



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE L'AGROALIMENTAIRE
ET DE LA FORÊT



**METEO
FRANCE**

Etude de l'évolution du climat en Bretagne et de son impact sur la forêt régionale

Volet n°1 : Caractérisation et évolution récente du climat
en Bretagne



Version finale

Client CRPF Bretagne-Pays de la Loire	michel.colombet@cnpf.fr @ anne-pernelle.duc@cnpf.fr ☎ +33 2 99 30 44 99	 Centre Régional de la Propriété Forestière BRETAGNE-PAYS DE LA LOIRE
Chargé d'affaires :	@ philippe.cornec@meteo.fr ☎ +33 2 22 51 53 21	
Responsable technique : Franck Baraer – DIRO/EC	@ franck.baraer@meteo.fr ☎ +33 2 22 51 53 31	

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
		V1	Juin 2019
		V2	Juillet 2019

Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Catherine Conseil	DIRO/EC	
Relecteur(s)			
Approbateur(s)			

Table des matières

1	Contexte.....	9
2	Les données climatologiques.....	9
2.1	Eléments de climatologie générale.....	9
2.2	Les données climatologiques issues des observations.....	10
2.3	Les données climatologiques issues du modèle SIM.....	10
3	Les indicateurs.....	11
3.1	Les températures.....	13
3.2	Les précipitations P et l'évapotranspiration potentielle ETP.....	13
3.3	Les indicateurs bioclimatiques.....	14
3.3.1	Le bilan hydrique climatique.....	14
3.3.2	Le Déficit Hydrique Relatif.....	14
3.3.3	Le nombre de mois secs et subsecs.....	15
3.4	Synthèse des indicateurs et de leur représentation.....	16
4	Le climat actuel.....	18
4.1	Précipitations.....	18
4.1.1	Répartition spatiale.....	19
4.1.2	Variabilité interannuelle.....	21
4.1.3	Précipitations à caractère exceptionnel.....	22
4.2	Températures.....	23
4.3	L'ensoleillement.....	24
4.4	Le vent.....	25
5	Les tendances récentes.....	27
5.1	Les températures.....	27
5.1.1	Températures annuelles.....	29
5.1.2	Evolution du froid.....	30
5.1.3	Evolution de la chaleur.....	32
5.2	Les précipitations.....	35
5.2.1	Précipitations annuelles.....	35
5.2.2	Précipitations estivales (juin à août).....	37
5.2.3	Le nombre de jours de pluie (≥ 1 mm) en été (juin à août).....	37
5.2.4	Précipitations de la période de végétation (avril à octobre).....	38
5.3	L'évapotranspiration potentielle ETP.....	38
5.3.1	L'ETP annuelle.....	38
5.3.2	L'ETP estivale (de juin à août).....	39
5.3.3	L'ETP en période de végétation (d'avril à octobre).....	39
5.4	Indicateurs bioclimatiques.....	40
5.4.1	Bilans hydriques climatiques annuels.....	40
5.4.2	Bilans hydriques climatiques en été (de juin à août).....	41
5.4.3	Bilans hydriques climatiques en période de végétation (avril à octobre).....	41
5.4.4	Le déficit hydrique relatif annuel (ETP-ETR)/ETP.....	42
5.4.5	Mois secs et subsecs.....	42
5.5	Synthèse des tendances depuis 1959.....	44
6	Les projections du futur.....	46
6.1	La modélisation et les scénarios.....	46
6.2	Constat sur la situation actuelle.....	47
6.3	Quel futur climatique pour nos régions ?.....	49
7	Conclusion.....	52
A.	Cartographie des périodes trentenaires 1959-1988, 1969-1998, 1979-2008 et 1989-2018....	58

Liste des illustrations

Illustration 1: Répartition par quadrant des directions du vent moyen tri-horaire à Brest de 1990 à 2017.....	12
Illustration 2: Sites choisis pour la production de graphiques en lien avec des territoires forestiers en Bretagne.....	16
Illustration 3: Liste des indicateurs climatiques en fonction des périodes d'intérêt et de leur représentation.....	17
Illustration 4: Cumul moyen annuel de précipitations 1981-2010.....	19
Illustration 5: Normales mensuelles de précipitations à Rennes (1981-2010).....	19
Illustration 6: Normales mensuelles de précipitations à Brest (1981-2010).....	19
Illustration 7: Cumul moyen de précipitations d'avril à septembre (1981-2010).....	20
Illustration 8: Cumul moyen de précipitations d'octobre à mars (1981-2010).....	20
Illustration 9: Cumul de précipitations en saisons d'étiage et recharge à Rennes (1959-2018).....	21
Illustration 10: Fréquence des orages en France (1997-2014).....	22
Illustration 11: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Brest (1981-2010).....	23
Illustration 12: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Rennes (1981-2010).....	23
Illustration 13: Moyennes annuelles des températures minimales (1981-2010).....	23
Illustration 14: Moyennes annuelles des températures maximales (1981-2010).....	24
Illustration 15: Cumul moyenne annuel d'insolation (1991-2010).....	25
Illustration 16: Rose des vents d'été à Lorient (1981-2010) à 15UTC (en haut) et à 06 UTC (en bas).....	25
Illustration 17: Moyennes annuelles des températures 1959-1988.....	27
Illustration 18: Moyennes annuelles des températures 1989-2018.....	27
Illustration 19: Moyennes annuelles des températures à Huelgoat 1959-2018.....	28
Illustration 20: Moyennes annuelles des températures à La Guerche 1959-2018.....	28
Illustration 21: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Brest (1959-2018).....	28
Illustration 22: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Rennes (1959-2018).....	28
Illustration 23: Moyennes annuelles des températures maximales 1959-1988.....	29
Illustration 24: Moyennes annuelles des températures maximales 1989-2018.....	29
Illustration 25: Moyennes annuelles des températures minimales 1959-1988.....	30
Illustration 26: Moyennes annuelles des températures minimales 1989-2018.....	30
Illustration 27: Moyennes des températures minimales d'hiver 1989-2018.....	30
Illustration 28: Moyennes des températures minimales d'hiver 1959-1988.....	30
Illustration 29: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1959-1988).....	31
Illustration 30: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1989-2018).....	31
Illustration 31: Nombre de jours de gel en mars-avril à Quénécan (1959-2018).....	31
Illustration 32: Nombre de jours de gel en mars-avril à Molac (1959-2018).....	31
Illustration 33: Moyennes des températures maximales d'été (1959-1988).....	32
Illustration 34: Moyennes des températures maximales d'été (1989-2018).....	32
Illustration 35: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1959-1988).....	32
Illustration 36: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1989-2018).....	32
Illustration 37: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à Huelgoat (1959-2018).....	33
Illustration 38: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à La Guerche (1959-2018).....	33
Illustration 39: Nombre total de nuits tropicales 1959-1988.....	33
Illustration 40: Nombre total de nuits tropicales 1989-2018.....	33
Illustration 41: Nombre de nuits à 18°C ou plus de juin à août à La Guerche (1959-2018).....	34
Illustration 42: Cumuls moyens annuels de précipitations 1959-1988.....	35
Illustration 43: Cumuls moyens annuels de précipitations 1989-2018.....	35

Illustration 44: Cumuls annuels de précipitations à Huelgoat 1959-2018.....	35
Illustration 45: Cumuls annuels de précipitations à La Guerche 1959-2018.....	35
Illustration 46: Cumuls moyens de précipitations (mm) par saison.....	36
Illustration 47: Evolution chronologique des jours de pluie annuels à Huelgoat (1959-2018).....	36
Illustration 48: Evolution chronologique des jours de pluie annuels à La Guerche (1959-2018)....	36
Illustration 49: Cumuls moyens de précipitations en été 1959-1988.....	37
Illustration 50: Cumuls moyens de précipitations en été 1989-2018.....	37
Illustration 51: Evolution du nombre de jours de pluie à Huelgoat et La Guerche.....	37
Illustration 52: Nombre moyen de jours de pluie en été 1959-1988.....	37
Illustration 53: Nombre moyen de jours de pluie en été 1989-2018.....	37
Illustration 54: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1959-1988).....	38
Illustration 55: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1989-2018).....	38
Illustration 56: Cumuls moyens d'ETP 1989-2018.....	38
Illustration 57: Cumuls moyens annuels d'ETP 1959-1988.....	38
Illustration 58: Cumuls moyens d'ETP en été 1959-1988.....	39
Illustration 59: Cumuls moyens d'ETP en été 1989-2018.....	39
Illustration 60: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1989-2018).....	39
Illustration 61: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1959-1988).....	39
Illustration 62: Bilans moyens annuels P-ETP 1959-1988.....	40
Illustration 63: Bilans moyens annuels P-ETP 1989-2018.....	40
Illustration 64: Evolution du bilan hydrique annuel à Huelgoat (1959-2018).....	40
Illustration 65: Evolution du bilan hydrique annuel à La Guerche (1959-2018).....	40
Illustration 66: Bilans moyens P-ETP en été 1959-1988.....	41
Illustration 67: Bilans moyens P-ETP en été 1989-2018.....	41
Illustration 68: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1959-1988).....	41
Illustration 69: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1989-2018).....	41
Illustration 70: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1959-1988.....	42
Illustration 71: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1989-2018.....	42
Illustration 72: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre à La Guerche (1959-2018)	43
Illustration 73: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre à Huelgoat (1959-2018)...	43
Illustration 74: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1959-1988.....	43
Illustration 75: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1989-2018.....	43
Illustration 76: Vagues de chaleur en Bretagne depuis 1947.....	48
Illustration 77: Modélisation ISBA utilisée dans SIM.....	55
Illustration 78: Températures moyennes annuelles 1959-1988.....	58
Illustration 79: Températures moyennes annuelles 1969-1998.....	58
Illustration 80: Températures moyennes annuelles 1979-2008.....	59
Illustration 81: Températures moyennes annuelles 1989-2018.....	59
Illustration 82: Précipitations moyennes annuelles 1959-1988.....	60
Illustration 83: Précipitations moyennes annuelles 1969-1998.....	60
Illustration 84: Précipitations moyennes annuelles 1979-2008.....	61
Illustration 85: Précipitations moyennes annuelles 1989-2018.....	61
Illustration 86: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1959-1988.....	62
Illustration 87: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1969-1998.....	62
Illustration 88: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1979-2008.....	63
Illustration 89: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1989-2018.....	63

Liste des tableaux

1 Contexte

Les organismes forestiers, en particulier le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), doivent prendre en compte de nombreux paramètres pour permettre à la forêt de s'adapter au changement climatique. La durée de vie des arbres impose de considérer de longues tranches d'histoire, au minimum 40 ans. Le climat est l'un des facteurs les plus influents sur la bonne santé des forêts, tant par ses effets directs que par les conditions propices à la prolifération de maladies et parasites. Son évolution peut être observée dans ses tendances les plus récentes grâce au travail des climatologues, et anticipée grâce aux projections climatiques qui ont été réalisées pour le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (**GIEC**) dans le cadre du changement climatique.

Parmi ses missions régaliennes, Météo-France assure l'archivage, le contrôle et la pérennité de bases de données climatologiques sur le territoire français. Ces bases de données constituent le meilleur outil pour répondre aux besoins exprimés par le CRPF de Bretagne-Pays-de-la-Loire : caractériser le climat actuel, quantifier les variations récentes, identifier les territoires plus fragiles ou au contraire résistants et estimer si possible les tendances futures, au travers d'indicateurs adaptés à la forêt.

2 Les données climatologiques

2.1 Eléments de climatologie générale

L'Organisation Météorologique Mondiale recommande de caractériser le climat d'un territoire par des statistiques calculées sur 30 ans. Les conditions météorologiques en cours peuvent être ainsi comparées à ces moyennes qui servent de valeurs de référence et sont appelées les normales. Pour des raisons pratiques, ces normales sont remises à jour tous les 10 ans avec trois décennies pleines. Les dernières normales sont issues des séries 1981-2010.

Ces normales évoluent au cours du temps et leurs variations permettent parfois de déceler des tendances. Les variations de ces dernières années ont surtout concerné les températures et ont été particulièrement rapides. Il semble donc capital de recalculer dans le cadre de cette étude des statistiques qui tiennent compte des années depuis 2011 sans attendre que la décennie 2011-2020 soit terminée.

2.2 Les données climatologiques issues des observations

Météo-France recueille une quantité d'observations grâce à son réseau de mesures. Après avoir subi une chaîne de contrôle et de validation, ces données constituent une base climatologique sur une longue période, au minimum depuis 1945 pour certaines séries. Toutefois, il manque à cette base une homogénéité temporelle et spatiale si on considère que l'information est dépendante du site où elle est obtenue (début de la série, altitude, déplacement du poste, conditions de mesures évolutives ...). Des traitements statistiques permettent de reconstituer des ensembles de données à la fois homogènes dans le temps et dans l'espace à partir de ces observations. Elaborée dans les années 1980, la méthode statistique d'interpolation AURELHY (Analyse Utilisant le Relief pour l'Hydrologie) s'est d'abord appliquée au calcul de champs de précipitations mensuels et annuels avec une résolution de 5 km pour environ 500 séries (normales de précipitations 1951-1980). Les progrès technologiques ont permis dans les années 1990 d'affiner la résolution spatiale à 1 km et les séries observées servant de référence ont été multipliées par 3 (normales de précipitations 1961-1990). A partir des années 2000, on a pu calculer le nombre de jours où les précipitations étaient supérieures à un seuil (≥ 1 mm, ≥ 5 mm, ≥ 10 mm) pour les normales 1971-2000. Parallèlement, des traitements similaires mais plus complexes ont été appliqués à partir des années 1990 aux températures minimales et maximales pour des champs mensuels et annuels à une résolution de 1 km.

Un travail considérable a été mené ces dernières années pour reconstituer des séries quotidiennes depuis 1947 avec différentes méthodes statistiques (s'appuyant notamment sur la climatologie AURELHY). Les résultats de ces méthodes sont comparables pour les régions de faible altitude de l'ouest de la France et ont été partiellement validés.

Les données ainsi obtenues représentent une opportunité unique de calculer des indices sur des seuils de températures, et répondent donc parfaitement aux besoins exprimés par le CRPF Bretagne-Pays-de-la-Loire. Trop récente pour avoir été complètement validée, on a néanmoins contrôlé l'adéquation de la climatologie obtenue avec la climatologie existante et on a retenu cette base pour l'étude qui suit.

2.3 Les données climatologiques issues du modèle SIM

Depuis une vingtaine d'années, pour répondre à des besoins spécifiques, notamment en altitude ou sur des domaines non couverts par des observations, les bureaux d'étude recourent à d'autres types de données, comme celles issues des modèles de prévision. Ceux-ci fournissent des

champs de précipitations, de températures, de vent, de pression ... sous forme de grilles, c'est-à-dire en des points répartis régulièrement suivant une maille connue et à des échéances régulières (toutes les heures par exemple). Ces modèles intègrent tout type d'information, comme les observations terrestres, les données satellitales ... en vérifiant leur cohérence physique, temporelle et spatiale. Ces données constituent a posteriori une base climatologique qui peut être complétée en remontant le temps suivant les données dont on dispose.

Les besoins dans le domaine de l'agrométéorologie et de l'hydrométéorologie ont amené Météo-France à construire une chaîne de modèles, la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) pour fournir des séries spatialisées homogènes de précipitations, d'évapotranspiration et de bilans hydriques entre autres. La chaîne est initialisée par SAFRAN, un schéma d'analyse permettant, à partir des observations terrestres et du modèle de prévision ARPEGE de Météo-France, d'interpoler sur la grille d'ISBA (8 km de résolution) 8 paramètres horaires : température et humidité à 2 mètres, vent à 10 mètres, rayonnements infrarouge et visible, précipitations liquides et solides, nébulosité. ISBA calcule les bilans d'eau et d'énergie et l'évolution du manteau neigeux. MODCOU est un modèle hydrologique qui estime au pas de temps quotidien à partir des lames d'eau ruisselées et infiltrées fournies par ISBA, les débits aux rivières et l'évolution des nappes.

L'intérêt de ces données, outre l'homogénéité spatiale et temporelle est la cohérence entre les précipitations et les bilans hydriques. La profondeur de l'archive est intéressante puisque les séries quotidiennes reconstituées démarrent en 1959 et permettent de faire des statistiques du bilan hydrique à des stades phénologiques précis. Les températures sont de qualité tout à fait adaptée à la chaîne de modèles, mais on ne dispose pas d'extrema quotidiens de température, donc les phénomènes de chaleur ou de gel ne peuvent pas être étudiés à partir de cette base. En revanche, elle sera utilisée pour l'examen des précipitations, de l'évapotranspiration et des bilans hydriques.

3 Les indicateurs

Comme il s'agit d'examiner les évolutions du climat récent et d'anticiper les changements futurs, on cherche autant que possible à utiliser les indicateurs disponibles dans les travaux qui sont menés dans le cadre du changement climatique (voir le site www.drias-climat.fr). L'intérêt se porte surtout sur les températures qui subissent les variations les plus visibles, mais aussi les précipitations et l'évapotranspiration potentielle ETP qui sont des éléments essentiels pour la végétation. En utilisant l'évapotranspiration potentielle calculée à partir du vent et du rayonnement global, les grandes tendances concernant ces deux derniers paramètres sont intégrées.

Concernant le vent, l'examen des séries de vent se heurte à la rupture d'homogénéité des mesures, liée par exemple à des changements de capteurs. On considère en général que les mesures de vent sont comparables entre elles à partir de 1981, ce qui ne permet pas de disposer d'une profondeur d'archive suffisante. Il est donc délicat de dégager des tendances précisément sur la vitesse du vent. Cependant, les travaux qui ont été menés sur les tempêtes ne montrent aucune tendance significative sur la fréquence et l'intensité des tempêtes en Bretagne. Les résultats de ces travaux sont synthétisés sur le site de Météo-France dédié aux tempêtes (<http://tempetes.meteofrance.fr/>). Par ailleurs, un examen des directions de vent susceptibles d'indiquer des évolutions de type de temps montre qu'il n'existe pas actuellement de fréquence plus importante pour certains secteurs.

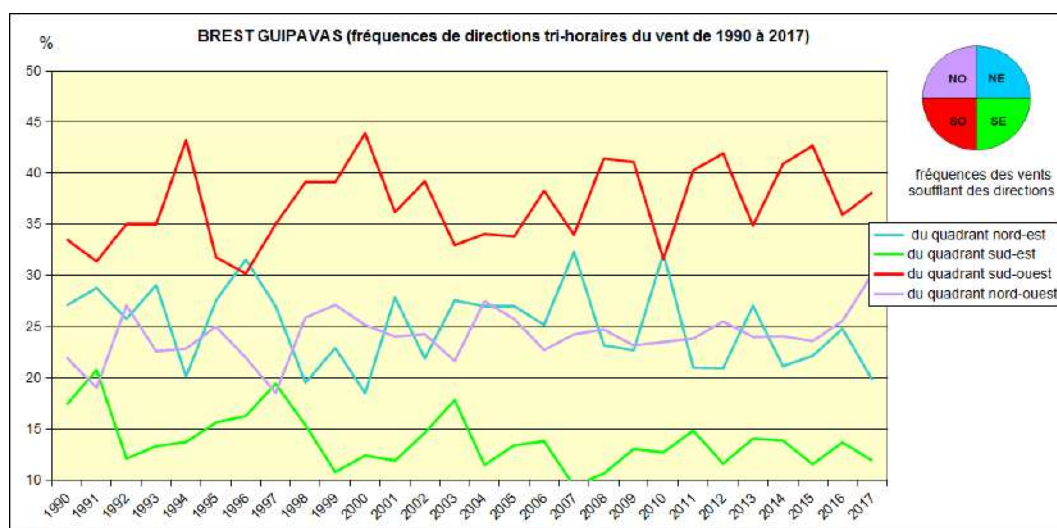


Illustration 1: Répartition par quadrant des directions du vent moyen tri-horaire à Brest de 1990 à 2017

On retrouve la même difficulté pour le rayonnement, car les changements de capteurs ont entraîné des ruptures d'homogénéité des séries. On considère que les mesures de ces grandeurs sont homogènes depuis 1991, donc les séries disponibles ne sont pas assez longues pour détecter une évolution. En revanche, à l'échelle globale, les satellites ont mis en évidence des évolutions du rayonnement influencé par la production d'aérosols liée à l'activité humaine : diminution dans les années 1950-1980, augmentation sur la période 1980-2000 dans les pays industrialisés (en lien avec la diminution des aérosols sulfatés), poursuite de l'augmentation après les années 2000 pour les mêmes pays.

3.1 Les températures

La température suit en général un cycle quotidien avec un maximum en milieu d'après-midi et un minimum en fin de nuit. Plus rarement, lors de situations météorologiques particulières, il arrive que la température évolue très peu, ou que la valeur maximale se produise le matin au lieu de l'après-midi.

Sous nos latitudes, les températures suivent également un cycle annuel avec les valeurs les plus basses en hiver et les valeurs les plus élevées en été.

Les indicateurs relatifs aux températures en relation avec les forêts sont donc choisis ainsi :

- moyennes des températures minimales TN (fin de nuit), des températures maximales TX (après-midi) et des températures moyennes $(TN+TX)/2$
- nombres de jours de chaleur ($> 25\text{ °C}$), de forte chaleur ($> 30\text{ °C}$), nombre de jours de gel ($\leq 0\text{ °C}$) et nombres de nuits où la température ne descend pas au-dessous d'un seuil choisi à 18 °C , que l'on appellera par la suite abusivement **nuits tropicales**.

Différentes périodes sont considérées : l'année, la période de végétation (d'avril à octobre), l'été (de juin à août), l'hiver (de décembre à février), et la période du démarrage de la végétation pour les gelées (mars-avril).

3.2 Les précipitations P et l'évapotranspiration potentielle ETP

Malgré une forte variabilité, les précipitations suivent également un cycle annuel avec des cumuls plus importants en période de recharge (d'octobre à mars) qu'en période d'étiage (d'avril à septembre). Le cumul des précipitations n'est pas la seule façon de qualifier la pluviométrie, la fréquence de son occurrence est aussi un indicateur, qu'on caractérisera par le nombre de jours de pluie (précipitations supérieures ou égales à 1 mm sur la journée).

A l'inverse, l'évapotranspiration potentielle ETP est plus importante en été (températures et rayonnement plus élevés). L'ETP utilisée dans cette étude est extraite de la base quotidienne SIM. Il s'agit de l'ETP de Penman-Monteith qui prend en compte notamment le rayonnement global, le vent, la chaleur latente de vaporisation, l'albédo de la surface évaporante, la tension de vapeur.

La période d'étiage permet de qualifier d'un point de vue climatologique la saison estivale et une partie des saisons intermédiaires (printemps et automne). Cette période adopte un comportement comparable à celui de la saison de végétation utilisée par les forestiers.

On s'intéressera donc pour l'année, la saison de végétation (d'avril à octobre) et l'été (de juin à août) aux cumuls de précipitations (P) et aux cumuls d'ETP.

3.3 Les indicateurs bioclimatiques

Les caractéristiques du milieu (climatiques : température, pluviosité, fréquence des gelées... et pédologiques : richesse chimique, réserve utile en eau du sol...) conditionnent la présence des espèces forestières et leur croissance.

Pour appréhender les effets d'un climat sur la végétation, il est nécessaire de savoir notamment si celui-ci comporte des périodes de déficit hydrique important (souvent printanier et estival), sources de stress pour les plantes. Le stress hydrique en résultant peut selon son intensité affecter la croissance d'une essence voire être une cause de dépérissement. Pour caractériser plus finement les niveaux de contrainte hydrique subis par les arbres, faire un bilan hydrique est donc d'intérêt pour le forestier : ce calcul fait la balance entre les quantités d'eau entrant et sortant du complexe sol-forêt. Il permet ainsi d'estimer le degré de satisfaction des besoins en eau.

Pour avoir une idée de l'importance sur le territoire et de l'évolution de la contrainte hydrique que peuvent subir les arbres, les forestiers s'intéressent à différents indicateurs bioclimatiques.

3.3.1 Le bilan hydrique climatique

Le bilan hydrique le plus simple consiste à faire la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, (P-ETP), généralement calculée au pas de temps mensuel sur la période de végétation ou la période estivale. On parle généralement de « bilan hydrique potentiel » ou « climatique » car il ne tient pas compte du sol (réserve utile) et du couvert forestier (qui intercepte une partie de la pluie incidente).

En gardant à l'esprit que le calcul du bilan hydrique climatique est une estimation très simplifiée de l'eau disponible pour les plantes, qui ne prend pas en compte de nombreux paramètres (dont la capacité du sol à stocker l'eau), cet indicateur donne une première vision saisonnière du risque de sécheresse avec une mise en évidence des mois de déficit hydrique climatique (où $P < ETP$).

3.3.2 Le Déficit Hydrique Relatif

Pour satisfaire ses besoins en eau, la plante utilise tout d'abord les précipitations du mois. Si les précipitations du mois suffisent, il n'y a pas de déficit hydrique et l'évapotranspiration réelle d'eau par la plante (ETR_m) est égale à l'ETP_m. Si les précipitations du mois ne sont pas suffisantes, la

plante prélève une certaine quantité d'eau dans le sol qui constitue un réservoir dont la contenance est initialisée au maximum (RU_{max}) en début de calcul. Dans ce cas, il y a déficit hydrique et la transpiration d'eau par la plante (ETR_m) est égale à la somme des précipitations du mois (p_m) et de ce qui est prélevé durant le mois dans le réservoir. Lorsque la période de déficit climatique est terminée, les excédents d'eau non transpirés par la plante servent tout d'abord à reconstituer le réservoir en eau du sol, puis fournissent un excédent appelé écoulement.

Ce calcul initialisé en janvier (avec une RU_{max}) et réalisé sur l'année fournit des valeurs d'ETP et d'ETR mensuelles qu'il est possible d'utiliser pour déterminer un indice caractérisant le déficit hydrique relatif subi par la plante (déficit hydrique relatif $DHR = (ETP - ETR) / ETP$).

3.3.3 Le nombre de mois secs et subsecs

En bioclimatologie, une définition simple des mois secs selon Gausсен (1952) est communément utilisée pour établir la durée de la saison sèche présentant un risque pour les plantes : un mois est sec si le total des précipitations en millimètres est inférieur à deux fois sa moyenne thermique ($P < 2T$). Dubreuil (2003) rappelle dans son article «Suivi de la sécheresse par télédétection : exemple de l'été 2003 en Bretagne » : « La mise au point de cette formule a notamment permis à Gausсен de préciser les limites du domaine méditerranéen au moyen de paramètres climatiques facilement disponibles. Son utilisation en dehors du milieu méditerranéen s'est très vite généralisée mais de nombreux auteurs lui ont préféré une définition moins stricte de la sécheresse. [...]L'intérêt est alors de prolonger la saison sèche en intégrant les mois dont les températures sont généralement moins élevées qu'en été mais où le déficit en eau reste susceptible d'être dommageable pour les plantes. En outre, cet assouplissement de la notion de sécheresse permet de mieux cerner la saison déficiente dans le domaine océanique. Afin de conserver une cohérence globale quant à la terminologie employée, il vaut mieux alors parler de subsécheresse si le total des précipitations mensuelles est compris entre 2 et 4 fois la moyenne des températures. Ainsi, Mounier (CNRS ER-30), lors de l'élaboration des Cartes Climatiques Détaillées (C.C.D.), a défini un mois subsec lorsque $2T < P_{mm} < 3T$. C'est donc toujours le même souci de rapporter les données pluviométriques à des données de températures qui ont guidé l'élaboration de ce concept de mois sec, le but étant toujours de mieux estimer les disponibilités en eau pour les plantes en rapportant les apports en eau aux prélèvements occasionnés par la chaleur.

3.4 Synthèse des indicateurs et de leur représentation

Un travail préalable a permis d'établir un compromis entre les multiples combinaisons possibles d'indicateurs et de périodes à considérer. On a décidé de représenter l'évolution des indicateurs soit sous forme de carte soit sous forme de graphique chronologique. Ce travail a été fait en 2 étapes. Dans un premier temps, il a été convenu de cartographier certains indicateurs sur 4 périodes trentenaires (1959-1988, 1969-1998, 1979-2008, 1989-2018). Pour juger de l'évolution d'une période à l'autre, on a tracé ensuite des cartes d'écarts qui ont permis de mettre en évidence des territoires soumis à des variations plus importantes et d'autres où, au contraire, le changement était minime. Ces cartes ont été produites en particulier pour comparer tous les indicateurs sur les 2 périodes extrêmes 1959-1988 et 1989-2018, mais ne sont pas présentées dans ce rapport pour éviter la surcharge d'informations.

On a associé ces territoires à 6 sites de forêts pour lesquels les autres indicateurs sont fournis sous forme de graphiques sur la totalité de la période disponible : en Bretagne, les forêts de Huelgoat (29), de la Guerche et de Paimpont (35), de St-Aubin-La Hunaudaye (22), de Molac et de Quénécan (56). Chaque site de forêt est représenté par un point central correspondant à un point de grille.

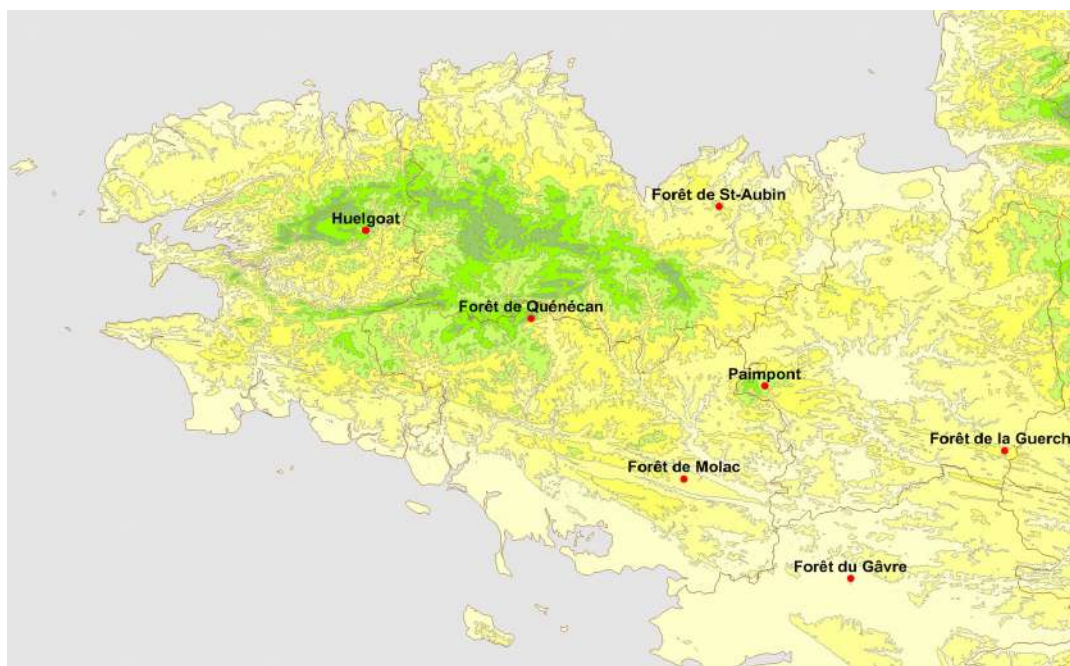


Illustration 2: Sites choisis pour la production de graphiques en lien avec des territoires forestiers en Bretagne

Le tableau suivant récapitule les représentations par indicateur et par période.

		Indicateurs	annuel	mars-avril	avril à octobre	juin à août	décembre à février
Cartographie	Températures	Moyennes	X				
		Moy. Maximales	X			X	
		Moy. Minimales	X				X
		Nombre de jours de gel $T \leq 0^{\circ}\text{C}$		X			
		Nb de jours de chaleur $T > 25^{\circ}\text{C}$				X	
		Nb de jours de forte chaleur $T > 30^{\circ}\text{C}$				X	
		NB de nuits tropicales $T \geq 18^{\circ}\text{C}$	X				
	Précipitations	Précipitations (P)	X		X	X	
		nb jours de pluie $P \geq 1 \text{ mm}$				X	
		ETP	X		X	X	
		P-ETP	X		X	X	
		(ETP-ETR)/ETP	X		X	X	
		nb de mois secs ($P < 2T$) et subsecs ($2T < P < 3T$)	X				
Graphiques	Températures	Moyennes des maximales	X				
		Moyennes des minimales	X				
		Nombre de nuits tropicales				X	
	Précipitations	cumul de P	X				
		cumul d'ETP	X				
		P-ETP	X				
		mois secs et subsecs			X		

Illustration 3: Liste des indicateurs climatiques en fonction des périodes d'intérêt et de leur représentation

4 Le climat actuel

La Bretagne bénéficie d'un climat doux océanique, tempéré par la proximité de l'Atlantique et la présence du Gulf Stream. Cette clémence, parfois démentie par de forts contrastes entre le littoral et l'intérieur, entre nord et sud, se caractérise ainsi :

- la pluviométrie annuelle moyenne varie du simple au double entre le bassin rennais (cumul annuel inférieur à 700 mm) et les reliefs finistériens (plus de 1300 mm par an) et les écarts marqués entre précipitations hivernales et estivales sur le littoral tendent à s'effacer au fur et à mesure qu'on pénètre sur le continent
- les températures clémentes affichent une moyenne annuelle de 12,5 °C et subissent des amplitudes limitées, tant à l'échelle de la journée qu'à l'échelle de l'année, mais il existe un gradient moyen de 3 à 4 degrés la nuit entre l'intérieur plus frais et les côtes plus douces et un gradient nord-sud en journée du même ordre de grandeur
- l'ensoleillement annuel moyen varie de 1400 à 2000 heures du Léon aux côtes sud du Morbihan
- les vents soufflent majoritairement d'ouest à sud-ouest et peuvent se déchaîner lors de tempêtes océaniques 2 à 3 fois par an.

Comme indiqué au paragraphe 2.1, le climat actuel est défini par les normales climatologiques de la période 1981-2010. Ces normales permettent de fixer des repères pour quantifier les évolutions des 60 dernières années et éventuellement anticiper les évolutions futures.

4.1 Précipitations

La Bretagne connaît un régime de pluies océaniques dont les cumuls les plus importants sont répartis d'octobre à mars en liaison avec les perturbations arrivant de l'Atlantique. Celles-ci génèrent des précipitations régulières aux passages des fronts, de faibles bruines et crachins au sein des perturbations et des précipitations plus irrégulières sous forme d'averses, parfois orageuses, lors de l'évacuation de ces perturbations. En période estivale, la trajectoire de ces perturbations est décalée vers le nord. Celles-ci sont moins nombreuses, atténuées et les pluies sont plus souvent instables et orageuses.

4.1.1 Répartition spatiale

La configuration géographique constituée de 3 façades maritimes et du relief modéré du massif armoricain expliquent la répartition contrastée de la pluviométrie.

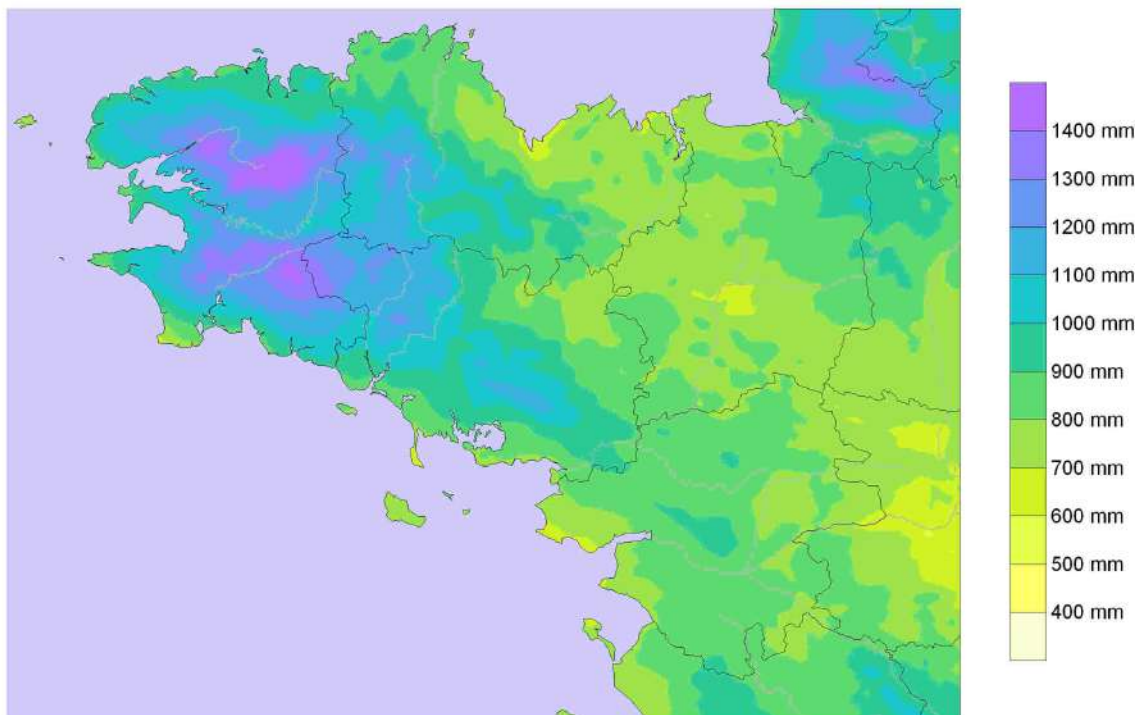


Illustration 4: Cumul moyen annuel de précipitations 1981-2010

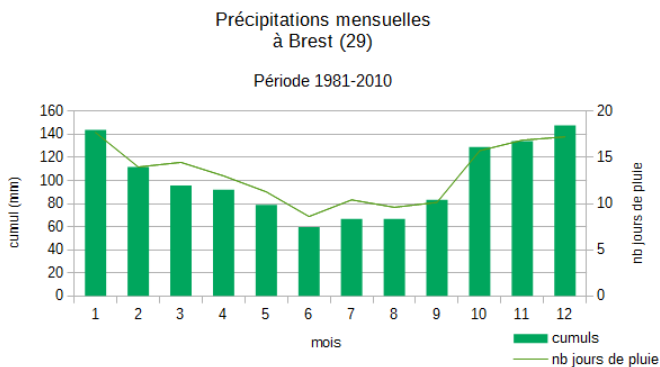


Illustration 6: Normales mensuelles de précipitations à Brest (1981-2010)

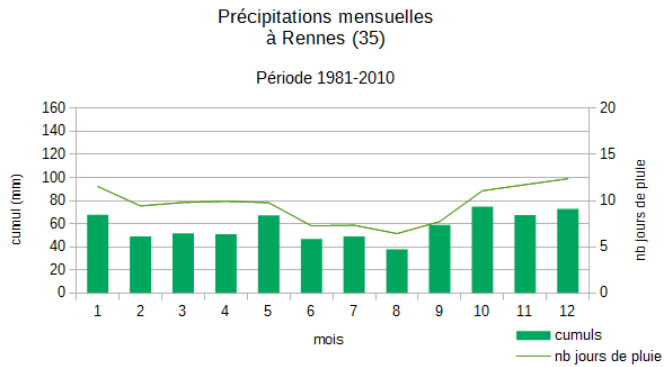


Illustration 5: Normales mensuelles de précipitations à Rennes (1981-2010)

Le cumul annuel des précipitations varie de 650 mm dans le bassin rennais à plus de 1400 mm au cœur des Monts d'Arrée. La partie ouest de la Bretagne est globalement plus arrosée, les zones vallonnées l'étant par ailleurs bien plus que le littoral. Cette répartition spatiale des précipitations est particulièrement vérifiée sur la période hivernale qui voit circuler les perturbations océaniques.

Les hauteurs d'eau mensuelles hivernales représentent souvent plus du double de celles d'été à Brest alors que la pluviométrie mensuelle de Rennes est comprise dans une fourchette assez étroite, de 40 à 80 mm.

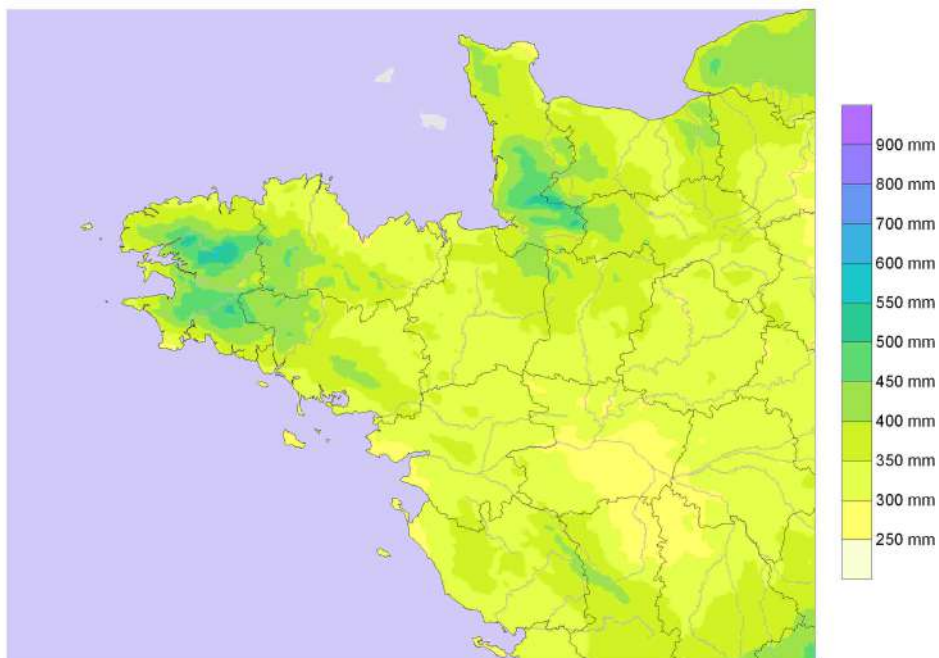


Illustration 7: Cumul moyen de précipitations d'avril à septembre (1981-2010)

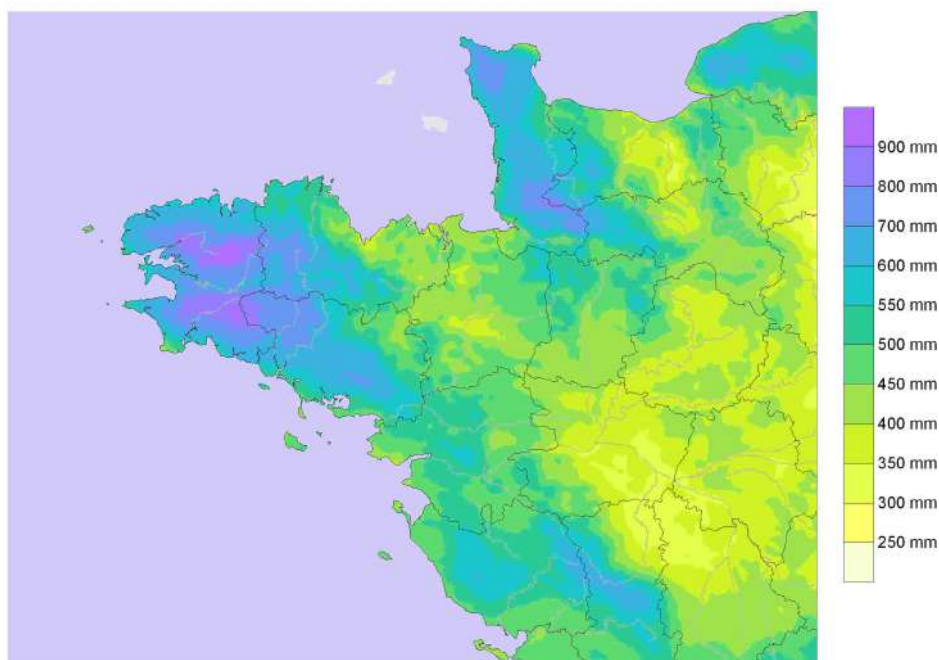


Illustration 8: Cumul moyen de précipitations d'octobre à mars (1981-2010)

4.1.2 Variabilité interannuelle

Les cumuls annuels de précipitations varient d'une année à l'autre sans toutefois dégager une tendance vraiment nette. Pour qualifier la pluviométrie hivernale et la pluviométrie estivale, on peut distinguer la période de recharge, d'octobre à mars et la période d'étiage d'avril à septembre. Il existe ainsi des cumuls extrêmes comme celui de 765 mm à Rennes, lors de l'hiver très arrosé 2000-2001 ou celui de 89 mm lors de l'été sec de 1969. Le dernier été pluvieux (337 mm) date de 2012, qui est en 8^e position, loin derrière 1993 (433 mm). Un hiver arrosé peut être suivi d'un été pluvieux ou d'un été sec, sans règle pré-établie. A l'inverse, on a l'exemple de l'hiver 2016-2017 bien sec (298 mm) qui succède à l'été 2016 déjà peu arrosé (195 mm).

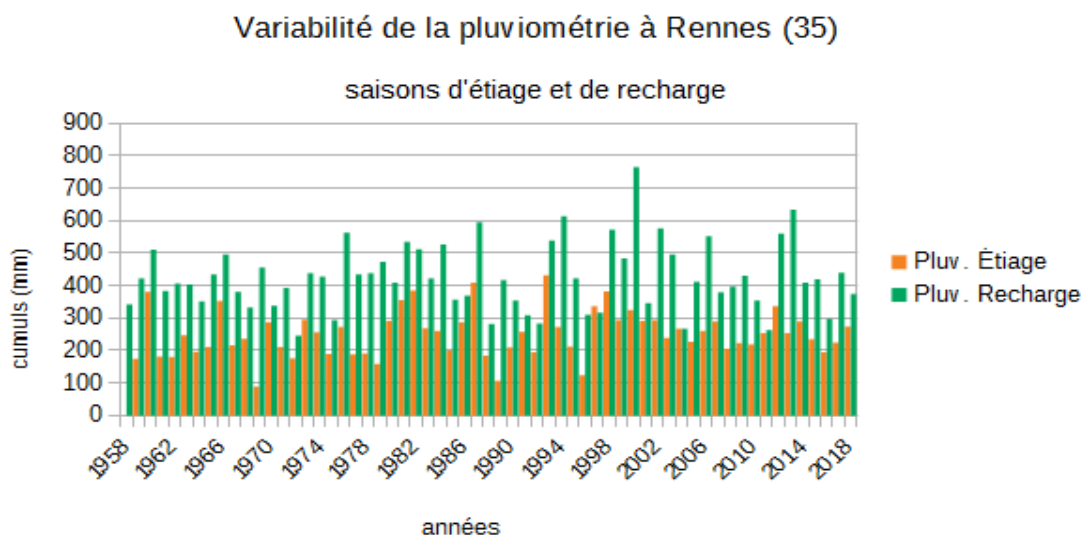


Illustration 9: Cumul de précipitations en saisons d'étiage et recharge à Rennes (1959-2018)

4.1.3 Précipitations à caractère exceptionnel

L'intensité des précipitations est aussi une caractéristique du climat d'un territoire. A Rennes, il pleut environ 1 jour sur 3, mais l'année compte seulement 18 journées de forte pluie (dépassant 10 mm) en moyenne. Une averse d'une heure est qualifiée d'exceptionnelle lorsqu'elle dépasse 30 mm de précipitations, tout comme une journée cumulant une hauteur d'eau de plus de 50 mm, il s'agit d'événements de fréquence décennale.

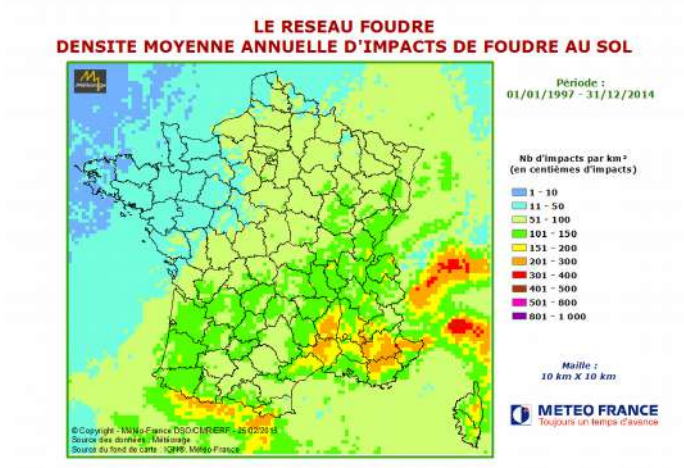


Illustration 10: Fréquence des orages en France (1997-2014)

La Bretagne est la région métropolitaine la moins touchée par les orages, 12 journées concernées en moyenne par an à Rennes.

Les autres phénomènes extrêmes comme la grêle ou la neige ne sont pas fréquents, mais pas non plus totalement absents.

4.2 Températures

En Bretagne, les températures sont douces, tempérées par la proximité de l'océan et l'influence du Gulf Stream. La température est une grandeur très fluctuante. Ses variations à l'échelle de l'année mais aussi à l'échelle de la journée constituent une composante du climat. C'est pourquoi on définit pour chaque jour une température minimale le plus souvent observée en fin de nuit et une température maximale le plus souvent observée en début ou milieu d'après-midi. Les moyennes mensuelles de ces valeurs sont les plus basses de décembre à mars, de 3 à 5 degrés en moyenne de l'intérieur vers les côtes et les plus élevées de fin juin à août, de 20 à 25 degrés, du nord-ouest au sud-est de la Bretagne.

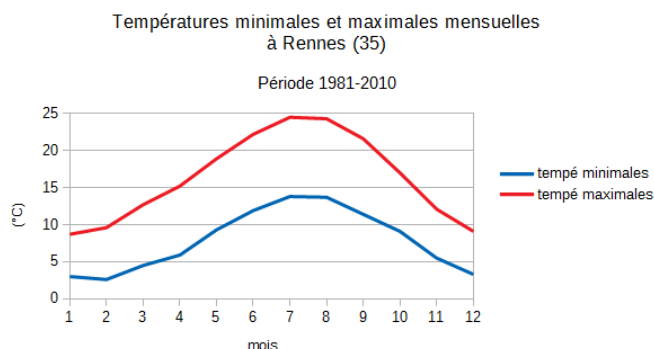
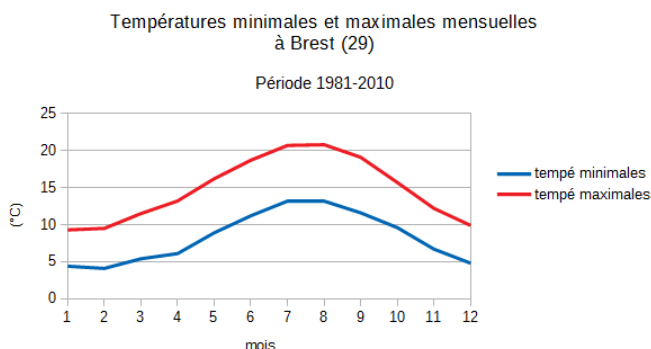


Illustration 11: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Brest (1981-2010)

Illustration 12: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Rennes (1981-2010)

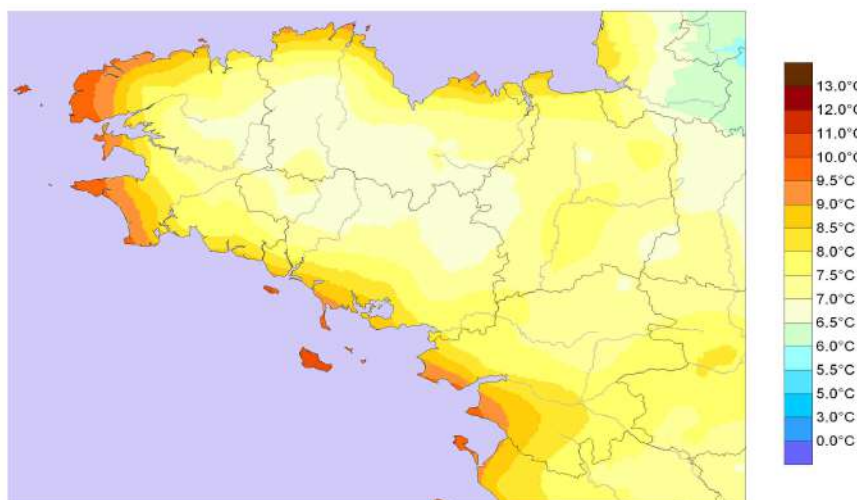


Illustration 13: Moyennes annuelles des températures minimales (1981-2010)

Comme la mer a une inertie thermique plus grande que la terre, les températures des zones proches du littoral sont influencées par la température de la mer et sont donc plus douces en hiver et plus fraîches en été (surtout sur les côtes nord et ouest). Les Monts d'Arrée, les Montagnes

Noires et les Monts du Méné subissent en revanche des températures hivernales plus froides.

Les températures maximales sont très dépendantes de la latitude en lien avec l'ensoleillement et augmentent en allant vers le sud (et l'intérieur en été).

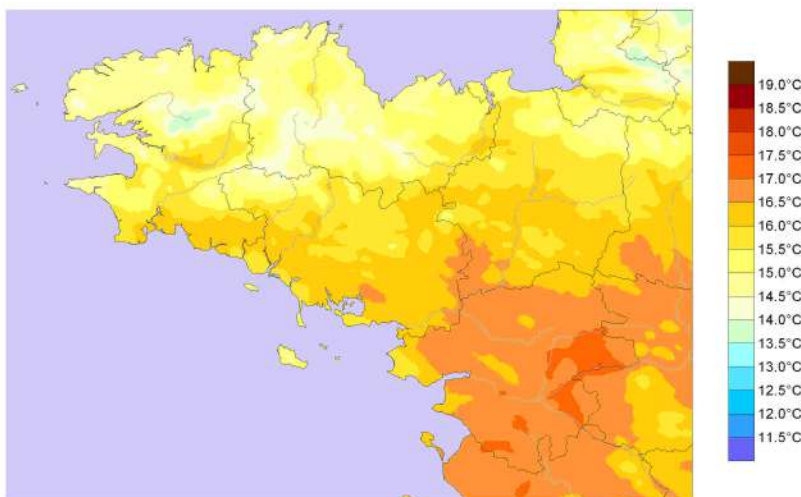


Illustration 14: Moyennes annuelles des températures maximales (1981-2010)

Du fait de cette distribution spatiale, les phénomènes de gel et de chaleur sont plus

fréquents dans l'intérieur qu'en bord de mer. Les gelées se produisent généralement entre novembre et mars, mais des gelées tardives peuvent surprendre jusque début mai. A Rennes, on trouve des gelées après le 21 avril à la fréquence d'une année sur 5.

La chaleur, caractérisée par des températures dépassant 25 °C, est un phénomène rare sur les côtes en particulier au nord et à l'ouest (5 à 10 jours), mais s'accroît au fur et à mesure de la progression vers le sud-est de la région pour atteindre environ 40 jours par été.

Les températures bretonnes connaissent aussi des variations importantes d'une année sur l'autre. Si la plupart du temps, elles sont proches des normales, une vague de froid hivernale ou une vague de chaleur estivale sont possibles. La Bretagne a ainsi connu des hivers froids mémorables en 1954, 1963 ou plus récemment en 1985. Les étés 1976, 1989 ou 2003 restent également dans les souvenirs pour leur chaleur inhabituelle.

Tout comme pour la pluviométrie, il n'existe pas de lien d'une saison à une autre. Ainsi, un hiver froid peut être suivi aléatoirement d'un été frais, proche de la normale ou chaud. De même, un été chaud n'entraînera pas forcément un hiver plus doux que la normale.

4.3 L'ensoleillement

L'ensoleillement fluctue logiquement en fonction de la latitude, mais également de la proximité du bord de mer et de l'altitude. L'amplitude annuelle sur la Bretagne varie de 1400 à 2000 heures des

Monts d'Arrée aux côtes morbihannaises. Le littoral de la Manche et de l'Atlantique bénéficie également de conditions plus ensoleillées que l'intérieur grâce à l'effet de brises côtières qui repoussent les nuages vers l'intérieur en été.

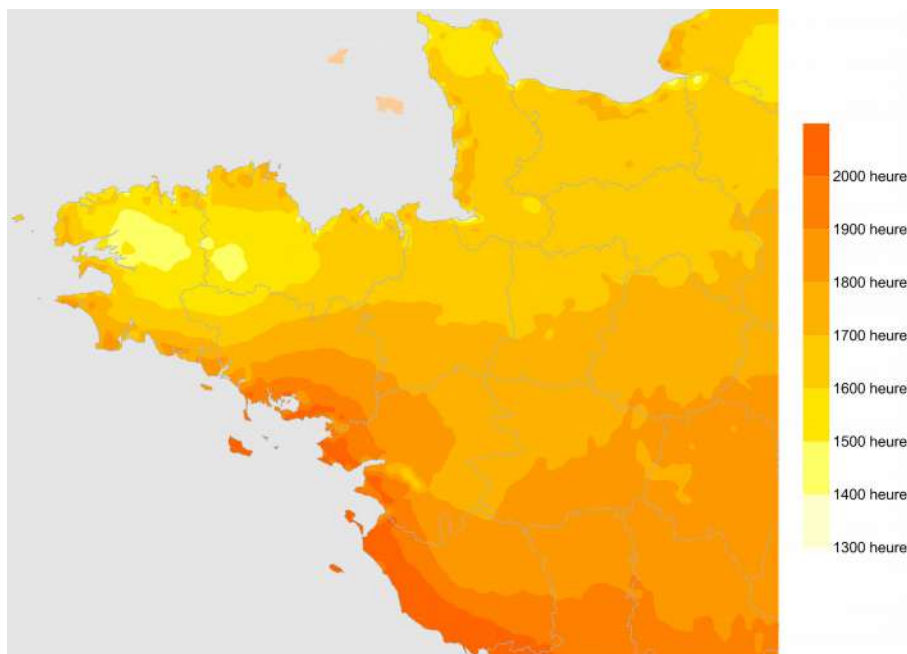


Illustration 15: Cumul moyenne annuel d'insolation (1991-2010)

4.4 Le vent

En Bretagne, le vent souffle majoritairement du sud-ouest, ce qui correspond à la circulation atmosphérique d'ouest en est, dominante sur les régions proches de l'Atlantique.

Les vents soufflant du nord-est sont également fréquents et sont associés à des situations anticycloniques. La fréquence des vents inférieurs à 10 km/h est plus élevée en été. Les vents supérieurs à 60 km/h sont plus souvent observés en hiver et sur le littoral (plus de 100 jours par an à Groix, moins de 50 jours par an à Rennes). Avec ses trois façades maritimes, la Bretagne bénéficie du phénomène de brise marine qui rafraîchit les bordures côtières, et exerce parfois son influence jusqu'à 100 km à l'intérieur des terres.

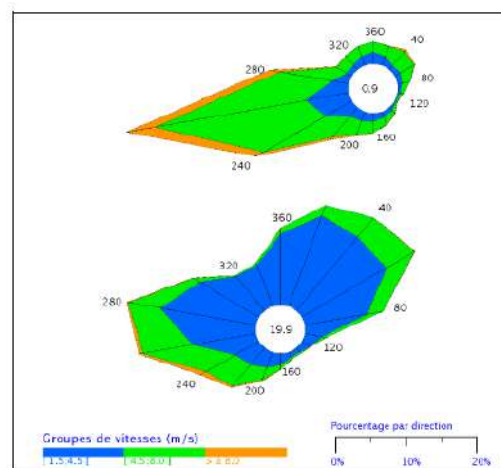


Illustration 16: Rose des vents d'été à Lorient (1981-2010) à 15UTC (en haut) et à 06 UTC (en bas)

La brise est le déplacement d'air qui s'établit entre la mer et la terre lorsqu'il existe une différence thermique suffisante, ce qui est le cas au cours d'une journée d'été où la terre se réchauffe en journée alors que la mer reste à température constante. Le vent s'oriente alors de la mer vers la terre à partir de la mi-journée jusqu'en fin d'après-midi et souffle à des vitesses modérées, de 15 à 30 km/h. Le phénomène s'inverse au coucher du soleil, au moment où la terre commence à se refroidir. Le vent souffle alors d'est à nord-est entre le début de nuit et les premières heures de la journée, dans des gammes de vitesses inférieures à 15 km/h. La brise de mer est un phénomène particulièrement intéressant pour contrecarrer l'effet de surchauffe.

5 Les tendances récentes

Les 4 périodes de 30 ans indiquées dans le paragraphe 3.4 ont été traitées : 1959-1988, 1969-1998, 1979-2008, 1989-2018.

5.1 Les températures

Les moyennes annuelles des températures augmentent au fur et à mesure de la progression chronologique : de l'ordre de 0,5 degré entre 1959-1988 et 1969-1998 et entre 1969-1998 et 1979-2008, un peu moins entre 1979-2008 et 1989-2018.

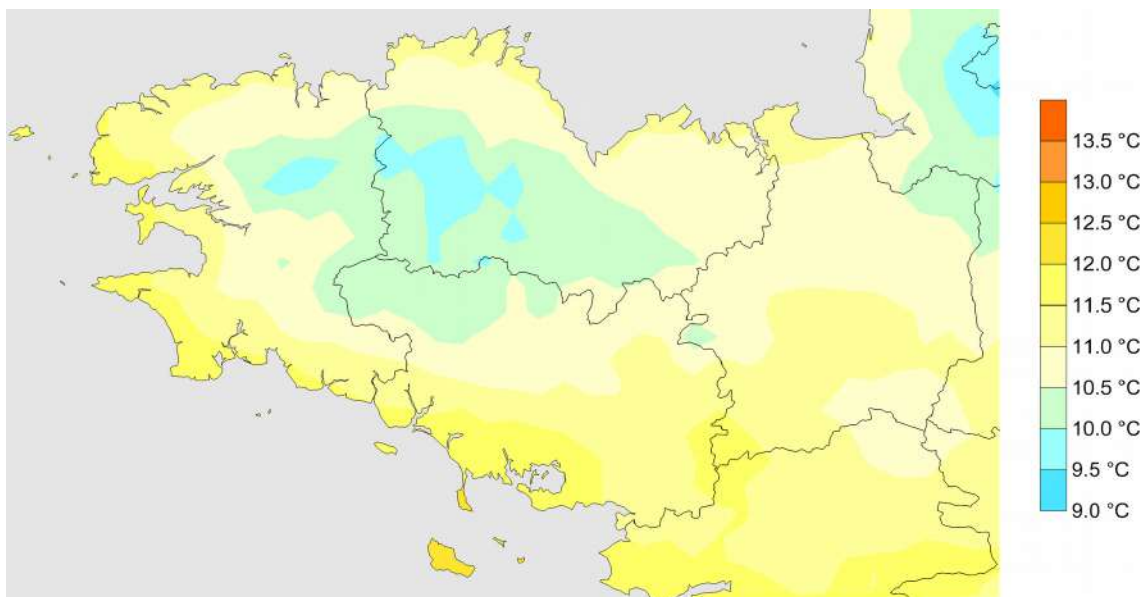


Illustration 17: Moyennes annuelles des températures 1959-1988

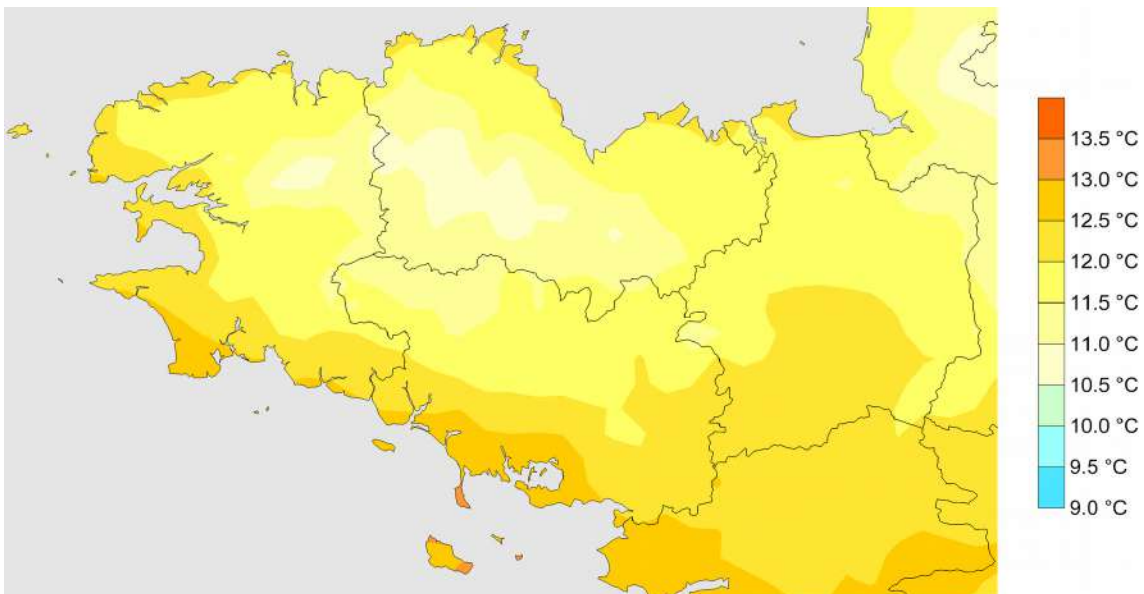


Illustration 18: Moyennes annuelles des températures 1989-2018

Cette tendance à la hausse est observée aussi bien pour les températures minimales que pour les températures maximales, pour les températures estivales que les températures hivernales.

Moyennes annuelles des températures minimales (TN) et maximales (TX)

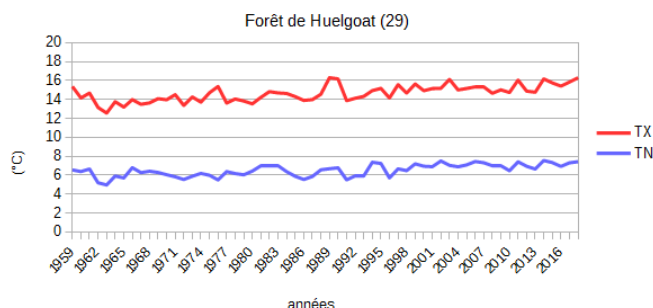


Illustration 19: Moyennes annuelles des températures à Huelgoat 1959-2018

Moyennes annuelles des températures minimales (TN) et maximales (TX)

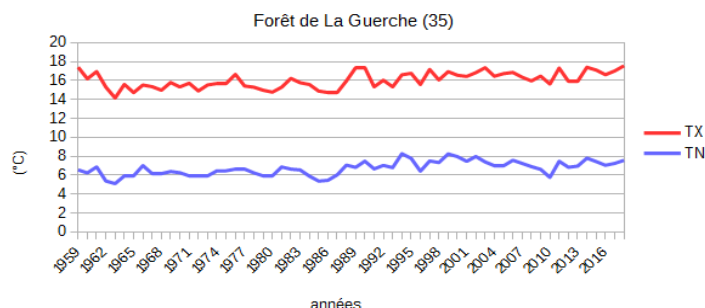


Illustration 20: Moyennes annuelles des températures à La Guerche 1959-2018

La progression n'est pas linéaire dans le temps, et pas identique suivant les territoires, mais les gradients de températures sont globalement conservés, et la distribution spatiale également.

Températures minimales : moyennes et minimales
Températures maximales : moyennes et maximales
à Brest 1959-2018

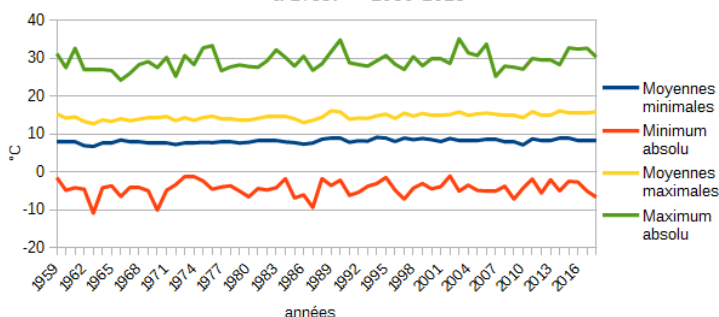


Illustration 21: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Brest (1959-2018)

Températures minimales : moyennes et minimales
Températures maximales : moyennes et maximales
à Rennes 1959-2018

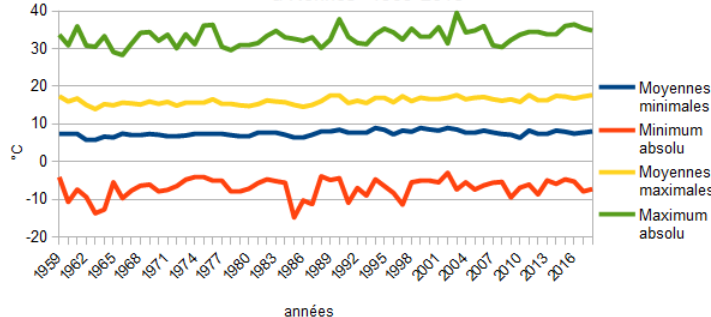


Illustration 22: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Rennes (1959-2018)

Les séries chronologiques de Brest et Rennes témoignent d'années consécutives présentant des extrêmes remarquables.

Les paragraphes suivants quantifient l'évolution des températures sur la totalité de la période. Comme les séries 1959-1988 et 1989-2018 sont disjointes, on examinera l'évolution au travers de ces 2 périodes.

5.1.1 Températures annuelles

Globalement, entre 1959-1988 et 1989-2018, les températures gagnent 1 degré en moyenne annuelle. L'amplitude spatiale passe de la plage « 9,5 degrés sur les Monts d'Arrée à 11,5 degrés sur le littoral atlantique » à la plage « 10,5 degrés à 12,5 degrés ». Le sud de l'Ille-et-Vilaine, l'intérieur du Finistère, le nord-ouest du Morbihan et le sud-ouest des Côtes-d'Armor connaissent la plus forte hausse, 1 à 1,2 degré, contre 0,8 à 1 degré ailleurs. Les températures maximales ont une évolution plus rapide entre 1979-2008 et 1989-2018, alors que les températures minimales accélèrent leur progression entre 1969-1998 et 1979-2008, en particulier sur le littoral.

Les températures maximales du Finistère se réchauffe davantage que sur les territoires voisins. Le gain est de l'ordre de 1,2 à 1,4 degré contre 0,8 à 1 degré ailleurs. La hausse la plus limitée est observée sur le centre de la Bretagne (triangle St-Brieuc - Pontivy - Josselin).

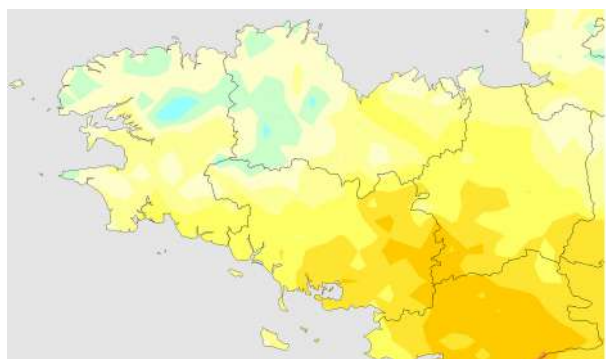


Illustration 23: Moyennes annuelles des températures maximales 1959-1988

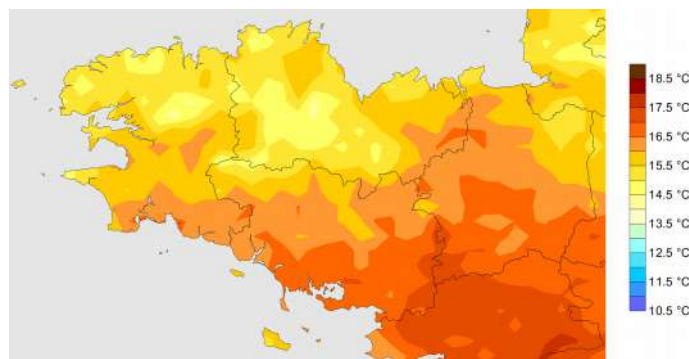


Illustration 24: Moyennes annuelles des températures maximales 1989-2018

La nuit, au contraire, la hausse annuelle des températures est globalement inférieure à 1 degré sauf sur le centre de la Bretagne qui gagne 1 à 1,2 degré.

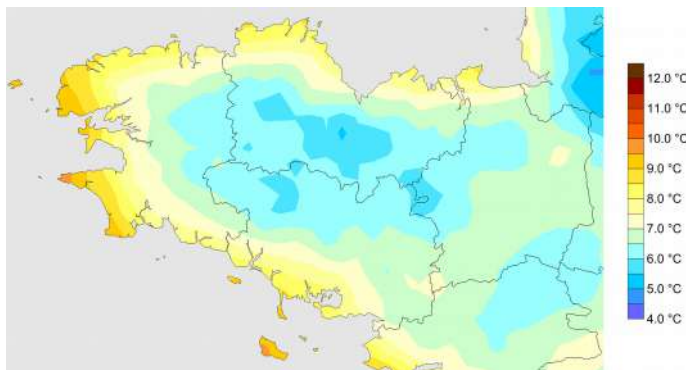


Illustration 25: Moyennes annuelles des températures minimales 1959-1988

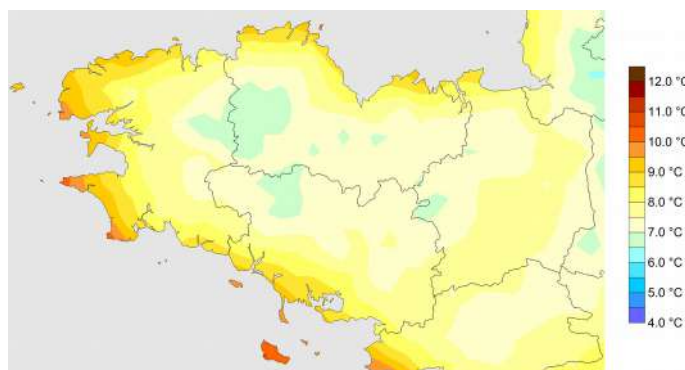


Illustration 26: Moyennes annuelles des températures minimales 1989-2018

La distribution spatiale des températures reste identique dans le temps : les températures maximales (de l'après-midi) augmentent en descendant vers le sud, les températures minimales (de la nuit) diminuent des côtes vers l'intérieur.

5.1.2 Evolution du froid

Même si elles se produisent hors période de végétation, les températures les plus basses observées la nuit en hiver (de décembre à mars) peuvent avoir un impact sur la santé des arbres. Les cartes ci-dessous montrent une progression globale de 1 degré entre 1959-1988 et 1989-2018. Le centre de la Bretagne affiche même un gain de l'ordre de 1,2 degré contre 0,8 à 1 degré ailleurs.

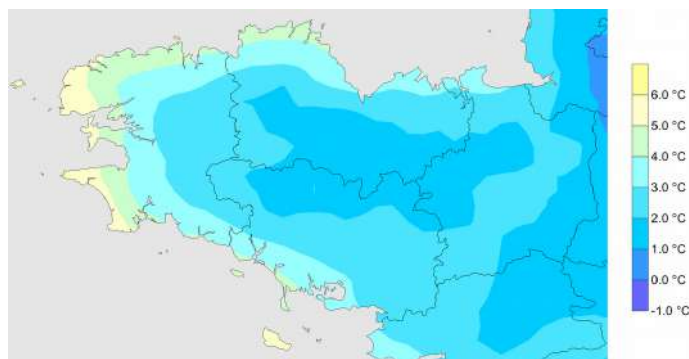


Illustration 28: Moyennes des températures minimales d'hiver 1959-1988

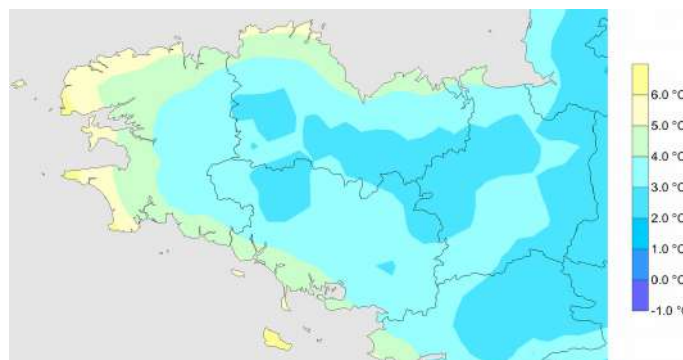


Illustration 27: Moyennes des températures minimales d'hiver 1989-2018

Le printemps est une période plus critique en raison des risques de gelée. En effet, si les températures de l'hiver écoulé sont plus douces que la normale, la période de végétation peut se trouver avancée et le gel occasionnel causer davantage de dégâts. Heureusement, l'examen des

jours de gel en mars-avril confirme les tendances déjà observées : malgré un nombre faible de gelées à cette saison, en particulier sur la côte, on constate une nette diminution des gelées entre 1959-1988 et 1989-2018 : de -4 à -6 jours pour les zones les plus froides, voire -10 jours sur les landes du Mené.

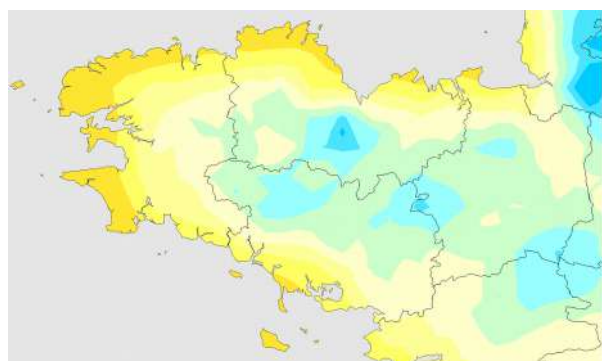


Illustration 29: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1959-1988)

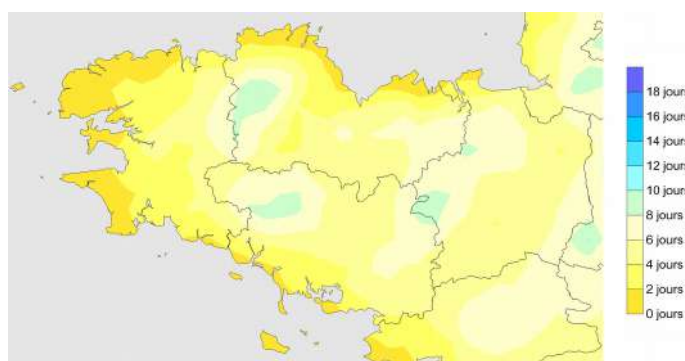


Illustration 30: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1989-2018)

Les séries chronologiques suivantes permettent de comparer les données de la forêt de Quénécan (56) située dans la zone où le froid disparaît plus vite et de la forêt de Molac (56) qui suit une progression plus conforme au reste de la région.

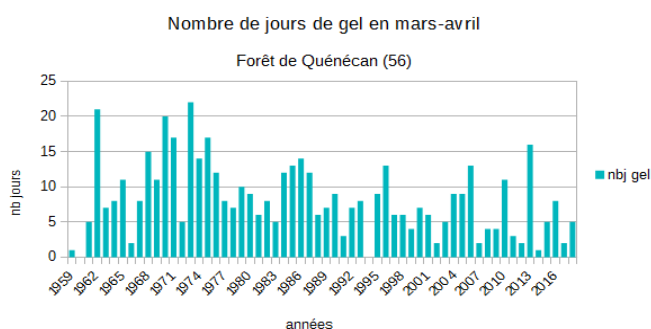


Illustration 31: Nombre de jours de gel en mars-avril à Quénécan (1959-2018)

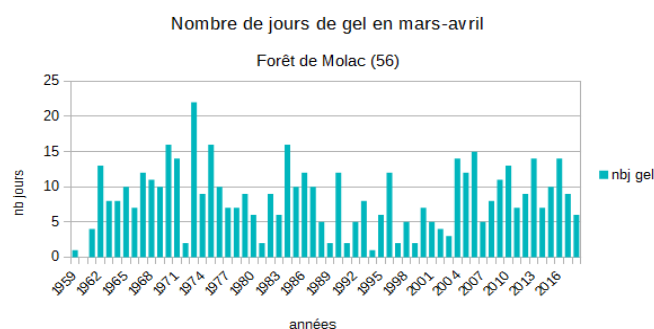


Illustration 32: Nombre de jours de gel en mars-avril à Molac (1959-2018)

La diminution des gelées au printemps amène la question de savoir si les dernières gelées de printemps interviennent désormais moins tard. Les tests qui ont été menés n'apportent pas de tendance significative sur les 2 sites forestiers bretons examinés (Huelgoat et Paimpont). On assiste donc à une diminution des gelées sans incidence à ce stade sur les « accidents » de type « gelée tardive ». La même absence de tendance est observée pour les premières gelées d'automne.

5.1.3 Evolution de la chaleur

Avec des effets différents, la chaleur peut avoir un fort impact sur la santé des forêts, suivant son intensité, sa durée et la sécheresse qui l'accompagne souvent. Les températures maximales en été (de juin à août) gagnent de 1 à 1,5 degré entre 1959-1988 et 1989-2018 sur le Finistère et l'Ille-et-Vilaine, alors que la hausse est plus limitée en centre Bretagne, de 0,2 à 0,6 degré seulement.

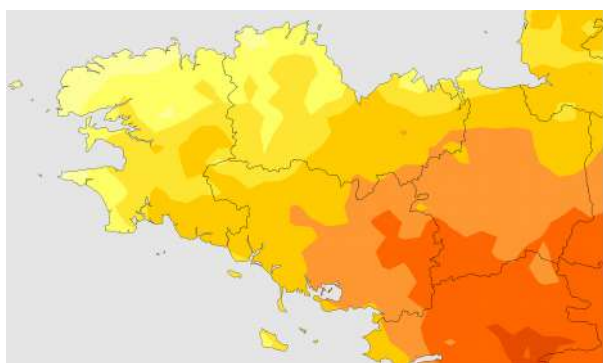


Illustration 33: Moyennes des températures maximales d'été (1959-1988)

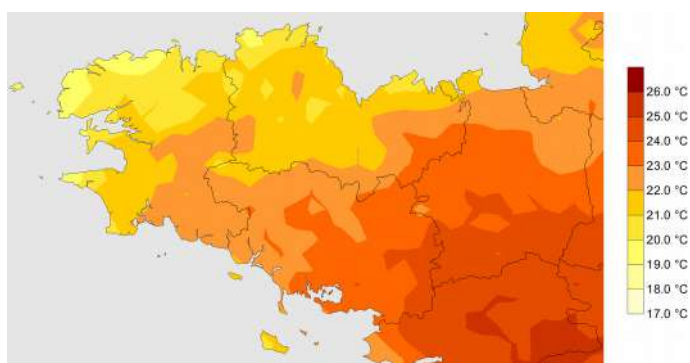


Illustration 34: Moyennes des températures maximales d'été (1989-2018)

Les jours de chaleur (> 25 °C) entre avril et octobre augmentent globalement d'une douzaine de jours entre 1959-1988 et 1989-2018, un peu moins sur le Léon et le pays de St-Brieuc (+ 4 à 8 jours) mais davantage sur les zones à la fois les plus méridionales et les plus intérieures (+ 14 à 18 jours pour le sud de l'Ille-et-Vilaine).

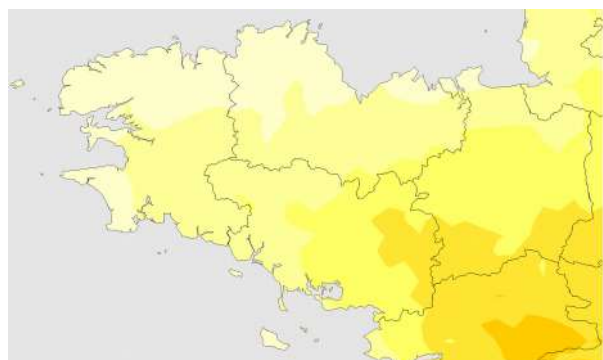


Illustration 35: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1959-1988)

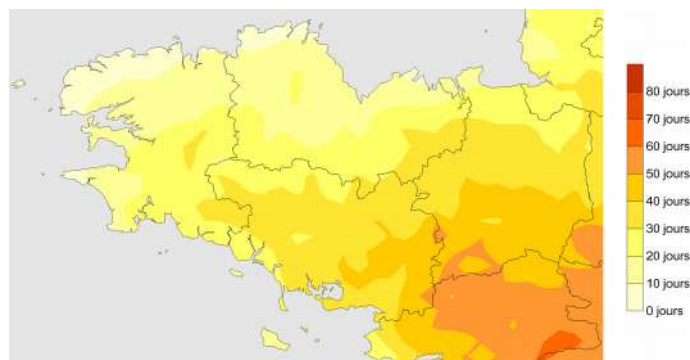


Illustration 36: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1989-2018)

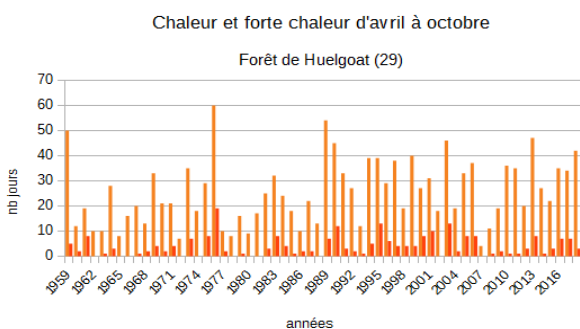


Illustration 37: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à Huelgoat (1959-2018)

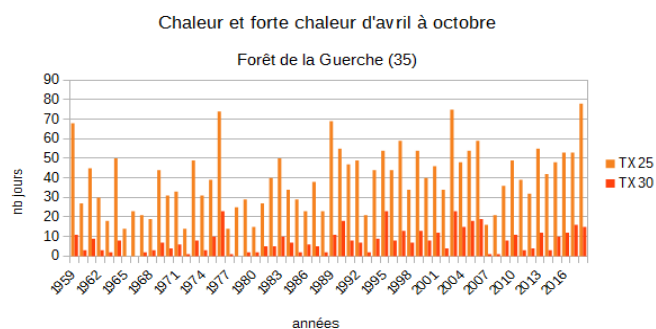


Illustration 38: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à La Guerche (1959-2018)

On constate globalement une fréquence plus grande du phénomène de forte chaleur. Sur la forêt de la Guerche, les années 2003 à 2006, puis 2015 à 2018 ont connu plus de 10 jours par an avec des températures égales ou supérieures à 30 °C. Ce n'est pas visible avant 2003 avec une telle intensité, mais si on considère le seuil 25 °C, ces mêmes années dépassent 40 jours ainsi que les années 1989-1992 et 1994 à 1997.

En forêt de Huelgoat, si on prend le seuil de 30 jours par an avec des températures égales ou supérieures à 25 °C, on décompte 5 années avant 1989 et 17 années à partir de 1989, dont les 3 dernières années !

Les nuits tropicales ($\geq 18\text{ °C}$) telles que définies au paragraphe 3.1 sont également en augmentation. Le phénomène est visible surtout sur le sud de l'Ille-et-Vilaine et l'est du Morbihan, mais également sur le littoral atlantique. Près des côtes, les températures nocturnes sont très proches de celles de la mer en été, et on y observe jusqu'à 100 à 120 nuits en plus sur la période de 30 ans, soit 3 à 4 nuits supplémentaires par an sur la côte atlantique !

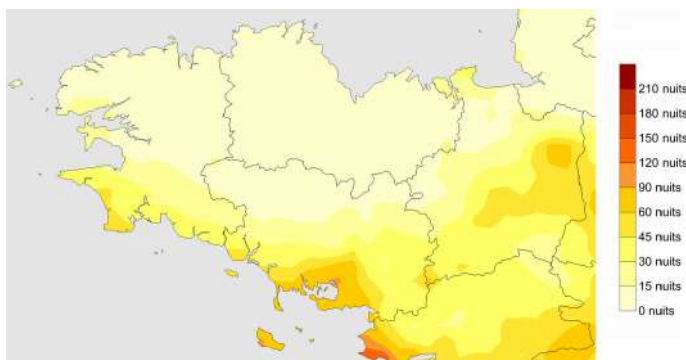


Illustration 39: Nombre total de nuits tropicales 1959-1988

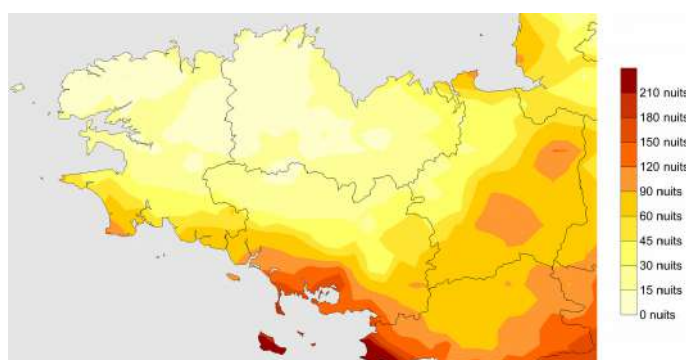


Illustration 40: Nombre total de nuits tropicales 1989-2018

Ces variations constatées sont aussi dépendantes de quelques années marquantes comme

l'année 2003 dont les températures estivales ont un poids important dans les moyennes 1979-2008 et 1989-2018.

La série chronologique du site de La Guerche, plus touché par le phénomène, montre une nette progression des nuits très douces ($\geq 18^\circ\text{C}$) : de phénomène rare, il devient présent quasiment tous les ans en s'accroissant.

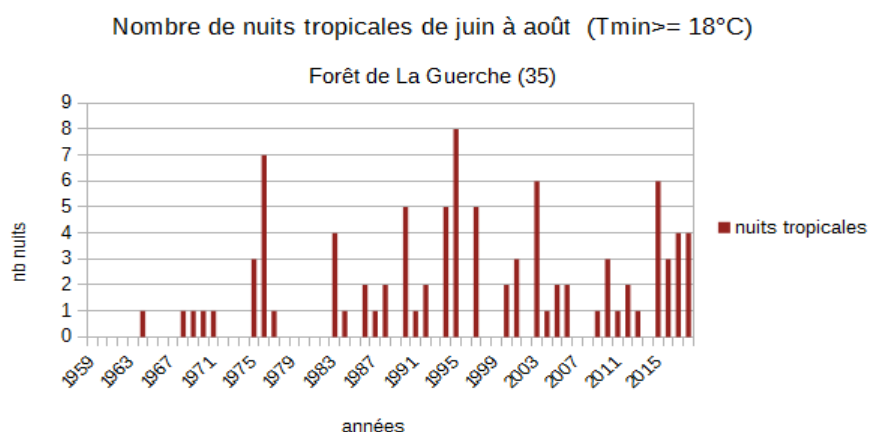


Illustration 41: Nombre de nuits à 18°C ou plus de juin à août à La Guerche (1959-2018)

5.2 Les précipitations

Comme évoqué précédemment, il n'existe pas de tendance marquée de la pluviométrie à l'échelle nationale ni à l'échelle régionale, car on n'observe pas de changement de régime de temps. Les variations observées sont souvent dépendantes de périodes ou d'années très pluvieuses, comme l'hiver 2000-2001, ou au contraire, très sèches comme 1989-1990. Ainsi, entre 1959-1988 et 1969-1998, les cumuls diminuent, puis augmentent sensiblement entre 1969-1998 et 1979-2008, et baissent de nouveau entre 1979-2008 et 1989-2018. Ce constat fait, on procédera comme pour les températures en utilisant les périodes extrêmes 1959-1988 et 1989-2018.

5.2.1 Précipitations annuelles

On observe une augmentation des cumuls de précipitations entre les 2 périodes, de l'ordre de 5 à 10 %, qui peut être liée au poids important des hivers 2000-2001 et 2013-2014 pour la période 1989-2018. La distribution spatiale des précipitations évolue peu, les forts cumuls se produisent à l'ouest où les reliefs sont plus marqués et captent sur leurs versants sud et ouest l'essentiel du contenu des perturbations atlantiques. L'Ille-et-Vilaine et l'est des Côtes-d'Armor, à l'abri de ces reliefs, se retrouvent moins arrosés.

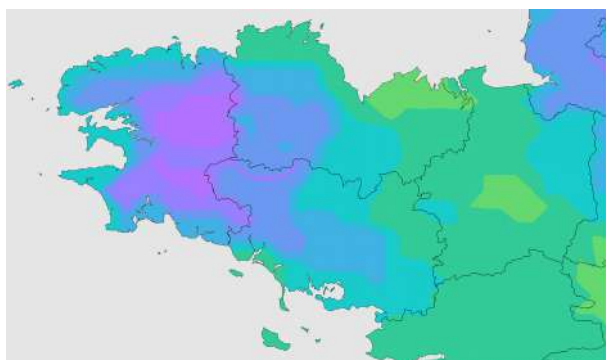


Illustration 42: Cumuls moyens annuels de précipitations 1959-1988



Illustration 43: Cumuls moyens annuels de précipitations 1989-2018

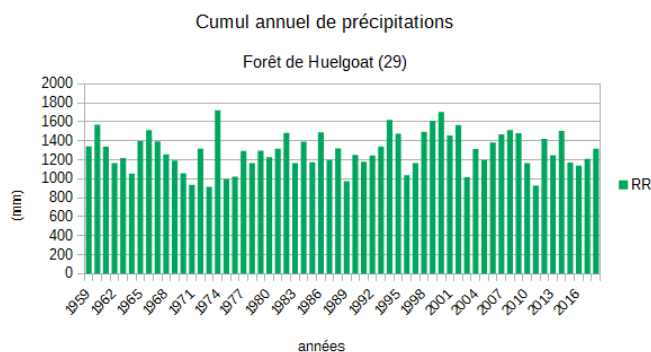


Illustration 44: Cumuls annuels de précipitations à Huelgoat 1959-2018

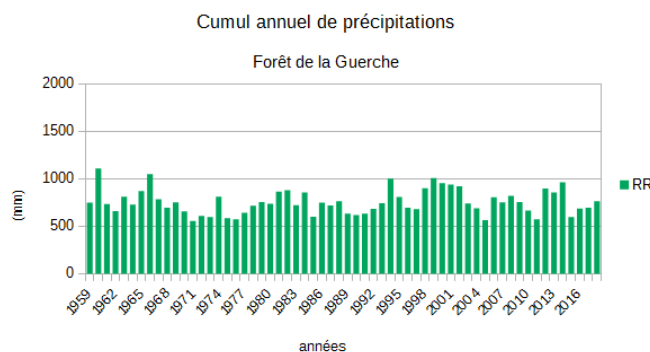


Illustration 45: Cumuls annuels de précipitations à La Guerche 1959-2018

Pour savoir quelle saison apporte sa plus forte contribution à la hausse constatée, la pluviométrie moyenne des 2 périodes de 30 ans est comparée saison par saison à Brest et à Rennes. On constate que la pluviométrie printanière subit une légère diminution, plus forte à l'ouest qu'à l'est, tandis que les pluviométries d'automne et d'hiver gagnent autour de 5 % et que celles d'été progressent beaucoup plus vite à l'ouest (+20 %) qu'à l'est (+4 %).

période de 30 ans	printemps		hiver		automne		été		année	
	Brest	Rennes	Brest	Rennes	Brest	Rennes	Brest	Rennes	Brest	Rennes
1959-1988	260	161	388	180	328	186	167	130	1143	657
1989-2018	247	158	413	192	341	194	203	135	1205	679

Illustration 46: Cumuls moyens de précipitations (mm) par saison

La hausse sensible des pluies estivales à l'ouest semble être associée à une augmentation du nombre de jours de pluie, visible sur l'année à l'ouest tandis qu'au sud-est, cet indicateur semble plutôt stationnaire ou en légère diminution.

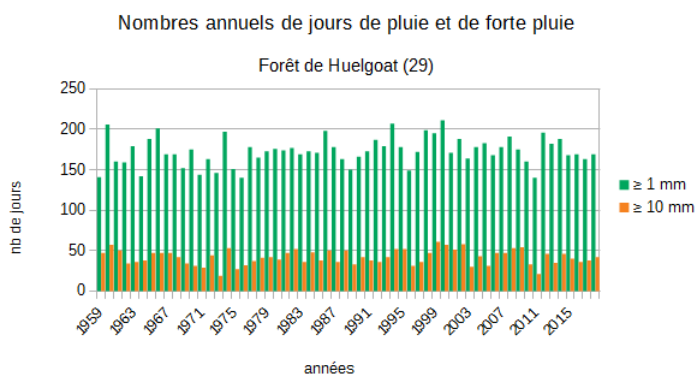


Illustration 47: Evolution chronologique des jours de pluie annuels à Huelgoat (1959-2018)

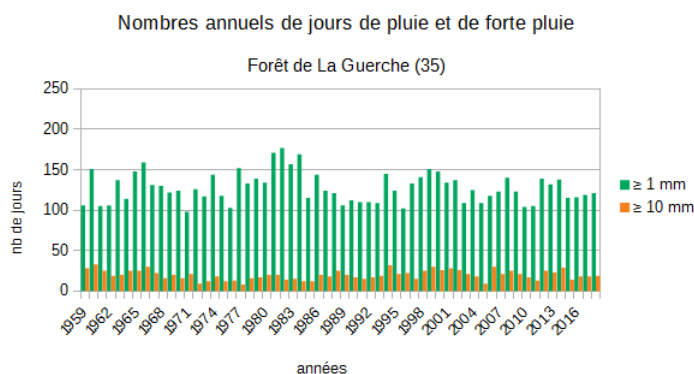


Illustration 48: Evolution chronologique des jours de pluie annuels à La Guerche (1959-2018)

5.2.2 Précipitations estivales (juin à août)

L'augmentation constatée sur cet indicateur est de l'ordre de 15 % sur les reliefs bretons, inférieure à 5 % ailleurs. Par rapport aux cumuls annuels, il existe un fort contraste entre les zones de relief et les zones abritées. Les pluies d'été, d'origine plus instable, ont un comportement différent des précipitations du reste de l'année, en accentuant l'arrosage des zones plus élevées.

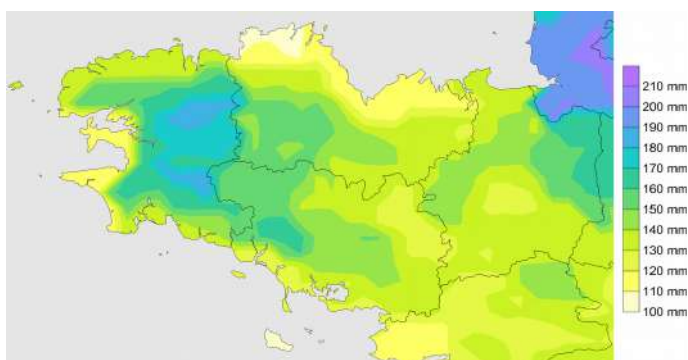


Illustration 49: Cumuls moyens de précipitations en été 1959-1988

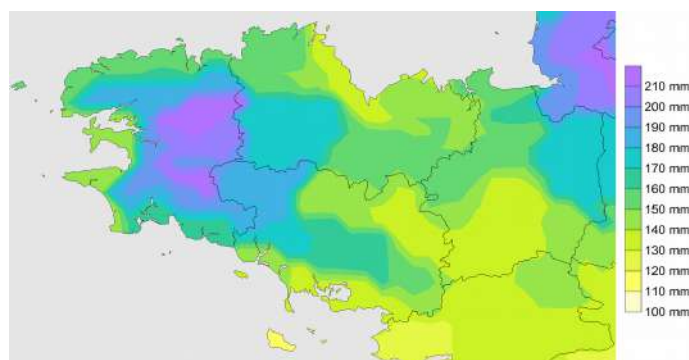


Illustration 50: Cumuls moyens de précipitations en été 1989-2018

5.2.3 Le nombre de jours de pluie (≥ 1 mm) en été (juin à août)

Les jours de pluie de juin à août sont un peu plus nombreux puisqu'entre les 2 périodes extrêmes, la saison gagne en moyenne 2 jours, sauf sur l'extrême sud-est de la région. Cette hausse est minime par rapport au nombre de jours de pluie, mais en l'associant à l'augmentation des précipitations estivales, on peut en déduire que les épisodes de pluie ne sont pas plus intenses. En été, il pleut en moyenne 1 jour sur 3 sur les zones de relief, 1 jour sur 4 ailleurs.

Période de 30 ans	Huelgoat	La Guerche
1959-1988	30	25
1989-2018	34	23

Illustration 51: Evolution du nombre de jours de pluie à Huelgoat et La Guerche

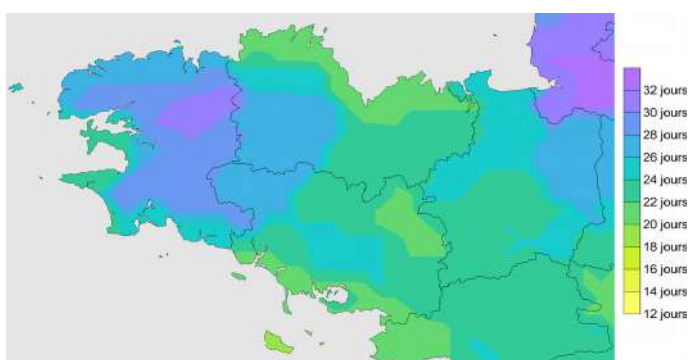


Illustration 52: Nombre moyen de jours de pluie en été 1959-1988

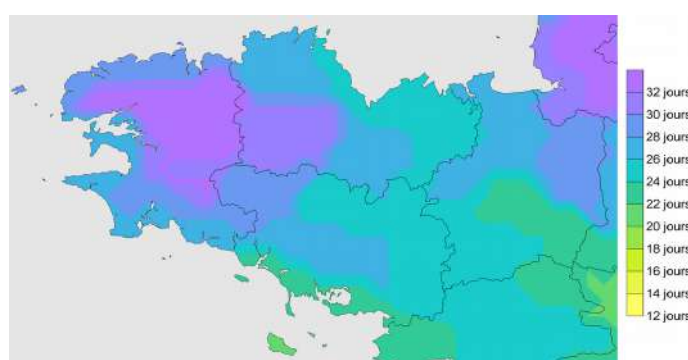


Illustration 53: Nombre moyen de jours de pluie en été 1989-2018

5.2.4 Précipitations de la période de végétation (avril à octobre)

L'augmentation constatée sur cet indicateur est de l'ordre de 10 % sur les reliefs bretons, inférieure à 5 % ailleurs. On en déduit que :

- les précipitations d'été ont un poids important dans l'augmentation de la pluviométrie sur une grande partie ouest de la Bretagne, et pas seulement les hivers pluvieux
- l'apport des saisons intermédiaires a tendance à minimiser cette augmentation, on a vu plus haut que la baisse de la pluviométrie printanière s'équilibre plus ou moins avec la hausse de la pluviométrie d'automne.

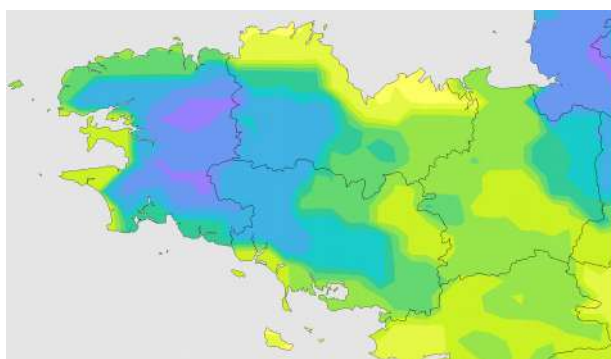


Illustration 54: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1959-1988)

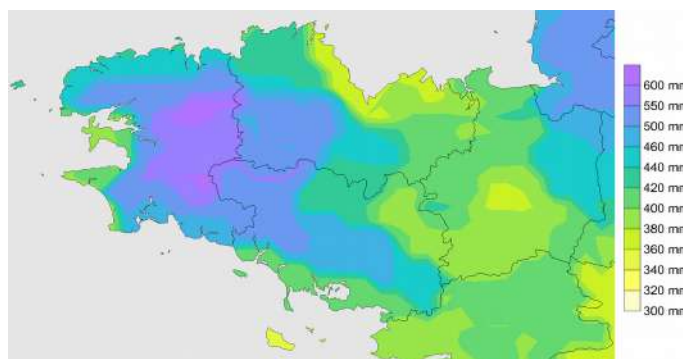


Illustration 55: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1989-2018)

5.3 L'évapotranspiration potentielle ETP

5.3.1 L'ETP annuelle

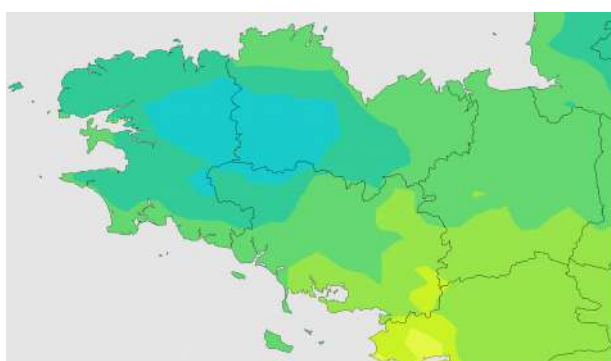


Illustration 57: Cumuls moyens annuels d'ETP 1959-1988

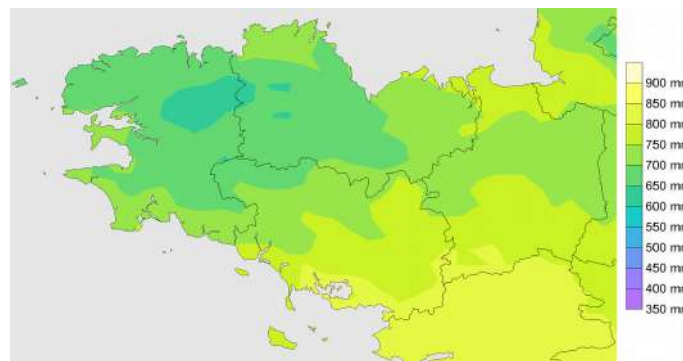


Illustration 56: Cumuls moyens d'ETP 1989-2018

L'élévation des températures (et probablement aussi celle du rayonnement) entraîne une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Cette augmentation est sensible à chaque

nouvelle période de 30 ans, totalisant 50 à 100 mm entre 1959-1988 et 1989-2018, soit 15 à 20 % pour un territoire couvrant le sud-ouest des Côtes-d'Armor (Argoat) et le nord-ouest du Morbihan (est des Montagnes Noires) et inférieure à 10 % ailleurs. Sur la zone concernée par la plus forte hausse d'ETP, on peut établir un lien avec la hausse marquée des températures maximales annuelles.

5.3.2 L'ETP estivale (de juin à août)

L'évapotranspiration subit entre 1959-1988 et 1989-2018 une augmentation de 20 à 60 mm, ce qui représente moins de 10 % sauf pour le nord de l'Ille-et-Vilaine (bocage breton), le sud-ouest des Côtes-d'Armor et le nord-ouest du Morbihan où l'augmentation représente 15 à 20 %.

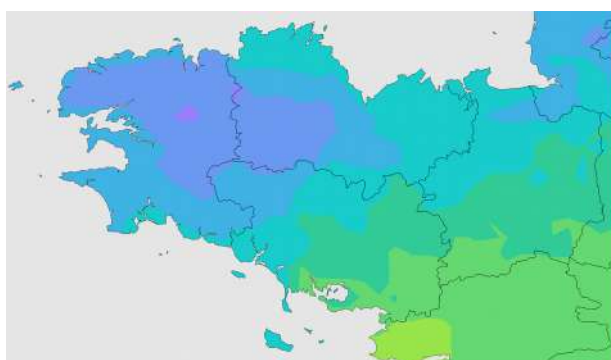


Illustration 58: Cumuls moyens d'ETP en été 1959-1988

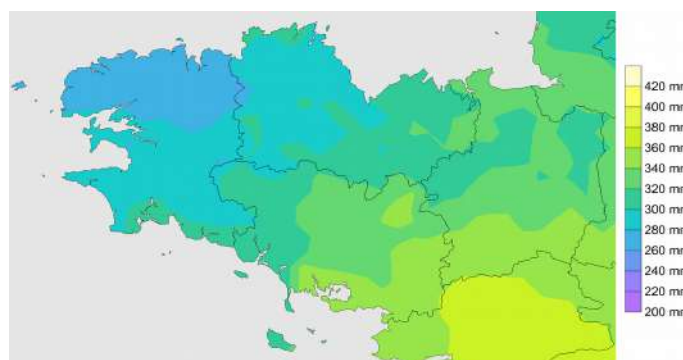


Illustration 59: Cumuls moyens d'ETP en été 1989-2018

5.3.3 L'ETP en période de végétation (d'avril à octobre)

Les écarts entre les deux cartes montrent une forte augmentation de l'évapotranspiration potentielle en période de végétation. Les valeurs de la hausse sont de l'ordre de 50 à 100 mm ce qui correspond aux pourcentages déjà évoqués pour l'été ou l'année. La zone connaissant la plus forte augmentation de l'évapotranspiration potentielle est la même qu'en été, le bocage breton et l'est des Monts-d'Arrée et des Montagnes Noires.

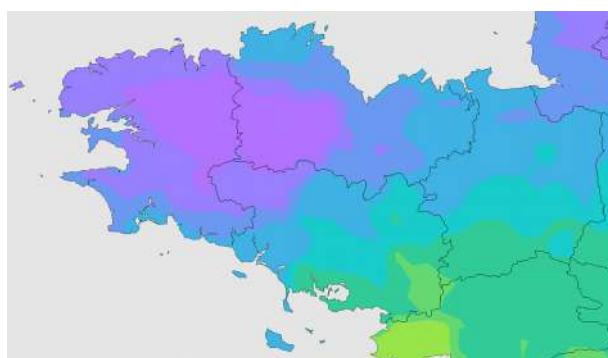


Illustration 61: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1959-1988)

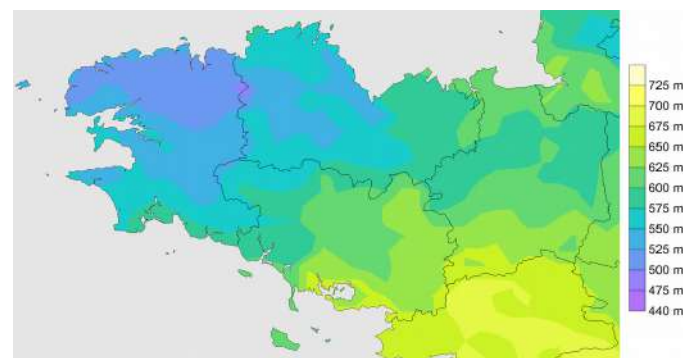


Illustration 60: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1989-2018)

5.4 Indicateurs bioclimatiques

Les précipitations sont en légère augmentation, l'ETP est en forte augmentation, le bilan P-ETP permet de quantifier les effets combinés de ces 2 indicateurs.

5.4.1 Bilans hydriques climatiques annuels

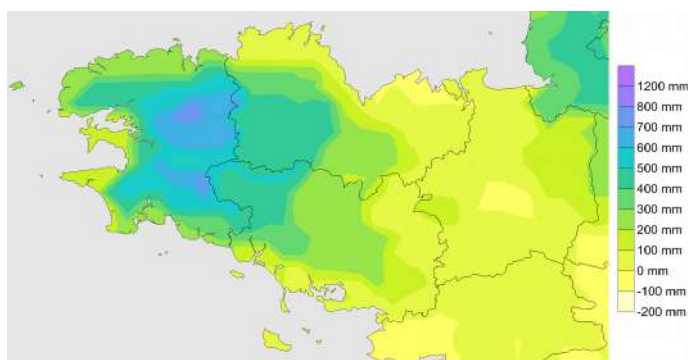


Illustration 62: Bilans moyens annuels P-ETP 1959-1988

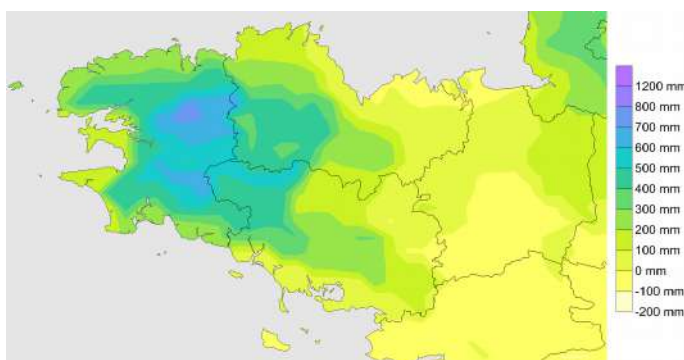


Illustration 63: Bilans moyens annuels P-ETP 1989-2018

Une grande moitié ouest de la région reste stable alors qu'on remarque une baisse de 40 à 80 mm sur une grande partie de l'Ille-et-Vilaine, ce qui représente de -20 à -40 % du bilan annuel de la période 1959-1988 !

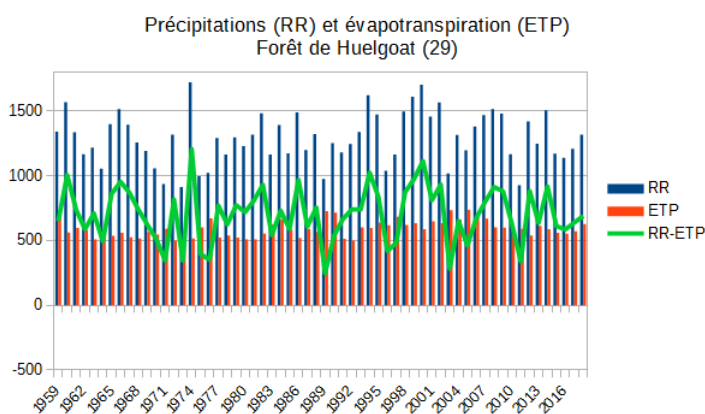


Illustration 64: Evolution du bilan hydrique annuel à Huelgoat (1959-2018)

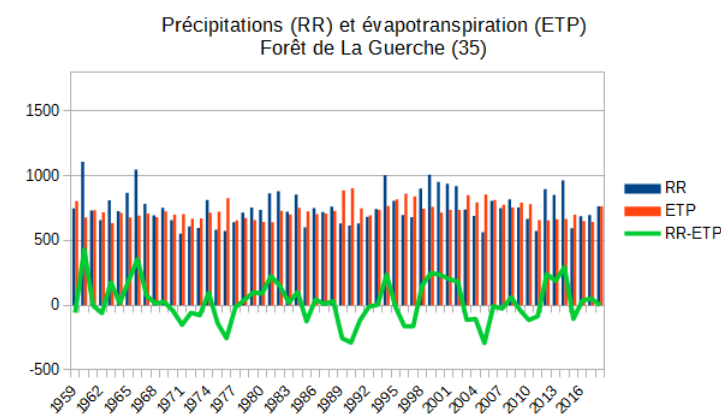


Illustration 65: Evolution du bilan hydrique annuel à La Guerche (1959-2018)

Les 2 graphiques ci-dessus permettent de comparer les bilans hydriques de l'ouest et de l'est de la région. On y constate l'augmentation de l'ETP associée à une forte variabilité de la pluviométrie. Des périodes présentent des bilans remarquables comme les années sèches 1989-1990 ou 1976.

5.4.2 Bilans hydriques climatiques en été (de juin à août)

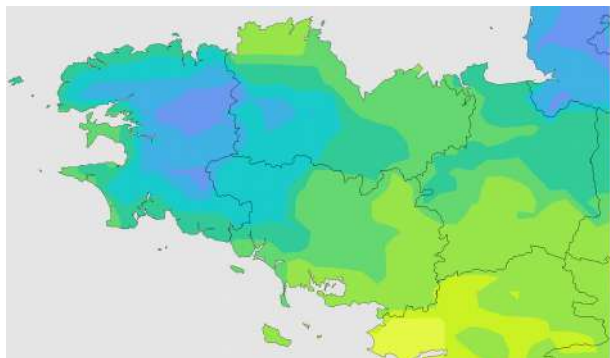


Illustration 66: Bilans moyens P-ETP en été 1959-1988

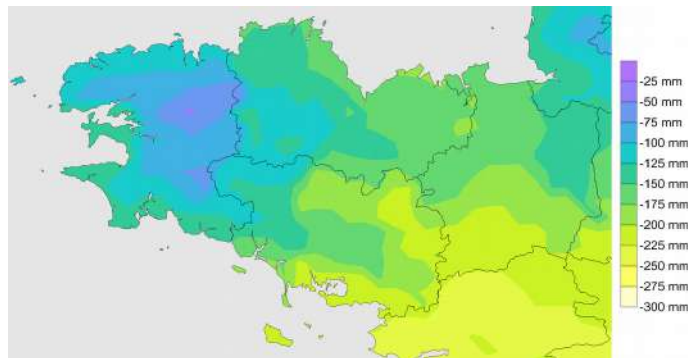


Illustration 67: Bilans moyens P-ETP en été 1989-2018

En été, la baisse de bilan entre les 2 périodes n'est plus aussi visible ! On constate que l'ouest de la région voit son bilan remonter légèrement, pendant que l'est de la région connaît une baisse d'environ 20 mm, soit 10 à 15 %. Le phénomène est plus sensible sur l'Ille-et-Vilaine et le sud-est du Morbihan qui correspondent à l'intérieur et au sud de la région.

5.4.3 Bilans hydriques climatiques en période de végétation (avril à octobre)

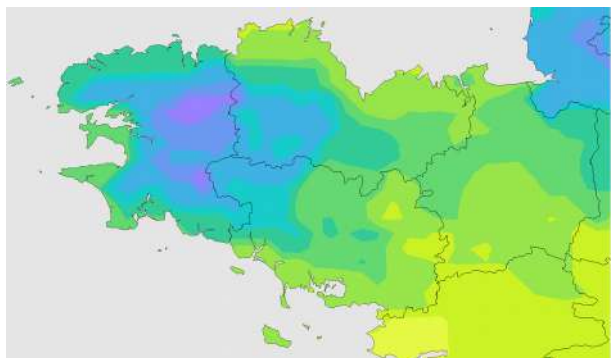


Illustration 68: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1959-1988)

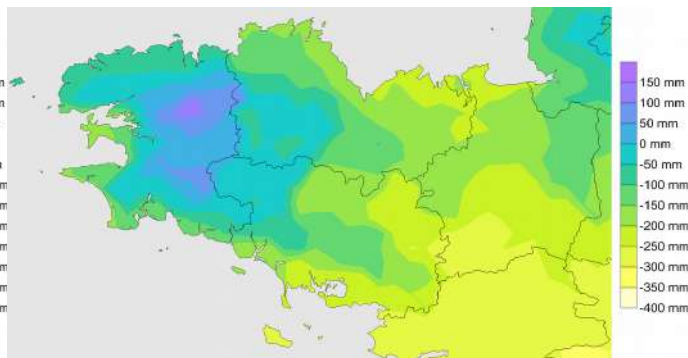


Illustration 69: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1989-2018)

Pour cette période, la baisse du bilan entre les 2 périodes varie de 50 mm à l'ouest à 80 mm au sud de l'Ille-et-Vilaine, soit de 30 % à 40 % du nord-ouest au sud-est de la région. La baisse du bilan est plus limitée que sur l'année, peut-être à cause de l'incidence importante de la hausse des températures en automne et en hiver.

5.4.4 Le déficit hydrique relatif annuel (ETP-ETR)/ETP

Le terme d'évapotranspiration réelle n'est pas directement disponible dans la base de données issue de la chaîne SIM car il est intégré pour les besoins des calculs dans un bilan d'évaporation totale, incluant évaporation de l'eau interceptée par la végétation, évaporation du sol nu et sublimation de la neige et de la glace (voir glossaire). Pour ce paramètre, il faudra donc s'en tenir à son évolution au fil du temps pour traduire une tendance et ne pas comparer ses valeurs à des références habituellement utilisées dans l'activité forestière.

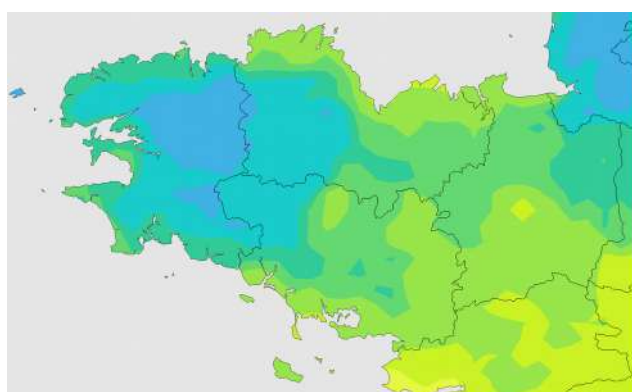


Illustration 70: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1959-1988

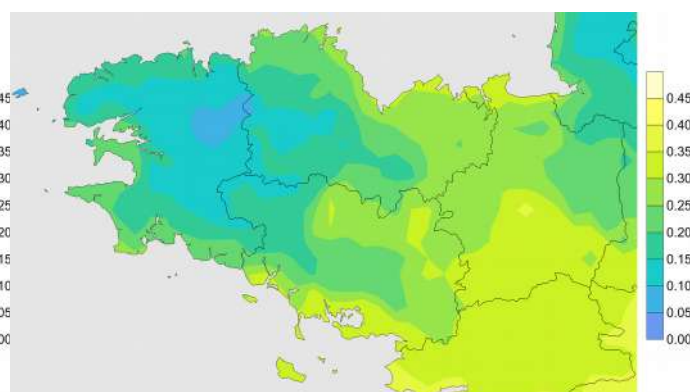


Illustration 71: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1989-2018

D'une période à l'autre, la situation reste assez semblable pour l'ouest de la Bretagne, plus précisément sur les zones de relief, alors que l'est du Morbihan et l'Ille-et-Vilaine voient leur déficit hydrique augmenter de 0,05, soit 20 à 25 % du déficit hydrique !

5.4.5 Mois secs et subsecs

L'intérêt de ces indicateurs est de pouvoir comparer un climat en cours d'évolution à un autre climat identifié. Ainsi un climat peut se caractériser par une année-type comportant un nombre défini de mois secs ($P < 2T$) ou subsecs ($2T < P < 3T$), où T et P sont respectivement la température moyenne mensuelle et la pluviométrie moyenne mensuelle sur 30 ans. Ce calcul ne permet pas d'identifier des mois secs sur la Bretagne pour les périodes 1959-1988 et 1989-2018. En revanche, si on cherche à déterminer pour chaque mois s'il est sec ou subsec et en cumulant ces mois sur 30 ans, on constate que l'indicateur « mois secs » ($P < 2T$) a baissé entre 1959-1988 et 1989-2018, perdant en moyenne 5 mois secs sur 30 ans, soit 10 %, voire 10 à 15 mois sur le sud du Finistère, des Côtes-d'Armor et l'est du Morbihan.

On voit nettement sur les graphiques des séries chronologiques que la période 1976-1991 a été plus critique pour l'ouest de la Bretagne. A l'est, le nombre de mois secs est 2 fois plus important, mais la chronologie ne met pas en évidence de période vraiment plus sèche, la succession de 2 années plus sèches se retrouve à plusieurs reprises depuis 1959.

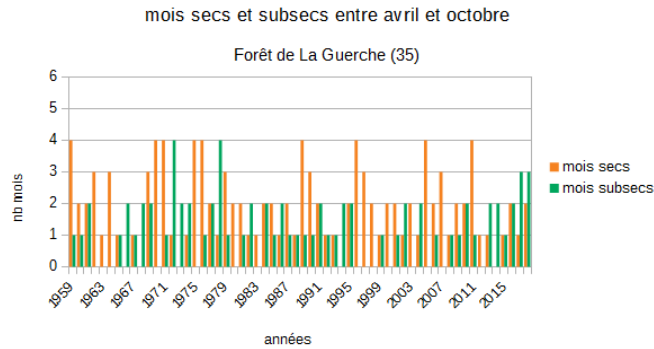
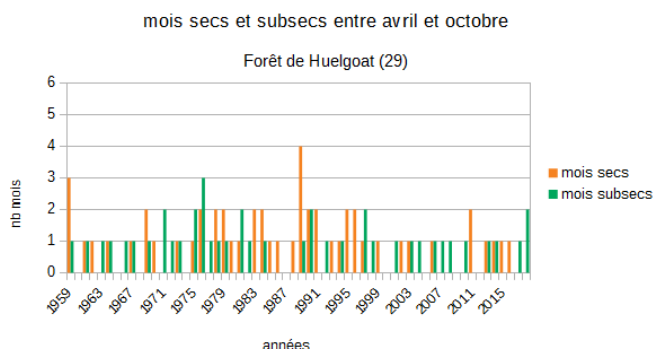


Illustration 73: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre à Huelgoat (1959-2018)

Illustration 72: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre à La Guerche (1959-2018)

Le nombre de mois subsecs ($2T < P < 3T$) est en baisse également et la méthode de calcul suivant l'année-type permet de cartographier les 2 périodes 1959-1988 et 1989-2018. La baisse la moins forte est observée sur l'est de la région, le sud-est de l'Ille-et-Vilaine montre même une faible augmentation de ces mois subsecs. C'est donc la seule zone potentiellement impactée par cet indicateur.

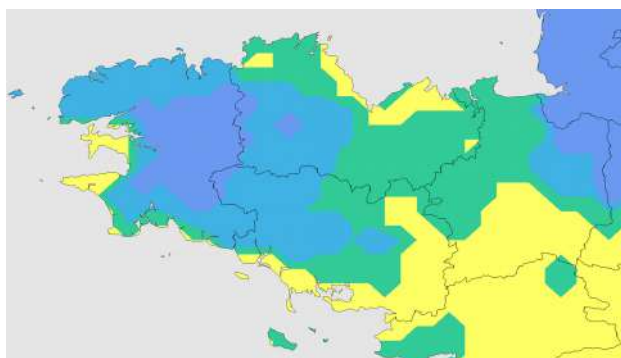


Illustration 74: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1959-1988

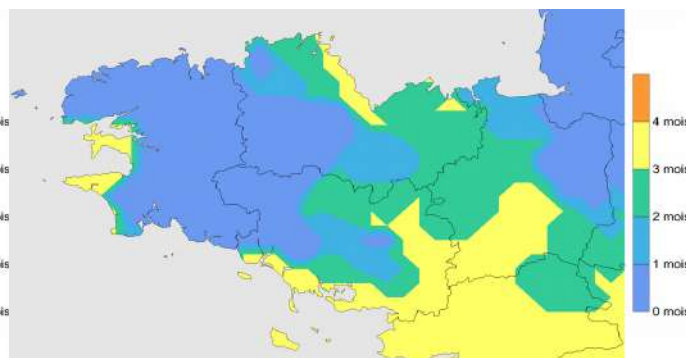


Illustration 75: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1989-2018

5.5 Synthèse des tendances depuis 1959

La Bretagne connaît comme le reste du territoire français une hausse générale des températures. L'examen des indicateurs liés directement à la température a permis de distinguer plusieurs territoires en Bretagne :

- le sud de l'Ille-et-Vilaine et l'est du Morbihan connaissent la hausse la plus rapide des températures, en particulier en été ; les conséquences sont par exemple l'augmentation des périodes de chaleur ou de forte chaleur et des nuits où la température ne redescend pas en dessous de 18 °C ainsi que la diminution des épisodes de gel
- la majeure partie du Finistère sauf le littoral et le Léon connaît une hausse marquée des températures de la journée
- le littoral atlantique est également touché par la hausse des températures, en particulier les températures nocturnes de l'été, en relation avec un probable réchauffement de la mer
- le centre de la Bretagne (territoire compris dans le triangle St-Brieuc - Pontivy - Josselin) connaît un net radoucissement des températures les plus froides, en progressant moins vite que ses voisins dans les situations chaudes. La topographie de ce territoire lui affecte un comportement différent des territoires voisins

D'autre part, la hausse systématique des températures au fil des saisons implique un allongement de la saison estivale avec ses effets liés à la forte chaleur et un allongement de la saison de végétation amenant un développement de la végétation de plus en plus précoce, des gelées moins fréquentes mais malheureusement, pas de certitude sur des dates de dernières gelées moins tardives.

A ces constats s'ajoute l'effet répétitif de saisons estivales plus chaudes dont il est difficile d'estimer les impacts.

La pluviométrie ne présente pas la même progression que les températures. Les 4 périodes de 30 ans disponibles montrent des fluctuations et ne peuvent permettre de conclure à des tendances. Toutefois, la comparaison des indicateurs associés entre 1959-1988 et 1989-2018 révèle une augmentation des précipitations de l'été à l'hiver, et une diminution printanière peu marquée (-5 % au plus). Le Finistère et plus généralement les reliefs de l'ouest breton bénéficient d'une hausse plus importante de la pluviométrie par rapport au reste de la région, dont une partie est due aux pluies d'été. Cette augmentation est associée à un nombre de jours de pluie

légèrement croissant, donc on ne peut pas l'imputer à des pluies qui seraient plus intenses (orages par exemple). En lien avec une augmentation marquée de la pluviométrie d'été sur la plus grande partie ouest de la Bretagne, on y constate une diminution du risque de mois secs et subsecs.

En revanche l'est de la région, en particulier l'est du Morbihan et le sud-ouest de l'Ille-et-Vilaine, subissent une augmentation d'ETP plus forte que celle de la pluviométrie, c'est donc une zone susceptible de connaître des situations plus critiques, avec une légère augmentation possible du nombre de mois secs à surveiller.

6 Les projections du futur

Le changement climatique fait partie de nos préoccupations quotidiennes et doit être pris en compte dans la gestion des ressources telles que la forêt. Les projections sur les décennies à venir ne peuvent pas descendre à une échelle plus fine que l'échelle régionale, et s'appréhendent au travers de moyennes, sur une période suffisamment longue, une à plusieurs décennies en général, et non pas sur une année.

6.1 La modélisation et les scénarios

Le climat futur est notamment fonction des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines. Or, les émissions humaines dépendent de notre consommation énergétique : chauffage et climatisation, transports, production de biens de consommation, activités agricoles, etc. Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de la démographie mondiale et des modes de vie à travers la planète.

Dans les premiers rapports du GIEC (2001 et 2007), l'analyse reposait sur un faisceau de futurs possibles de nos sociétés et de nos modes de vie. Ces scénarios socio-économiques (SRES), organisés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2), étaient traduits chacun en termes d'émissions de gaz à effet de serre pour le XXIème siècle. Ces évolutions des émissions ou des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles simulant le climat futur. Les scénarios climatiques émergeant de ces simulations étaient à leur tour utilisés dans des modèles d'impacts permettant notamment de simuler les effets du climat sur les écosystèmes ou l'hydrologie. Ces résultats étaient enfin utilisés dans des études socio-économiques sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques.

Lors de la préparation du 5e rapport de 2014, une approche différente a été adoptée afin d'accélérer le processus d'évaluation. Pour analyser le futur du changement climatique, les experts du GIEC ont cette fois défini a priori quatre trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés RCP («Representative Concentration Pathways» ou «Profils représentatifs d'évolution de concentration»).

Ces RCP sont utilisés par les différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes ...), qui travaillent pour la première fois en parallèle. Les climatologues

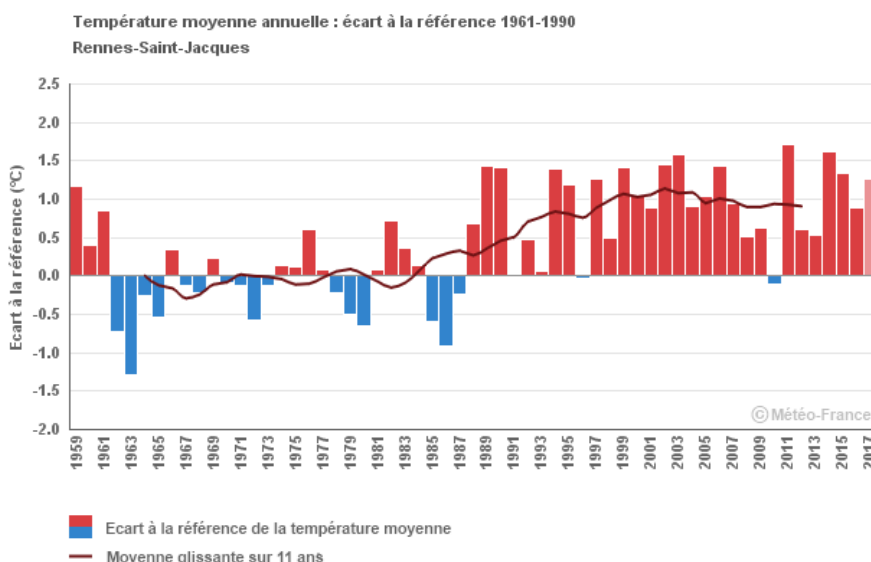
en déduisent des projections climatiques globales ou régionales. Les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques compatibles avec les RCP.

Les quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (RCP) retenus par les experts du GIEC pour le 5e rapport ont été traduits en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Le bilan radiatif représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat comme, par exemple la concentration en gaz à effet de serre, ce bilan se modifie : on parle de forçage radiatif.

Les 4 profils RCP correspondent chacun à une évolution différente de ce forçage à l'horizon 2300. Ils sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m² (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe.

6.2 Constat sur la situation actuelle

En Bretagne comme sur l'ensemble du territoire métropolitain, le changement climatique se traduit principalement par une hausse des températures, marquée surtout depuis les années 1980.



À l'échelle saisonnière, ce sont le printemps et l'été qui se réchauffent le plus, avec des hausses de 0,3 °C à 0,4 °C par décennie. En automne et en hiver, les tendances sont également positives

mais avec des valeurs moindres, de l'ordre de +0,2 °C à +0,3 °C par décennie.

En cohérence avec cette augmentation des températures, le nombre de journées chaudes (températures maximales supérieures ou égales à 25 °C) augmente et le nombre de jours de gelées diminue. Cette dernière évolution est plus sensible dans l'intérieur des terres que sur le littoral.

Les vagues de chaleur recensées depuis 1947 en Bretagne ont été sensiblement plus nombreuses au cours des 36 dernières années que sur la période antérieure.

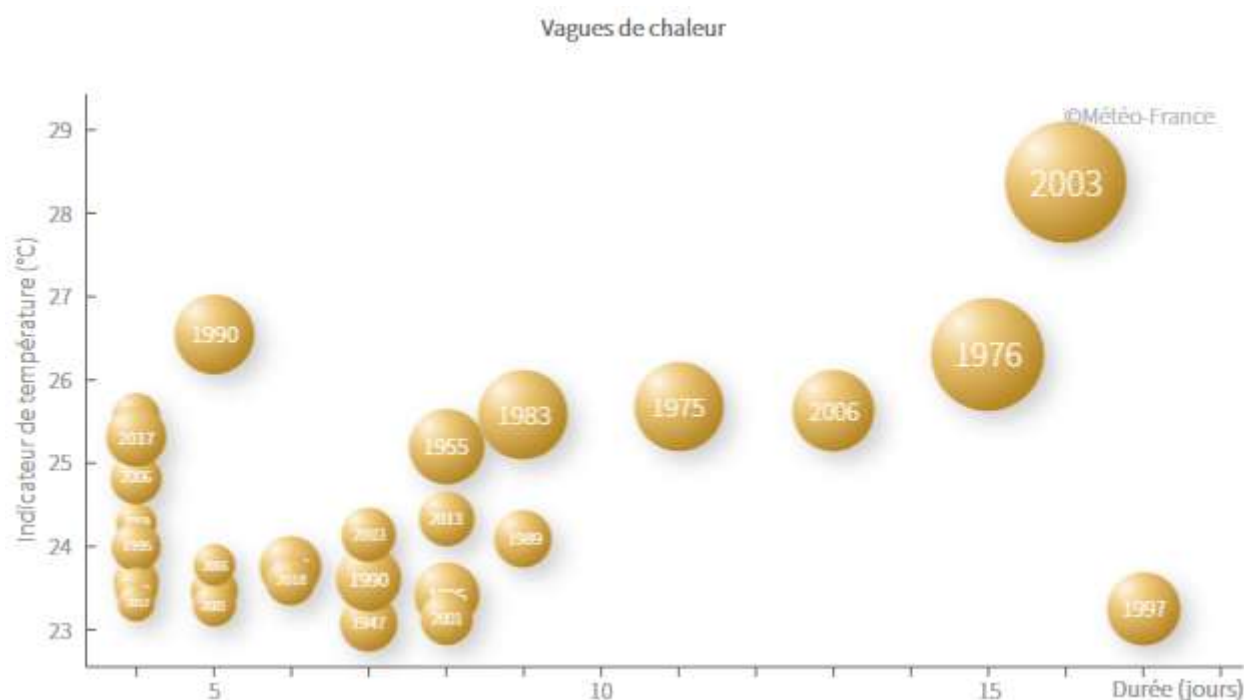


Illustration 76: Vagues de chaleur en Bretagne depuis 1947

Les canicules observées en Bretagne du 2 au 17 août 2003 et du 22 juin au 6 juillet 1976 sont de loin les plus sévères survenues sur la région. C'est aussi en 2003 qu'a été observée la journée la plus chaude¹ depuis 1947

L'évolution des précipitations est moins nette, car la variabilité d'une année sur l'autre est importante. Sur la période 1959-2018, les tendances annuelles et saisonnières sont plutôt à la hausse.

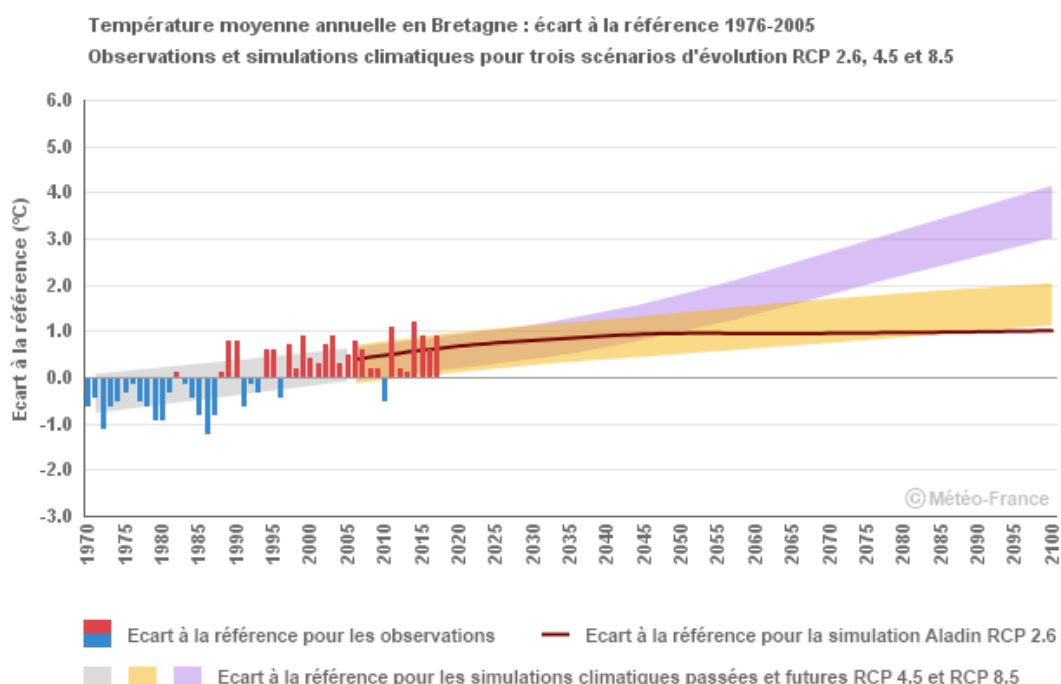
1 Au moment de la finalisation de ce rapport, de nouveaux records sont tombés en Bretagne lors de la vague de chaleur du 23 au 25 juillet 2019, survenant après une première vague inédite du 26 au 29 juin (voir <http://www.meteofrance.fr/actualites>).

Malgré l'augmentation de la température, les changements d'humidité des sols sont peu marqués, et on note peu d'évolution de la fréquence et de l'intensité des sécheresses.

Le site de Météo-France consacré au changement climatique donne des indications ciblées par région (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>)

6.3 Quel futur climatique pour nos régions ?

En Bretagne, les projections climatiques montrent une poursuite du réchauffement annuel jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, l'évolution de la température moyenne annuelle diffère significativement selon le scénario considéré. Le seul qui stabilise le réchauffement est le scénario RCP2.6 (lequel intègre une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO₂). Selon le RCP8.5 (scénario sans politique climatique), le réchauffement pourrait dépasser 3 °C à l'horizon 2071-2100. Le nombre de journées chaudes est également en augmentation en lien avec la poursuite du réchauffement. Sur la première partie du XXI^e siècle, cette augmentation est similaire d'un scénario à l'autre. À l'horizon 2071-2100, cette augmentation serait de l'ordre de 12 jours par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP4.5 (scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂), et de 38 jours selon le RCP8.5.

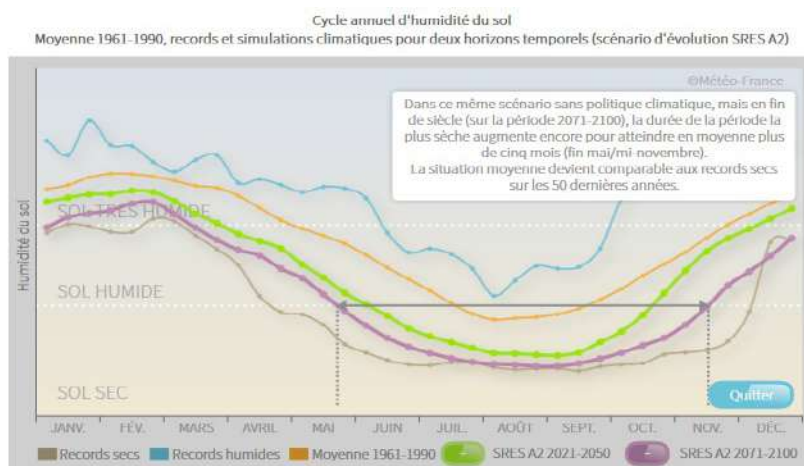
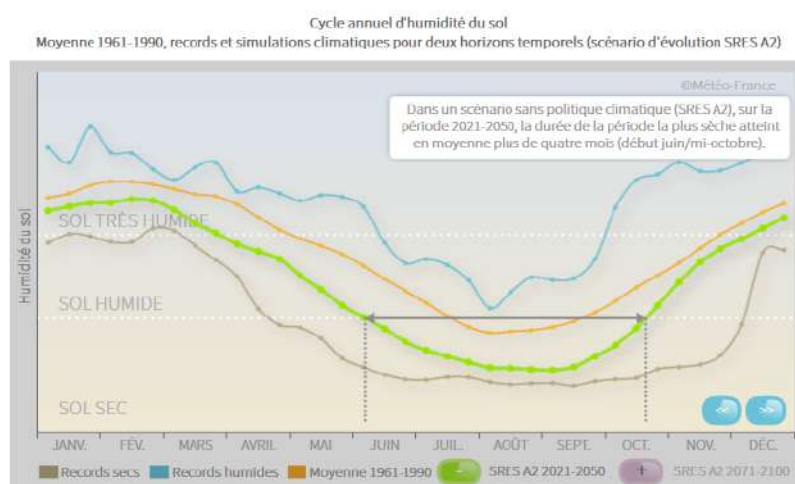
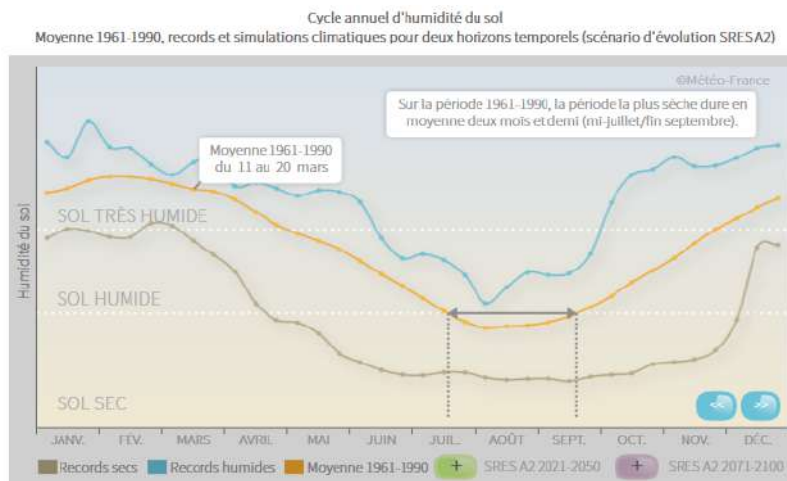


Le nombre de gelées est en diminution en lien avec la poursuite du réchauffement. Jusqu'au milieu du XXI^e siècle cette diminution est assez similaire d'un scénario à l'autre. À l'horizon 2071-2100, cette diminution serait de l'ordre de 11 jours par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP4.5 (scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂), et de 17 jours selon le RCP8.5.

Les projections climatiques montrent peu d'évolution des précipitations annuelles d'ici la fin du XXI^e siècle.

L'évolution de l'humidité du sol au cours de l'année observe en moyenne un cycle annuel représenté par la courbe orange des graphiques ci-contre. Elle est comprise entre les records humides (courbe bleue) et les records secs (courbe brune). La comparaison de ce cycle annuel d'humidité du sol sur la Bretagne entre la période de référence climatique 1961-1990 et les horizons temporels proches (2021-2050) ou lointains (2071-2100) sur le XXI^e siècle (selon le scénario SRES A2) montre un assèchement important en toute saison.

En termes d'impact potentiel pour la végétation et les cultures non irriguées, cette évolution se traduit par un allongement moyen de la période de sol sec de l'ordre de 2 à 4 mois tandis que la période humide se réduit dans les mêmes proportions. On note qu'en été, l'humidité moyenne du sol en fin de siècle pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui.



7 Conclusion

La prise en compte de l'évolution climatique est un enjeu majeur pour l'adaptation de la forêt. A l'échelle de la Bretagne, la hausse des températures est une certitude même si notre région semble échapper aux plus fortes chaleurs estivales dans le futur proche et peut encore connaître des étés frais en raison de sa configuration géographique. Il est cependant indéniable que l'augmentation de la fréquence des périodes de canicule en été, la diminution de la fréquence des hivers froids, l'augmentation des températures aux saisons intermédiaires ont déjà des effets sur la végétation. Toutes les projections climatiques s'accordent à prévoir une accentuation de ce réchauffement pour la seconde moitié du XXIème siècle.

L'incertitude est importante concernant l'évolution des précipitations dans notre région, plus lente à se mettre en place. Pourtant les excès d'eau ou sa pénurie peuvent avoir des conséquences plus désastreuses que le réchauffement. Compte tenu de la hausse de température attendue, il apparaît cependant probable que le XXIème siècle verra augmenter la fréquence des sécheresses superficielles ou agricoles sur des saisons qui déborderont largement le cadre de notre été actuel, avec comme conséquence un risque accru de feux de forêts.

Glossaire

Rayonnement

Le rayonnement solaire global (ou irradiation solaire globale) reçu sur une surface comprend l'ensemble des composantes directe et diffuse normales à la surface de réception.

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement provenant du seul disque solaire, sur une surface perpendiculaire à la direction du soleil. Il est nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

Le rayonnement solaire diffus comprend la totalité du rayonnement solaire parvenant sur une surface horizontale, excepté sa composante directe. Il inclut la diffusion de la voûte céleste et la réflexion des surfaces avoisinantes.

Evapotranspiration

L'évapotranspiration concerne l'ensemble des processus renvoyant dans l'atmosphère sous forme gazeuse une partie des précipitations (forme liquide). Ce phénomène combine les pertes en eau par évaporation directe d'eau liquide (eau libre ou eau du sol dans les 15 premiers cm environ) et par transpiration de la biomasse. L'évapotranspiration s'exprime en mm d'eau pour une période donnée.

Evapotranspiration potentielle ETP : l'évapotranspiration est dite potentielle quand l'énergie nécessaire à la vaporisation est le seul facteur limitant. L'ETP est donc une variable qui ne dépend que du climat (demande climatique en eau). Un sol nu, mouillé en surface par une pluie évapore à l'ETP.

L'ETP utilisée dans cette étude est l'ETP issue de la base quotidienne SIM calculée suivant la formule de Penman Monteith

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

où R_n est le rayonnement net, G est le flux de chaleur de la surface, $(e_s - e_a)$ représente le déficit de pression de vapeur de l'air, c_p est la capacité thermique de l'air, Δ représente la pente de la courbe de tension de vapeur saturante en fonction de la température, γ est la constante psychrométrique et r_s et r_a sont les conductivités de la surface et de l'air.

Evapotranspiration maximale ETM : pertes par évapotranspiration d'une culture à un stade donné qui ne souffre pas de sécheresse. Pour obtenir l'ETM, on applique à l'ETP un coefficient cultural K_c qui dépend de la culture et de son stade de végétation. Les coefficients K_c sont définis au pas décadaire, pour chaque culture.

Evapotranspiration réelle ETR : un couvert végétal offre une certaine résistance au transfert de la vapeur d'eau en lien avec sa structure et évaporera toujours moins que l'ETP. La disponibilité réelle en eau dans le sol conditionne également l'évapotranspiration. L'évapotranspiration réelle (ETR) se définit ainsi comme la quantité d'eau réellement transpirée dans les conditions naturelles. C'est une estimation des pertes par évapotranspiration d'une culture à un stade donné et souffrant éventuellement d'un manque d'eau. Pour prendre en compte la régulation stomatique, un coefficient réducteur est appliqué à l'ETM dès que la plante souffre. Cet état se caractérise une réserve superficielle épuisée. Le coefficient appliqué est la fraction de la réserve profonde restante.

Dans la chaîne SIM, la version d'ISBA représente le sol en 14 couches d'épaisseur fixe sur tout le domaine, pour une profondeur totale de 12 mètres. Les variables du bilan d'eau et d'énergie sont calculées pour un certain nombre de couches, ce qui permet de prendre en considération uniquement la partie du sol qui est en lien avec la végétation. Ceci est propre à chaque type de végétation. Pour ces couches, température et contenu en eau et glace

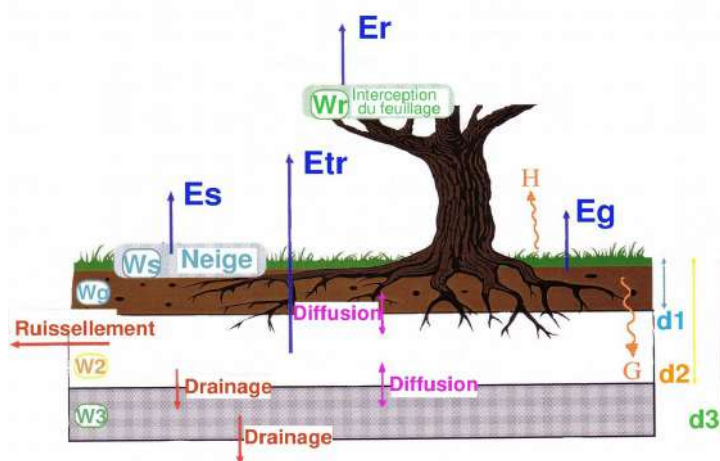


Illustration 77: Modélisation ISBA utilisée dans SIM

sont calculés à la même profondeur permettant une meilleure représentation du gel du sol. Par exemple, pour le type de végétation «cultures» on utilise moins de couches pour le bilan d'eau que pour le type «forêts équatoriales», les forêts ayant des racines plus profondes leur permettant de puiser de l'eau plus profondément dans le sol. Le bilan de l'eau est exprimé par des termes de drainage et de ruissellement, ainsi que par l'évapotranspiration réelle (Etr), l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation (Er), l'évaporation du sol nu (Eg) et la sublimation de la neige et de la glace (Es). L'évaporation totale étant la somme $Etr+Er+Eg+Es$. Pour des questions d'accès aux données dans la base SIM quotidienne, c'est cette évaporation totale qui est utilisée pour le calcul

du déficit hydrique relatif à la place de l'ETR dans l'étude présente.

ANNEXES

A. Cartographie des périodes trentenaires 1959-1988, 1969-1998, 1979-2008 et 1989-2018

A.1. Températures moyennes annuelles

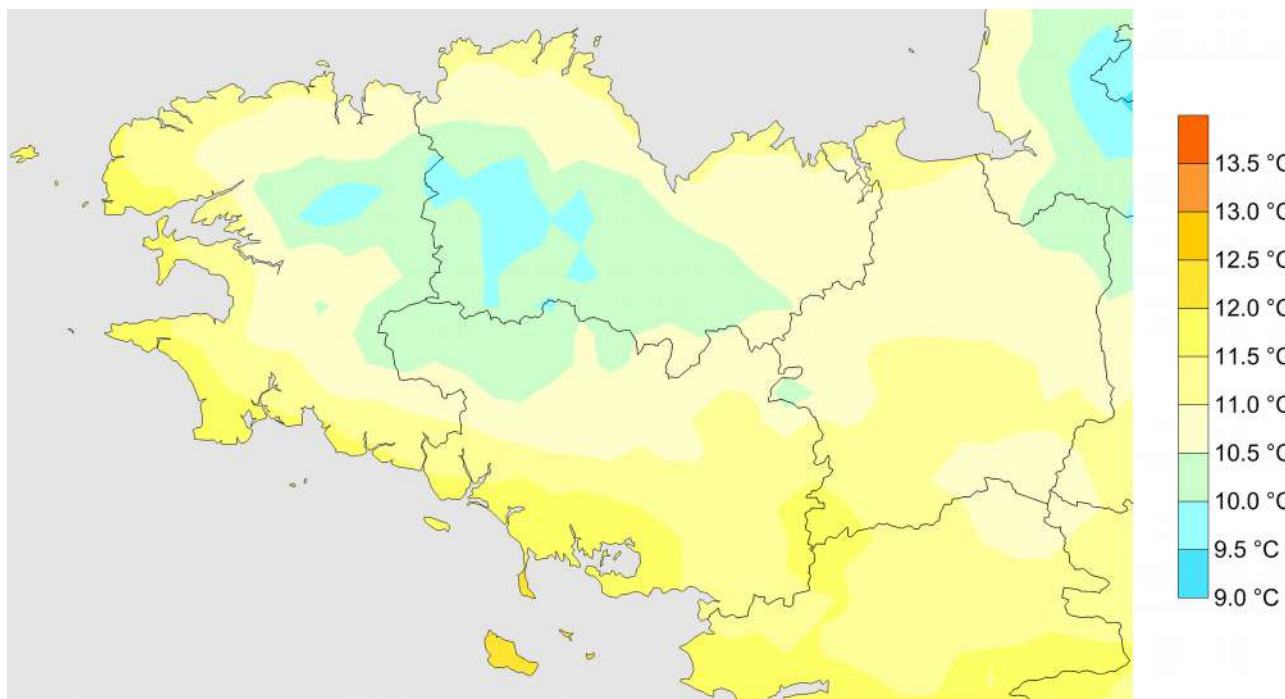


Illustration 78: Températures moyennes annuelles 1959-1988

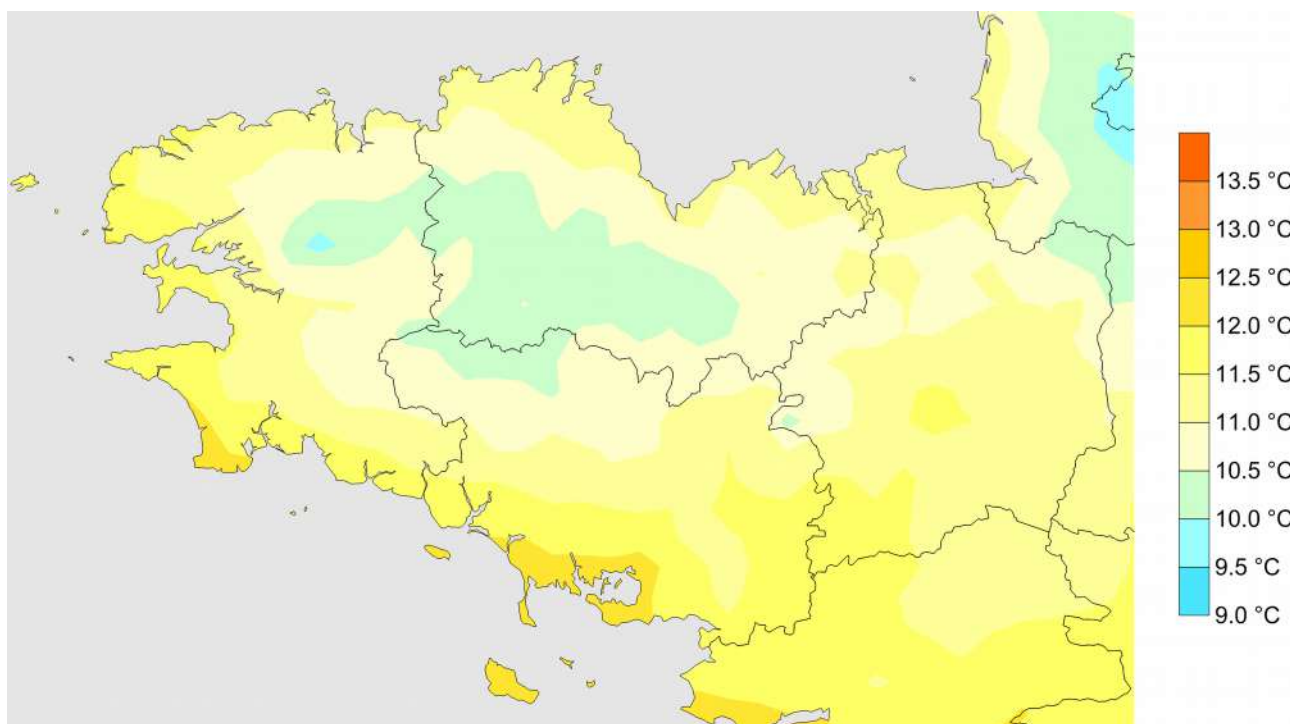


Illustration 79: Températures moyennes annuelles 1969-1998

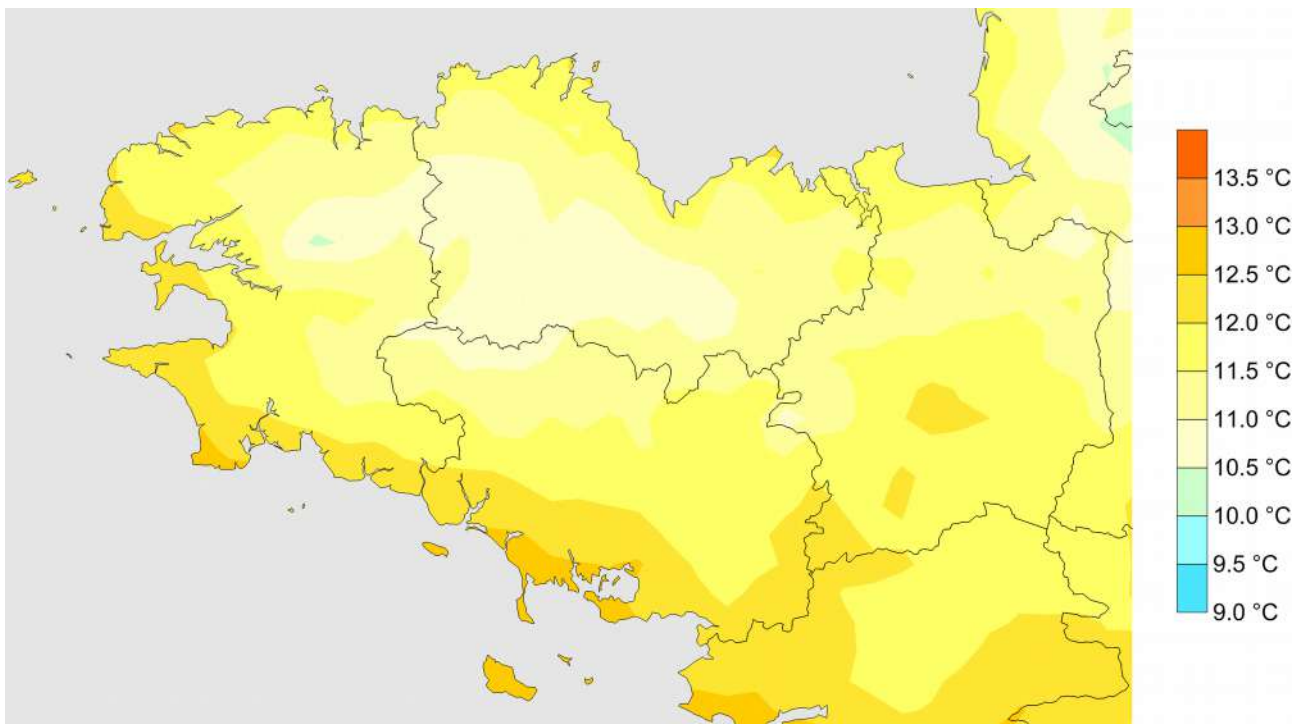


Illustration 80: Températures moyennes annuelles 1979-2008

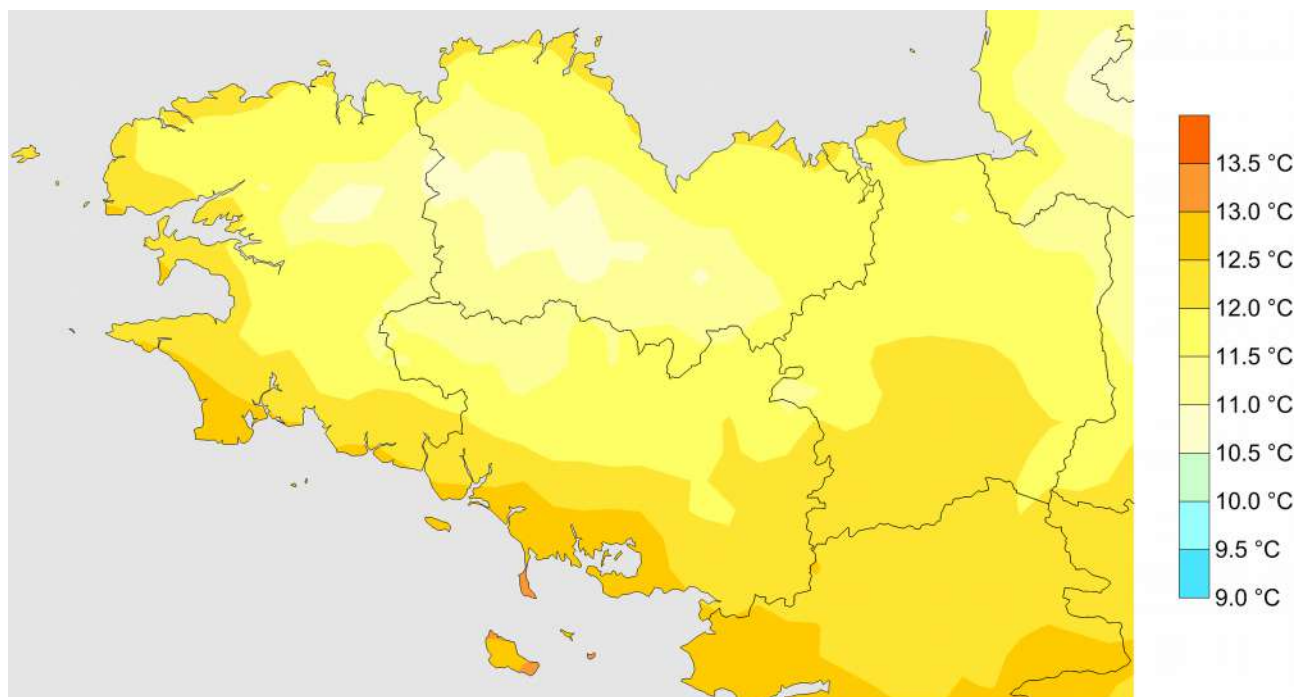


Illustration 81: Températures moyennes annuelles 1989-2018

A.2. Précipitations moyennes annuelles

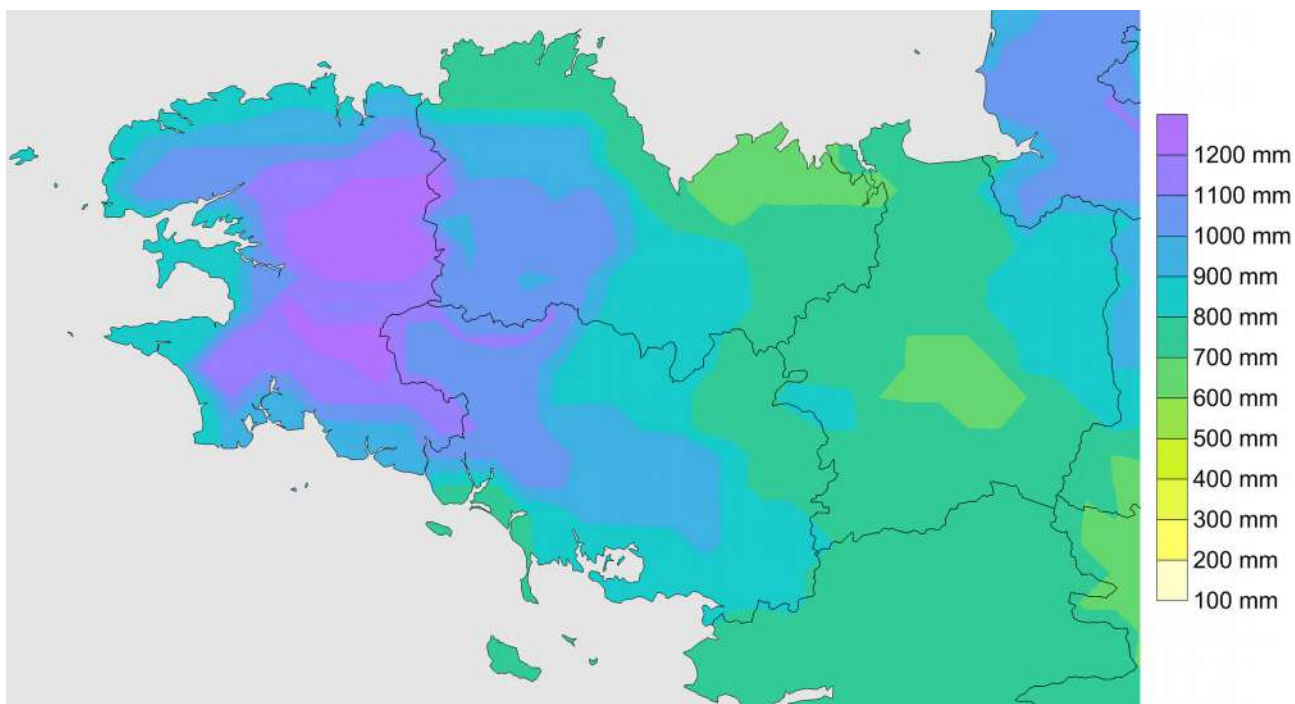


Illustration 82: Précipitations moyennes annuelles 1959-1988

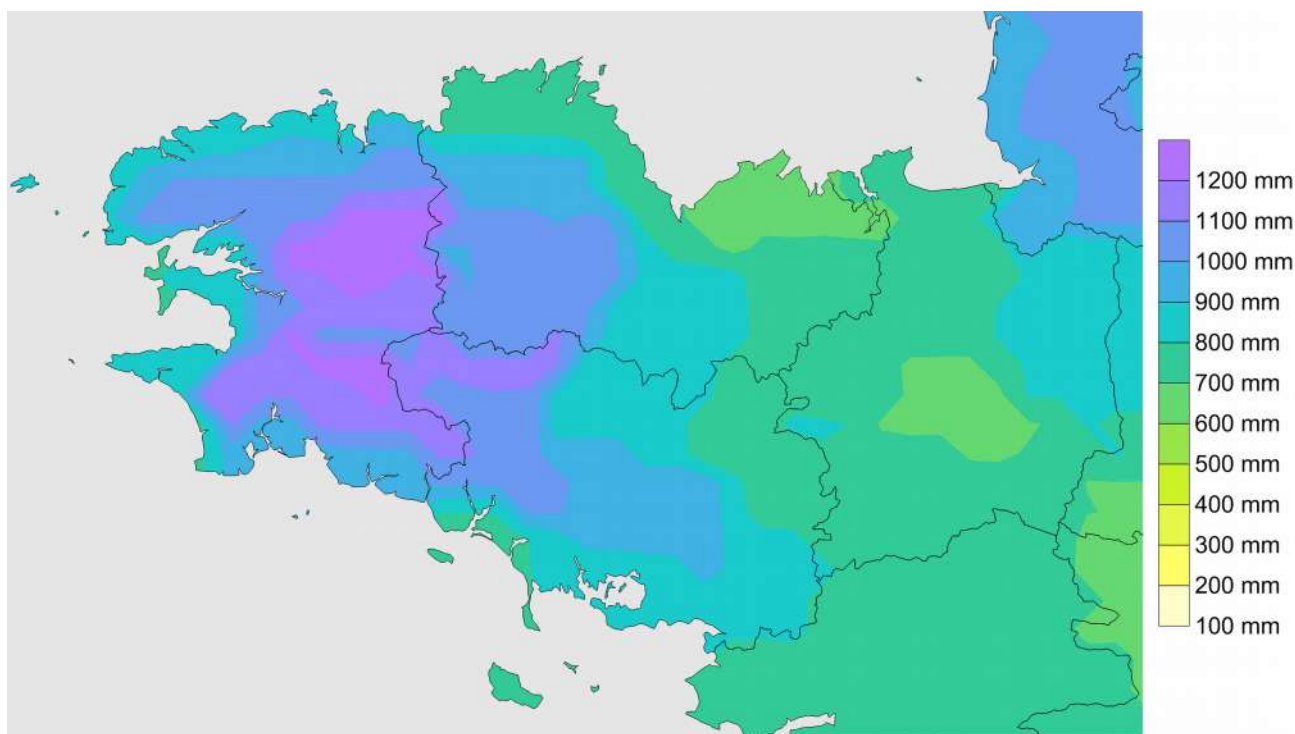


Illustration 83: Précipitations moyennes annuelles 1969-1998

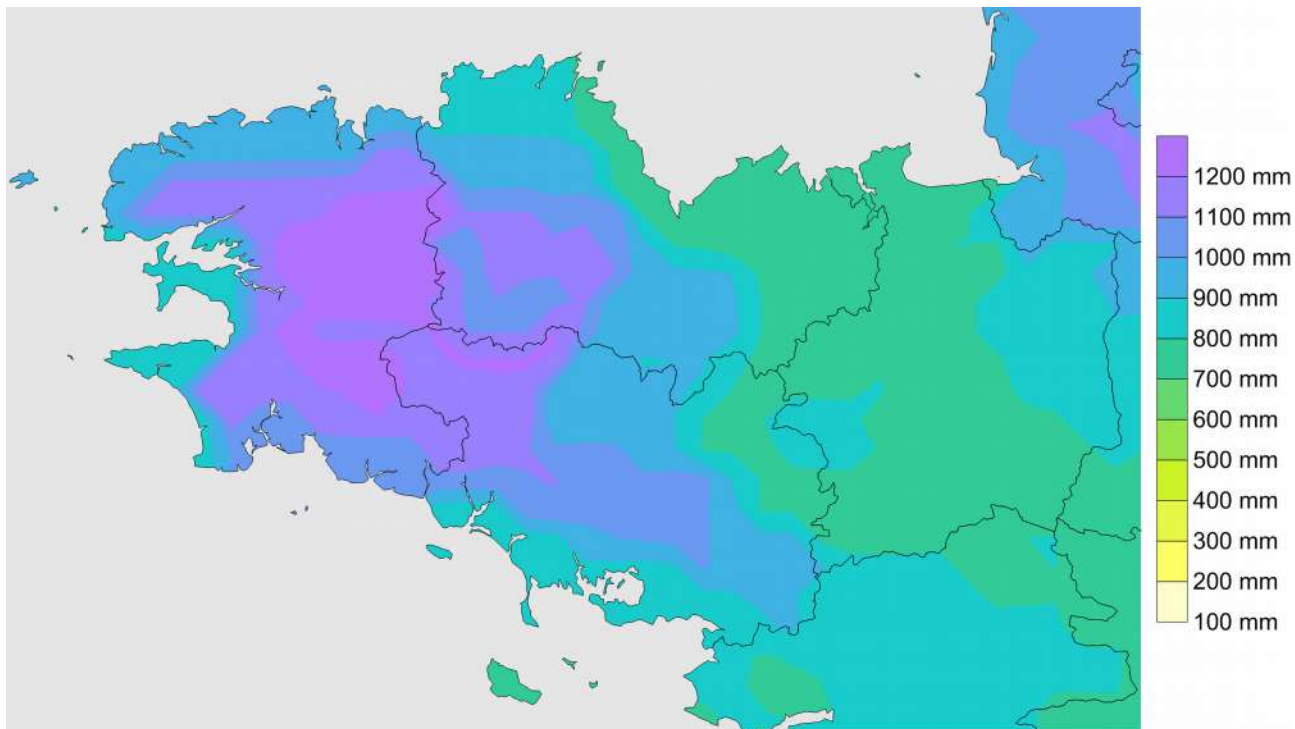


Illustration 84: Précipitations moyennes annuelles 1979-2008

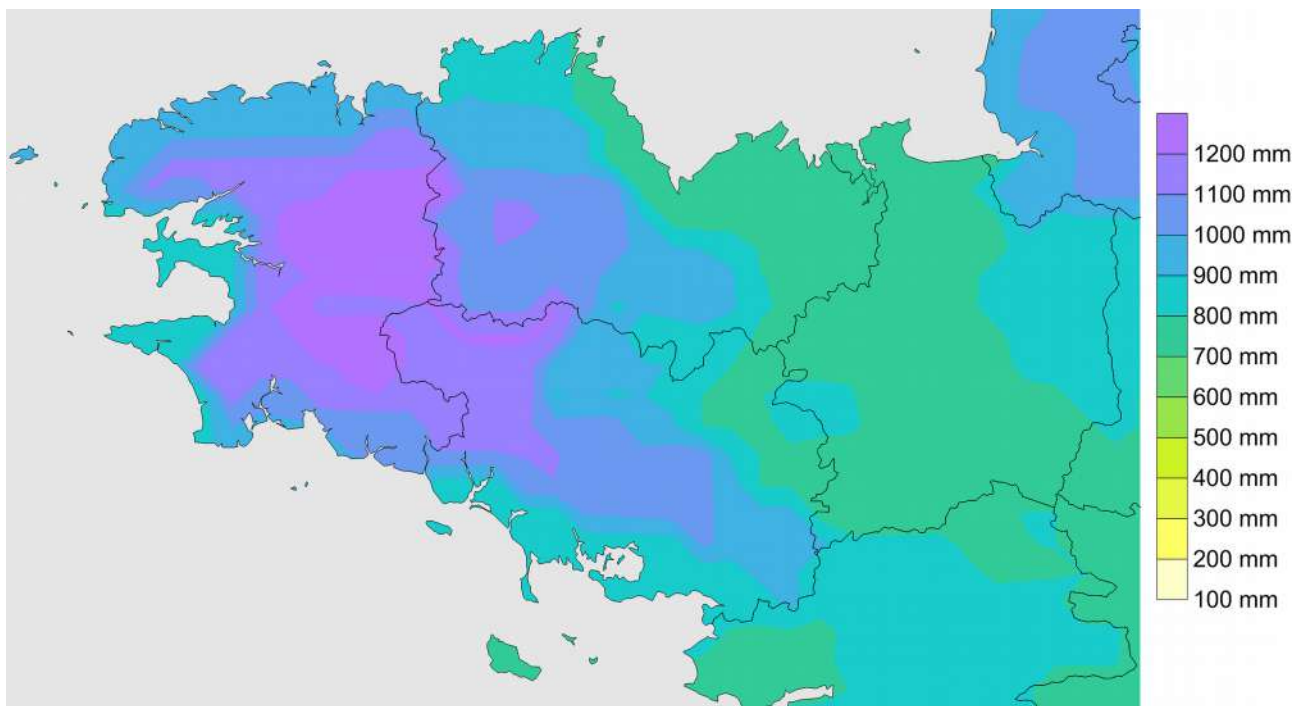


Illustration 85: Précipitations moyennes annuelles 1989-2018

A.3. P-ETP moyennes sur la période de végétation

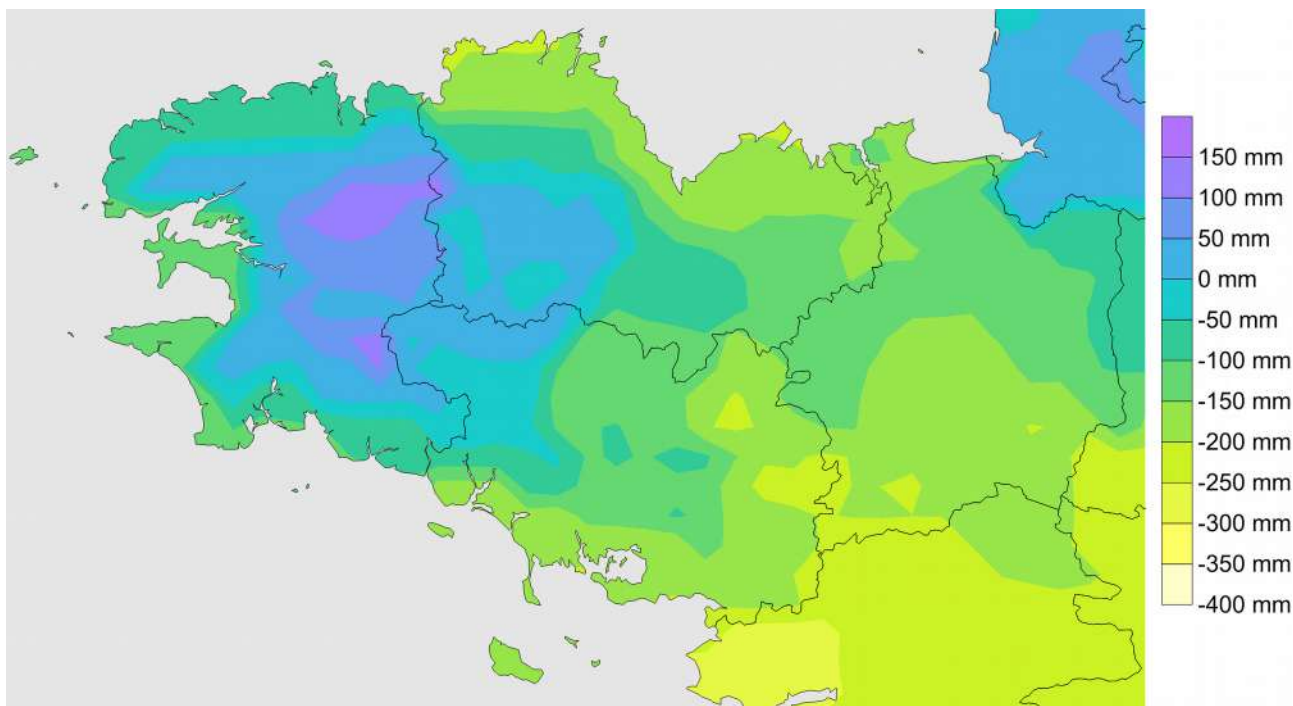


Illustration 86: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1959-1988

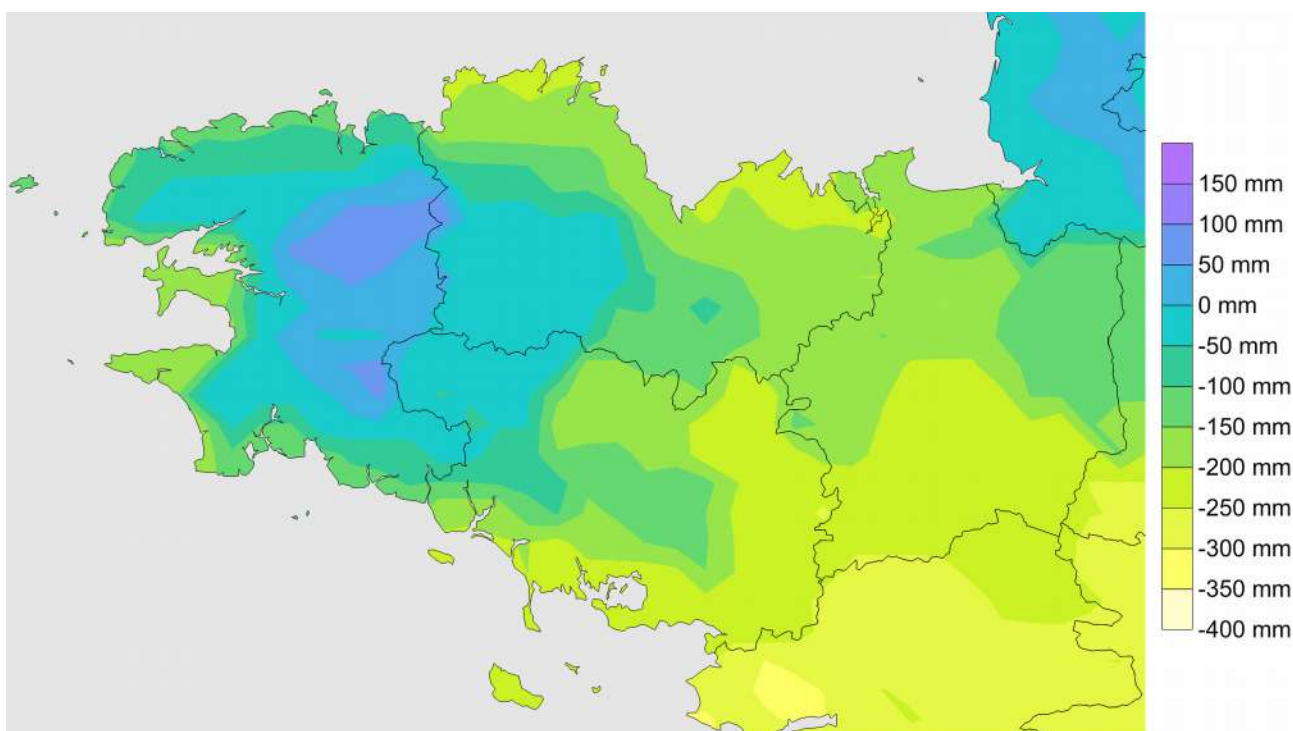


Illustration 87: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1969-1998

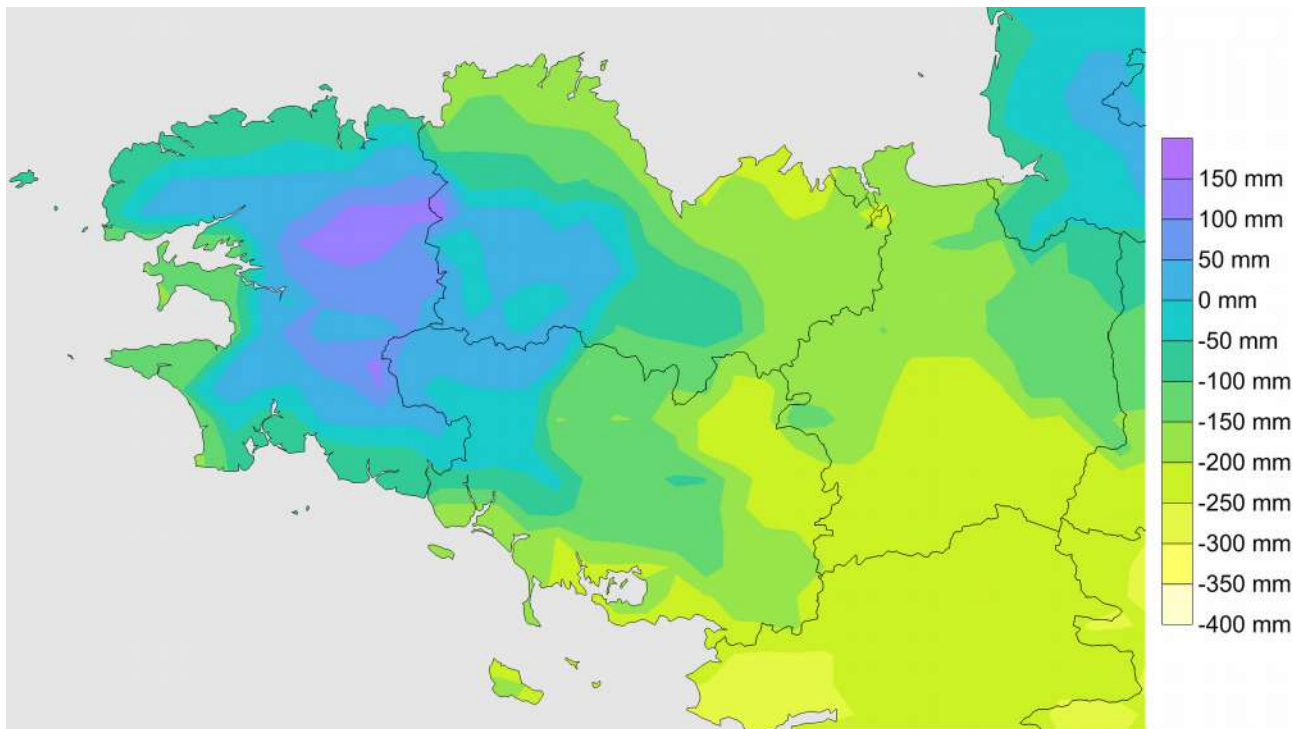


Illustration 88: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1979-2008

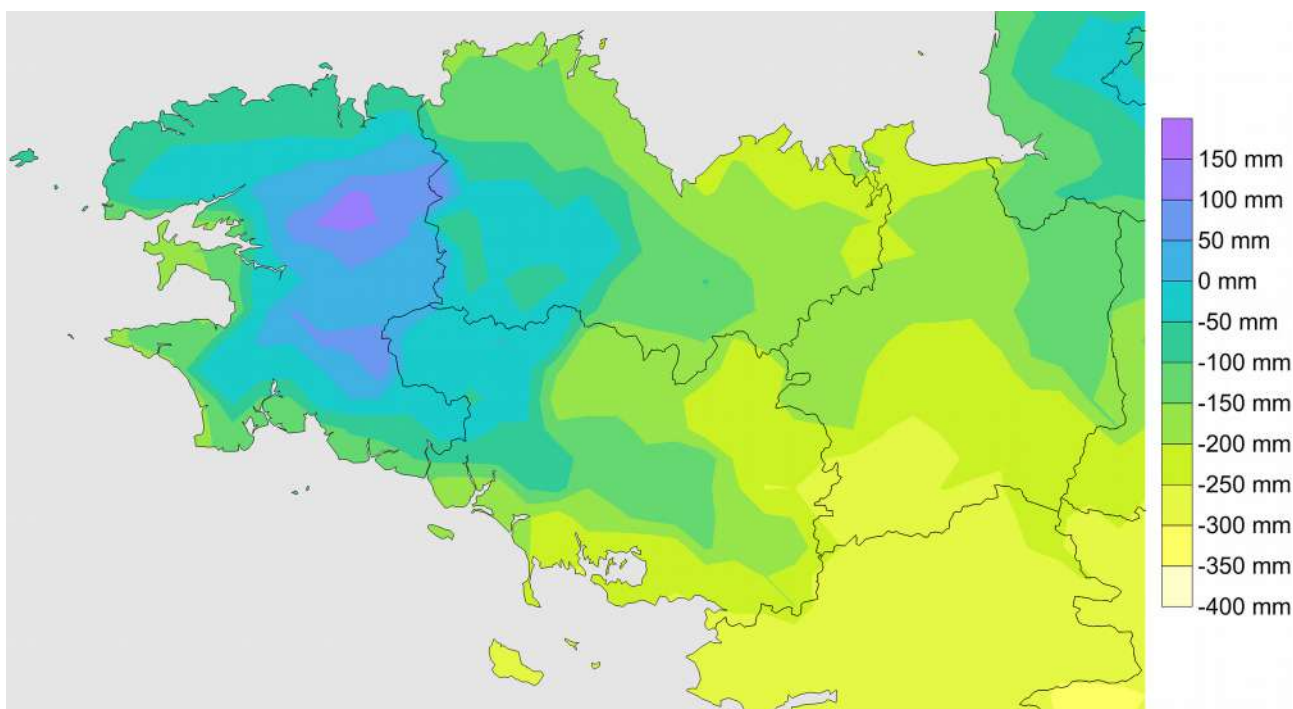


Illustration 89: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1989-2018

