dessous montre que l'évolution temporelle de ces deux paramètres sur la station de Quimper est très liée. Entre les périodes 1965-1990 et 1991-2020, globalement le cumul augmente lorsque le nombre de jours de pluie augmente. Toutefois pour les mois d'avril, juin et août, bien que le nombre de jours de pluie soit resté stable, le cumul de pluie augmente de 8 à 15 mm, cela traduit une intensification des pluies sur ces 3 mois en saison d'été.



➤ Indicateur — Nombre de jours de pluie – méthode de calcul

Sur l'échelle de temps retenue (année, saison, mois), compter le nombre de jours où le cumul est supérieur à 1 mm (ou inférieur pour le nombre de jours secs). Ce comptage peut être décliné selon l'intensité des pluies. Par exemple pour compter le nombre de jours de **pluie faible**, compter le nombre de jours où le **cumul quotidien** est situé **entre 1 et 5 mm** (cf. [Fiche B3 : La décomposition des pluies](#)).

L'analyse du nombre de jours de pluie nécessite des **données quotidiennes**.

À retenir

Compter le nombre de jours de pluie permet d'abord de rendre compte de la **répartition des pluies sur l'année**. Elle nécessite des **données quotidiennes**.

Le parallèle avec le cumul permet de connaître le nombre de jours qui contribue au cumul total (ou par type de pluie). En comparant 2 périodes de 30 ans sur le climat passé, il est également possible d'identifier une **intensification des pluies**, soit lorsque le cumul augmente plus rapidement que le nombre de jours de pluie, soit lorsque le nombre de jours de forte pluie augmente plus vite que ceux de faible pluie (voir complément [Fiche D1 : identifier une tendance climatique sur la période historique](#)).

FICHE B3

LA DECOMPOSITION DES PLUIES

La **décomposition des cumuls selon l'intensité des pluies** constitue une étape importante du diagnostic climatique territorial. Elle permet d'identifier les types de pluies les plus contributrices au cumul total. Elle consiste à calculer le cumul mensuel, saisonnier ou annuel selon le type de pluie.

Connaitre la répartition des pluies en termes d'intensité au cours de l'année est importante pour mieux anticiper son impact sur la ressource.

▾ Indicateur — « Cumul par type de pluie » — méthode de calcul

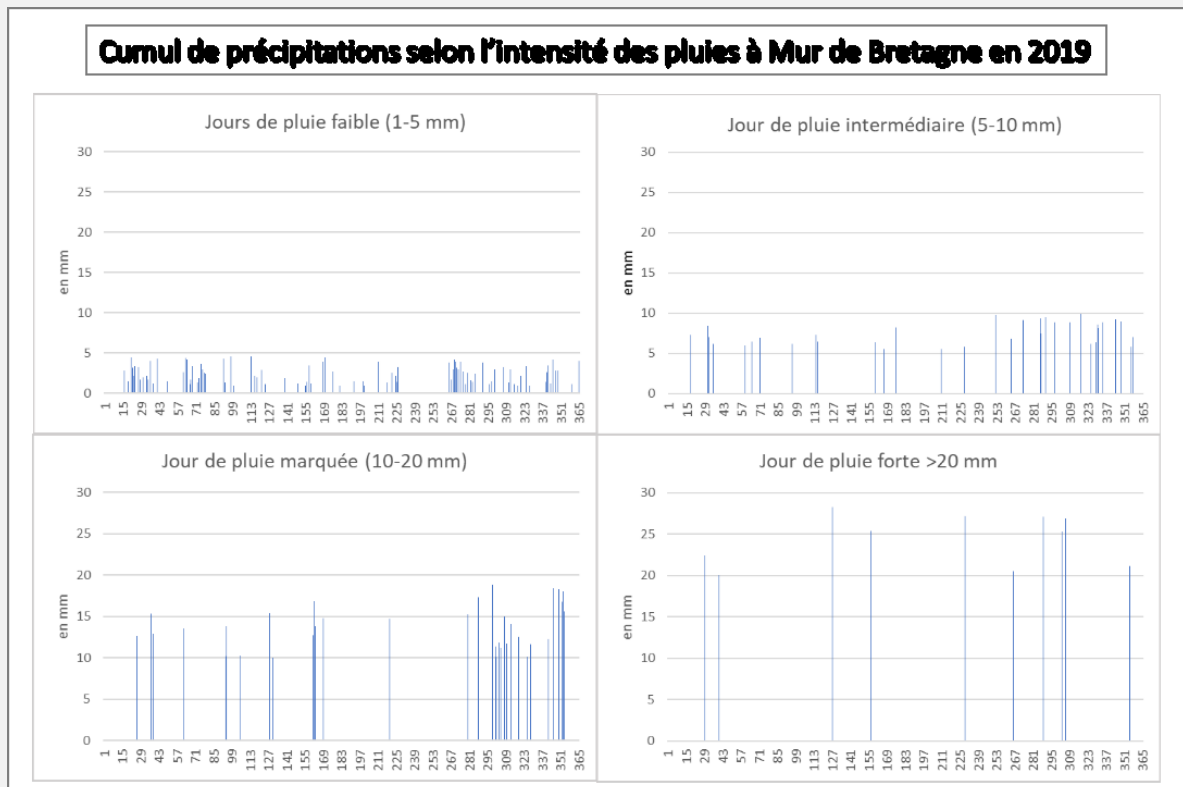
Afin d'identifier les différents types de pluies, les cumuls quotidiens sont décomposés en plusieurs classes selon la hauteur du cumul (cf. graphique). Les seuils retenus dans ce guide sont :

-  Jour de pluie faible (1-5 mm),
-  Jour de pluie modérée (5-10 mm)
-  Jour de pluie marquée (10-20 mm)
-  Jour de pluie forte (>20 mm)

Calculer le cumul par type de pluie en sommant les cumuls **quotidiens** sur l'échelle de temps retenue (année, saison, mois) et sur la période considérée.

L'appellation de ces seuils est théorique puisqu'il n'y a pas d'information sur la répartition de ce cumul au sein de la journée. Par exemple, un cumul quotidien de 15 mm peut très bien être dû à une averse de 20 minutes ou une pluie continue sur la journée. Dans tous les cas, ce jour sera considéré comme jour de pluie marquée. **Il n'est pas nécessaire de rentrer dans le détail à une échelle infra-quotidienne.** A noter qu'en deçà de 1 mm, le cumul est trop faible pour inclure ces jours dans une analyse pluviométrique.

Cette méthode de décomposition a été décrite par Mounier et Péguy en 1968 afin de mesurer l'importance ou non des précipitations intenses dans le régime pluviométrique (Mounier et Péguy, 1968). Plus récemment, une étude a été menée en Bretagne en utilisant cette méthode (Dubreuil *et al.*, 1996).



Évaluer la contribution des différents types de pluie au cumul

L'analyse des cumuls par type de pluie donne une information plus précise que le cumul total. Cependant, la **répartition de ces cumuls par type de pluie est très variable selon la position de la station et la saison**. Cette variabilité doit être prise en compte pour étudier l'évolution des cumuls de faibles et fortes pluies par rapport au cumul total.

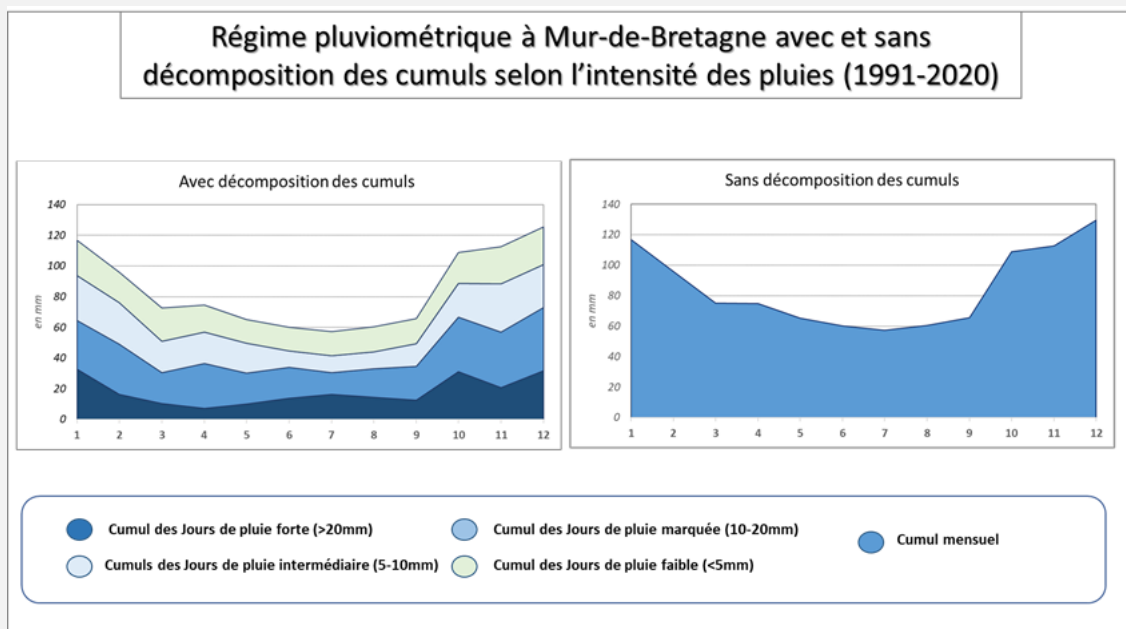
En effet, selon l'importance des fortes pluies dans le cumul total, il n'y a pas les mêmes enjeux de gestion de l'eau. Un **régime porté par des fortes pluies** est plus favorable au risque **inondation**, mais permet d'assurer une **bonne recharge** des réserves. Tandis qu'une contribution faible des fortes pluies au cumul total induit en général une plus faible recharge.

➤ Encadré 19

Analyse du régime pluviométrique sur la station Mur-de-Bretagne

En considérant des cumuls mensuels totaux sans décomposition, le régime pluviométrique de la station de Mur-de-Bretagne se caractérise par des cumuls minimums en été qui sont deux fois moins importants que les cumuls maximums en hiver.

Avec la décomposition des cumuls selon l'intensité des pluies, il apparaît que le cumul des jours de pluie faible varie peu et reste autour de 15/20 mm par mois, tandis que celui des jours de pluie marquée (10-20 mm) varie de 15 à 40 mm. C'est sur les mois d'hiver que les cumuls de jours de pluie de plus de 10 mm sont maximums. **Les jours de forte pluie représentent ainsi une part importante du cumul total** et contribuent à forger le régime pluviométrique. C'est-à-dire que lorsque le cumul de fortes pluies est minimum, le cumul total est minimum.



Les jours de forte pluie façonnent le régime pluviométrique (surtout à l'Ouest de la Bretagne) et **participent à la différenciation Est/Ouest**. Mais cet apport est fluctuant d'une saison à l'autre et d'une station à l'autre. Pour s'en rendre compte, le cumul peut être approché en relatif, à différentes échelles temporelles (mensuelle, annuelle, saisonnière – *cf. Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles*).

Compter le nombre de jours selon l'intensité des pluies

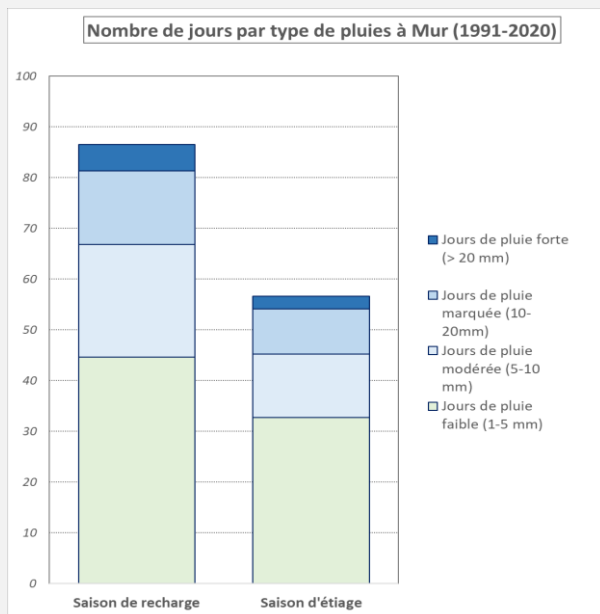
Pour une plus grande précision, il est intéressant de compter le **nombre de jours selon l'intensité des pluies**. Cela permet d'avoir le nombre de jours de forte ou faible pluie et leur répartition selon la période de l'année, **et de croiser cette information avec celle des cumuls selon le type de pluie** (cf. Fiche B2 : Le nombre de jours de pluie) afin de compléter l'analyse.

En général, les jours de forte pluie sont peu nombreux, mais cette observation varie selon la saison et la position géographique. L'étude régionale a montré qu'il y avait entre 3 et 15 jours de pluie de plus de 20 mm sur une année hydrologique en moyenne en Bretagne (Amiot, 2020).

Les périodes propices à ces jours de fortes pluies sont à identifier, car cela n'a pas la même signification selon la saison hydrologique⁴. **En saison de recharge** (octobre à mars), ces jours de fortes pluies vont contribuer grandement au cumul total. Cela peut être bénéfique puisque cela permet d'assurer la recharge, mais peut aussi engendrer des inondations lorsque ces jours sont nombreux ou répartis sur une courte période. **En saison d'étiage** (avril à septembre), les jours de forte pluie ont moins d'impact sur la recharge des nappes, mais peuvent intervenir fortement dans le remplissage des retenues d'eau superficielle (par ruissellement), voire engendrer des crues rapides. Le nombre de jours de pluie par type de pluie est donc intéressant à surveiller ainsi que son évolution.

➤ Encadré 20

Analyse du nombre de jours de pluie à Mur-de-Bretagne



La figure ci-contre présente le nombre de jours selon l'intensité des pluies par saison hydrologique à Mur-de-Bretagne.

Le détail des jours selon l'intensité des pluies montre que les jours de fortes pluies représentent une infime partie des jours de pluie.

Il y a deux fois plus de jours de pluie de plus de 10 mm entre la saison d'étiage et la saison de recharge. Cependant, en termes de fréquence, le zoom par intensité des pluies permet une meilleure connaissance de cette répartition des jours de pluie.

⁴ Définition cf. Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie

Montrer l'importance et la répartition des fortes pluies

L'approche complète, mettant en parallèle le cumul de pluie avec le **nombre de jours de pluie selon l'intensité**, permet de rendre compte de la répartition des jours de forte pluie et de leur importance sur le cumul annuel.

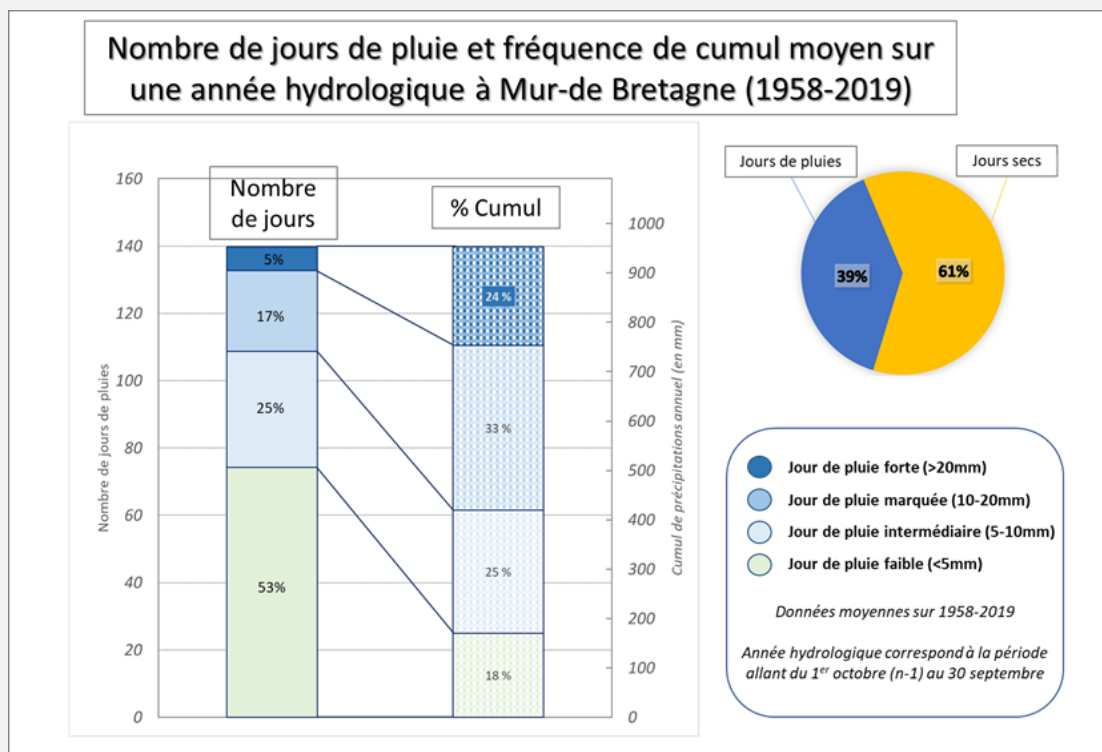
L'importance des fortes pluies dans le cumul est très variable selon la position de la station sur le territoire breton. Il existe en effet un gradient Est/Ouest, l'importance des fortes pluies dans le cumul total diminuant vers l'Est. Il y a aussi un gradient littoral/intérieur, la part des fortes pluies étant moins importantes sur le littoral.

➤ Encadré 21

Analyse nombre de jours de pluie et fréquence de cumul

Sur la station de Mur-de-Bretagne, le nombre de jours de pluie selon l'intensité est mis en parallèle avec le cumul moyen de pluie. Sur une année hydrologique, il y a environ 74 jours de fortes pluies qui représentent 25 % du cumul annuel et 74 jours de pluie faible qui représentent 18 % du cumul. Plus de la moitié du cumul est apporté par une trentaine de jours de pluie de plus de 10 mm.

L'autre partie (autour de 40 % du cumul) est apportée par près de 110 jours de pluie. **Donc, le cumul de précipitation dépend fortement de quelques jours de fortes pluies.** La ressource en eau disponible dépend fortement de ces quelques jours de fortes pluies c'est pourquoi **il est nécessaire d'identifier les périodes où interviennent ces fortes pluies et leurs évolutions.**



Suivre l'évolution du cumul par type de pluie

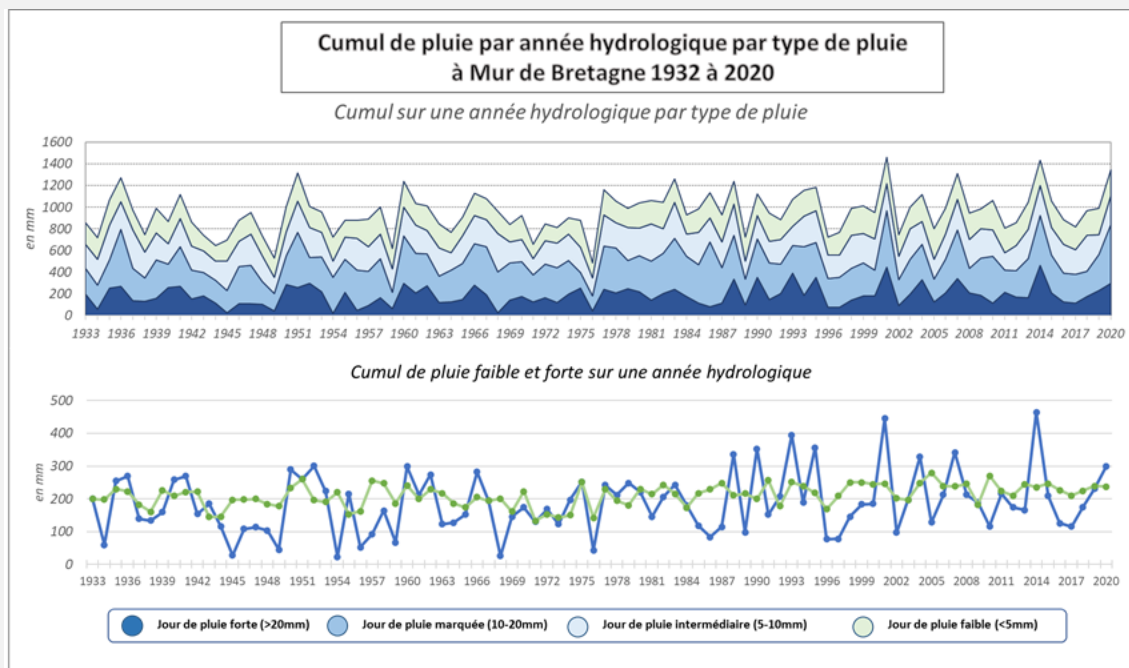
L'analyse **temporelle des cumuls et nombre de jours par type de pluie** permet d'évaluer notamment la tendance d'évolution des fortes pluies, responsable d'un apport pluviométrique important. Cette évolution peut s'étudier de la même façon que l'évolution des cumuls (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*).

Elle permet notamment de rendre compte de l'évolution des fortes pluies et de leurs importances dans le cumul total. L'évolution du cumul par type de pluie permet **aussi d'étudier l'intensification ou non des pluies sur la période considérée**.

Encadré 22

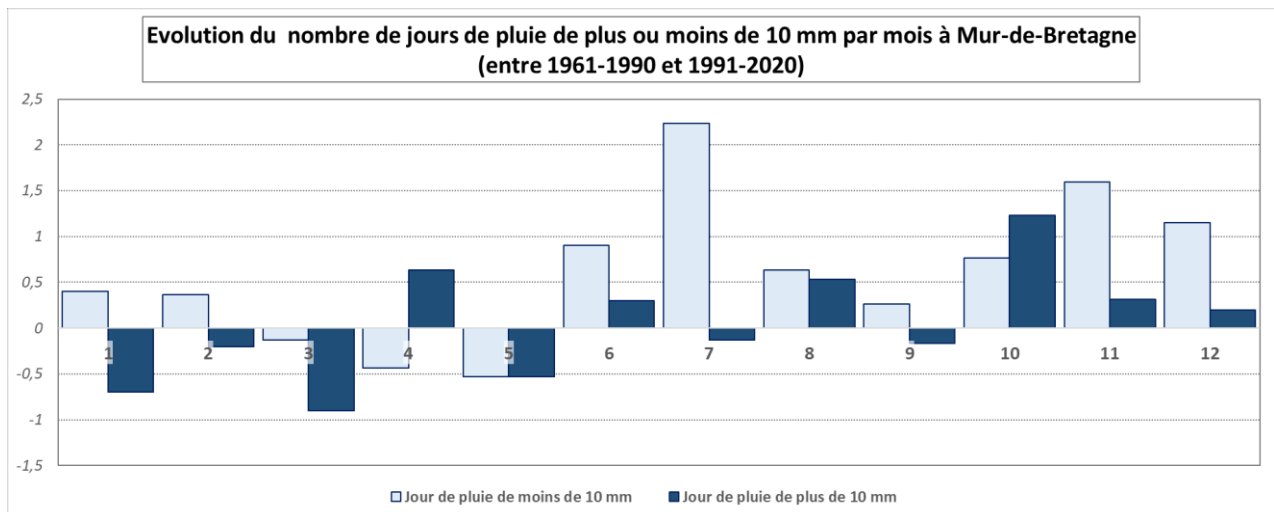
Tendance évolutive des types de pluie sur la station de Mur-de-Bretagne

La figure ci-dessous présente le suivi annuel du cumul par type de pluie à Mur-de-Bretagne. Le cumul tend à augmenter avec des **cumuls annuels supérieurs à 1 000 mm plus fréquents** après 1976. Des pics de cumul annuel à plus de 1 200 mm sont de plus en plus fréquents depuis 1990. Cette évolution semble assez liée avec celle du cumul des fortes pluies. Ce cumul est situé en moyenne autour de 200 mm, mais varie de 50 à 450 mm. Depuis les années 90, des pics de cumul annuel de fortes pluies ≥ 350 mm s'observent davantage. Parallèlement, le cumul des pluies faibles est lui relativement stable et présente une variabilité interannuelle moins importante. Les fortes pluies ont ici un rôle dans l'évolution temporelle des cumuls.



L'intensification des pluies peut s'étudier à partir du nombre de jours par type de pluie. Elle intervient lorsque le nombre de jours de pluie de plus de 10 mm augmente plus rapidement que le nombre de jours de moins de 10 mm.

Par exemple, à Mur-de-Bretagne, on constate que l'évolution des jours de plus de 10 mm est parfois différente de celles des jours de pluie de moins de 10 mm. Le nombre de jours de pluie de plus de 10 mm tend à diminuer en janvier, mars et mai. Les pluies tendent à s'intensifier à priori en avril et octobre car le nombre de jours de pluie de plus de 10 mm évolue plus rapidement que le nombre de jours de pluie de moins de 10 mm.



📌 À retenir

Dans le diagnostic climatique territorial, la décomposition des pluies permet de préciser la **répartition annuelle des cumuls selon l'intensité des pluies**. Cette information permet de définir les apports liés à des jours de pluie forte ou faible selon la saison et ainsi préciser comment s'organise le régime pluviométrique.

La décomposition des pluies peut s'effectuer sur les cumuls pour avoir la contribution des types de pluie au cumul total et suivre son évolution dans le temps.

Il est aussi possible de compter le nombre de jours par type de pluies. Cela permet d'avoir la répartition des pluies faibles et fortes au cours de l'année.

Le parallèle entre cumul et nombre de jours par type de pluie permet une approche plus complète de l'indicateur. Il est possible d'observer le nombre de jours par rapport à leurs contributions dans le cumul total.

Cette analyse du cumul moyen différencié par type de pluie doit s'accompagner d'une analyse du nombre de jours par type de pluie, ce qui permet d'**étudier l'intensification ou non des pluies sur la période considérée**.

Sources bibliographiques

Amiot L., (2020), Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne : approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias, Mémoire de Master, Université Rennes 2

Dubreuil V., Huon F., Lejeune C., (1996). Les précipitations intenses en Bretagne, *Noréis*, n°170, pp.395-406

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

FICHE B4

LES PLUIES EFFICACES

Les pluies efficaces correspondent aux précipitations **théoriques** restantes après absorption par la végétation et restitution dans l'atmosphère. C'est une amorce théorique du lien pluie-débit. Cet indicateur présente un intérêt en termes de gestion de la ressource et notamment afin de **préparer la gestion des étiages**. En effet, il est intéressant de **connaître la part de précipitations qui ira recharger les réserves et celle qui ruisselle**.

Analyses des pluies efficaces moyennes

Les analyses de pluies efficaces peuvent se faire d'abord en étudiant les **données moyennes**. Concrètement, cet indicateur peut s'étudier de la même façon que le cumul de pluies (*cf. Fiche B1 : Le calcul de moyennes en climatologie*). L'intérêt est de présenter les **périodes critiques pour la gestion des étiages**. En moyenne, les pluies efficaces vont être les plus importantes en saison de recharge et quasiment nulles en saison d'étiage car une grande partie est alors évaporée ou utilisée par les végétaux.

Le parallèle entre précipitations réelles et efficaces peut être fait en cumul ou en fréquence par rapport au cumul total. Le regard en **fréquence** est plus parlant pour rendre compte de la **proportion de pluies efficaces**.

📌 Indicateur - Pluies efficaces - Méthode de calcul

Les pluies efficaces correspondent à la différence entre les arrivées d'eau au sol et l'eau évaporée et consommée réellement par les végétaux. Cet indicateur est donc calculé par soustraction de l'évapotranspiration potentielle aux précipitations. Alors que ces dernières sont mesurées avec un pluviomètre, l'évapotranspiration potentielle (**ETP**) **est estimée par calcul** à partir des données disponibles de température, rayonnement, vent... Par conséquent, Météo-France fournit des valeurs d'ETP, **mais pas pour toutes les stations**.

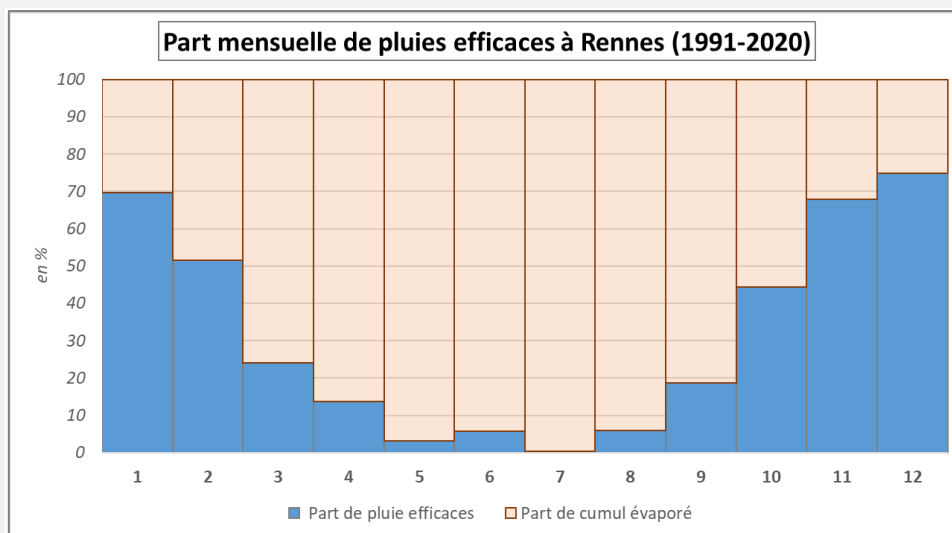
En absence de données d'ETP, il peut être choisi soit de considérer les mêmes données d'ETP sur l'ensemble des stations du territoire, soit de la calculer à partir de la formule de Turc (*cf. Fiche D4 : comment approcher le risque de sécheresse future ?*).

📌 Encadré 23 - à savoir

L'indicateur **Pluies efficaces** met en évidence **les périodes possibles de recharge**, c'est-à-dire lorsque la pluie est supérieure à l'ETP. Il existe une autre méthode, le bilan hydrique, pour une analyse plus fine du risque de sécheresse, notamment lors des tensions en période d'étiage ou lorsque l'ETP est supérieure aux précipitations (*cf. Fiche c4 : le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*).

▾ Encadré 24 - Exemple à Rennes

À Rennes, les pluies efficaces représentent moins de 10 mm du mois d'avril à août contre plus de 50 mm en novembre-décembre. En termes de fréquence, moins de 10 % des précipitations sont efficaces entre mai et août en moyenne. **Les pluies sont efficaces à plus de 50 % entre novembre et février à Rennes.** Dans tous les cas, au moins un tiers du cumul est absorbé ou évaporé. Ce type de graphique met en exergue les périodes réelles de tension qui correspondent à Rennes aux mois de mai à août avec en juillet quasiment 100 % des pluies évaporées.



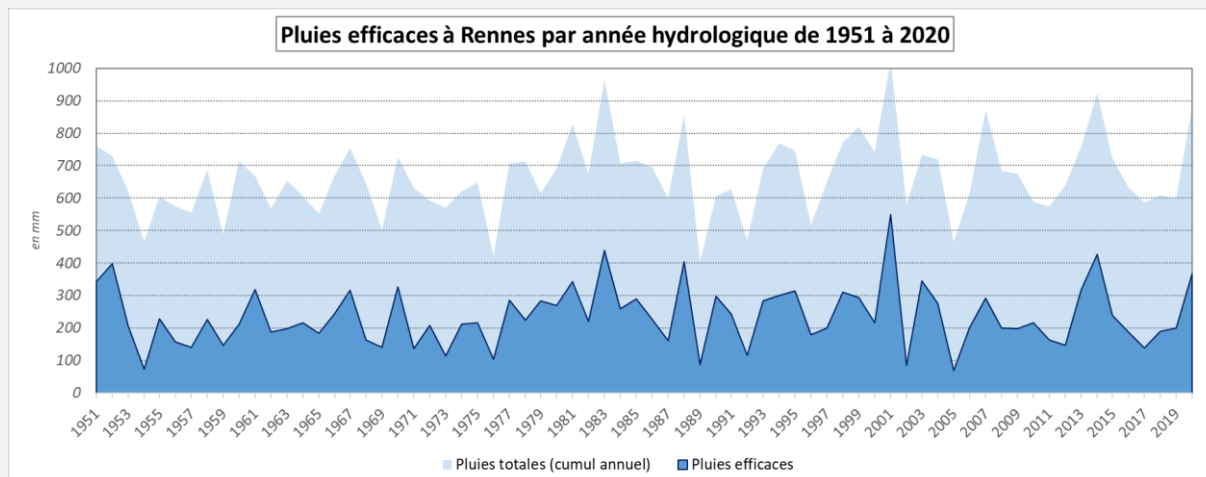
Suivre l'évolution des pluies efficaces

Il est aussi possible de suivre **l'évolution des pluies efficaces** en termes de cumul ou de fréquence selon les mêmes méthodes que le cumul de précipitations (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*). Cela donne ainsi l'évolution des cumuls théoriques qui vont recharger les cours d'eau.

Une comparaison entre les indicateurs de pluies efficaces et pluies totales permet de visualiser la **part des précipitations qui atteint potentiellement les nappes** et le réseau hydrographique et reconstituer ainsi les ressources en eau disponibles.

▾ Encadré 25 — Évolution des pluies efficaces à Rennes

À Rennes, les pluies efficaces représentent en moyenne autour de 200 mm sur une année hydrologique soit environ un tiers du cumul total. **Ce qui signifie que deux tiers du cumul sont consommés par les plantes ou évaporés chaque année à Rennes.** Il existe une corrélation assez marquée entre les pluies efficaces et les précipitations totales. Leurs tendances se suivent : le cumul de précipitations annuelles a augmenté de près de 60 mm depuis 1961, les pluies efficaces ont augmenté de 20 mm.



❗ À retenir

Les pluies efficaces montrent la quantité de précipitations qui peut recharger les nappes et les cours d'eau. L'intérêt est de les caractériser et d'en déduire les périodes de tension pour améliorer la gestion de la ressource en eau.

De la même façon que le cumul de pluie, cet indicateur peut être approché en moyenne (*cf. Fiche B1 : le calcul de moyennes en climatologie*) ou en tendance d'évolution (*cf. Fiche D1 : identifier une tendance climatique sur la période historique*). Un regard en fréquence mettant en parallèle précipitations réelles et efficaces peut compléter cette analyse.

Sources bibliographiques

Monteith J.L. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19, 205-224. Obtained from Forest Hydrology and Watershed Management – Hydrologie Forestière et Aménagement des Bassins Hydrologiques (Actes du Colloque de Vancouver, août 1987) IAHS-AISH, 167, 1987, 319-327.

Mounier, J., 1965. Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne. *Noréis* 48, 437-448

Thiery D., 1977 Calculs de pluie efficace au pas de temps journalier avec les sous-programmes climat et clidat, bureau de recherches géologiques et minières

FICHE B5

LES TYPES DE CLIMATS ANNUELS DE KÖPPEN : UNE SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

La détermination du type de climat de Köppen donne une vision synthétique du climat. Cette classification **identifie les années les unes par rapport aux autres selon des seuils prédéfinis de températures et de précipitations**. Elle permet aussi de comparer rapidement les stations entre elles sur un même territoire (échelle locale ou régionale), ou des stations au niveau national ou du monde entier étant donné qu'il s'agit d'une classification largement utilisée.

De plus, cet indicateur permet d'identifier des tendances d'évolution en analysant l'évolution de la fréquence de type de climat annuel.

Définition : qu'est-ce que la classification de Köppen ?

La classification de Köppen est un **système de classification climatique** mis au point en 1900 à partir des cartes mondiales de la végétation qui étaient disponibles à cette époque. L'auteur Köppen a cherché à faire correspondre les données climatiques avec les limites des grands domaines végétaux. Elle est souvent considérée comme la première tentative de classification quantitative du climat.

La classification est synthétisée par une suite de deux ou trois lettres qui permet de décrire le climat :

- La première lettre correspond au **type de climat**, de A à E : climat tropical (A), climat aride (B), climat tempéré (C), climat continental (D) et climat polaire (E).
- La deuxième lettre équivaut au **régime pluviométrique** qui permet de préciser si le climat est humide (f), ou marqué par des sécheresses hivernales (w) ou estivales (s).
- La dernière lettre définit le **régime thermique** estival : à été chaud (a), à été tempéré (b) ou à été frais (c).

Cette classification a été conçue pour être réalisée sur des moyennes mensuelles de température et précipitations sur une période de 30 ans. Les critères et valeurs seuils ont été définis d'après la méthode de Köppen-Geiger, mais aussi à l'aide de l'étude du climat français par « type de climat annuel » réalisée en 2016 par Eveno, Planchon *et al.*

Pour chacune des lettres de cette classification correspond un seuil défini ci-dessous. Pour le type de climat, le critère dépend des températures ou précipitations. Pour le régime pluviométrique, les seuils de sécheresse sont déterminés selon la hauteur cumulée minimale du mois le moins arrosé de l'année (été ou hiver). Enfin, le régime thermique est déterminé selon la température maximum du mois le plus chaud. Les seuils sont décrits ci-dessous :

Nom	Climat tempéré						Climat aride
Type Climat	C						B
Description	Température du mois le plus chaud > 10°C et température moyenne des mois les plus frais entre -3 et 18°C						Cumul annuelle < 20 * Tannuelle + 140
Nom	Méditerranéen/ à été sec		Chinois/ à hiver sec	Océanique/ sans saison sèche			Climat des steppes
Régime pluviométrique	s		w	f			s
Description	Mois d'été le plus sec < 2 * T moyenne de ce mois		Cumul du mois d'hiver le moins arrosé < 10% du mois le plus arrosé	Ni Cs ni Cw			380 < Cumul annuel < 760mm
Variation température	à été chaud	à été tempéré	à été tempéré	à été chaud	à été tempéré	à été frais	Froid
Régime Thermique	a	b	b	a	b	c	k
Description	Température moyenne du mois plus chaud > 22°C	Tmoy du mois plus chaud < 22°C	Tmoy du mois plus chaud < 22°C	Température moyenne du mois plus chaud > 22°C	Tmoy du mois plus chaud < 22°C	Tmoy du mois plus chaud < 22°C et au moins 4 mois avec une Tmoy < 10°C	Tmoy annuelle < 18°C
Types	Csa	Csb	Cwb	Cfa	Cfb	Cfc	Bsk

Cependant, **le seuillage utilisé peut induire en erreur et masquer certaines tendances mensuelles ou saisonnières**. En effet, il y a trois régimes pluviométriques pour le climat tempéré dont deux pour identifier les saisons sèches, mais aucune par rapport aux saisons humides.

Il n'est donc pas possible d'identifier des années très arrosées avec cet indicateur. Sur les périodes sèches, le seuillage peut être également biaisé, car il ne dépend que du cumul minimum d'un mois d'été ou d'hiver.

Le Type de Climat Annuel, une adaptation de la méthode de Köppen

La méthode qui est utilisée ici est donc une adaptation de la classification de Köppen. Cette adaptation consiste à annualiser la classification, c'est-à-dire à attribuer un type de climat annuel (TCA) selon les critères de Köppen pour chaque année et par station. Avec cette méthode, **les climats rencontrés en Bretagne sont les suivants** :

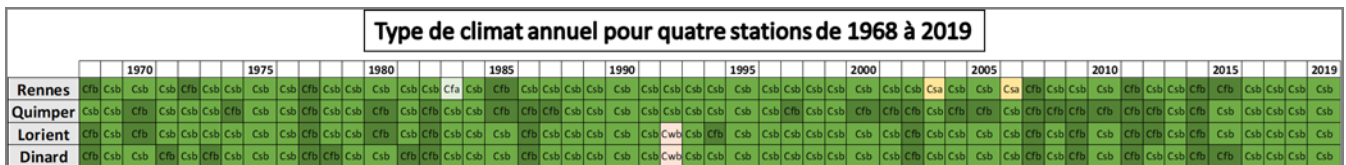
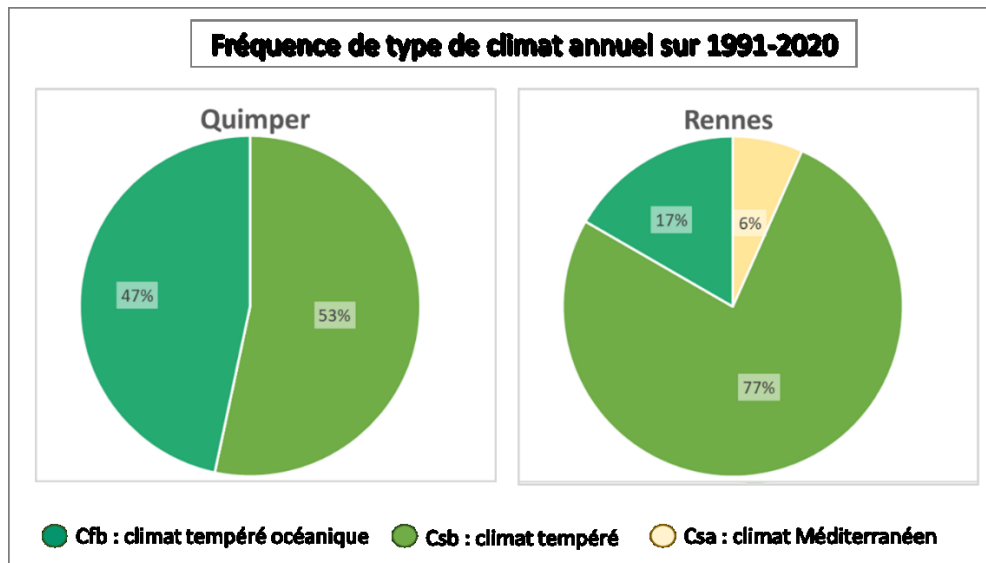
Bsk	Climat des steppes
Csa	Climat Méditerranéen
Csb	Climat Tempéré
Cfa	Climat Tempéré océanique à été chaud
Cfb	Climat Tempéré Océanique
Cwb	Climat tempéré à hiver sec

À l'échelle d'une station de mesure, **l'indicateur peut être présenté annuellement**, sur une période considérée. Cela permet de visionner l'évolution des types de climats annuels sur la station. L'indicateur peut aussi être présenté selon la fréquence d'apparition des climats sur 30 ans.

La figure ci-contre montre l'analyse des types de climats annuels de Köppen à Rennes et Quimper sur la dernière période de 30 ans. Sur ces 2 stations, le climat le plus fréquent est celui de type Cfb, c'est-à-dire **climat océanique sans saison sèche**. Le climat Csb est aussi très fréquent, c'est un climat tempéré marqué par un été sec.

À **Rennes**, le climat Csb « tempéré à été sec » est ultra-majoritaire et concerne 3 années sur 4. Deux années de climat méditerranéen (Csa) sont aussi observables à Rennes, il s'agit de 2003 et 2006.

À **Quimper**, le climat océanique Cfb est plus présent puisqu'il concerne près d'une année sur deux.



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. D’après l’étude DEMOCLIM (stage Master 2020 ; Dubreuil et al., 2018), selon les modèles CNRM et IPSL (*cf. Fiche A6 : Des repères sur la simulation climatique*), **le changement climatique se traduit par un renforcement du climat de type méditerranéen en Bretagne**. Il deviendrait plus fréquent à Rennes et ferait son apparition à Quimper.

➤ Encadré 26 - A savoir

Les seuils pour définir une année comme étant sèche ou humide sont parfois trompeurs. Différentes études ont montré la nécessité de corriger le seuil des climats de type Csb correspondant à un « climat tempéré avec un été sec » qui est majoritaire en Bretagne. Le climat tempéré à été sec correspond ici à une année où les précipitations d’au moins un mois d’été sont inférieures à deux fois la température moyenne de ce même mois ($P < 2 T$).

À retenir

Le Type de Climat Annuel de Köppen est un indicateur permettant de caractériser le climat et son évolution, de façon synthétique. Il nécessite les données mensuelles de température et précipitations.

Il peut être calculé sur une quinzaine de stations en Bretagne où les données de T° et P sont validées sur les 30 années passées. Il est intéressant pour sensibiliser de façon concrète à l'évolution climatique, mais doit être accompagné d'indicateurs plus précis afin de nuancer l'intensité relative de ce type de climat. Cependant, le seuillage utilisé peut induire en erreur et masquer certaines tendances mensuelles ou saisonnières. Il y a trois régimes pluviométriques pour le climat tempéré dont deux pour identifier les saisons sèches, mais aucune par rapport aux saisons humides. **Il n'est donc pas possible d'identifier des années très arrosées avec cet indicateur.**

Sources bibliographiques

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

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.

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*, [en ligne], 41 | 2017, mis en ligne le 28 septembre 2017, URL : <https://journals.openedition.org/echogeo/15017>

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, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01825987v1>

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], <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01474598>

Köppen W., 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, 6, p. 657-679.

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., 2006 : World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263.

FICHES C - INDICATEURS SUR LES RISQUES INONDATIONS ET SÉCHERESSES

L'analyse du climat passé permet d'identifier des événements exceptionnels de type **sécheresse** ou **inondation**. Il est important de bien connaître ces événements sur la période historique. En effet, c'est à partir de l'étude de ces phénomènes et l'évaluation de leurs probabilités d'occurrence que s'effectue la politique de gestion de l'eau et la prévention des risques. C'est aussi à partir de la connaissance des risques passés qu'il est possible d'appréhender leurs évolutions futures.

L'identification des périodes à risque sécheresse ou inondation, ainsi que leurs évolutions temporelles, peut s'effectuer 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 **indicateurs climatiques**, tels que le Standardized Precipitation Index (SPI), ou le bilan hydrique pour le risque de sécheresse.

L'objectif de cette famille de fiches est de montrer les différentes façons d'approcher les risques inondations et sécheresses et de présenter les limites de ces approches.

C1: Une approche probabiliste du risque	89
C2 : Standardized precipitation index (SPI)	95
C3 : Approche du risque d'inondation	100
C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de secheresse	108

FICHE C1

UNE APPROCHE PROBABILISTE DU RISQUE

Un événement extrême est par définition un phénomène qui se produit rarement. Ces événements extrêmes peuvent être décrits statistiquement par une approche probabiliste. Cette méthode probabiliste permet de définir des seuils de cumuls extrêmes d'après la probabilité qu'ils se produisent.

Qu'est-ce qu'une approche probabiliste ?

L'approche probabiliste consiste à déduire la probabilité qu'un événement se produise en fonction de sa fréquence d'apparition sur la période considérée. Elle est notamment utilisée pour définir le risque d'inondation sur un territoire, grâce à l'analyse de la fréquence et du temps de retour des crues. Définir les **centiles de cumuls de précipitations** permet cette approche probabiliste.

Dans le cadre du diagnostic climatique territorial, les centiles permettent d'identifier les valeurs de cumul extrême. En effet, les centiles séparent une série statistique ordonnée en 100 parties d'effectifs égaux. Ils correspondent aussi au pourcentage de valeurs inférieures à un centile défini.

Par exemple, une série des cumuls mensuels est classée par ordre croissant puis divisée en 100 parts égales. Le centile 1 correspond au seuil qui comprend 1 % des valeurs, soit 1 % des cumuls les plus faibles. Le centile 99 correspond au seuil qui comprend 99 % des valeurs et les 1 % des valeurs supérieures à ce seuil correspondent aux cumuls les plus importants.

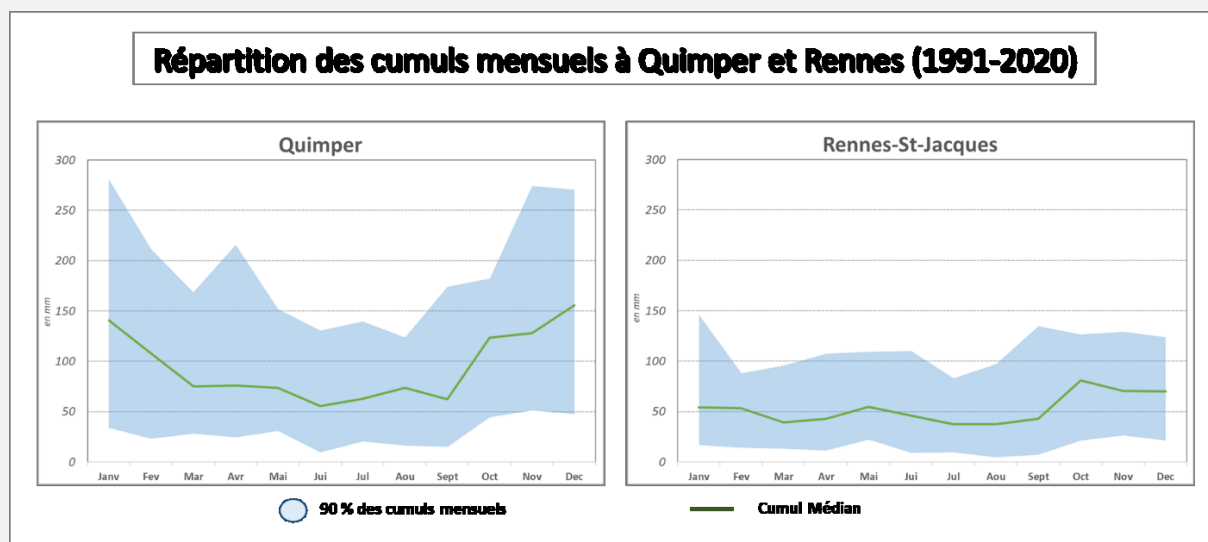
Les centiles peuvent se calculer à échelle quotidienne ou mensuelle. Les centiles quotidiens peuvent notamment être utilisés pour faire un lien avec le risque d'inondation ([cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse](#)). Avec les centiles mensuels, il est possible par exemple de représenter la répartition des cumuls de précipitations sur la période de référence.

➤ Encadré 27

Comparaison de la répartition des cumuls à Rennes et Quimper

Le graphique ci-dessous montre la répartition des cumuls à Rennes et Quimper avec l'intervalle entre le centile 95 et le centile 5, qui présente 90 % des cumuls. La comparaison des deux stations montre un régime pluviométrique saisonnier plus marqué à Quimper avec une amplitude de cumul de plus de 200 mm entre octobre et janvier. Cette amplitude atteint 100 mm en janvier à Rennes. Or **une grande amplitude signifie une plus grande variabilité des cumuls**. Il y a donc une variabilité des cumuls qui est plus importante à Quimper, d'autant plus sur les mois de novembre à janvier.

Cette grande variabilité signifie qu'un mois de novembre à Quimper peut aussi bien avoir un cumul de précipitations de 50 **ou** 250 mm. Cela a un impact important sur la gestion de la ressource notamment en ce qui concerne la gestion du risque d'inondation. À Quimper, les mois d'hiver présentent des cumuls dont l'amplitude et l'intensité sont deux fois supérieures aux mois d'été. On comprend donc que le risque d'inondation est plus important à Quimper qu'à Rennes et particulièrement sur la période novembre-janvier.



Distribution statistique

Des lois de distribution statistique peuvent être utilisées afin de compléter et renforcer la visibilité des seuils extrêmes au sein d'intervalles de confiance. La **loi de Gauss** permet de représenter la répartition statistique des cumuls moyens. Elle est très répandue en hydrologie et en climatologie pour représenter la répartition des valeurs moyennes. La **loi de Galton** est particulièrement utilisée pour les étiages. La **loi de Gumbel** peut aussi être utilisée.

Évaluer le régime probable

Le régime probable est une **approche probabiliste mensuelle** qui permet d'avoir des informations sur les cumuls mensuels extrêmes inférieurs et supérieurs.

Le régime probable doit être calculé sur une période d'**au moins 30 ans** pour laquelle les données de cumuls mensuels sont disponibles. Les bornes les plus pertinentes à considérer sont les suivantes : décile supérieur (ou centile 90), quintile supérieur (ou centile 80), médiane (ou centile 50), quintile inférieur (ou centile 20), et décile inférieur (ou centile 10).

Les déciles et quintiles inférieurs et supérieurs délimitent les maxima et minima mensuels. **Le décile inférieur** correspond au seuil qui comprend 10 % des valeurs de cumul mensuel les plus faibles de la série. Le quintile inférieur correspond au seuil qui comprend 20 % des valeurs de cumul mensuel les plus faibles et inversement pour les quintiles et déciles supérieurs. Enfin, 50% des cumuls présentent des valeurs en dessous, ou au-dessus, du seuil médian.

Un mois dont le cumul de précipitations est supérieur au décile supérieur peut être considéré comme **très arrosé**. À l'inverse, un mois inférieur au décile inférieur peut être considéré comme **très sec** (cf. tableau ci-dessous).

Seuil	Cumuls mensuels	Fréquence théorique	
Décile Supérieur	Supérieur au seuil	Une année sur dix	Mois "très arrosé"
Quintile Supérieur	Supérieur au seuil	Une année sur cinq	Mois "arrosé"
Médiane	Supérieur ou inférieur au seuil	Une année sur deux	Mois "normal"
Quintile Inférieur	Inférieur au seuil	Une année sur cinq	Mois "sec"
Décile inférieur	Inférieur au seuil	Une année sur dix	Mois "très sec"

Pour chaque mois de l'année, le régime probable permet donc de **définir les seuils extrêmes des cumuls** (humides ou secs). En Bretagne, les seuils extrêmes supérieurs sont plus importants sur les mois d'hiver que sur les mois d'été. C'est encore plus vrai vers l'ouest, sur l'Odéon par exemple, où la limite du décile supérieur est plus de deux fois supérieure en hiver par rapport à l'été.

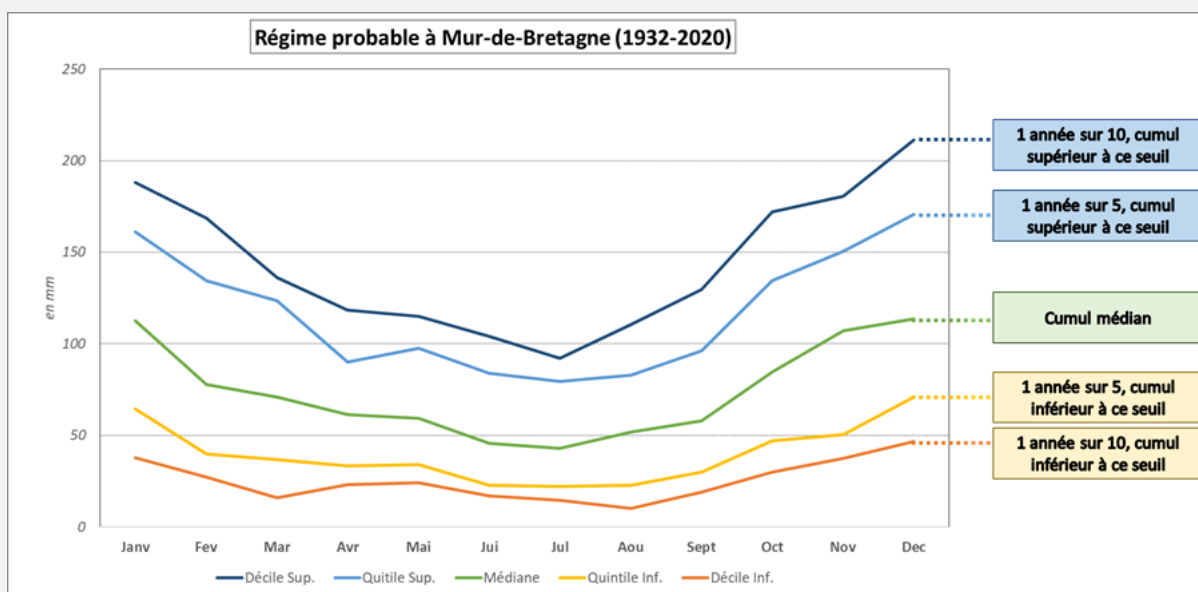
Le régime probable permet également de **quantifier l'amplitude de ces extrêmes**.

En effet, 60 % des cumuls sont situés entre le quintile inférieur et supérieur, et 80 % entre le décile inférieur et supérieur. L'écart entre le quintile et le décile supérieur ou inférieur précise donc l'étendue des extrêmes. **Une proximité entre les quintiles et déciles inférieurs ou supérieurs** signifie que les cumuls de précipitations extrêmes se répartissent autour de valeurs assez proches.

➤ Encadré 28

Régime probable à Mur-de-Bretagne

L'analyse du régime probable de Mur-de-Bretagne permet d'observer une saisonnalité des pluies, avec des maximums en hiver et minimums en été. Cette saisonnalité s'observe aussi pour les quintiles et déciles supérieurs, les cumuls mensuels maximums ayant tendance à être d'autant plus élevés sur les mois d'hiver. Le décile supérieur passe de 90 à plus de 200 mm entre les mois de juin et décembre. Par ailleurs, l'écart entre le quintile et le décile supérieur est assez similaire tout au long de l'année. **Cette saisonnalité est intéressante à montrer notamment pour appréhender le risque d'inondation.** En effet, plus les bornes supérieures sont élevées, plus le cumul risque d'être important.



1932-2020	Régime probable Mur-de-Bretagne 1932-2020													An
	Janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec		
Décile Sup.	188	168	136	118	115	104	92	111	130	172	180	211		1182
Quintile Sup.	161	135	124	90	98	84	79	83	96	135	151	171		1102
Médiane	113	78	71	61	59	46	43	52	58	85	107	114		983
Quintile Inf.	64	40	37	33	34	23	22	23	30	47	50	71		869
Décile Inf.	38	27	16	23	24	17	15	10	19	30	38	47		755

Concernant les bornes inférieures, l'amplitude de cumul est clairement atténuée, avec des cumuls mensuels minimums homogènes. **La notion de mois sec est donc similaire pour tous les mois de l'année.** La probabilité d'avoir des cumuls de pluies très faibles existe tout au long de l'année, notamment pendant la saison de recharge. Cette information est importante pour anticiper la gestion de la ressource en eau. En effet, des cumuls de novembre, décembre ou janvier de moins de 50 mm interviennent en moyenne **une année sur dix**.

À retenir

L'approche probabiliste des événements extrêmes en pluviométrie s'appréhende par le calcul des **centiles de cumuls de précipitations**.

Le **régime probable** est l'indicateur le plus adapté pour définir les **seuils extrêmes** des cumuls mensuels de précipitation, et pour analyser **la répartition** de ces cumuls et **l'amplitude** de ces extrêmes. La connaissance des seuils extrêmes permet de désigner une période à risque lorsque les seuils sont atteints.

Sources bibliographiques

Brunet-Moret Y., (1969). Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie Cah. O.R.S.T.O.M. sér. *Hydrol.*, Vol. VI, n° 3

E.R. 30, sous la direction de C.P. PEGUY, 1981: "Dix ans de carte climatique détaillée de la France au 1/250.000e."; in "Eaux et climats : Mélanges offerts à C.P. PEGUY ; Grenoble; pp. 41-84

Jeandel C., Mosséry R., (éd.) (2011). Le Climat à Découvert : Outils et méthodes en recherche climatique, *CNRS Éditions*, Paris

Mounier J., De Saintignon M.F., 1981: "La carte climatique détaillée de la France."; *Le Courrier du CNRS*, N 42; pp.47-51

FICHE C2

STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)

Le Standardized Precipitation Index (SPI) est un indice normalisé classiquement utilisé pour suivre le **risque de sécheresse**. Il est préconisé pour identifier et mettre en évidence les périodes extrêmes sur la période passée.

Identifier les périodes extrêmes

Le SPI est un indicateur statistique qui permet de **quantifier l'écart des précipitations d'une période**, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques (sur la période de référence ou normale climatique). Cet indicateur, développé par McKee *et al.* en 1993, est **recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM)** notamment pour identifier le risque de sécheresse.

Le SPI est normalisé et **varie ainsi autour de 0**. Il est possible de désigner une période sèche ou humide selon l'intensité de cet 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 ci-dessous 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.

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

Cet **indice repose uniquement sur l'analyse des précipitations**, c'est à la fois une force puisque cela limite les biais, mais c'est aussi une faiblesse. En effet, l'approche des sécheresses uniquement par le cumul de précipitations peut être biaisée car il n'intègre pas la température et donc l'évapotranspiration qui dépend aussi de l'évapotranspiration (ETP), de la nature du sol et de l'occupation du sol. Les tendances identifiées par cet indicateur seront donc similaires aux tendances pluviométriques décrites par les indicateurs.

Cependant, le SPI permet **d'identifier rapidement les périodes extrêmes** et de les visualiser (cf. encadré 29). Un deuxième avantage est qu'il peut se calculer sur différentes périodes temporelles (mois, saisons, années...) ce qui permet de lisser ou préciser l'indicateur.

De plus, le SPI est comparable avec toutes les stations.

➤ Indicateur - SPI - Méthode de calcul

Le SPI est un indice normalisé dont la méthode de calcul est la suivante :

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

Avec P = Cumul de précipitations sur l'échelle de temps considéré (1 mois, 2 mois ...)

P_m = Cumul moyen de précipitations sur la période historique (période de référence)

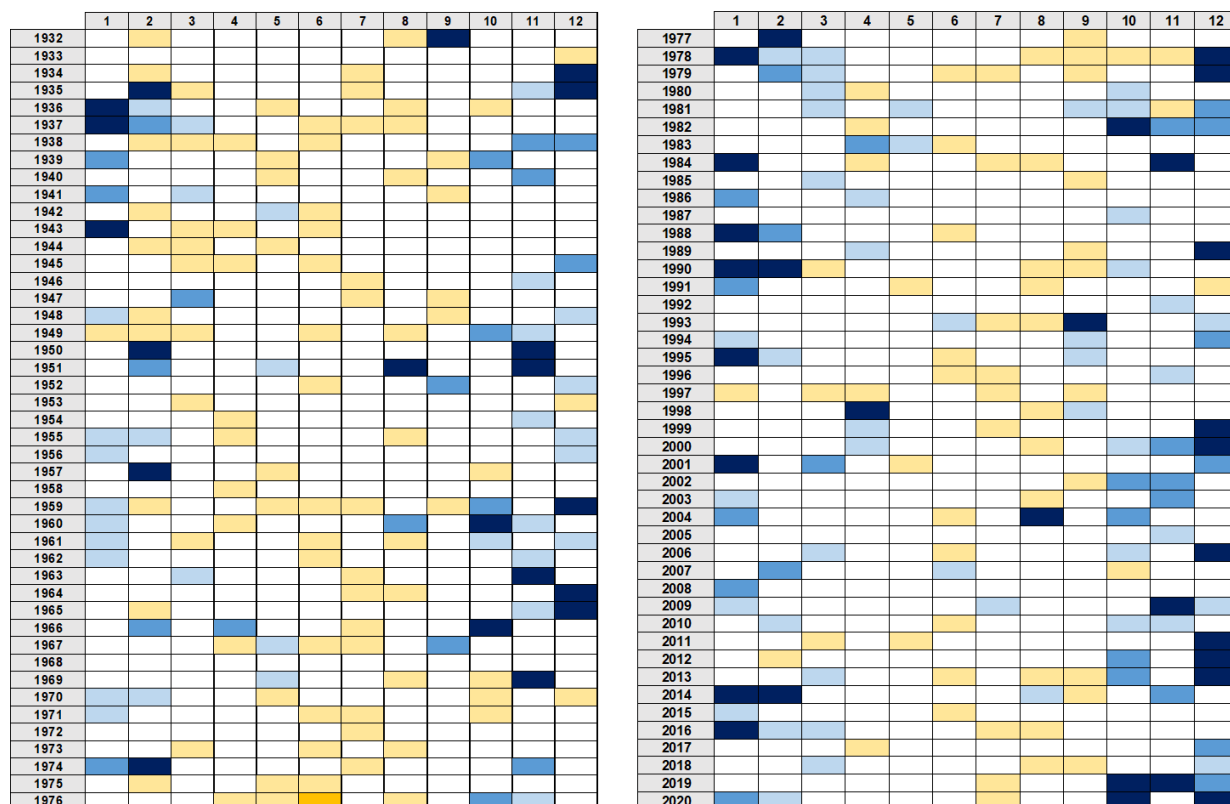
σ —= Écart-type de précipitations sur la période historique

Représentations du SPI

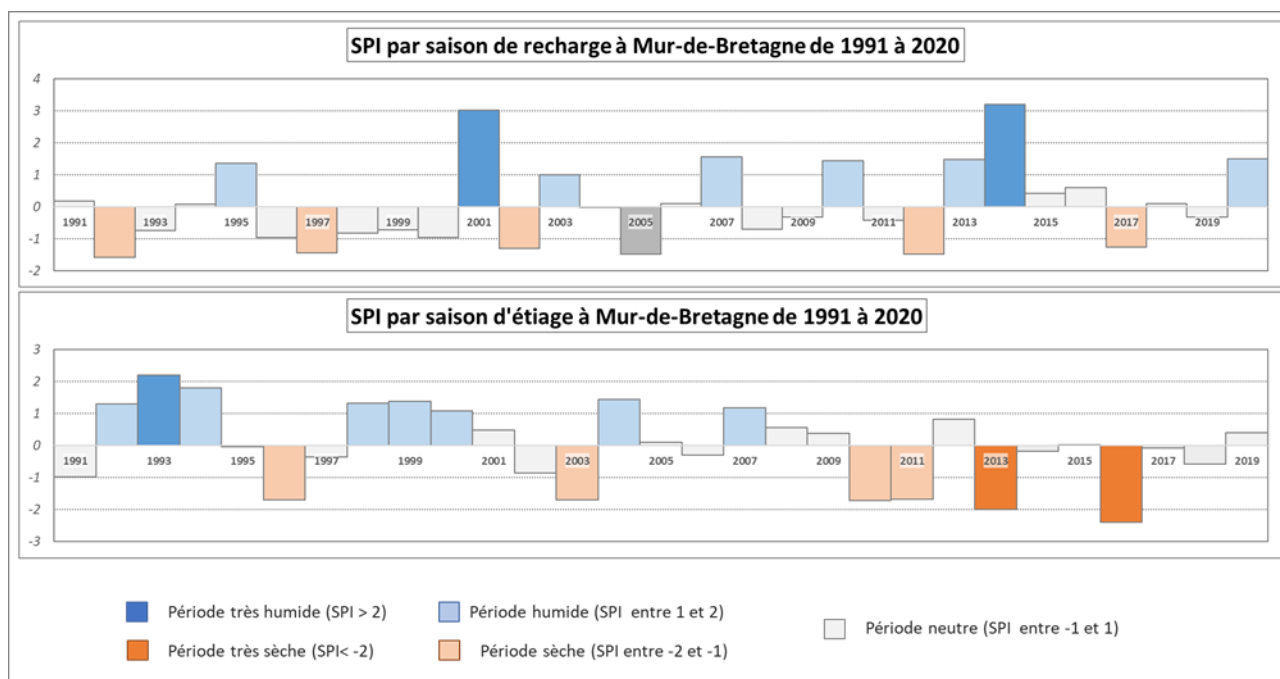
Le SPI peut être représenté de différentes façons.

D'abord, la **représentation en damier** permet de visualiser la situation mensuelle ou saisonnière. À Mur-de-Bretagne par exemple, le SPI mensuel calculé sur la période 1932-2020 présente une majorité de **périodes « normales » (en blanc)**. Les mois secs sont principalement identifiés de mars à septembre, mais peuvent aussi survenir en hiver. Seul le mois de juin 1976 est considéré comme **très sec (orange)**. Les mois humides interviennent en saison de recharge, le SPI dépasse plusieurs fois le seuil de mois **extrêmement humide (bleu foncé)**. Ces mois) sont souvent synonymes d'inondations sur le Blavet. Les mois extrêmes humides consécutifs sont de plus en plus nombreux. On peut citer octobre 1966, février 1974, l'hiver 1990-1991, l'hiver 2000-2001, l'hiver 2013-2014 et plus récemment le mois de décembre 2020.

SPI à Mur-de-Bretagne entre 1932 et 2020



La représentation peut aussi être faite sous forme **d'histogramme**, et il est ainsi possible d'identifier une tendance d'évolution du SPI. Pour Mur-de-Bretagne, le SPI par saison hydrologique présente dans les deux cas une importante variabilité interannuelle. Cependant, il tend clairement à diminuer en saison d'été. Cela signifie que le risque de sécheresse augmente durant cette période. Il n'est en revanche pas possible avec cet indicateur de quantifier la sécheresse.



À retenir

Dans le cadre du diagnostic climatique territorial, **l'indicateur SPI** peut être utilisé pour **identifier les périodes extrêmes** (humides ou sèches) du climat passé, sur différentes échelles temporelles (1,2,3,6 mois ou plus). Les différentes représentations du SPI permettent également de mettre en évidence les tendances d'évolution par rapport à la moyenne sur la période étudiée. Ainsi, sans quantifier vraiment les événements extrêmes, le SPI permet de visualiser les périodes passées à risque d'inondation (SPI > 2) et de sécheresse (SPI < -2) qui, dans les exemples, ont tendance à devenir de plus en plus fréquentes sur la période passée.

Sources bibliographiques

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

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

FICHE C3

APPROCHE DU RISQUE D'INONDATION

D'un point de vue climatologique, les inondations résultent souvent de cumuls de pluies importants ou des pluies continues sur un temps long. Un des enjeux du diagnostic climatique territorial est d'analyser les phénomènes pluviométriques enregistrés lors des périodes d'inondation passées, et de **comprendre les enchainements météorologiques responsables de ces situations**. Cette connaissance pourra alors être appliquée aux modélisations du climat futur. Cela permet d'anticiper dans la mesure du possible, les épisodes d'inondations en estimant leur durée de retour potentiel.

Analyser les périodes d'inondation passées

Les années les plus arrosées sont souvent marquées par des inondations, même si l'état du sol et des réserves en eau jouent aussi un rôle important pour les provoquer. Étudier la répartition des cumuls de précipitations **sur une année très humide** permet de **quantifier** et **qualifier** les caractéristiques pluviométriques qui mènent potentiellement à des inondations.

Analyser la répartition des cumuls de pluviométrie

L'analyse approfondie de la répartition des cumuls sur une ou **plusieurs années très arrosées et connues pour avoir été marquées par des inondations** permet de caractériser les liens entre précipitations et inondations. Les années les plus arrosées en Bretagne sont **1951, 1983, 1986, 2001, 2007, 2014**.

Dans un premier temps il est nécessaire de rendre compte de l'intensité du phénomène par rapport à la normale. Une analyse selon l'intensité des pluies (*cf. Fiche B3 : La décomposition des pluies*) permet ensuite de préciser la répartition du cumul sur cette période extrême.

Analyser le lien débit/pluie

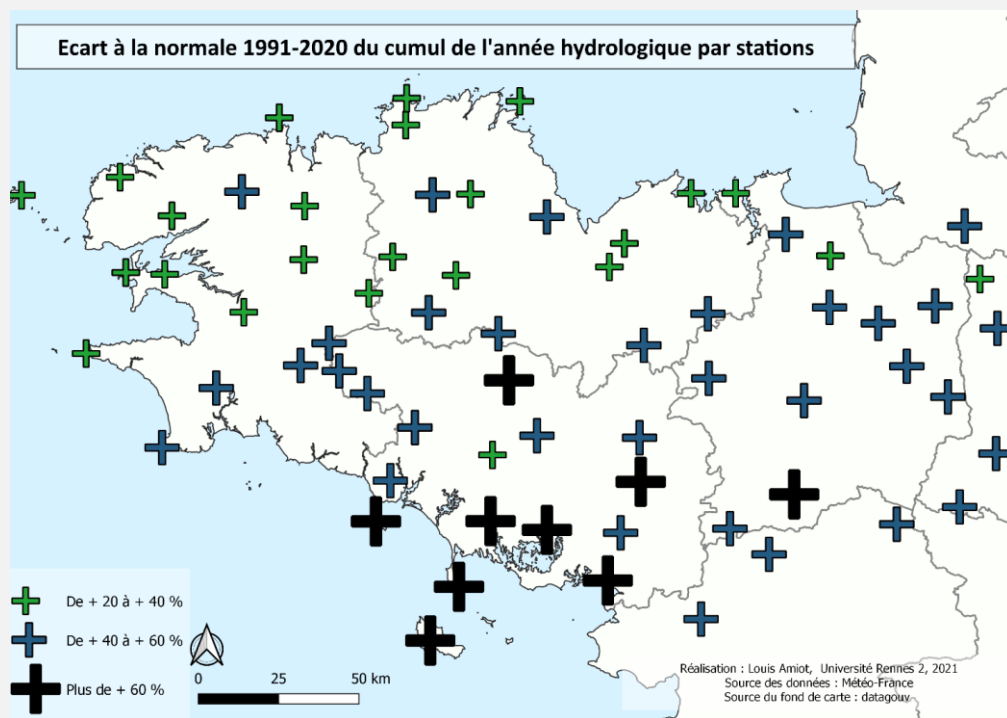
Sur les événements extrêmes ponctuels (**quelques jours**), il est intéressant de faire le lien entre pluie et débit. L'analyse peut alors s'effectuer au **pas de temps horaire** et permet d'évaluer le temps de réponse des débits par rapport aux événements extrêmes. Il est alors recommandé d'isoler les jours de **pluie de plus de 50 mm**, ou isoler les cumuls maximums. Ces jours de pluie extrêmes sont très rares, peuvent intervenir en été comme en hiver et engendrer une crue rapide.

➤ Encadré 29

Analyse des caractéristiques pluviométriques de l'année hydrologique 2001 (oct 2000 – sept 2001)

En Bretagne, comme dans une majeure partie de la France, l'année hydrologique 2001 a été particulièrement humide. C'est aussi une période marquée par de nombreuses inondations, notamment en saison de recharge (octobre à mars).

Sur l'ensemble des stations de mesures bretonnes, **le cumul de précipitations atteint 1000 mm, et monte jusqu'à 2 000 mm sur les stations du Massif armoricain**. L'écart par rapport au cumul de la période de référence est autour de + 50 %, et des cumuls supérieurs de 300 à 700 mm par rapport à la normale sont enregistrés. La côte nord-bretonne a eu des cumuls moins importants, mais toujours supérieurs à la normale (cf. carte ci-dessous). 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'été. Les cumuls sur la seule saison de recharge sont supérieurs de 100 à 200 mm au cumul annuel moyen par station.



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 principalement de jours de pluie de plus de 10 mm pendant lesquels les cumuls enregistrés sont importants : 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 en 9 jours. Entre novembre 2000 et mars 2001, **l'intensification** des fortes pluies en saison de recharge a entraîné cinq épisodes de crue majeurs.

Plus généralement en Bretagne, l'analyse des données passées montre une **intensification des pluies en été et en automne, sans impact pour l'instant sur le risque d'inondation**, plutôt concentré en hiver. Concernant les données futures, l'évolution du nombre de jours de forte pluie (cf. [Fiche D3 : identifier des tendances climatiques futures](#)), notamment en hiver, est un paramètre sensible à étudier afin d'estimer l'évolution du risque d'inondation.

L'évolution du **nombre de jours de pluie forte est donc un paramètre sensible à étudier sur les données futures**, 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 pourrait entraîner des risques de crues plus fréquents à ces périodes de l'année, alors que ce **risque est pour l'instant concentré en hiver en Bretagne**.

Analyse à échelle infra-quotidienne

Sur les événements extrêmes ponctuels (quelques jours), il est intéressant de faire le lien entre pluie et débit. Sur quelques jours isolés, l'analyse peut alors s'effectuer au pas de temps horaire et permet d'évaluer le temps de réponse des débits par rapport aux événements extrêmes.

Pour identifier les événements extrêmes, il faut isoler les **jours de pluie de plus de 50 mm** ou isoler les cumuls maximums. Ces jours de pluie extrêmes sont très rares, ils peuvent intervenir en été comme en hiver.

Caractériser le risque inondation

Le risque d'inondation peut être appréhendé par les centiles. Les centiles des cumuls mensuels peuvent être étudiés afin d'obtenir les seuils de mois extrêmes (*cf. Fiche C1 : Une approche probabiliste du risque*). Les centiles peuvent aussi être étudiés en cumul quotidien pour avoir les seuils des cumuls quotidiens extrêmes mois par mois, ou sur l'ensemble des données. L'intérêt est de quantifier les seuils et les comparer entre stations pour identifier la zone et la période où les centiles sont les plus élevés. Des valeurs seuils élevées (centiles supérieurs) signifient que les cumuls extrêmes sont plus élevés, et donc que le risque d'inondation est plus important. Cette approche purement climatique est à coupler avec l'occupation du sol et le type de sol **pour affiner réellement les zones à risque**.

Définir des valeurs seuils de cumul sur plusieurs jours

L'objectif est ici de retrouver les périodes d'inondations passées grâce à des valeurs seuils de cumuls de précipitation identifiées sur plusieurs jours.

Les seuils de pluies extrêmes peuvent être définis à partir des années d'inondations connues (1951, 1966, 1990, 2001, 2014 ...). Par exemple, des cumuls de 50 mm en 1 jour ou 100 mm en 10 jours se retrouvent sur ces années d'inondations à Mur-de-Bretagne.

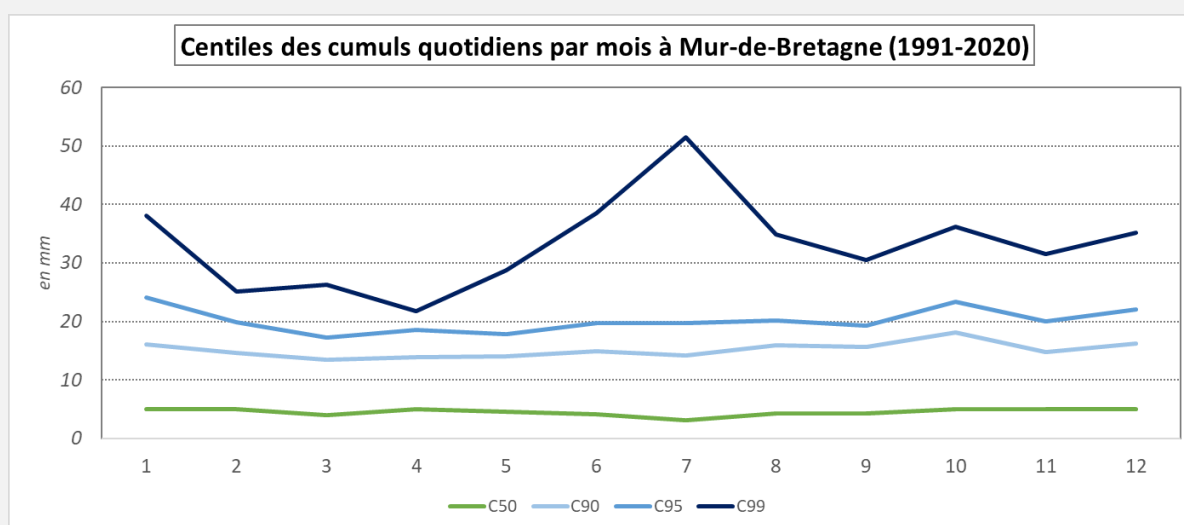
Ces valeurs sont déterminées à partir des centiles supérieurs, ou par une approche plus subjective des cumuls maximums. **Il suffit d'ordonner la série** et observer la répartition des cumuls maximum sur 1 ou plusieurs jours. Une fois que les seuils sont définis, il faut **compter le nombre de fois ou ces seuils sont dépassés par année hydrologique**. Cela permet de suivre l'évolution du risque d'inondation.

Cette méthode ne prend pas en compte l'occupation du sol et son évolution. Cependant elle donne un aperçu de la tendance climatique concernant l'évolution des cumuls extrêmes et de leur répartition.

➤ Encadré 30 – Analyse des cumuls quotidiens à Mur-de-Bretagne

L'analyse des cumuls quotidiens à Mur-de-Bretagne montre que les seuils correspondant aux centiles 50, 90 et 95 sont quasiment similaires d'un mois à l'autre. En effet, la moitié des jours de pluie présente un cumul supérieur ou inférieur au seuil de 4.5mm (centile 50). Un jour de pluie sur 10 (centile 90) dépasse le seuil situé autour de 15 mm de cumul et 1 jour de pluie sur 20 (centile 95) dépasse le seuil situé autour de 20 mm. Cela signifie que tout au long de l'année, 95 % des cumuls de pluie quotidiens sont inférieurs à 20 mm.

Par contre, le centile 99, qui correspond au seuil le plus extrême (1 jour de pluie sur 100), varie fortement d'un mois à l'autre, entre 25 à 50 mm. Il est possible d'avoir un cumul quotidien de plus de 50 mm en juillet, ou près de 40 mm en juin. Cela signifie un risque de crue rapide due à ce fort apport pluviométrique. Cependant, ce pic ne concerne que le centile 99, les autres centiles restent stables, signifiant que ces jours de très forte pluie sont très rares.

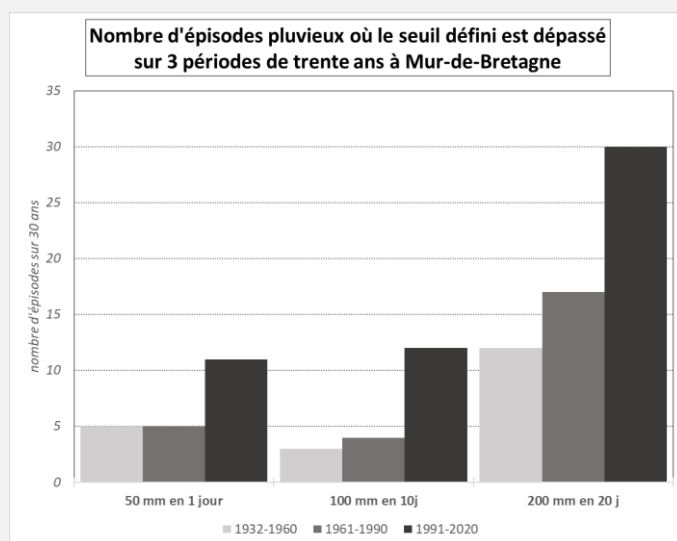


Détermination des seuils par une approche des cumuls sur plusieurs jours

L'inondation ne se produit pas uniquement lors d'un **épisode pluvieux intense de courte durée**. Elle peut survenir après un épisode de pluie continue sur une **longue période qui a entraîné une saturation en eau du sol**.

Pour couvrir l'ensemble du risque inondation, il est nécessaire de s'intéresser au cumul sur plusieurs jours. Ici, on utilisera le cumul sur 1, 5, 10 et 20 jours. L'idée est de déterminer des seuils critiques pour ces cumuls sur plusieurs jours au-delà desquels une inondation peut se produire. Une fois ces seuils déterminés, il suffit de **compter le nombre de fois où ils sont dépassés par année hydrologique afin d'avoir une idée des tendances d'évolution**.

➤ Encadré 31 - Analyse des cumuls sur plusieurs jours à Mur-de-Bretagne



Sur la station Mur-de-Bretagne, les seuils considérés sont les suivants :

- 50 mm sur 1 jour, pour identifier théoriquement les pluies extrêmes en lien avec les crues rapides,
- 100 mm sur 10 jours et 200 mm sur 20 jours, pour caractériser des inondations longues.

Sur la période passée, le nombre d'épisodes à fort cumul **tend clairement à augmenter**. Le graphique ci-dessous montre que le nombre d'épisodes de fortes pluies a doublé par rapport à la dernière période 1961-1990. Cela signifie que le risque d'inondation a théoriquement augmenté. Pour préciser cette affirmation, il est possible de calculer le nombre d'épisodes de forts cumuls par saison hydrologique.

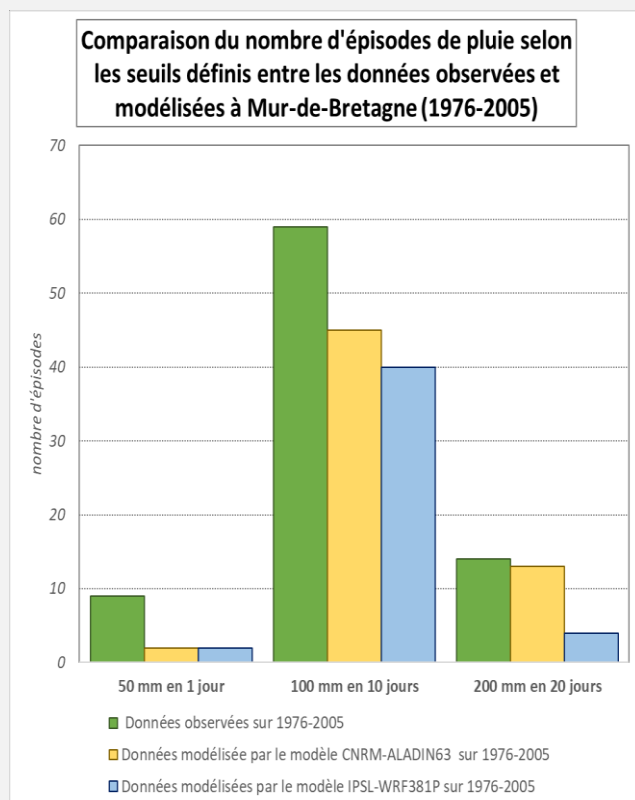
Appréhender les risques futurs

Le risque d'inondation futur est approché grâce à la connaissance du risque passé. **Les seuils définis pour la période passée peuvent être réutilisés**. À partir de ces seuils, il est possible de déterminer l'évolution des inondations.

Cependant, la pluie est un paramètre très difficile à représenter par les modèles climatiques, ce qui induit de nombreux biais dans sa représentation (*cf. Fiche A6 : Des repères sur la simulation climatique*). En effet, la méthode de correction des modèles induit un lissage des extrêmes et un resserrement de l'amplitude de la répartition des cumuls. **Le risque inondation futur est ainsi a priori sous-estimé par les modèles**.

Il est également nécessaire de confronter les données passées observées et modélisées afin de rendre compte des biais (*cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias*)

Encadré 32 - Evolution du risque d'inondation à Mur-de-Bretagne



La première étape de l'étude de l'évolution du risque d'inondation future est de confronter les données passées modélisées aux données observées sur la même période (*cf. Fiche D2 : extraction des données modélisées sur le portail Drias*).

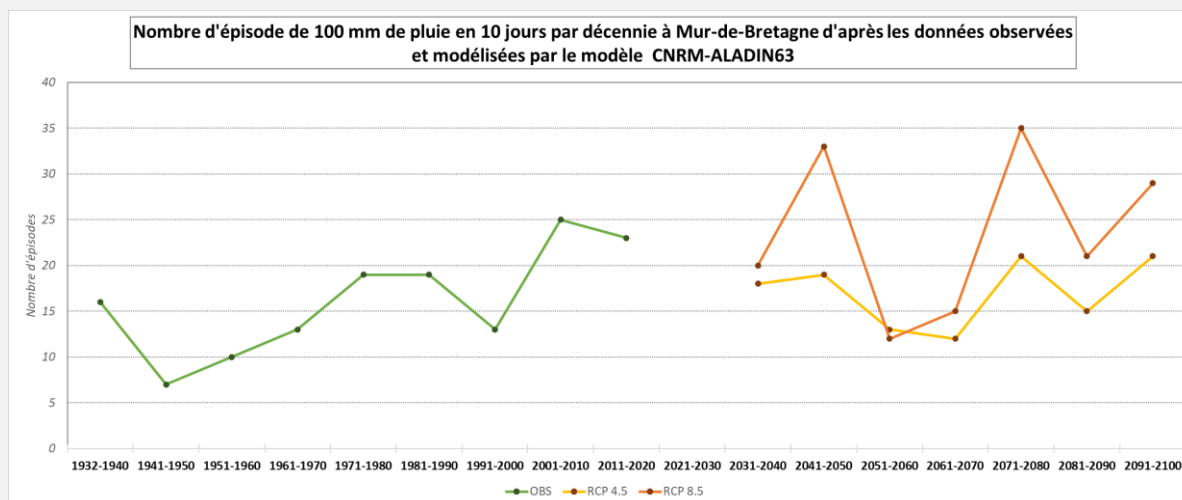
Pour Mur-de-Bretagne, le nombre de jours au-delà des seuils de cumul défini est sous-estimé par les deux modèles ainsi que les jours de pluie de plus de 50 mm.

Le modèle du CNRM semble mieux reproduire ces épisodes de pluie, particulièrement les épisodes de 200 mm en 20 jours.

L'évolution du nombre d'épisodes de pluie de 100 mm sur 10 jours tend à augmenter sur la période passée. Actuellement, il y a une **vingtaine d'épisodes** de ce type par décennie **contre une dizaine par décennie avant 1951**.

Concernant les tendances futures modélisées via le modèle CNRM, l'évolution du nombre d'épisodes est différente selon le scénario considéré. **Avec le scénario intermédiaire (RCP4.5)**, le nombre d'épisodes de pluies reste stable jusqu'à la fin du siècle autour de 15-20 épisodes par décennies. Cela signifie à priori que le nombre d'inondations devrait rester stable d'ici la fin du siècle avec ce scénario.

Avec le scénario pessimiste (RCP 8.5), le nombre d'épisodes est beaucoup plus variable d'une décennie à l'autre et tend à augmenter. Le nombre d'épisodes par décennie devrait doubler d'ici la fin du siècle. Cela signifie une hausse importante du risque inondation pour Mur-de-Bretagne avec ce scénario.



À retenir

Le risque inondation peut s'appréhender en climatologie par **l'étude des extrêmes**. Étudier en détail la **répartition et l'intensité des cumuls quotidiens** sur une ou des périodes d'inondation (1951, 1966, 1994, 2001, 2014) permet de connaître les caractéristiques météorologiques qui ont mené à cette situation. L'analyse climatique peut être **couplée à une analyse des débits** sur les périodes identifiées pour une meilleure approche du risque inondation.

En définissant des **seuils de cumuls** à partir des données passées et notamment à partir des périodes d'inondation connues, il est possible de suivre l'évolution du risque inondation sur la période passée. Les **mêmes seuils peuvent être considérés pour le suivi du risque inondation futur**. Cependant, il faut rappeler qu'il y a de nombreux biais et incertitudes induits par la modélisation. Les cumuls maximums sont sous-estimés et cela est en partie dû à la méthode de correction des données.

FICHE C4

LE BILAN HYDRIQUE, UNE APPROCHE COMPLETE DU RISQUE DE SECHERESSE

Le bilan hydrique est l'indicateur recommandé pour **quantifier le risque de sécheresse** et son évolution sur le territoire. Des données de précipitations et d'évapotranspiration (ETP) sont nécessaires pour calculer le bilan hydrique.

Quand parler de sécheresse ?

La sécheresse se définit comme une situation temporaire ou saisonnière de manque d'eau. Lambert (1996) a défini **3 types de sécheresse** :

- 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 1 mm 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 prolongée. Le déficit d'humidité des sols dépasse la capacité des végétaux à puiser les réserves d'eau du sol, ce qui exerce 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.

Concrètement, une sécheresse météorologique trop longue entraîne une sécheresse pédologique, qui elle-même 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 qui, dans l'imaginaire collectif, est « une région où il pleut tout le temps ». Mounier est l'un des premiers climatologues à avoir étudié la fréquence des sécheresses en Bretagne, montrant déjà à partir des années 60 que le risque de sécheresse existe en Bretagne avec une importante fluctuation climatique en été (Mounier, 1965 ; 1977). Ces travaux ont été confirmés et affinés par la suite par Dubreuil (1994) et Lamy (2009) qui utilisent le bilan hydrique pour une analyse détaillée de la sécheresse.

Qu'est-ce que le bilan hydrique ?

Le bilan hydrique **quantifie la disponibilité en eau pour les végétaux** en fonction des **arrivées d'eau (P), des besoins en eau (ETP) et de l'état de la réserve utile du sol (RU)**. Cette dernière correspond à la quantité d'eau maximum que le sol peut stocker. Cette eau est alors considérée comme une réserve dans laquelle les végétaux peuvent puiser. Le bilan hydrique s'obtient en faisant la différence entre P et ETP à échelle mensuelle. Il y a alors 2 cas de figure :

- **P > ETP** : le surplus d'eau vient recharger la réserve utile. Si la réserve a atteint son maximum, les sols sont saturés en eau et le surplus d'eau s'écoule et alimente les masses 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.
- **P < ETP** : le manque d'eau est compensé par une baisse de la réserve utile, car les végétaux vont puiser l'eau manquante dans le sol. Cependant, puiser dans cette réserve peut ne pas suffire à combler le manque d'eau car les végétaux n'ont pas la capacité de puiser toute l'eau de la réserve utile (notamment du fait de leur profondeur d'enracinement). 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 $P < ETP$, il y a forcément un DE**, même minime. Les mois sont qualifiés de secs ou arides selon la hauteur du déficit.

1	ARIDE	$P < ETP$ et $DE > 100$
2	SEC	$P < ETP$ et $60 < DE \leq 100$
3	SUB SEC	$P < ETP$ et $30 < DE \leq 60$
4	FAIBLE DEFICIENCE	$P < ETP$ et $DE \leq 30$
5	HUMIDE	$P \geq ETP$ et $RU < RU0$
6	HYPER HUMIDE	$P > ETP$ et $S > 0$

Le DE doit être représenté à **échelle mensuelle**. Un code renvoyant à la notion de mois sec ou humide est ensuite attribué à chaque mois selon les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et l'état de la réserve utile du sol (cf. tableau ci-dessous). Par exemple, un mois aride est un mois où les précipitations sont inférieures à l'ETP et où le déficit d'évapotranspiration est de plus de 100 mm.

Il est possible de prendre en compte l'occupation du sol en estimant la réserve utile d'après le type de sol et/ou en calculant l'ETP en prenant en compte le cycle phénologique des végétaux.

Dans le cadre du diagnostic climatique territorial, il est conseillé d'utiliser **l'ETP Météo-France** et de fixer la **réserve utile à 125 mm**. En faisant abstraction de la variation de la réserve utile du sol dans le temps et dans l'espace, le bilan hydrique climatique est théorique, mais permet une comparaison entre les différentes stations ainsi qu'une comparaison temporelle qui ne dépend que de l'évolution climatique.

Par conséquent, globalement selon la période de l'année, le bilan hydrique permet de traduire l'une des quatre phases hydrologiques suivantes :

- Phase de **surplus hydrologique** : les précipitations sont supérieures à l'ETP, les réserves se remplissent et lorsqu'elles sont pleines, l'eau restante s'écoule. Cela se produit généralement en hiver.
- Phase de **sollicitation de la réserve utile du sol (RU)** avec potentiellement un déficit d'évapotranspiration (DE) minime. Elle correspond plutôt au printemps au moment de la reprise de la végétation.
- Phase où la réserve en eau du sol ne suffit plus, entraînant un déficit d'évapotranspiration (**DE**) **important**. Cette phase intervient surtout en été.
- Enfin, la **RU se reconstitue** au cours de l'automne.

Ainsi décrites, ces quatre phases correspondent de façon générale aux saisons météorologiques, mais il peut y avoir des décalages ou des épisodes de déséquilibres hydrologiques. Selon les valeurs des paramètres climatiques, le bilan hydrique permet de mettre en évidence les périodes de surplus ou de tension de la ressource en eau. Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETP tel qu'en saison d'été, la pluie va d'abord alimenter les besoins en eau du sol et non plus les nappes et cours d'eau.

➤ Encadré 33

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et bilan hydrique

L'ETP 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 calcul d'ETP : la formule de Thornthwaite, la formule de Turc et la formule de Penman. La méthode de calcul recommandé par la FAO est la formule de Penman-Monteith. Météo France utilise une adaptation de cette formule de Penman-Monteith. L'ETP Météo-France prend en compte les mesures de vent, de rayonnement, de température ainsi que l'humidité de l'air. Ces paramètres permettent d'estimer les besoins en eau du sol. Le bilan hydrique qui combine ETP et précipitations correspond ici au bilan hydrique d'un gazon. Ce calcul théorique de Météo-France ne prend pas en compte la véritable occupation du sol. Cela permet cependant de comparer les valeurs du bilan hydrique avec d'autres stations puisqu'il s'agit de données calculées par la même méthode.

Comment analyser un bilan hydrique ?

Le bilan hydrique donne **une vision d'ensemble de l'état de la réserve du sol** par rapport aux besoins et arrivées d'eau.

Généralement, les mois d'été ressortent souvent comme étant subsecs, secs ou arides.

Or, il est considéré qu'**au-delà de 30 mm de déficit** d'évapotranspiration ($DE > 30$ mm), il y a un impact sur la végétation. Les mois considérés comme subsecs, secs et arides sont des mois où la végétation est affectée par une sécheresse plus ou moins marquée selon la hauteur du déficit.

Les années de sécheresse extrême sont bien identifiables avec un ou deux mois arides. Par ailleurs, il est possible de définir la saison de recharge (mois hyperhumides avec surplus d'eau) et d'identifier les périodes critiques de recharge tardive.

➤ Indicateur - Bilan hydrique - Méthode de calcul

Pour **calculer le bilan hydrique**, il faut disposer des **données mensuelles de précipitations et d'ETP**. Si les données d'ETP sont indisponibles, il est possible de l'estimer à partir du rayonnement mesuré et des températures (*cf. Fiche D4 : comment approcher le risque de sécheresse future ?*). Si les données de rayonnement et/ou de température ne sont pas disponibles, il n'est pas possible de faire le bilan hydrique.

Il faut ensuite calculer :

- La Réserve utile, selon la précision de l'étude elle peut être estimée selon le type de sol, ou fixe. En Bretagne, il est d'usage de considérer la réserve utile à 125 mm.
- L'excédent pluviométrique ($P - ETP$)
- Le déficit pluviométrique ($ETP - P$)
- Evapotranspiration Réelle (ETR)
- La somme du déficit annuel
- Le déficit d'évapotranspiration ($ETP - ETR$)
- La reconstitution de la réserve utile
- Le surplus / précipitations efficaces (S)

Avec les données calculées, il est déjà possible d'étudier les variations du déficit d'évapotranspiration (DE) ou des pluies efficaces (S) notamment en regardant l'évolution annuelle.

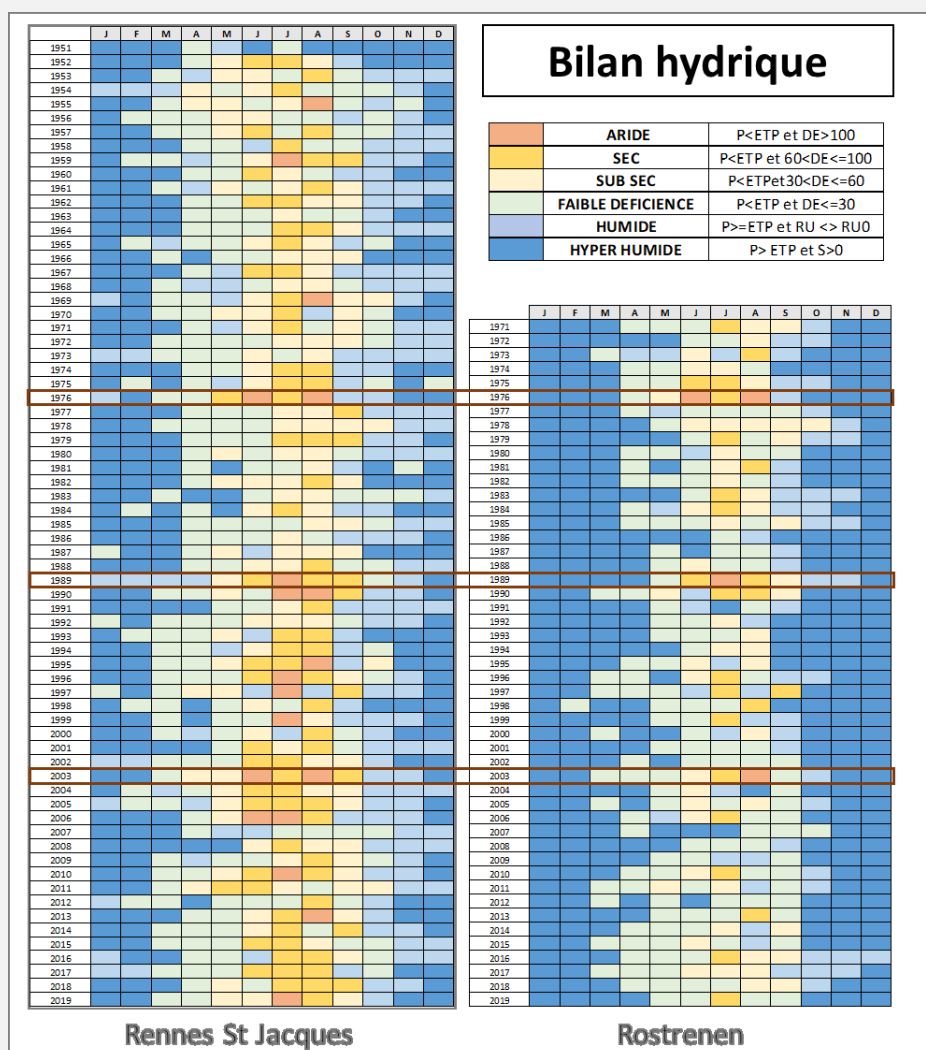
➤ Encadré 34 - Analyse du bilan hydrique à Rennes et Rostrenen

La représentation en damier du bilan hydrique (mois/années) permet de visualiser les périodes de sécheresse. La comparaison entre les bilans hydriques de Rennes et Rostrenen montre que le risque de sécheresse n'est pas identique partout en Bretagne. En effet, les mois secs et arides sont plus fréquents à Rennes. Cependant lors des épisodes de sécheresse majeure, comme 1976, 1989 et 2003, on retrouve pour les deux stations des mois secs et arides.

Le bilan de Rennes montre clairement une augmentation des mois considérés comme secs. En effet depuis 1989, il n'y a pas eu une année sans mois sec (sauf 2007) avec parfois deux voire trois mois secs par an. 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 moins important (un mois sec tous les deux ans), et tend plutôt à diminuer. À noter toutefois que la série temporelle est moins longue que celle de Rennes.

Concernant la saison de recharge (mois hyper humide), elle est plus courte à Rennes de novembre à mars en moyenne) qu'à Rostrenen (octobre à mars), même s'il existe des variabilités interannuelles. Sur ce bilan hydrique, il est possible d'identifier les périodes critiques concernant une recharge tardive. L'hiver 1972-1973, 1988-1989, 1991-1992 ou encore 2016-2017 peuvent être cités comme étant des saisons de recharge peu efficaces.



Analyse détaillée des composantes du bilan hydrique

Déficit d'évapotranspiration – fréquence sur 30 ans

Le bilan hydrique peut être appréhendé en étudiant la fréquence de déficit d'évapotranspiration (DE). Cela correspond à la fréquence de mois arides, secs, subsecs, à faible déficience, humides et hyper humides sur 30 ans calculée à partir du bilan hydrique. Ainsi, il est possible de donner la fréquence et répartition des mois de sécheresse, mais aussi **délimiter la durée moyenne de la saison de recharge**. L'intérêt est aussi de comparer cette fréquence sur la période actuelle (**1991-2020**) avec la période **1961-1990** afin d'identifier l'évolution de ce déficit.

➤ Encadré 35

Analyse de la fréquence de déficit d'évapotranspiration à Rennes

La fréquence du déficit d'évapotranspiration (DE) à Rennes montre qu'il y a en moyenne 20 % de mois de juillet arides, 10 % de mois d'août arides et plus de la moitié de ces mois considérés comme secs.

Concernant la saison de recharge, la **recharge** complète de la réserve du sol correspond aux mois hyper humides et humides. Elle **commence en octobre dans 70 % des années** et se termine en mars (les mois humides et hyper humides ne sont plus majoritaires).

Si on observe l'évolution de la fréquence en comparant la période actuelle (1991-2020) par rapport à la période 1961-1990, il apparaît que la **situation semble empirer, principalement en saison d'étiage**. De mai à septembre, la fréquence de mois secs est renforcée et la **période d'étiage semble démarrer plus tôt** (avril). Cette fréquence peut aussi être comparée avec les données modélisées afin d'avoir l'évolution probable des sécheresses à horizon moyen ou lointain (*cf. Fiche D4 : comment approcher le risque de sécheresse future ?*).



Déficit d'évapotranspiration annuel

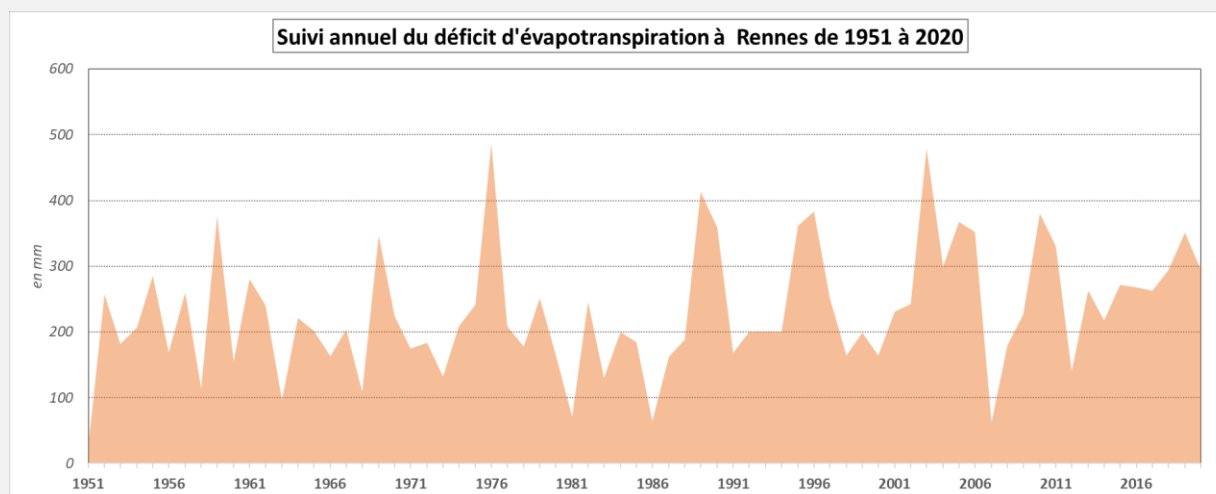
Le déficit d'évapotranspiration (DE) peut être étudié seul afin d'identifier les années de sécheresse. Il s'agit d'une quantification théorique du manque d'eau d'après le bilan hydrique. Ce déficit peut être cumulé sur l'année. Le DE annuel peut se calculer **à échelle de l'année civile** puisque ce déficit intervient majoritairement sur la saison d'été (mars-septembre). L'étude des tendances d'évolution du DE peuvent s'effectuer de la même façon que pour le cumul de précipitation (*cf. Fiche D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique*).

➤ Encadré 36

Suivi du déficit d'évapotranspiration annuel à Rennes

Le suivi du DE sur Rennes permet d'identifier les années de sécheresse. Elles correspondent aux pics de DE : **1976** avec près de 500 mm de DE, **1989** avec 410 mm, **2003** avec 480 mm. Le DE tend à augmenter avec des pics de plus en plus fréquents depuis la fin des années 1980. Ainsi, le DE a augmenté de près de 50 % à Rennes depuis 1951 d'après la régression linéaire qui est significative. Cette hausse signifie **une hausse de l'intensité des sécheresses**.

En Bretagne, le risque de sécheresse tend à augmenter **malgré la tendance à la hausse des précipitations observée**.



Taux de remplissage de la réserve utile

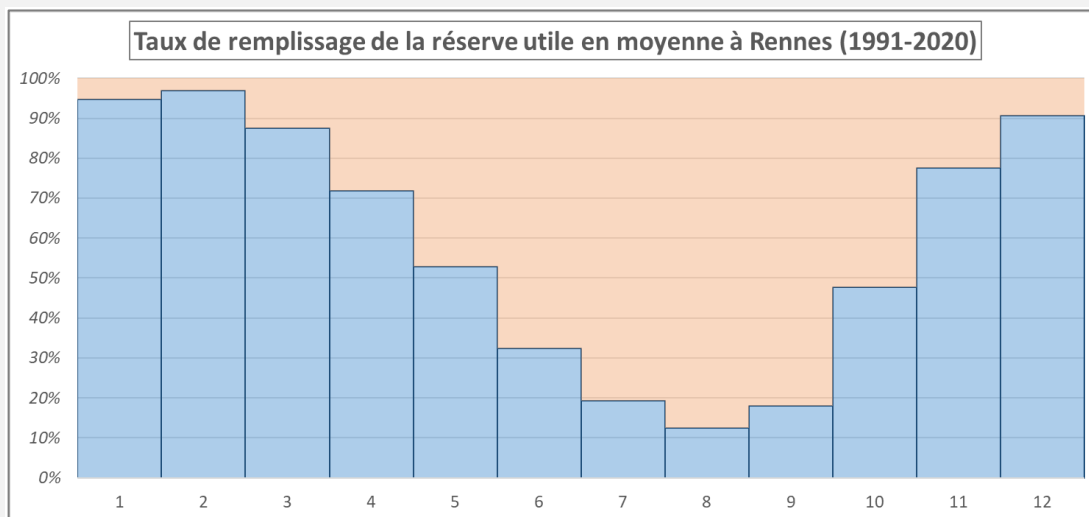
Le bilan hydrique se base aussi sur la réserve utile du sol, celle-ci diminue lorsque l'ETP est supérieur aux précipitations. On considère alors que la réserve du sol compense en partie le déficit pluviométrique. **La variation de la réserve utile du sol est donc un marqueur de sécheresse**.

L'analyse du taux de remplissage de la réserve donne une idée des périodes critiques pour la gestion des étés. Ce taux peut s'étudier en moyenne ou sur des périodes particulières afin de rendre compte de l'état des réserves du sol en phase de sécheresse extrême par exemple. Il se calcule en prenant la RU moyenne par rapport à la réserve utile maximum RU0 (qui correspond ici à 125 mm).

➤ Encadré 37

Taux de remplissage de la réserve utile à Rennes

La réserve est remplie à plus de 50 % en moyenne de novembre à mai à Rennes. La **période critique** pour la réserve en eau est la période de **juillet à septembre** où moins de 20 % de la réserve est remplie.



Évolution du risque de sécheresse futur

Le bilan hydrique peut être calculé avec les données modélisées. Il se calcule de la même manière, seules les données d'entrée (P et ETP) vont changer selon le modèle et le scénario considéré.

Cependant, les données **d'ETP ne sont pas disponibles dans les modélisations Drias⁵**. Il est donc nécessaire de calculer l'ETP sur la période future pour pouvoir calculer le bilan hydrique. La [fiche D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ?](#) vise à présenter une méthode de calcul pour l'ETP.

⁵ Le portail Drias est le site sur lequel les sorties de modèles climatiques sont disponibles. Cf Fiche D2.

À retenir

Le bilan hydrique est un indicateur complet de suivi du risque de sécheresse. Avec les précipitations et l'ETP, il permet un suivi du manque d'eau selon l'état de la réserve du sol.

Le bilan hydrique est un indicateur qui peut être représenté en **fréquence**, en **damier**, en **graphique** annuel et montre la tendance d'évolution du risque de sécheresse.

L'évolution du bilan hydrique peut aussi être modélisée en prenant en compte les précipitations modélisées et une ETP calculée à partir des données modélisées ([fiche D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ?](#)).

Sources bibliographiques

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.

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

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

DUBREUIL V., 2005 : Un risque climatique à géographie variable : la sécheresse dans la France de l'ouest. In « Les risques climatiques », sous la direction de D.Lamarre, Belin-Sup, GDR RICLIM, pp.147-173

LAMY C., DUBREUIL V., 2013 : Impact potentiel du changement climatique sur les sécheresses pédologiques en Bretagne au 21eme siècle. *Climatologie*; Vol.10, pp.107-121

DUBREUIL V., 1997 : "La sécheresse dans la France de l'Ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée ; *Sécheresse*, 8-1, pp.47-55.

FICHES D - TENDANCES CLIMATIQUES

Identifier les tendances d'évolution du climat est une étape essentielle d'une étude climatique. Une fois que les conditions climatiques actuelles ont été décrites, il est nécessaire de s'intéresser aux tendances passées et futures. Cela permet d'identifier et de quantifier des changements climatiques sur le territoire. **Un changement climatique est déjà observable en Bretagne**, des études sont déjà disponibles tant sur les tendances d'évolution que sur les effets du changement climatique dans l'ouest (Merot *et al.*, 2012 ; Roussel G., 2012 ; Lamy, 2013 ; Poquet *et al.*, 2019 ; Ligneau *et al.*, 2019)⁶.

L'objectif de cette famille de fiches est de fournir des éléments méthodologiques et d'indicateurs pour **préciser l'évolution du climat à une échelle territoriale assez fine**, et plus particulièrement identifier l'évolution de la pluviométrie ainsi que sa répartition sur le territoire. Cela permet de distinguer les périodes qui tendent à s'assécher et celles qui sont de plus en plus arrosées. Les tendances de pluviométrie permettent de suivre indirectement l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau à travers les indicateurs présentés précédemment.

Pour plus d'infos : DRIAS, 2020, les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/294>

D1 : Identifier une tendance climatique sur la période historique -----	120
D2 : Extraction des données modélisées sur le portail drias -----	127
D3 : Identifier des tendances climatiques futures -----	131
D4 : Comment approcher le risque de sécheresse future ? -----	140

⁶ Mérot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., (dir.), 212 : Le climat change dans l'Ouest, Évaluation, Impacts, Perceptions. Presses Universitaires de Rennes, 458 pages. <http://www.pur-editions.fr/detail.php?idOuv=3096>

Roussel G., 2012. *Changement climatique : Connaissances scientifiques actuelles en Bretagne. Rapport du CSEB*, 198p. <http://www.cseb-bretagne.fr/index.php/syntheses-etudes/changement-climatique.html>

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

Poquet J., Dubreuil V., Bouriau E., (2019)., Vulnérabilités et atouts du bassin rennais : quelle adaptation face au changement climatique, Notes de l'AUDIAR, 15 p.

Ligneau L., Tilly S., Baraer F., Dubreuil V., Bonnardot V., (2020). Observatoire du changement climatique pour l'agriculture : résultats préliminaires en Bretagne. *Changement Climatique et Territoires*, LETG UMR 6554 CNRS, Rennes, France. pp.427-432.

FICHE D1

IDENTIFIER UNE TENDANCE CLIMATIQUE SUR LA PERIODE HISTORIQUE

L'objectif de l'étude des tendances est de quantifier l'évolution de la pluviométrie dans le temps. Pour l'étude des tendances climatiques, trois méthodes peuvent être utilisées :

- Le **suivi temporel**, c'est-à-dire l'évolution du cumul annuel sur toute la période de la série de données,
- **Les écarts entre deux moyennes**,
- **Les écarts à la normale**,

Ces méthodes s'appliquent à tous les indicateurs présentés précédemment dans les fiches B - Indicateurs descriptifs et C - Indicateurs sur les risques inondation et sécheresse.

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.

Pour le diagnostic climatique territorial, c'est majoritairement l'évolution de la pluviométrie qui va être étudiée.

Suivi temporel

Le suivi temporel consiste à étudier l'évolution des cumuls d'une année à l'autre selon une échelle temporelle définie. La mise en évidence de la tendance peut se faire par une régression linéaire ou une moyenne mobile sur x années. Elle peut s'effectuer sur les différentes échelles temporelles : annuelle, saisonnière, mensuelle (cf. *Fiche A5 : Les différentes échelles de temps pour l'analyse de la pluviométrie*).

Selon la période considérée, la tendance va être plus ou moins importante. Pour une analyse de l'évolution des températures, cette méthode de suivi temporel par régression linéaire ou moyenne mobile va être privilégiée. En effet, la **température est un paramètre qui a une faible variabilité interannuelle**. De plus, la tendance à la hausse est marquée et significative sur une large partie de la surface du globe.

Pour la **pluviométrie**, la tendance en régression linéaire est plus difficile à cerner. En effet, la pluie a une **très grande variabilité interannuelle**. Des cumuls de pluie d'un mois, d'une saison ou d'une année peuvent varier du simple au double d'une année à l'autre. **Cette variabilité rend difficile la visibilité d'une tendance.**

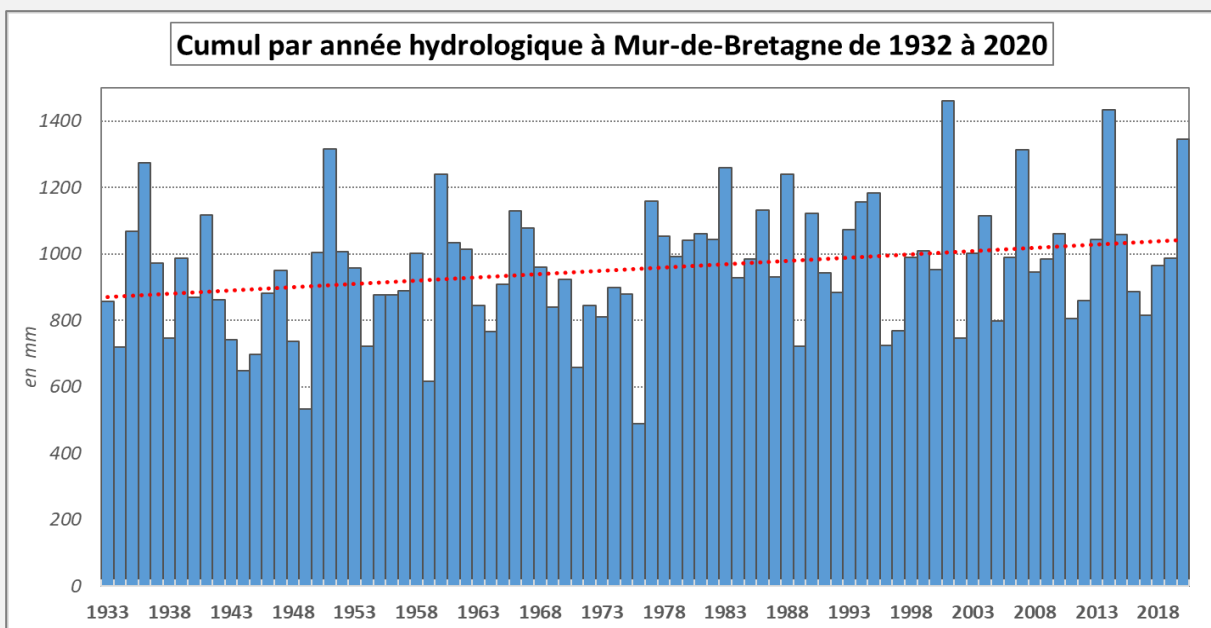
➤ Encadré 38 — Suivi annuel de précipitation à Mur-de-Bretagne

Par exemple, à Mur-de-Bretagne, le cumul moyen par année hydrologique tend à augmenter. La droite de régression linéaire (pointillé rouge) montre qu'il est passé de l'ordre de 800 mm dans les années 1930 à plus de 1 000 mm aujourd'hui soit environ **+ 20 % de cumul total en 80 ans**.

L'évolution du cumul est d'abord marquée par une importante variabilité interannuelle.

L'augmentation observée est surtout due à des cumuls annuels maximums de plus en plus importants, les cumuls minimums restent situés entre 600 et 700 mm. Ces 2 dernières décennies, les cumuls moyens dépassent à plusieurs reprises la barre des 1300 mm annuels.

Cette tendance à la hausse du cumul annuel doit être étudiée à une échelle temporelle plus fine pour rendre compte de la variabilité saisonnière.



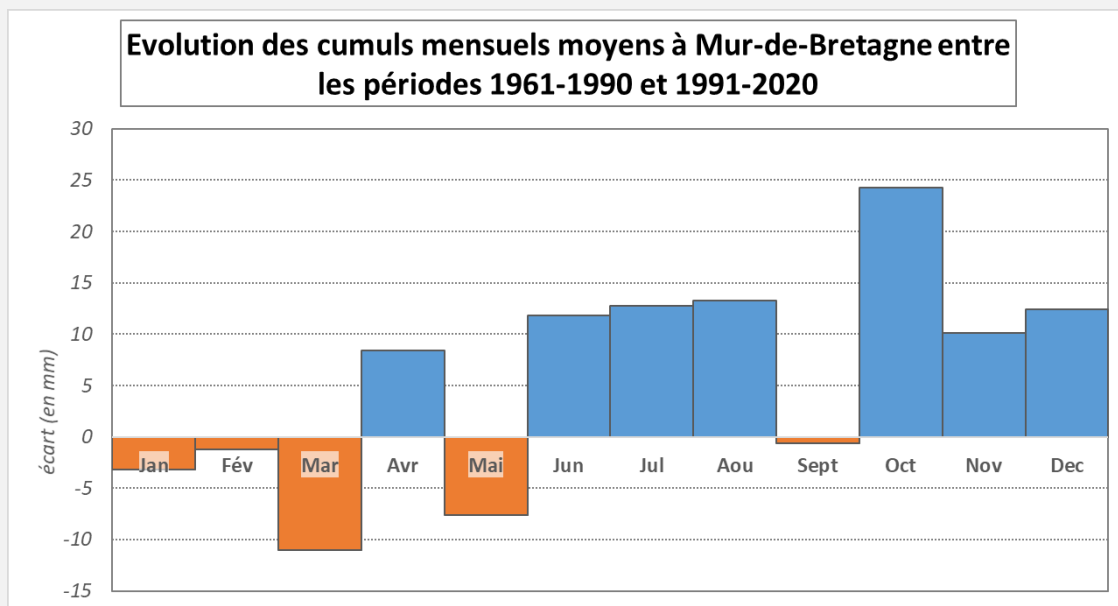
Écarts de moyennes

La tendance d'évolution peut s'observer par **l'écart entre les moyennes de deux périodes**. Les conditions sont d'avoir deux périodes d'au moins 30 ans et de même durée. Généralement, la tendance va être calculée entre la normale climatique actuelle (1991-2020) et celle qui se termine juste avant (ici 1961-1990). Il faut donc disposer d'une série d'au moins 60 ans pour identifier ces tendances moyennes. Elles peuvent être calculées en données relatives (en %) ou absolues (en mm). Les tendances relatives permettent une comparaison des données entre stations.

Les données moyennes permettent de s'affranchir partiellement des extrêmes puisque le cumul est lissé sur une période d'au moins 30 ans.

➤ Encadré 39 — Évolution des cumuls moyens à Mur-de-Bretagne

À Mur-de-Bretagne, le cumul moyen augmente sur la majorité des mois. L'augmentation est plus forte sur les mois d'été et octobre-novembre-décembre. Le cumul moyen diminue en mars et mai. Ces informations sont un premier pas pour caractériser l'évolution de la pluviométrie. L'analyse doit être complétée par l'évolution du nombre de jours de pluie et l'évolution des cumuls et jours de pluie décomposés (*cf. Fiche B2 : le nombre de jours de pluie et Fiche B3 : la décomposition des pluies*).



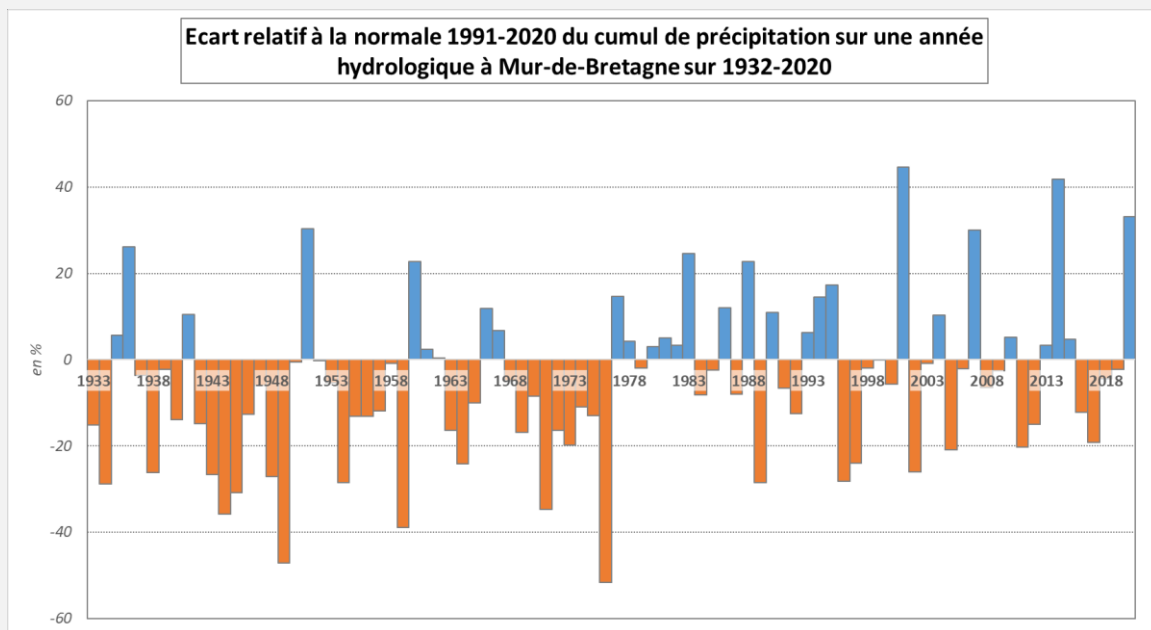
Écart à la normale

Plutôt que de comparer deux périodes entre elles, il est possible de comparer le cumul annuel, mensuel ou saisonnier d'une année à l'autre par rapport à la normale (1991-2020) ou la période de référence. Cette notion d'écart à la normale est notamment utilisée en météorologie pour désigner une période extrême.

Selon la période de référence considérée, les écarts ne seront pas les mêmes sur une période similaire. Par exemple, en considérant la même période 1961-2020, les écarts à la normale ne seront pas les mêmes si la normale 1961-1990 ou la normale 1991-2020 est prise en compte.

➤ Encadré 40 — Écart à la normale annuel à Mur-de-Bretagne

L'analyse de l'écart à la normale facilite l'observation des périodes extrêmes. À Mur-de-Bretagne, les années 1949 et 1976 ont eu un cumul inférieur de 40 % par rapport à la normale. À l'inverse, les années 2001 et 2014 ont eu un cumul de plus de 40 % par rapport à la normale. Les années supérieures à la normale sont plus fréquentes depuis la fin des années 1970. Cela traduit une tendance à la hausse du cumul



Limites

Les analyses de suivis temporels par régression linéaire ou par l'écart de moyennes sont parfois contradictoires dans leurs tendances, notamment car les calculs de moyenne tendent à lisser la variabilité interannuelle des cumuls. De plus, ces tendances vont être très dépendantes des valeurs extrêmes, notamment si elles sont en début ou fin de série pour les régressions linéaires.

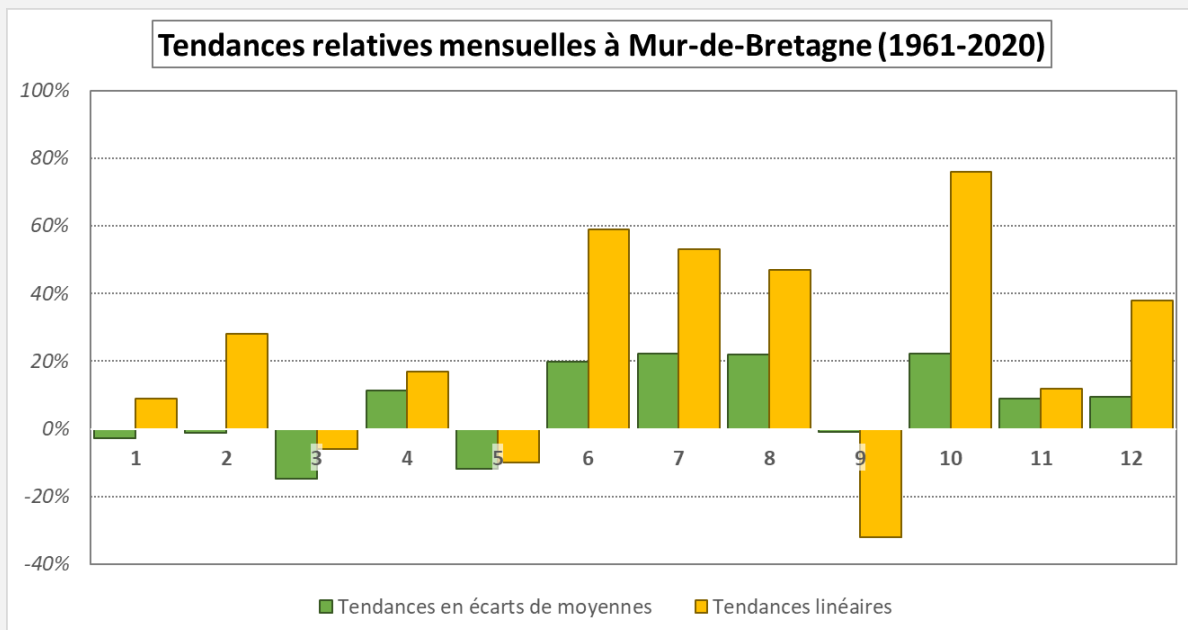
Le regard croisé des tendances linéaires et tendances moyennes permet de rendre compte de la significativité des tendances sans passer par des tests statistiques. **Si les deux tendances évoluent dans le même sens, on peut considérer que celle-ci est significative avec une incertitude sur l'intensité.** Cette observation peut être validée par des tests statistiques.

➤ Encadré 41

Tendances mensuelles par régression linéaire et écart de moyenne à Mur-de-Bretagne.

A Mur-de-Bretagne, les tendances obtenues avec les régressions linéaires sont généralement supérieures à celles obtenues avec les écarts de moyennes. Des écarts de plus de 10 %, allant dans le même sens, sont observés sur la plupart des mois de l'année.

Les tendances sont opposées selon les deux méthodes pour les mois de janvier et février, voire septembre. Cela traduit une grande incertitude concernant l'évolution du cumul sur ces 3 mois ainsi que la non-significativité de leurs tendances.



Les tests statistiques des tendances

L'**usage de tests statistiques** est recommandé pour suivre l'évolution des tendances sur la période passée. En effet, ils permettent de valider si une tendance est significative ou non significative et donc si elle est fiable à long terme.

Cependant, dans une analyse pluviométrique, les tendances sont souvent peu significatives. En effet, la variation est portée par les extrêmes et il y a une grande variabilité interannuelle.

Les tests préconisés sont les suivants : Test de Pettit, Test de Mann-Kendall et t-test. Ces tests peuvent être calculés via R-studio, Excel Stat.

Le **test de Pettit** est un test non paramétrique où l'hypothèse H_0 est que la série suit une même distribution. Ce test permet d'identifier la présence et la date de ruptures d'homogénéité dans la série. À partir du moment où les séries climatiques utilisées ont été préalablement homogénéisées (cf. [Fiche A2 : Valider la qualité des séries de données disponibles](#)), une rupture d'homogénéité signifie donc une rupture climatique. Le test de Pettit permet ainsi de détecter une date de rupture dans la série de donnée de pluviométrie.

Le **test de Mann-Kendall** permet de définir l'existence ou non d'une tendance climatique et son sens d'évolution. L'hypothèse H_0 est qu'il n'y a pas de tendance. Pour un test exact, il ne faut pas de valeurs identiques et une série de plus de 50 ans.

Le **test t de student** est un test paramétrique qui permet d'évaluer la significativité de la tendance. Il peut s'appliquer sur un échantillon unique ou sur un groupe d'échantillon comme des moyennes.

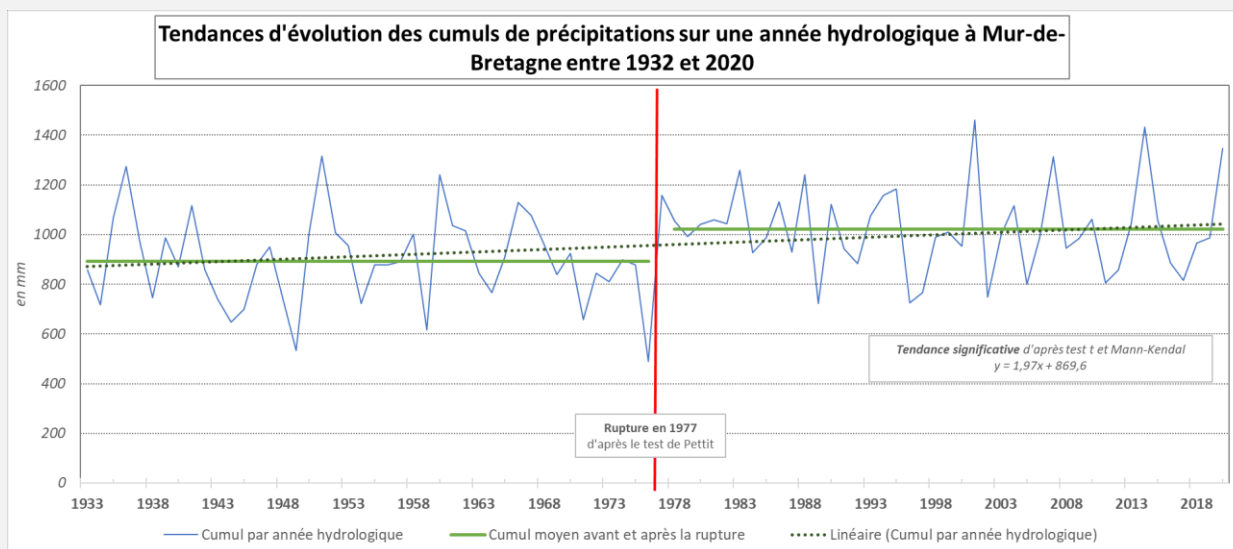
Pour les écarts de moyennes, la significativité de la tendance peut être donnée par le test t de Student. L'écart peut être approché par un **intervalle de confiance** pour rendre compte de la significativité des tendances. En effet, plus l'intervalle est réduit, plus la tendance est significative.

Par exemple, ci-dessous, les écarts de moyennes sont présentés dans un intervalle de confiance de 95 %. Les intervalles sont minimums en janvier, février et septembre. Cela signifie que les tendances sont sûres à 95% pour ces mois. Sur les autres mois, l'intervalle est de plus de 10 %. De plus, il est situé autour de 0, il est donc difficile de déterminer si la tendance est à la hausse ou à la baisse.

➤ Encadré 43

Validation des tendances par tests statistiques à Mur-de-Bretagne

Les différents tests statistiques ont été appliqués à Mur-de-Bretagne pour les données par année hydrologique. La tendance à la hausse du cumul est significative : depuis 1932, le cumul annuel a augmenté de près de 20 mm par décennie. Il y a une rupture majeure dans la série de données en 1977 : à partir de cette date, le cumul a évolué et varie autour d'une moyenne plus élevée.



❗ À retenir

Dans le cadre du diagnostic territorial, il est conseillé d'appréhender l'évolution des cumuls et jours de pluie par un écart de moyenne et par régression linéaire. L'objectif est de quantifier l'évolution et de comparer les deux méthodes. **Si, l'évolution est similaire dans les deux cas, la tendance peut être considérée comme significative.**

Des tests statistiques permettent de valider cette significativité des tendances (ou pas).

À noter que dans une analyse pluviométrique, les tendances sont souvent peu significatives. En effet, la variation est portée par les extrêmes et il y a une grande variabilité interannuelle.

Sources bibliographiques

Bigot S., (2002). Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemples d'application, Acte des Journées de Climatologie de Strasbourg

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

Acte de colloque 2012 Grenoble. Les climats régionaux observation et modélisation

Mann H. B., 1945: Non Parametric Test Against Trend. *Econometrika*, 13, 245-259.

Leroy E., Rome S., Bigot S. (2012). Variabilité spatio-temporelle de la température de l'air (1950- 2009) dans le département de la Drôme (région Rhône-Alpes, France). Association Internationale de Climatologie, Sep 2012, Grenoble, France. pp.469-474.

FICHE D2

EXTRACTION DES DONNEES MODELISEES SUR LE PORTAIL DRIAS

Le portail Drias est développé par Météo-France et permet de rendre accessibles gratuitement des données climatiques modélisées issues de différents modèles climatiques, et ceci en fonction de différents scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (RCP)⁷. C'est un outil d'aide à la décision.

Pour rappel, l'espace "Accompagnement" apporte une aide importante, avec de nombreuses documentations d'aide à la compréhension. Il est conseillé de s'y référer.

Le Portail Drias permet l'extraction de données modélisées qui vont être la base de la partie prospective du diagnostic climatique territorial.

Lien : <http://www.drias-climat.fr/>

⁷ Representative Concentration Pathway. Les scénarios RCP sont 4 scénarios de trajectoires radiatives établies par le GIEC, sur la base de 4 hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre émise dans les années à venir.

Quels modèles climatiques choisir pour la Bretagne ?

Le choix des modèles pour l'analyse des tendances futures n'est pas anodin. Les modèles climatiques présentent des différences dans la façon dont la circulation atmosphérique est simulée. Ces différences engendrent des modèles plus ou moins humides et plus ou moins chauds, avec des tendances futures d'évolution des températures ou des précipitations contrastées.

Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques générales des modèles avec en gras les modèles français fréquemment utilisés pour des études régionales. Sur Drias, 12 modèles différents sont disponibles. Ces modèles reproduisent le climat de façon différente, ils sont plus ou moins secs ou humides, frais ou chaud. Ces différences entre les modèles permettent d'avoir une vision globale de l'évolution climatique.

Pour la modélisation au niveau national, il y a des différences marquées de l'évolution du climat selon le modèle. Concernant les températures, un fort contraste existe selon les modèles (+ 2 et + 6 °C à horizon lointain avec le RCP8.5) avec toutefois **une convergence vers une hausse des températures**. Pour les précipitations, en plus du fort contraste affiché par les modèles, certains tendent vers une forte baisse des cumuls en été, d'autres vers une hausse.

Modèles	Caractéristiques
HadGEM2 / CCLM4-8-17	Chaud et sec
HadGEM2 / RegCM4-6	Chaud et sec
EC-EARTH / RCA4	Intermédiaire
EC-EARTH / RACMO22E	Plutôt sec
NorESM1 / HIRHAM5	Plutôt sec
NorESM1 / REMO2015	Intermédiaire
MPI-ESM / CCLM4-8-17	Frais
MPI-ESM / REMO2009	Frais
IPSL-CM5A / RCA4	Humide en hiver, sec en été
IPSL-CM5A / WRF 381P	Chaud en hiver, frais en été, Humide
CNRM-CM5 / ALADIN 63	Intermédiaire
CNRM-CM5 / RACMO22E	Frais et humide en hiver

Pour mener à bien la phase d'analyse des tendances d'évolution du climat futur attendue dans le cadre du diagnostic climatique territorial, il est conseillé d'utiliser les données issues d'au moins **deux modèles contrastés** en termes d'évolution du climat. Cela permet de couvrir la gamme d'évolutions climatiques possibles, pour un même scénario RCP.

Ainsi, pour la Bretagne, il est recommandé de retenir les modèles climatiques développés par le Centre National de Recherches Météorologiques (**CNRM** – ALADIN63 plus chaud et moins pluvieux), et par l'Institut Pierre Simon Laplace (**IPSL** – WRF31P moins chaud et plus pluvieux). Il s'agit de modèles régionaux climatiques français qui ont des mailles fines.

Ils reposent sur 2 modèles atmosphériques différents :

- « ArpègeClimat » : développé par le CNRM et qui est une version du modèle de prévision Météo-France adaptée aux études climatiques.
- « LMDZ » : développé par l'IPSL, et utilisé pour l'étude du climat terrestre, mais aussi d'autres atmosphères planétaires (Vénus, Mars...).

Selon quels scénarios d'émissions de GES (RCP) ?

L'objectif est d'étudier l'évolution du climat à partir de deux scénarios RCP sélectionnés en fonction de leur disponibilité sur le portail Drias. Il est nécessaire d'avoir des scénarios qui soient disponibles pour les modèles choisis.

Sur le portail Drias, le scénario 6.0 n'est pas disponible.

Le scénario RCP 2.6, qui est pourtant celui qu'il faudrait suivre afin de respecter les **accords de Paris**, semble peu réaliste au regard de la situation actuelle. En effet, une étude parue dans *Nature Climate Change* a montré que la baisse de 8 % des émissions de GES au niveau mondial annoncé en 2020, et attribué au confinement, 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). De plus, Météo-France a écarté ce scénario lors de récentes présentations de l'évolution du climat d'ici 2100. On peut donc considérer que ce scénario n'est plus d'actualité. Par ailleurs, les données issues du scénario RCP 2.6 ne sont pas disponibles sur Drias.

Les deux scénarios qu'il semble donc pertinent de retenir sont les **RCP 4.5 et RCP 8.5**

Plus d'infos : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/53>

➤ Encadré 43 - Extraction des données depuis le portail Drias

L'extraction des données se déroule sur la partie « données et produits » du portail Drias. Il est nécessaire de créer un compte au préalable. À noter que toutes les actions sont gratuites.

Une fois les modèles et scénarios sélectionnés, il faut choisir les **points de grilles les plus proches** des stations météorologiques retenues pour le diagnostic territorial (*cf. Fiche A6 : des repères sur la simulation climatique*). Dans cette sélection des points de grille, il faut éviter les points littoraux. En effet, les biais sont trop importants sur ces points d'interface entre terre et mer. **Il vaut mieux considérer un point de grille plus dans les terres pour une station maritime.**

Ensuite, il faut choisir les paramètres climatiques à modéliser. Pour le diagnostic climatique territorial, il s'agit des données de température (min et max) et de précipitation. Les données de rayonnement peuvent éventuellement être utilisées aussi dans l'objectif de calculer une ETP (*cf. Fiche D4 : comment approcher le risque de sécheresse future ?*). Ces données de sortie de modèles sont disponibles au format csv.

❗ À retenir

Les données modélisées sont à extraire depuis le portail Drias.

Afin de couvrir la gamme d'évolution climatique possible selon les caractéristiques des modèles, **l'utilisation des modèles du CNRM et de l'IPSL est recommandée pour la Bretagne.**

Afin d'obtenir des résultats contrastés, **les scénarios RCP 4.5 et 8.5 sont à retenir.**

L'usage d'au moins deux modèles et deux scénarios contrastés permet d'identifier des convergences entre les modèles et scénarios sur l'évolution climatique.

Sources bibliographiques

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

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

Rapport Drias : Drias. (2020) Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/meteo-france-eclaire-le-climat-en-france-jusquen-2100>

FICHE D3

IDENTIFIER DES TENDANCES CLIMATIQUES FUTURES

Les tendances climatiques futures s'étudient à partir des données extraites du portail Drias
(*cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias*).

Il est nécessaire de rendre compte des biais de ces données modélisées et de les corriger avant d'étudier leur évolution. Ensuite, l'évolution du climat doit être étudiée à différents horizons temporels : horizon moyen (2031-2060) et horizon lointain (2071-2100).

Corriger les données modélisées

Le portail Drias fournit des données modélisées futures **mais aussi des données modélisées passées**. En effet, le portail Drias propose une analyse des tendances d'évolution en comparant les données futures modélisées avec les données passées modélisées et non avec les données passées observées, c'est-à-dire réelles.

Des biais plus ou moins importants persistent toujours sur les données de sortie de modèle. Afin d'avoir une idée des biais liés aux modèles choisis (ici, CNRM et IPSL) et de les corriger, **il est nécessaire de confronter les données du climat passé observées (réelles) aux données du climat passé modélisées par ces modèles**.

Pour cela, le portail Drias propose des données modélisées sur la période passée allant de 1951 à 2005. L'extraction des données doit se faire pour chaque modèle et chaque paramètre climatique utilisé.

Une fois les données extraites, celles-ci doivent être **mises en parallèle avec les données observées**. Pour cela, il faut calculer les moyennes par mois, par saison et par année, sur une période identique. Sur Drias, la période de référence passée est 1976-2005. On peut donc comparer les données moyennes modélisées et observées sur cette période. Il est possible de considérer la période 1951-2005 comme période de référence. Cependant, l'objectif est de comparer ces données modélisées aux données observées. Il faut donc s'assurer que les données observées soient disponibles depuis 1951.

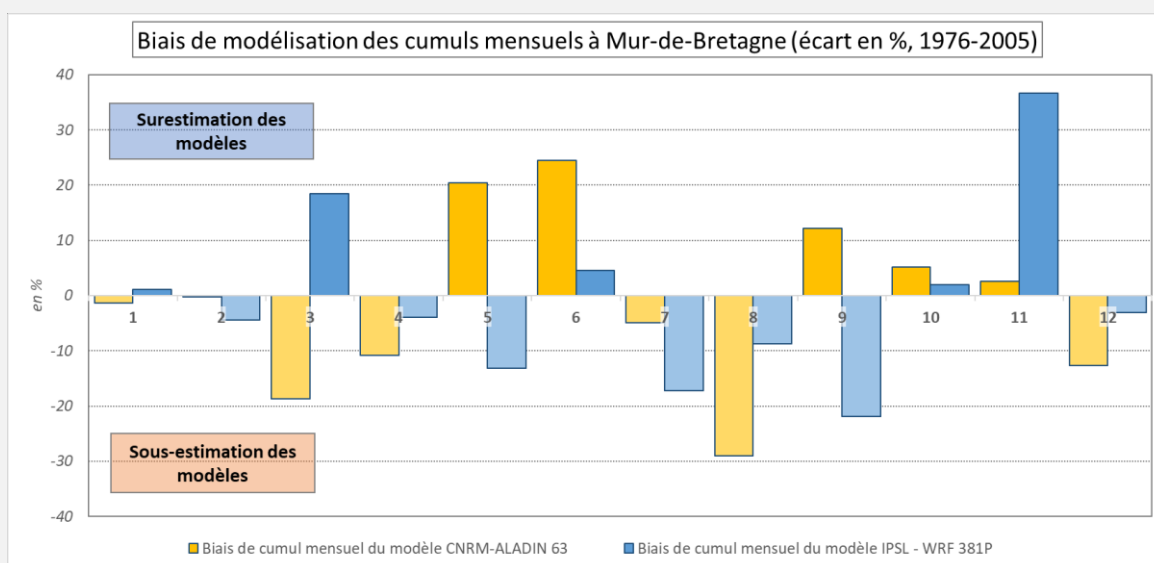
L'analyse des biais est importante à effectuer pour identifier le modèle qui est le plus précis et à quelle saison. C'est aussi la base de calcul pour la correction des données modélisées futures.

➤ Encadré 44

Biais des 2 modèles CNRM et IPSL pour Mur-de-Bretagne

En observant l'écart entre les données passées observées et modélisées, il apparaît des écarts mensuels à Mur-de-Bretagne. Ces écarts sont très différents d'un mois à l'autre et d'un modèle à l'autre sans logique saisonnière. Les mois de janvier, février et octobre sont très bien reproduits par les 2 modèles en termes de cumul mensuel. Des écarts de plus ou moins 20 % sont observés avec le modèle CNRM sur les mois de mai, juin et août. Pour le modèle IPSL, c'est surtout le mois de novembre qui est mal reproduit, le cumul est surestimé de plus de 30 %.

Difficile de dire ici quel modèle est le plus précis. Ces différentes représentations du cumul mensuel montrent l'intérêt de prendre en compte au moins deux modèles différents.



➤ Encadré 45

Méthode de correction des biais — Exemple du cumul

À partir de l'écart entre les cumuls moyens modélisés et observés sur la période 1976-2005, on peut corriger les données modélisées de la façon suivante :

$$P_{corr} = P_{mod} + \Delta P_{mod} (1971 - 2005).$$

Avec P_{corr} = Cumul modélisé corrigé

P_{mod} = Cumul modélisé brut

$\Delta P_{mod} (1971 - 2005)$ = écart entre les cumuls moyens modélisés et observés sur la période 1976-2005

La correction peut s'appliquer pour des données annuelles, saisonnières ou mensuelles. Dans le cas de corrections mensuelles ou saisonnières, il faut effectuer la correction à partir des biais de chaque mois et de chaque saison.

Identifier les tendances futures

Les tendances futures s'observent à partir de **données modélisées corrigées**.

L'analyse des tendances doit **démarrer 10 ans après la date actuelle**. En effet, les incertitudes d'évolution du climat et la variabilité décennale sont trop grandes pour évaluer l'évolution du climat d'ici 10 ans (horizon proche).

À l'heure actuelle, les simulations climatiques futures proposées sur le portail Drias couvrent la période 2006-2100. Il est conseillé d'extraire l'ensemble des données et de ne travailler que sur la période **2031-2100**.

Sur cette période, on considère deux périodes sur lesquelles des données moyennes vont être calculées et comparées :

- **L'horizon Moyen** : il correspond à la période 2031-2060 ou 2041-2071, cette période synthétise l'évolution du climat proche. Les divergences des modèles sont généralement plus faibles pour cette période.
- **L'horizon Lointain** : il correspond à la période 2071-2100, cette période synthétise l'évolution du climat à long terme. Les incertitudes sont généralement plus grandes à cette échelle de temps. Cependant, des convergences peuvent être observées entre différents modèles qui signifieraient que cette évolution est plus probable.

Les données moyennes sur les deux horizons sont à comparer avec les données observées sur la normale climatique actuelle (1991-2020). Ainsi, il y a 30 ans de données qui sont toutes comparables puisque les données des modèles sont corrigées.

L'idée est de comparer les données des deux modèles pour deux scénarios RCP, afin de rendre compte de la gamme d'évolution possible du climat. L'identification de convergences entre les modèles est aussi importante à montrer.

En effet, des convergences d'évolution climatique entre deux modèles différents dans leur représentation climatique ont une signification forte (plus forte probabilité). L'étude menée sur 4 bassins versants de la région Bretagne a montré une convergence des 2 modèles CNRM et IPSL, concernant l'évolution des précipitations par saison hydrologique. Ces deux modèles tendent vers une baisse du cumul de précipitation en saison d'étiage et une hausse en saison de recharge (Amiot, 2020).

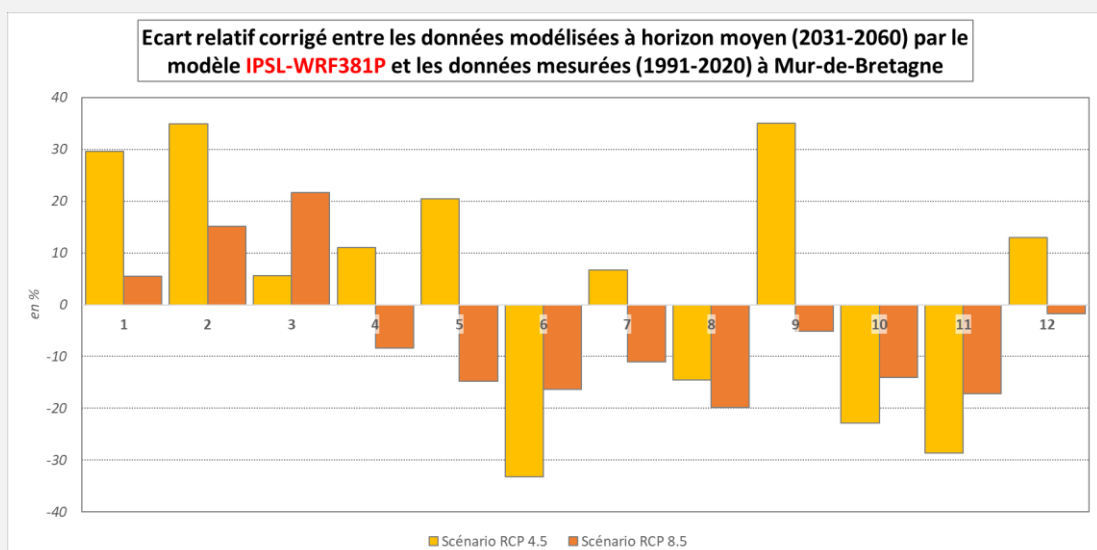
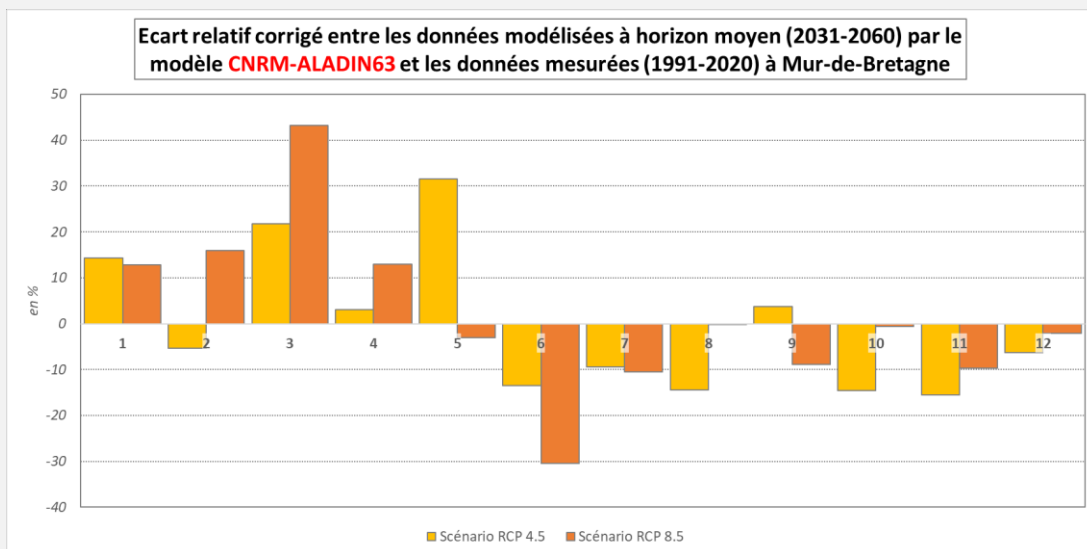
➤ Encadré 46

Évolution des cumuls mensuels de précipitation à horizon moyen à Mur-de-Bretagne

L'évolution des cumuls mensuels à horizon moyen à Mur-de-Bretagne montre une tendance bien différente selon le modèle et scénario. Le modèle du CNRM présente une hausse du cumul de plus de 10 % dans tous les cas en janvier et mars. Le cumul augmente aussi en avril. Une baisse de plus de 10% du cumul mensuel est envisagée dans les deux scénarios pour les mois de juin, juillet et novembre.

Le modèle de l'IPSL présente une évolution des cumuls plus importante, les écarts sont majoritairement de plus de 10 %. Ici, le cumul augmente sur les 3 premiers mois de l'année. Il est en baisse de plus de 10% pour les deux scénarios sur les mois de juin, août, octobre et novembre. Sur les autres mois, la tendance est opposée selon le scénario. Par ailleurs, le scénario 4.5 présente ici une tendance plus marquée que le 8.5.

Si on synthétise les tendances, il y a une convergence des modèles vers une hausse des cumuls mensuels sur janvier-mars ainsi qu'une baisse des cumuls d'au moins 10 % en juin, août et novembre.



Les indicateurs Drias

Le portail Drias propose des indicateurs qui sont directement disponibles sur la plateforme.

Les indicateurs disponibles sont les suivants :

- Cumul de précipitations
- Précipitations moyennes des jours de pluie (quand $P > 1$ mm)
- Pourcentage de précipitations intenses (part de cumul apporté par les jours de pluie au-delà du centile 90)
- Nombre de jours de pluie
- Nombre de jours de fortes précipitations ($P > 20$ mm)
- Nombre maximum de jours de pluie consécutifs
- Période de sécheresse

Les données extraites correspondent aux moyennes sur des périodes de 30 ans qui sont les suivantes : période de référence (1976-2005), horizon proche (2021-2050), horizon moyen (2041-2070) et horizon lointain (2071-2100).

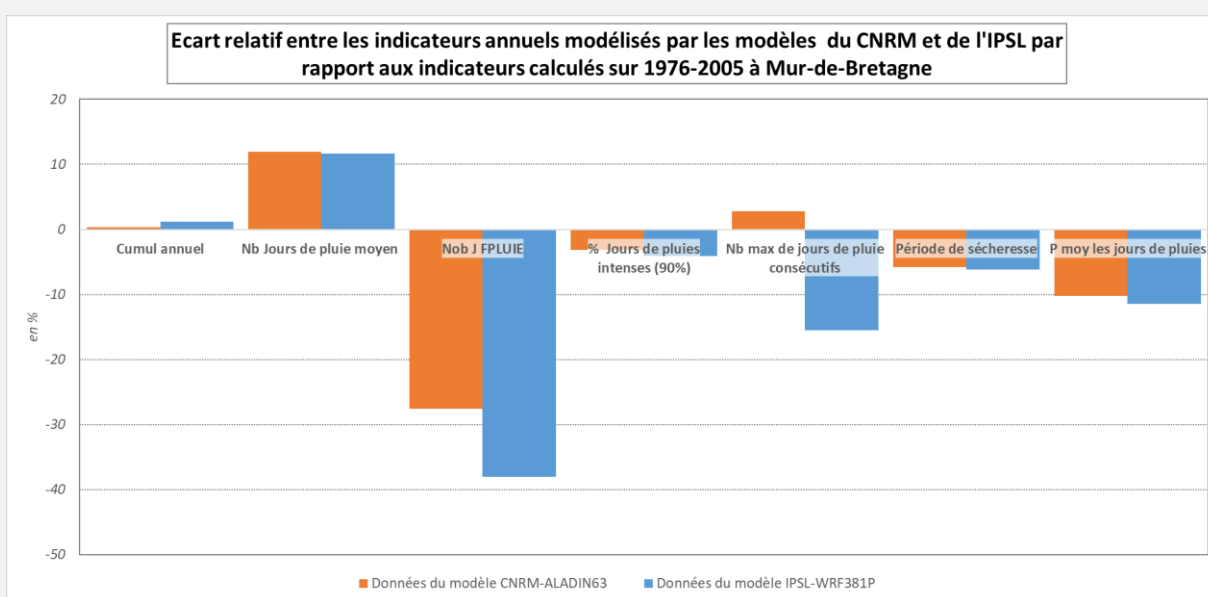
Avant tout usage de ces indicateurs, il est nécessaire de les confronter aux données observées. C'est-à-dire calculer les indicateurs sur la période 1976-2005 pour les données observées et extraire les indicateurs Drias d'un modèle sélectionné sur la plateforme. Ces informations permettent à la fois de tester la validité des indicateurs et de caractériser les modèles.

L'usage de ces indicateurs pour caractériser le climat futur n'est pas recommandé dans le cadre du diagnostic climatique pour plusieurs raisons :

- Les indicateurs ne correspondent pas nécessairement à ceux recommandés précédemment.
- Les écarts précalculés directement disponibles sur Drias sont calculés par rapport aux données modélisées sur la période 1976-2005. Dans l'idéal, il faut comparer les données futures modélisées avec les données observées sur la normale climatique actuelle (ici : 1991-2020).
- Les périodes futures sur lesquelles sont calculés les indicateurs Drias ne sont pas celles recommandées ici (sauf pour l'horizon lointain 2071-2100). Il est possible de calculer à horizon proche (2021-2050) mais l'incertitude de 10 ans n'est pas prise en compte.

➤ Encadré 47 — Comparaison des indicateurs fournis sur le portail Drias et des indicateurs calculés à partir des données mesurées à Mur-de-Bretagne

Une comparaison des résultats des indicateurs fournis par le portail Drias à partir des modèles CNRM et IPSL, et de ces mêmes indicateurs calculés à partir des données observées sur la station Mur-de-Bretagne indique que les indicateurs concernant le nombre de jours de pluie sont mal reproduits par les modèles. Le nombre de jours de pluie est surestimé de plus de 10 % tandis que le nombre de jours de fortes pluies est sous-estimé de 26 à 38 % selon le modèle considéré. Cela signifie que les deux modèles présents ont tendance à avoir plus de jours de pluies, mais moins intenses qu'en réalité. Le nombre de jours de pluie consécutifs est aussi sous-estimé de plus de 10 % par le modèle de l'IPSL. Cela souligne des répartitions des pluies différentes selon les modèles.



📌 À retenir

Les données issues du portail Drias ne **doivent jamais être analysées au format brut**. Elles doivent faire l'objet d'une correction préalable à partir des biais calculés en confrontant les données passées mesurées aux données passées modélisées.

Une fois que les données modélisées ont été corrigées, les tendances peuvent s'observer entre la normale climatique actuelle (1991-2020), l'horizon moyen (2031-2060 ou 2041-2070) et l'horizon lointain (2071-2100).

Sources bibliographiques

Amiot L., (2020), Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne : approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias, Mémoire de Master, Université Rennes 2

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

Rapport Drias : Drias. (2020) Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole

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

FICHE D4

COMMENT APPROCHER LE RISQUE DE SECHERESSE FUTURE ?

Le bilan hydrique est l'indicateur le plus adapté pour suivre le risque de sécheresse (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*). La modélisation du bilan hydrique nécessite d'utiliser les données des précipitations modélisées préalablement corrigées (*cf. Fiche D3 : Identifier des tendances climatiques futures*) et l'évapotranspiration (ETP) future. Actuellement, il n'y a pas de données d'ETP disponibles sur le portail Drias ; il est donc nécessaire de les calculer.

Calculer le paramètre ETP

Le calcul de l'ETP future doit se faire tant qu'il n'y a pas d'ETP disponible sur le portail Drias.

La formule utilisée par Météo-France pour calculer l'ETP induit l'usage de nombreux paramètres climatiques tels que le vent, l'humidité ou le rayonnement (*cf. Fiche A1 : Sélectionner les stations représentatives*). Ces paramètres sont disponibles avec les modèles du CNRM, mais pas avec ceux de l'IPSL.

Par ailleurs, l'usage de ces nombreux paramètres revient à multiplier les incertitudes issues de la modélisation. Enfin, l'objectif n'est pas d'analyser les résultats de l'ETP en tant que tel, mais de comparer les résultats d'ETP issues des deux modèles.

Pour ces raisons, il est nécessaire de simplifier le calcul de l'ETP, avec une méthode de calcul qui soit la plus proche possible de celle utilisée par Météo-France. Cela s'est traduit par des tests de sensibilité 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 calculée à partir d'une adaptation de la formule de Penman (Ducharne, 2002) est considérée comme la référence.

Indicateur – ETP - Méthode de calcul

Il existe plusieurs formules de calcul d'ETP. Différents tests de sensibilité ont été menés pour déterminer la méthode de calcul la plus appropriée.

$$ETP_{turc} = n \times 0,013 \times (R_g + 50) \times \left(\frac{t}{t + 15} \right)$$

Avec n = nombre de jours

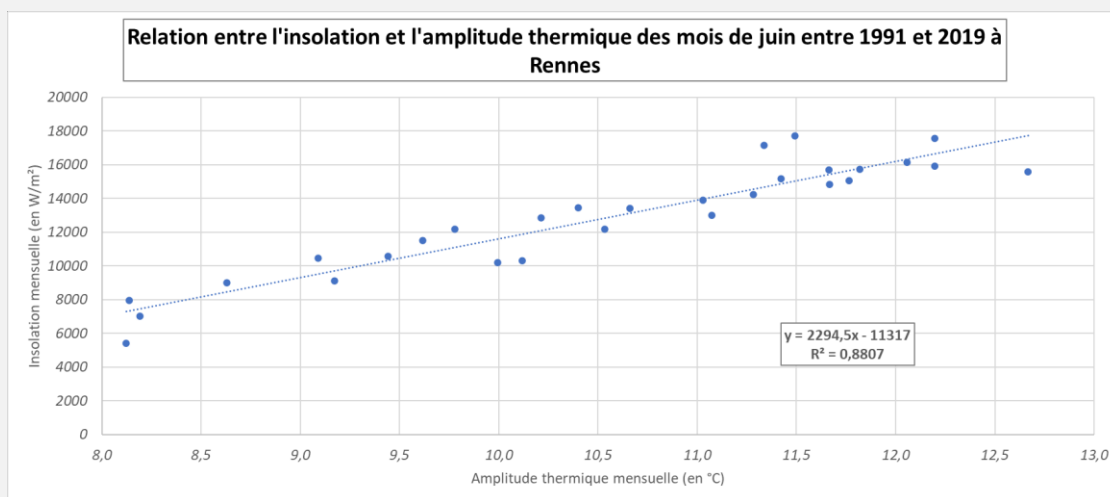
R_g = rayonnement global (en cal/cm²/jour)

t = température moyenne de l'air sur la période (°C)

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.

La méthode de calcul du rayonnement a été reprise de celle proposée par Dubreuil et Planchon (2009) ainsi que dans la thèse de Chloé Lamy (2013). Le rayonnement est estimé 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) sur 1991-2020. L'amplitude thermique n'est pas linéaire, elle présente des maximums en été et minimum en hiver. C'est pourquoi, pour chaque mois, il est nécessaire de relever la formule de la régression linéaire. Par exemple, pour l'estimation de l'insolation future (INSTest) du mois de juin, la formule sera la suivante :

$$INSTest = 2294,5 \times \text{Amplitude thermique} - 11317$$



L'estimation de l'insolation est ainsi possible avec les données de températures modélisées. Il suffit de calculer l'amplitude thermique de chaque mois et d'appliquer la formule correspondante.

À partir des données d'insolation, le rayonnement global est calculé par des calculs complexes qui ne sont pas détaillés ici. Des feuilles de calculs préparés peuvent être mises à disposition, où il suffit de renseigner l'insolation et la latitude. Mais la relation peut s'effectuer directement avec les données de rayonnement global.

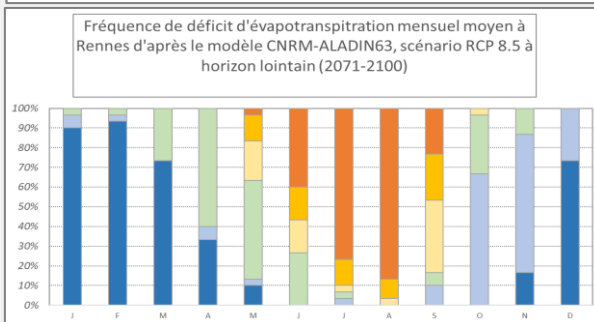
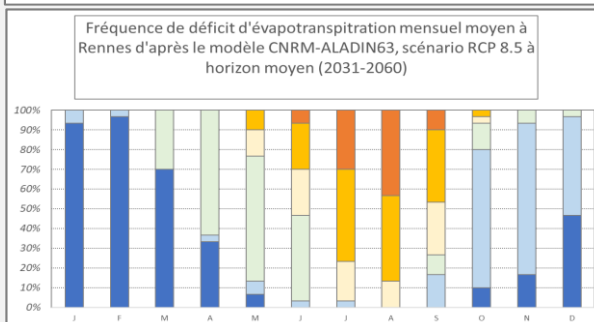
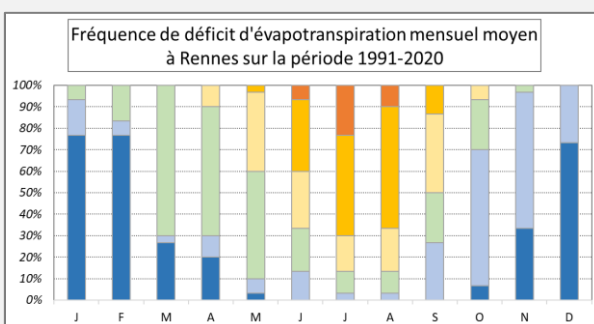
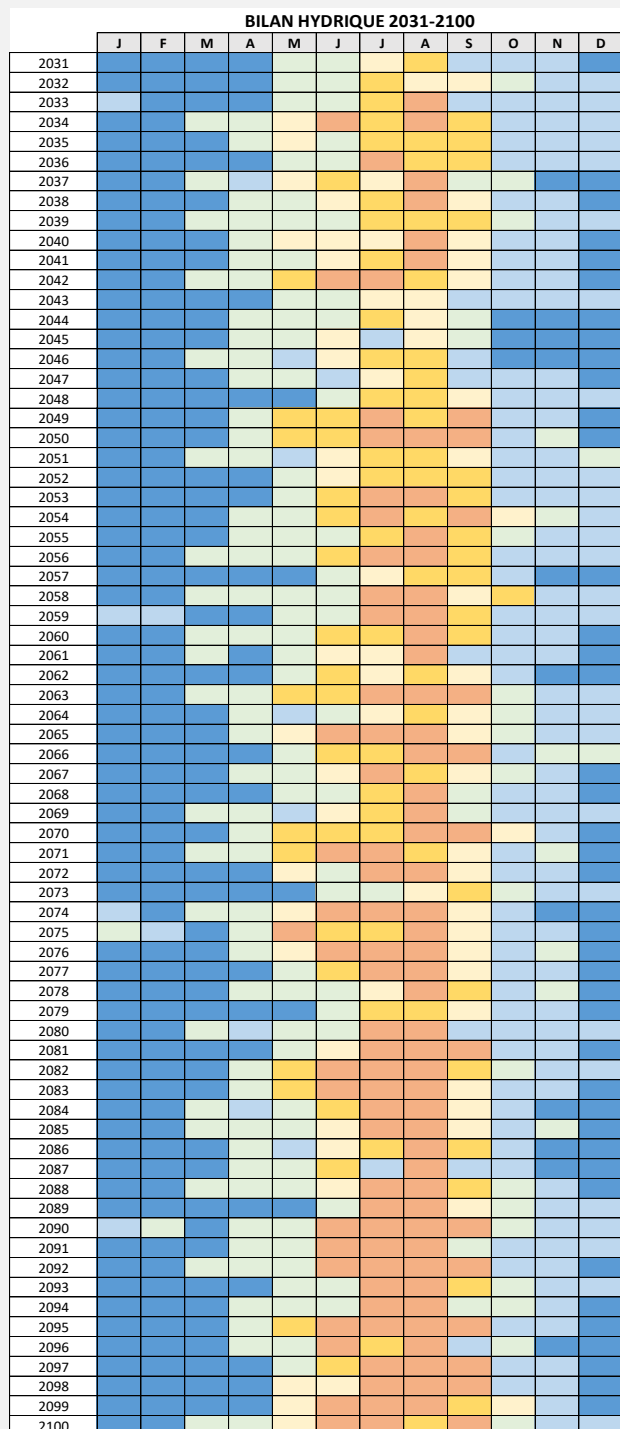
Analyse du bilan hydrique futur

À partir des **données de précipitations corrigées de leurs biais et de l'ETP calculée**, il est possible de calculer le **bilan hydrique** selon la même méthode que sur la période historique (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*). L'usage d'une méthode similaire entre les deux périodes permet une comparaison.

Dans l'objectif d'avoir la gamme d'évolution du risque de sécheresse, il est conseillé de calculer les bilans hydriques sur **au moins deux modèles différents** (*cf. Fiche D2 : Extraction des données modélisées sur le portail Drias*)

Encadré 48 - Bilan hydrique à Rennes avec le modèle CNRM-ALADIN63 et le scénario RCP 8.5

D'après le scénario RCP 8.5, le risque de sécheresse tend clairement à augmenter d'ici la fin du siècle. Il y a au cours du siècle une quasi-généralisation des mois « arides » en juillet-août. Et cela intervient dès l'horizon moyen avec près d'un tiers de mois de juillet aride (contre 22% aujourd'hui) et plus de 40 % de mois d'août arides (contre 10% aujourd'hui). Par ailleurs, la représentation en damier montre que des années avec trois voire quatre mois arides deviennent fréquentes en fin de siècle. Cette situation est à mettre en parallèle avec un modèle différent afin de vérifier ou non la tendance observée.



	ARIDE	$P < \text{ETP} \text{ et } \text{DE} > 100$
	SEC	$P < \text{ETP} \text{ et } 60 < \text{DE} \leq 100$
	SUB SEC	$P < \text{ETPet} 30 < \text{DE} \leq 60$
	FAIBLE DEFICIENCE	$P < \text{ETP} \text{ et } \text{DE} \leq 30$
	HUMIDE	$P \geq \text{ETP} \text{ et } \text{RU} < \text{RU} 0$
	HYPER HUMIDE	$P > \text{ETP} \text{ et } S > 0$

Analyser l'évolution des paramètres ETP et DE

L'ETP peut être étudiée indépendamment en suivant l'évolution de l'**ETP annuelle**. Cela permet de rendre compte de l'**évolution des besoins en eau théorique de la végétation** (ici, gazon).

Le même exercice peut être mené avec le **DE annuel** issue du bilan hydrique. Ce suivi annuel permet de rendre compte de l'**évolution du manque d'eau annuel**.

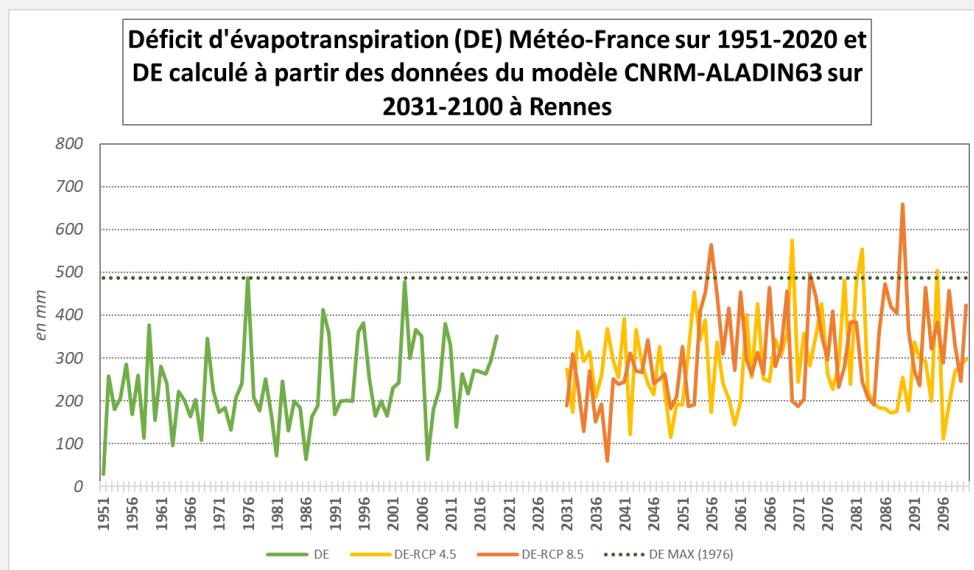
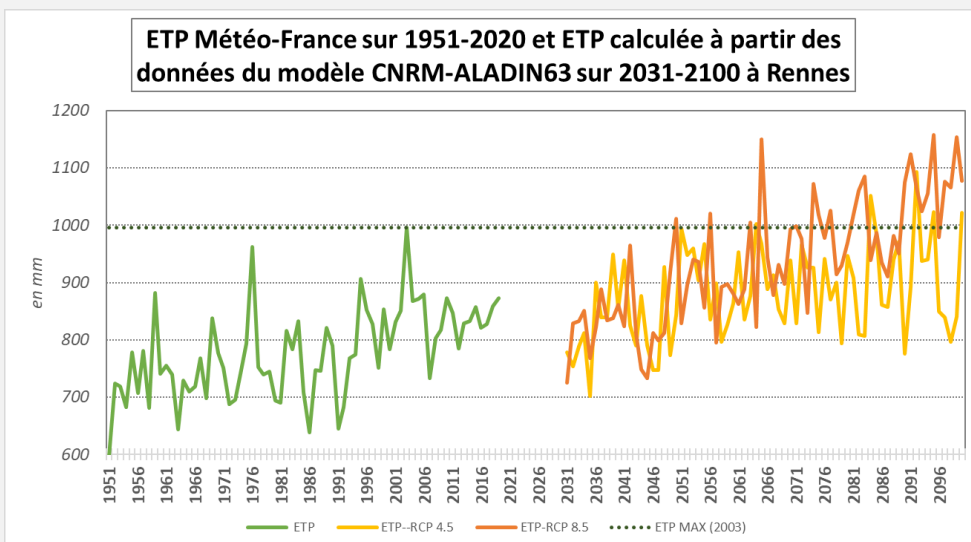
La comparaison des tendances de différents modèles est nécessaire pour rendre compte du champ d'évolution possible de ces paramètres (cf. encadré 49).

➤ Encadré 49 – Évolution de l'ETP et du déficit d'évapotranspiration (DE) à Rennes avec le modèle CNRM-ALADIN63

Le **modèle CNRM** affiche une augmentation marquée de l'ETP, entre + 100 et + 250 mm d'ici la fin du siècle selon le scénario (RCP 4.5 ou 8.5) à Rennes. L'ETP maximale de 2003 serait dépassée quasi systématiquement après 2050 d'après le RCP 8.5. Avec le RCP 4.5, une année sur trois serait au niveau supérieur au maximum.

Le déficit d'évapotranspiration subit lui aussi une augmentation de 200 à 250 mm d'ici la fin du siècle. Le déficit de 1976 (sécheresse historique) est dépassé quasiment chaque année à partir de 2075, il est ponctuellement dépassé avant cette date avec le RCP 8.5. Avec le RCP 4.5, le DE dépasse ce seuil une année sur 3.

Ce qui signifie que pour les deux scénarios, le risque de sécheresse tend clairement à augmenter. Un regard sur un modèle plus contrasté permettrait d'affirmer ou non cette tendance.



Quelles incertitudes ?

Le suivi du risque de sécheresse doit être effectué avec grande prudence. En effet, la méthode de calcul de l'ETP préconisée ici induit des approximations. La méthode de calcul de l'ETP 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.

À retenir

L'estimation du risque de sécheresse futur est importante pour répondre à l'interrogation sur la disponibilité en eau en période d'étiage.

Le **bilan hydrique**, indicateur permet d'appréhender au mieux ce risque (*cf. Fiche C4 : Le bilan hydrique, une approche complète du risque de sécheresse*) utilise notamment le paramètre ETP. Ce paramètre doit être calculé pour les valeurs futures puisque le portail Drias ne fournit pas ces données. La méthode recommandée correspond à une **ETP Turc avec un rayonnement estimé** d'après une relation préexistante entre l'insolation et l'amplitude thermique. Cette estimation donne des résultats plutôt bons en moyenne avec un écart de moins de 10 % par rapport aux données Météo-France.

Cependant, l'estimation de l'ETP donne un bilan hydrique très théorique. **Les résultats doivent être présentés avec grande prudence.**

Sources bibliographiques

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

Dubreuil V., Lamy C., Planchon O., 2018 : les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur. Colloque Les risques naturels dans le contexte de changement climatique. Colloque de Cluj-Napoca, Roumanie, 14-17 mars 2018. pp.15-21.

http://editura.ubbcluj.ro/www/ro/ebooks/authors_d.php?ida=692

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., Fichet 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

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

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

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.* MétéoFrance

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.