



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 Pays-de-la-Loire et de son impact sur la forêt régionale

Volet n°1 : Caractérisation et évolution récente du climat dans les Pays-de-la-Loire



Version finale

Client CRPF Bretagne-Pays de la Loire	@ patrick.blanchard@cnpf.fr anne-pernelle.duc@cnpf.fr ☎ +33 2 51 62 09 59	 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.....	18
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.....	28
5.1.2	Evolution du froid.....	30
5.1.3	Evolution de la chaleur.....	32
5.2	Les précipitations.....	36
5.2.1	Précipitations annuelles.....	36
5.2.2	Précipitations estivales (juin à août).....	38
5.2.3	Le nombre de jours de pluie (≥ 1 mm) en été (juin à août).....	39
5.2.4	Précipitations de la période de végétation (avril à octobre).....	39
5.3	L'évapotranspiration potentielle ETP.....	40
5.3.1	L'ETP annuelle.....	40
5.3.2	L'ETP estivale (de juin à août).....	41
5.3.3	L'ETP en période de végétation (d'avril à octobre).....	42
5.4	Indicateurs bioclimatiques	42
5.4.1	Bilans hydriques climatiques annuels.....	43
5.4.2	Bilans hydriques climatiques en été (de juin à août).....	44
5.4.3	Bilans hydriques climatiques en période de végétation (avril à octobre).....	44
5.4.4	Le déficit hydrique relatif annuel (ETP-ETR)/ETP.....	45
5.4.5	Mois secs et subsecs.....	46
5.5	Synthèse des tendances depuis 1959.....	47
6	Les projections du futur.....	50
6.1	La modélisation et les scénarios.....	50
6.2	Constat sur la situation actuelle.....	51
6.3	Quel futur climatique pour nos régions ?.....	53
7	Conclusion.....	56
A.	Cartographie des périodes trentenaires 1959-1988, 1969-1998, 1979-2008 et 1989-2018....	62



Liste des illustrations

Illustration 1: Répartition par quadrant des directions du vent moyen tri-horaire à Nantes de 1987 à 2017.....	12
Illustration 2: Sites choisis pour la production de graphiques en lien avec des territoires forestiers dans les Pays-de-la-Loire.....	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 Angers (1981-2010).....	19
Illustration 6: Normales mensuelles de précipitations à Nantes (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 au Mans (1959-2018).....	21
Illustration 10: Fréquence des orages en France (1997-2014).....	22
Illustration 11: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Nantes (1981-2010)....	23
Illustration 12: Cycle annuel des températures minimales et maximales au Mans (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 St-Nazaire (2001-2010) à 06 UTC et à 15UTC.....	26
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 Mayenne 1959-2018.....	28
Illustration 20: Moyennes annuelles des températures en Saumurois 1959-2018.....	28
Illustration 21: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Nantes (1959-2018).....	28
Illustration 22: Valeurs moyennes et extrêmes des températures au Mans (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 1959-1988.....	31
Illustration 28: Moyennes des températures minimales d'hiver 1989-2018.....	31
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 Mayenne (1959-2018).....	32
Illustration 32: Nombre de jours de gel en mars-avril à Soubise (1959-2018).....	32
Illustration 33: Moyennes des températures maximales d'été (1959-1988).....	33
Illustration 34: Moyennes des températures maximales d'été (1989-2018).....	33
Illustration 35: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1959-1988).....	33
Illustration 36: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1989-2018).....	33
Illustration 37: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à Mayenne (1959-2018).....	34
Illustration 38: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre en Saumurois (1959-2018).....	34
Illustration 39: Nombre total de nuits tropicales 1959-1988.....	34
Illustration 40: Nombre total de nuits tropicales 1989-2018.....	34
Illustration 41: Nombre de nuits à 18°C ou plus de juin à août à Soubise (1959-2018).....	35
Illustration 42: Cumuls moyens annuels de précipitations 1959-1988.....	36
Illustration 43: Cumuls moyens annuels de précipitations 1989-2018.....	36

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

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 l'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 ... après avoir vérifié 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 dans les Pays-de-la-Loire. 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.

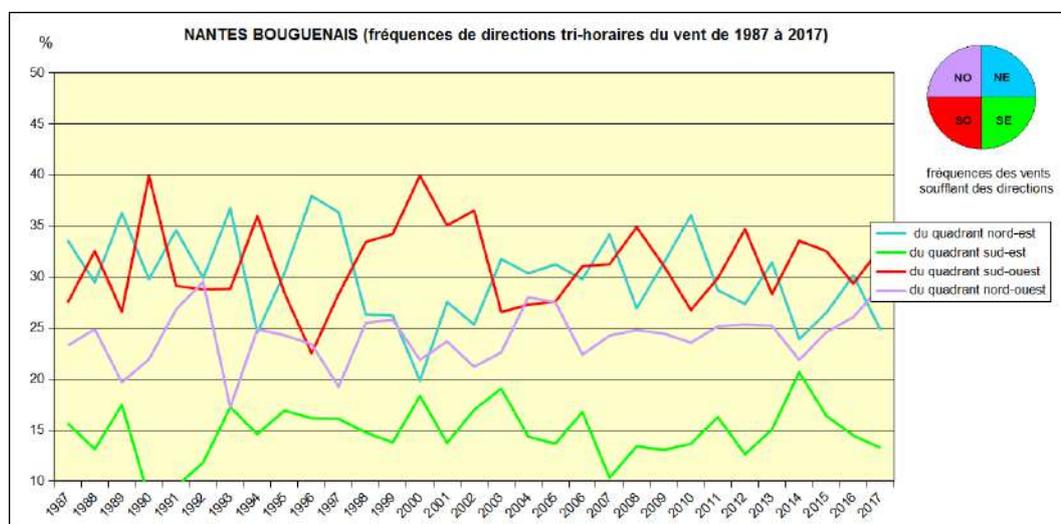


Illustration 1: Répartition par quadrant des directions du vent moyen tri-horaire à Nantes de 1987 à 2017

On retrouve le même problème pour l'insolation, car les changements de capteurs ont entraîné des ruptures d'homogénéité des séries. On considère que les mesures d'insolation 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 (pm) 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 Gaussen (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 Gaussen 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 pour lesquels les autres indicateurs sont fournis sous forme de graphiques sur la totalité de la période disponible : pour les Pays-de-la-Loire, les forêts du Gâvre (44), de Soubise (85), de Courcelles (72), du Saumurois et du Puiset-Doré (49) et de Mayenne (53). Chaque site est représenté par un point central correspondant à un point de grille.

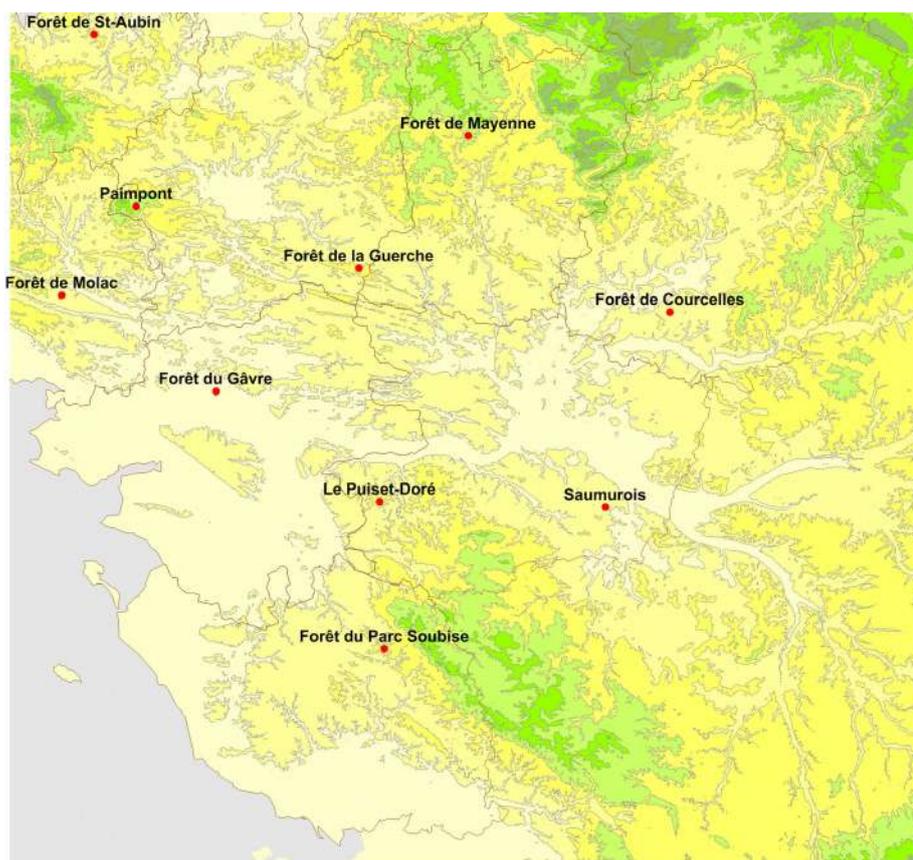


Illustration 2: Sites choisis pour la production de graphiques en lien avec des territoires forestiers dans les Pays-de-la-Loire

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	
		$(\text{ETP}-\text{ETR})/\text{ETP}$	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

Les Pays-de-la-Loire bénéficient d'un climat doux océanique qui se nuance au fur et à mesure de l'éloignement du bord de mer. La région s'étire du littoral atlantique aux collines du Perche ; cette configuration spatiale est à l'origine de forts contrastes entre les territoires, gommés par les caractères généraux suivants :

- la pluviométrie annuelle moyenne, régulièrement répartie au fil des mois, varie de moins de 600 mm sur le Layon à 1000 mm, sur les reliefs du nord de la Mayenne et les Gâtines en Vendée
- les températures clémentes affichant une moyenne annuelle de 12,5 °C, sont associées à 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 le nord-est plus frais et les côtes plus douces et un gradient nord-est / sud-ouest en journée du même ordre de grandeur
- l'ensoleillement annuel moyen varie de 1600 à 2000 heures des collines normandes aux côtes vendéennes
- 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

Les Pays-de-la-Loire suivent 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 un autre type de précipitations prend le relais, avec des pluies plus souvent instables et orageuses.

4.1.1 Répartition spatiale

La présence de reliefs parallèles à la côte atlantique (sillon de Bretagne, bocage vendéen et Gâtines) et des collines normandes au nord-est de la région expliquent la répartition contrastée de

la pluviométrie : les perturbations déversent la plus grande partie des précipitations sur les versants exposés et les territoires situés à l'arrière de ces reliefs reçoivent moins d'eau.

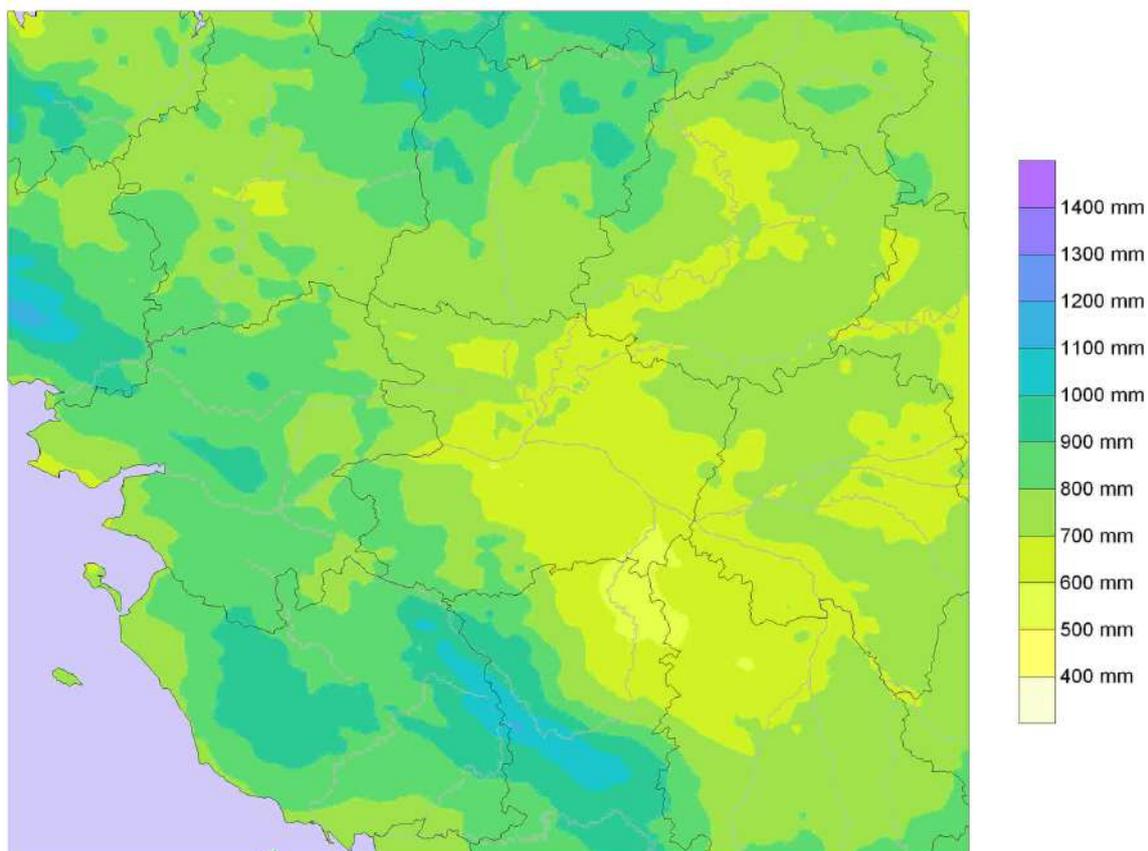


Illustration 4: Cumul moyen annuel de précipitations 1981-2010

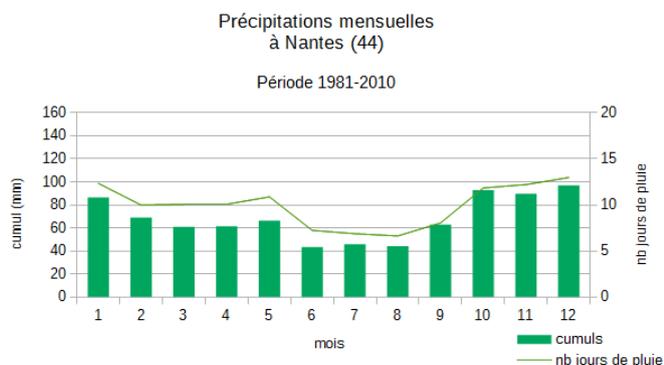


Illustration 6: Normales mensuelles de précipitations à Nantes (1981-2010)

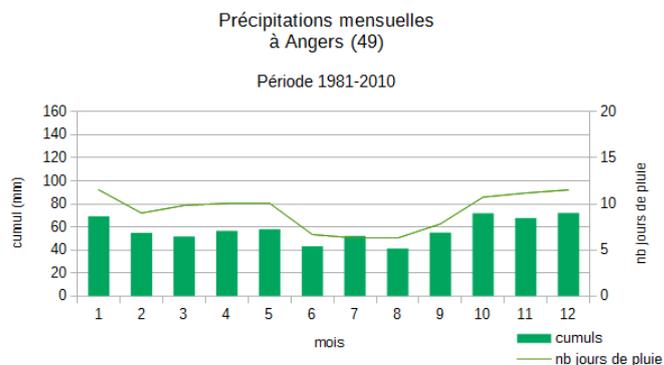


Illustration 5: Normales mensuelles de précipitations à Angers (1981-2010)

Le cumul annuel des précipitations varie de moins de 500 mm sur le Saumurois à plus de 1000 mm au point culminant du Haut-Bocage de Vendée et plus de 900 mm sur le nord-ouest de la Mayenne. L'arc formé par la Mayenne, la Loire-Atlantique et la Vendée est donc globalement

plus arrosé. Ce contraste spatial de la pluviométrie est particulièrement visible 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 l'ouest de cet arc alors qu'à l'arrière de cette barrière, la pluviométrie mensuelle est comprise dans une fourchette assez étroite au long de l'année, de 40 à 70 mm par mois.

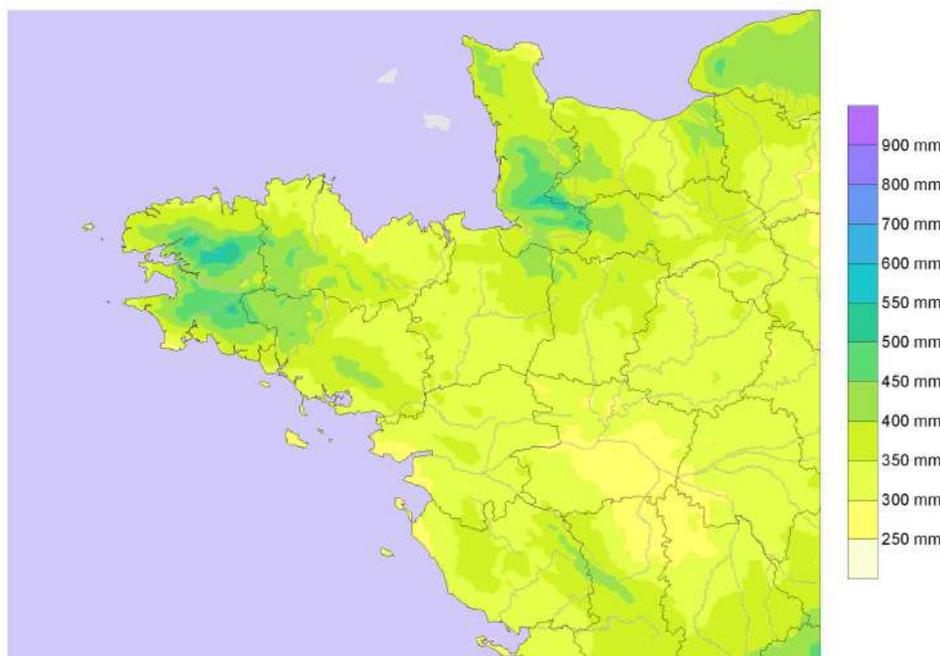


Illustration 7: Cumul moyen de précipitations d'avril à septembre (1981-2010)

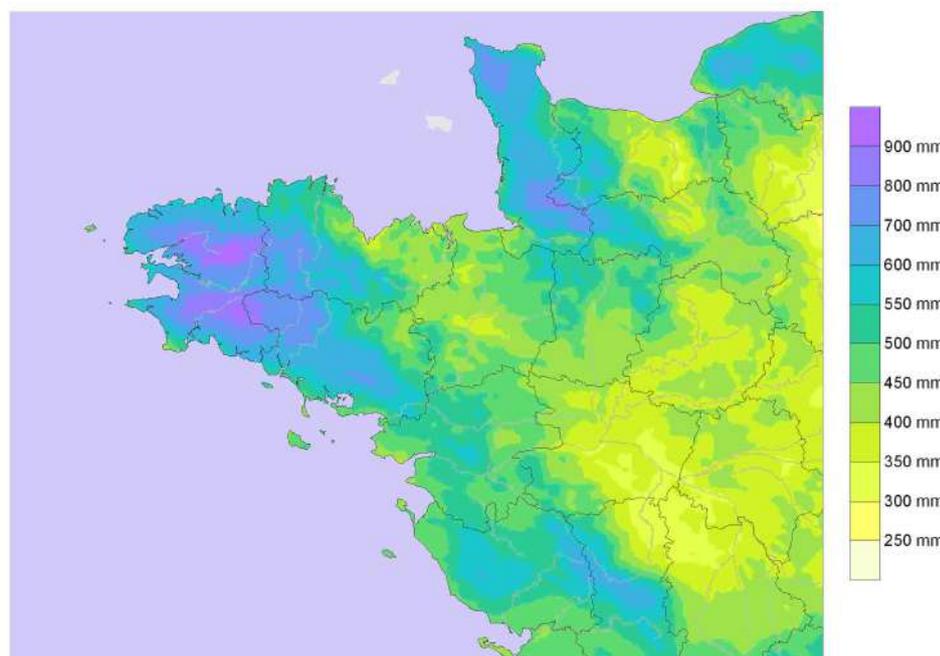


Illustration 8: Cumul moyen de précipitations d'octobre à mars (1981-2010)

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 le montrent les séries du Mans : 711 mm lors de l'hiver très arrosé 2000-2001 ou 107 mm lors de l'été sec de 1989. Toujours au Mans, le dernier été pluvieux (412 mm) date de 2012, qui est en 3^e position, loin derrière 1960 (461 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 (233 mm) qui succède à l'été 2016 déjà peu arrosé (158 mm).

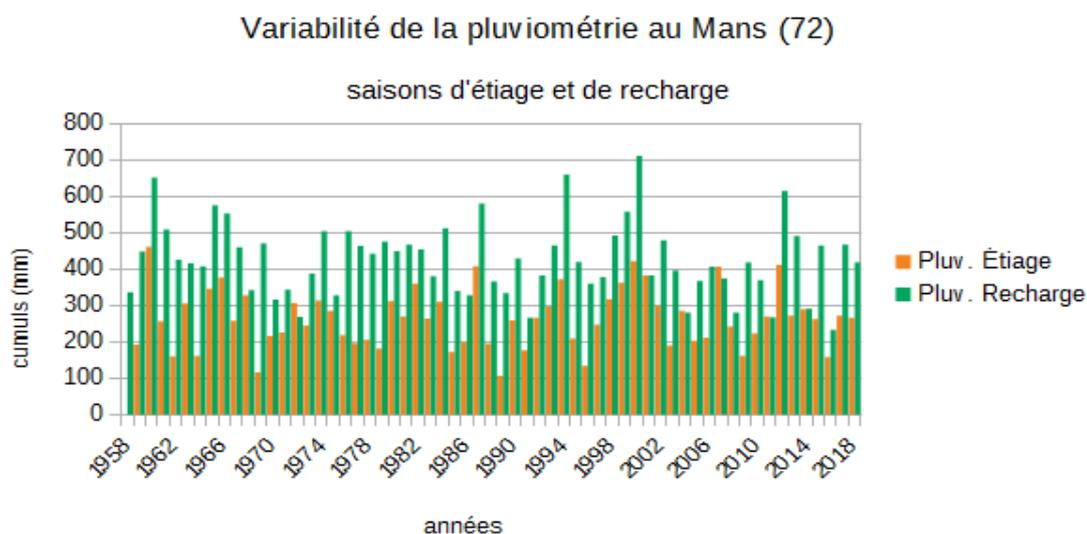


Illustration 9: Cumul de précipitations en saisons d'étiage et recharge au Mans (1959-2018)

4.1.3 Précipitations à caractère exceptionnel

L'intensité des précipitations est aussi une caractéristique du climat d'un territoire. A Nantes, il pleut environ 1 jour sur 3, mais l'année compte seulement 24 journées de forte pluie (dépassant 10 mm) en moyenne. Une averse d'une heure est qualifiée d'exceptionnelle lorsqu'elle dépasse environ 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.

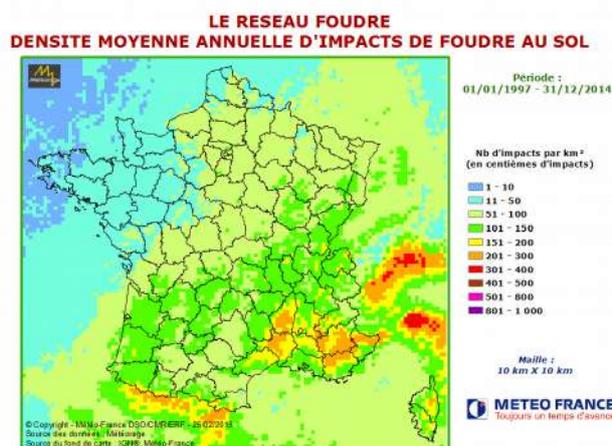


Illustration 10: Fréquence des orages en France (1997-2014)

Les Pays-de-la-Loire font partie comme la Bretagne des régions métropolitaines les moins touchées par les orages, moins de 15 journées concernées en moyenne par an sur l'ensemble du territoire.

Les autres phénomènes extrêmes comme la grêle ou la neige ne sont pas fréquents, mais pas non plus totalement absents, en particulier sur la Sarthe et la Mayenne.

4.2 Températures

Dans les Pays-de-la-Loire, 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 1 à 4 degrés en moyenne du pays du Pail en Mayenne aux côtes atlantiques et les plus élevées de fin juin à août, de 22 degrés sur le littoral de Loire-Atlantique et les collines d’Ernée (nord-ouest de la Mayenne) à 26 degrés sur le sud-est du Maine-et-Loire.

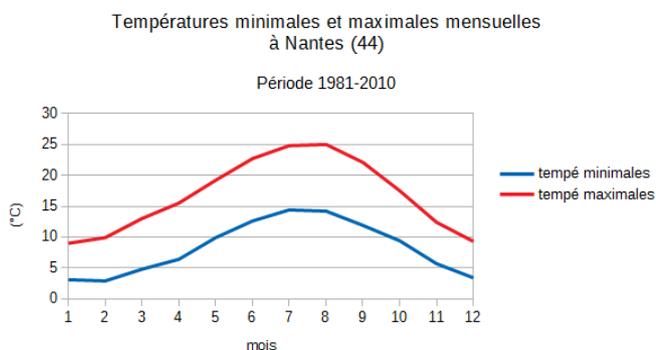


Illustration 11: Cycle annuel des températures minimales et maximales à Nantes (1981-2010)

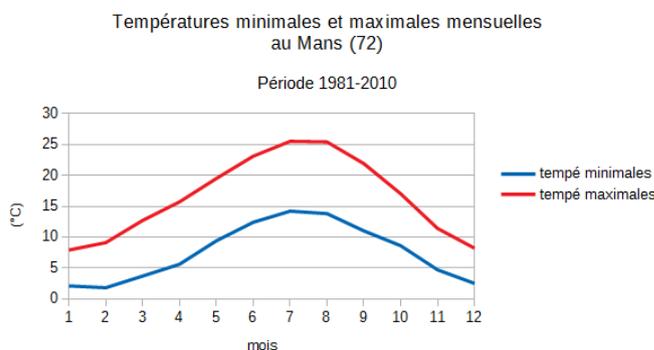


Illustration 12: Cycle annuel des températures minimales et maximales au Mans (1981-2010)

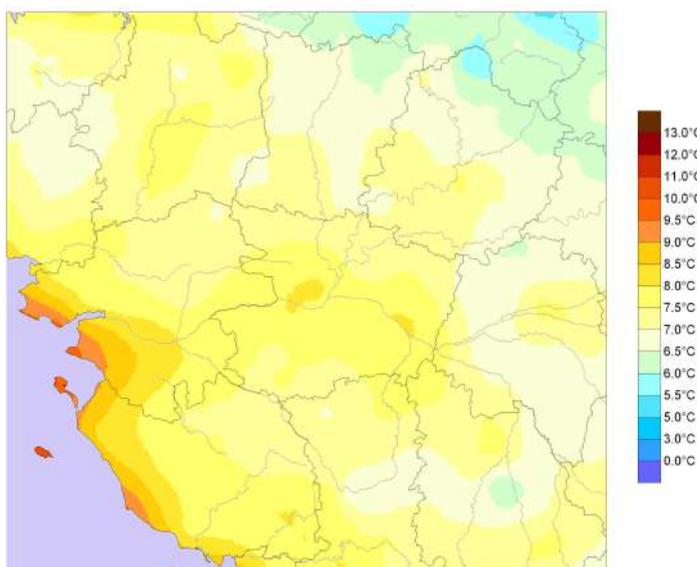


Illustration 13: Moyennes annuelles des températures minimales (1981-2010)

Comme la mer a une inertie thermique plus grande que la terre, les températures proches du littoral atlantique sont influencées par la température de la mer et sont donc plus douces en hiver et plus fraîches en été que sur le reste de la région. Les hauteurs des Gâtines, les collines d’Ernée et les Alpes Mancelles 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).

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 Nantes, on trouve des gelées après le 15 avril à la fréquence d'une année sur 5. Au Mans, les mêmes statistiques se produisent jusqu'au 4 mai en moyenne, soit presque trois semaines plus tard.

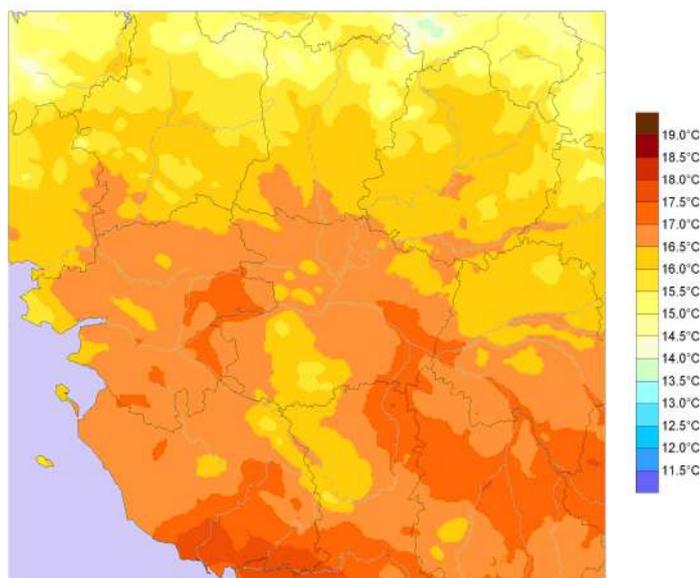


Illustration 14: Moyennes annuelles des températures maximales (1981-2010)

La chaleur, caractérisée par des températures dépassant 25 °C, est plus sensible dans l'intérieur que sur les côtes (environ 30 jours de chaleur), mais s'accroît au fur et à mesure de la progression vers le sud de la région pour atteindre environ 55 jours par été.

Les températures peuvent connaître 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 peut avoir une forte incidence sur la moyenne annuelle. Tout comme les autres régions métropolitaines, les Pays-de-la-Loire ont 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 remarquable.

A l'instar de 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. Les moyennes annuelles sont bien homogènes malgré ce gradient

nord-est / sud-ouest qui s'échelonne de 1600 heures sur les collines d'Ernée à plus de 2000 heures sur les côtes vendéennes. La latitude n'est pas le seul facteur du maximum d'insolation sur le littoral : les conditions plus ensoleillées sur le bord de mer sont directement liées à l'effet de brises côtières qui repoussent les nuages vers l'intérieur en été.

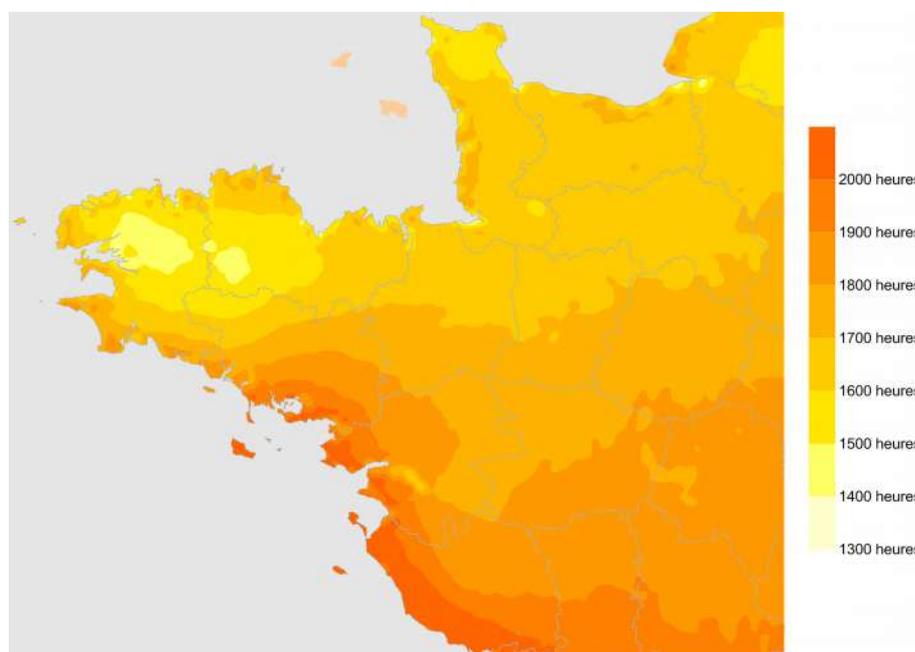


Illustration 15: Cumul moyenne annuel d'insolation (1991-2010)

4.4 Le vent

Sur les Pays-de-la-Loire comme sur le grand ouest de la France, le vent souffle majoritairement du sud-ouest, ce qui correspond à la circulation atmosphérique d'ouest en est, dominante sur la façade atlantique. Les vents soufflant du nord-est sont également fréquents et sont associés à des situations anticycloniques. Les vents inférieurs à 10 km/h sont plus fréquents en été. Les vents supérieurs à 60 km/h sont plus souvent observés en hiver et sur le littoral (environ 100 jours par an à l'île d'Yeu, 30 jours par an au Mans).

La façade maritime de la région lui permet de bénéficier du phénomène de brise marine qui rafraîchit les bordures côtières en été, et exerce parfois son influence jusqu'à 100 km à l'intérieur des terres.

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

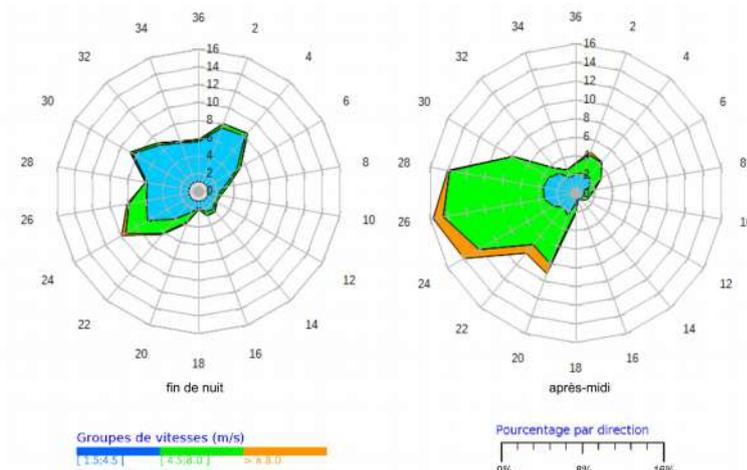


Illustration 16: Rose des vents d'été à St-Nazaire (2001-2010) à 06 UTC et à 15UTC

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.

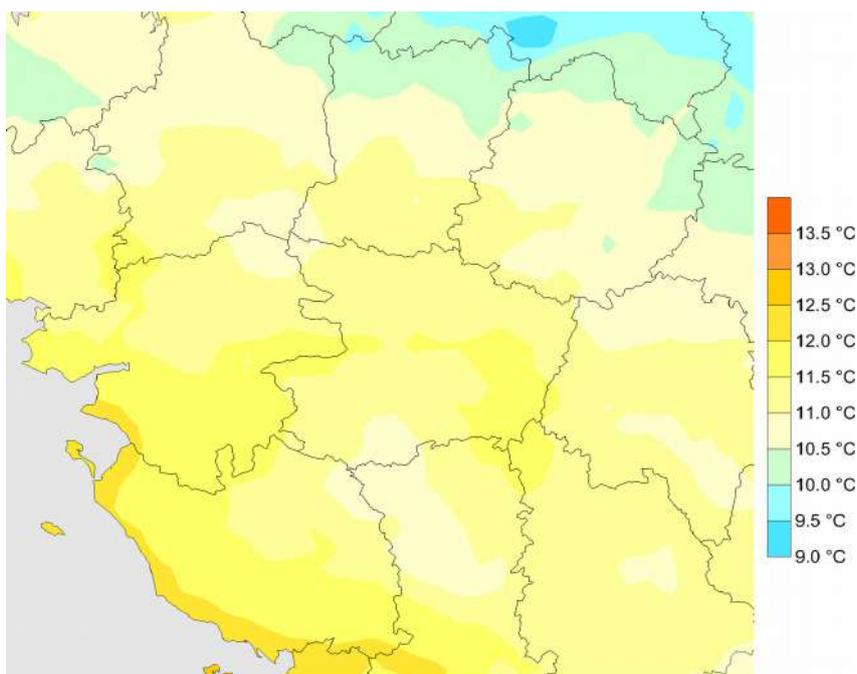


Illustration 17: Moyennes annuelles des températures 1959-1988

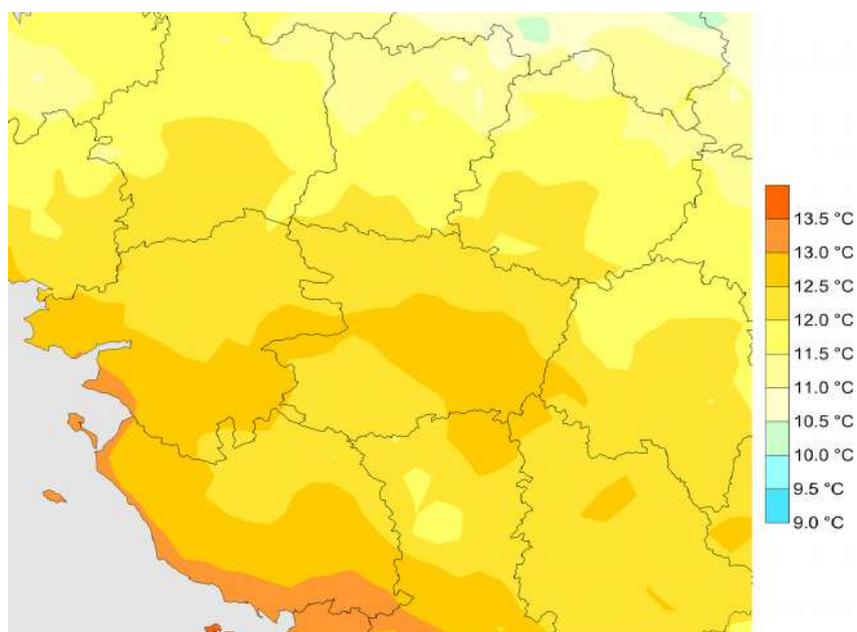


Illustration 18: Moyennes annuelles des températures 1989-2018

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)

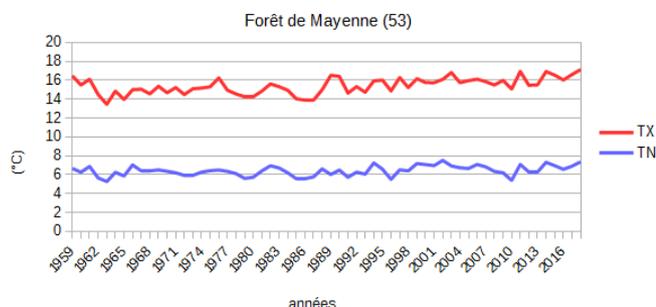


Illustration 19: Moyennes annuelles des températures à Mayenne 1959-2018

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

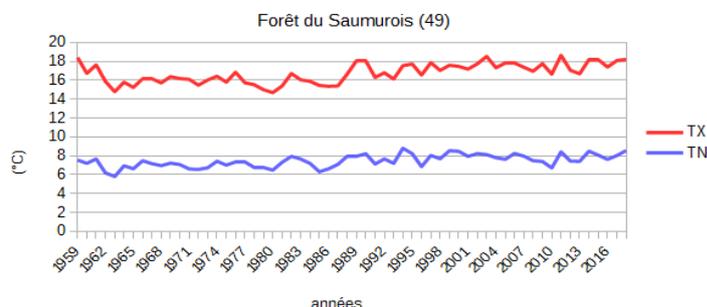


Illustration 20: Moyennes annuelles des températures en Saumurois 1959-2018

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.

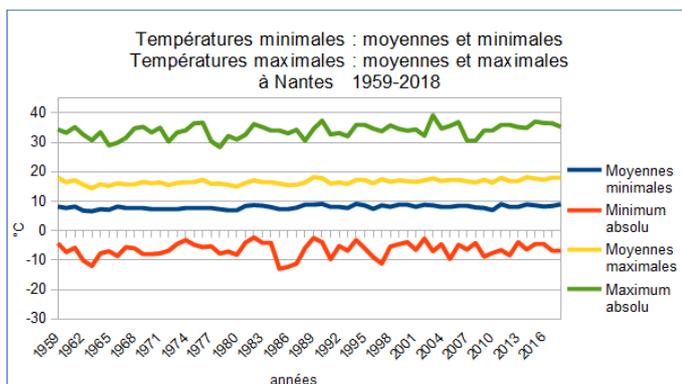


Illustration 21: Valeurs moyennes et extrêmes des températures à Nantes (1959-2018)

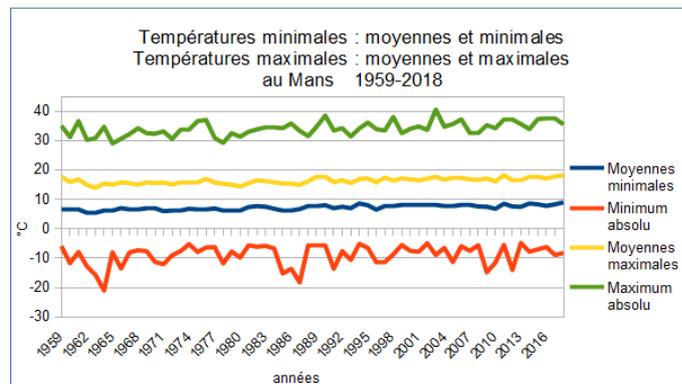


Illustration 22: Valeurs moyennes et extrêmes des températures au Mans (1959-2018)

Les séries chronologiques de Nantes et Le Mans 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 le nord-est de la Mayenne à

12 degrés sur le littoral atlantique » à la plage « 10,5 degrés à 13 degrés ». Le sud du Maine-et-Loire connaît la plus forte hausse, de 1,2 à 1,4 degré ; l'est de la Loire-Atlantique, de la Sarthe et de la Vendée le suivent de près, de 1 à 1,2 degré. Ailleurs la hausse se limite de 0,8 à 1 degré, sauf sur le centre de la Mayenne qui connaît une hausse limitée entre 0,4 à 0,8 degré.

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.

L'est de la région (Maine-et-Loire et Sarthe) voit ses températures maximales grimper de 1,2 à 1,6 degré alors que le réchauffement est de 0,6 à 0,8 degré sur le centre de la Mayenne. Ailleurs que sur ces 2 zones au comportement marqué, la hausse des températures maximales est de 0,8 à 1,2 degré.

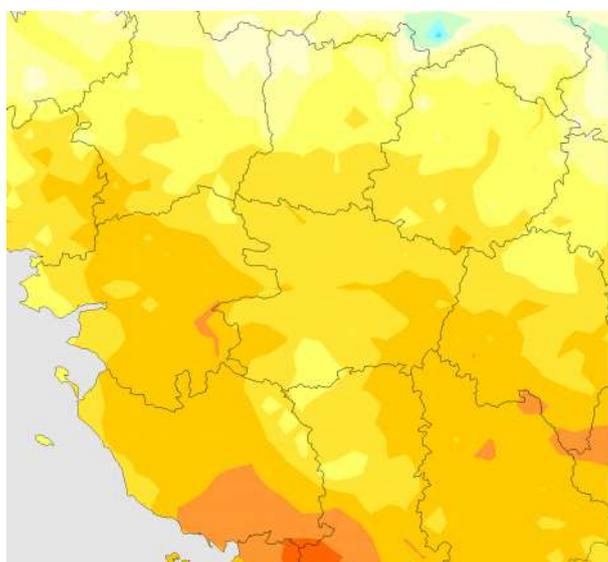


Illustration 23: Moyennes annuelles des températures maximales 1959-1988

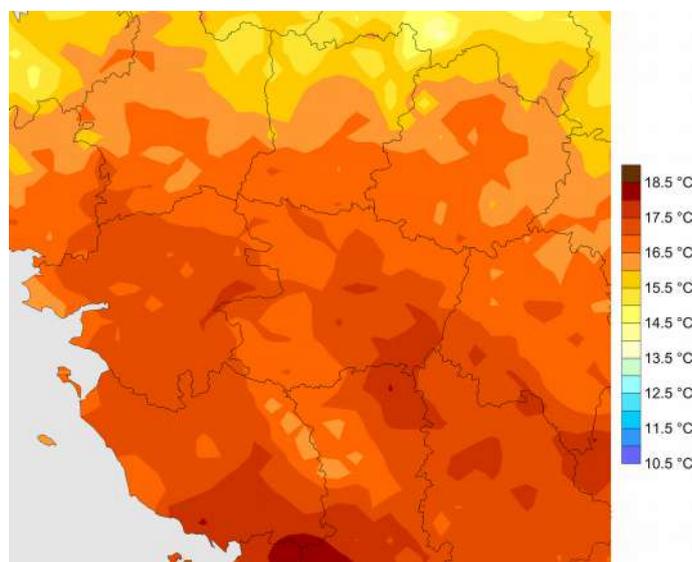


Illustration 24: Moyennes annuelles des températures maximales 1989-2018

La nuit, au contraire, la hausse annuelle des températures est globalement inférieure à 1 degré. Le sud de la Sarthe et l'est de la Vendée se démarquent avec une forte hausse, de l'ordre de 1,2 à 1,8 degré. Le centre de la Mayenne connaît une évolution timide, de 0,2 à 0,4 degré.

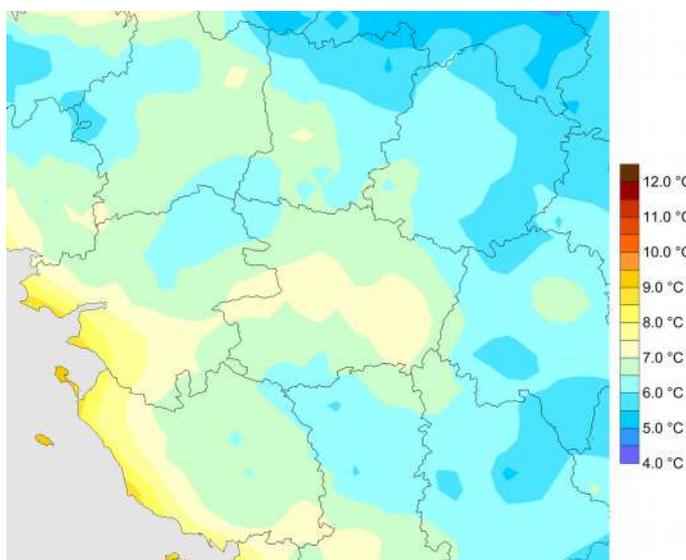


Illustration 25: Moyennes annuelles des températures minimales 1959-1988

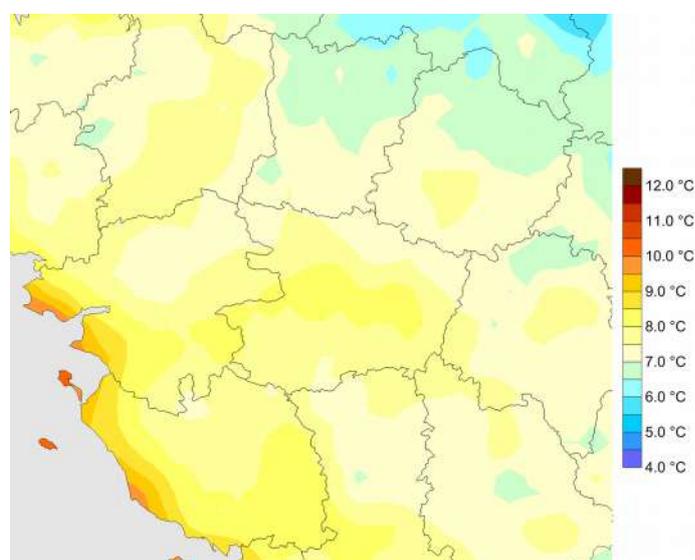


Illustration 26: Moyennes annuelles des températures minimales 1989-2018

La distribution spatiale des températures reste identique dans le temps : de façon globale, les températures maximales (de l'après-midi) augmentent en descendant vers le sud, les températures minimales (de la nuit) diminuent du sud-ouest au nord-est. On distingue le comportement particulier des hauteurs de Gâtines (85), des Mauges (49), des Coëvrons (53) et des Alpes Mancelles (72) plus froids que le reste du territoire, car plus élevés.

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 janvier) peuvent avoir un impact sur la santé des arbres. Les cartes ci-dessous montrent une progression globale de 0,8 à 1 degré entre 1959-1988 et 1989-2018. On retrouve le sud de la Sarthe et dans une moindre mesure l'est de la Vendée qui se réchauffent plus vite qu'ailleurs tandis que le centre de la Mayenne ne connaît pratiquement aucune évolution des températures minimales d'hiver. L'information intéressante est que l'augmentation des températures minimales de l'hiver est moins marquée que sur l'année complète.

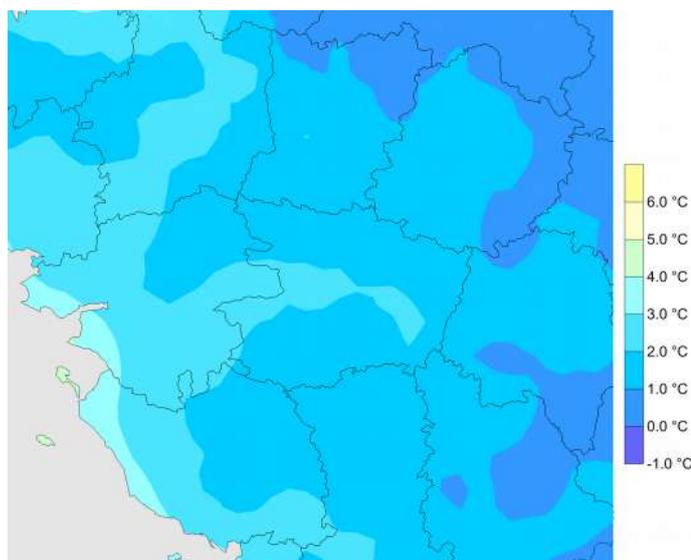


Illustration 27: Moyennes des températures minimales d'hiver 1959-1988

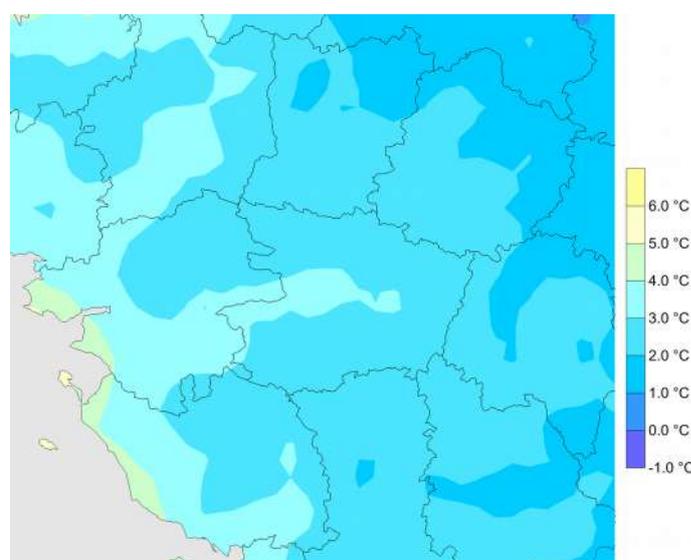


Illustration 28: Moyennes des températures minimales d'hiver 1989-2018

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 : on perd en moyenne 5 ou 6 jours sur le sud de la Sarthe, l'est de la Vendée et le nord-est de la Mayenne, de 2 à 4 jours ailleurs, sauf sur le centre de la Mayenne où la réponse au réchauffement semble plus limitée.

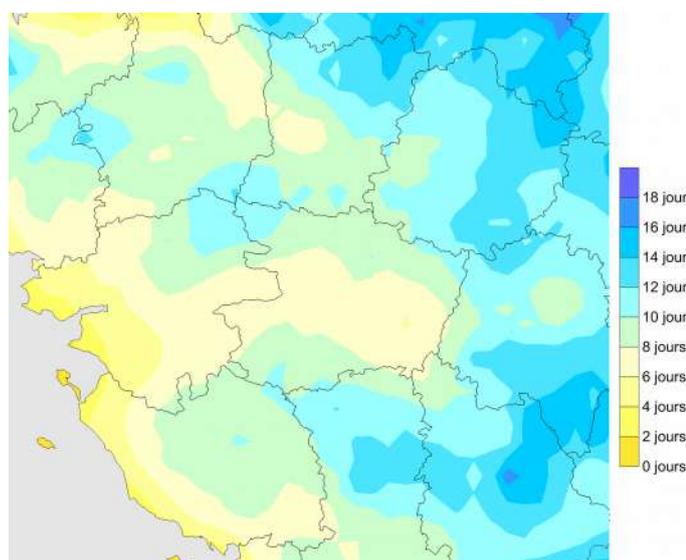


Illustration 29: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1959-1988)

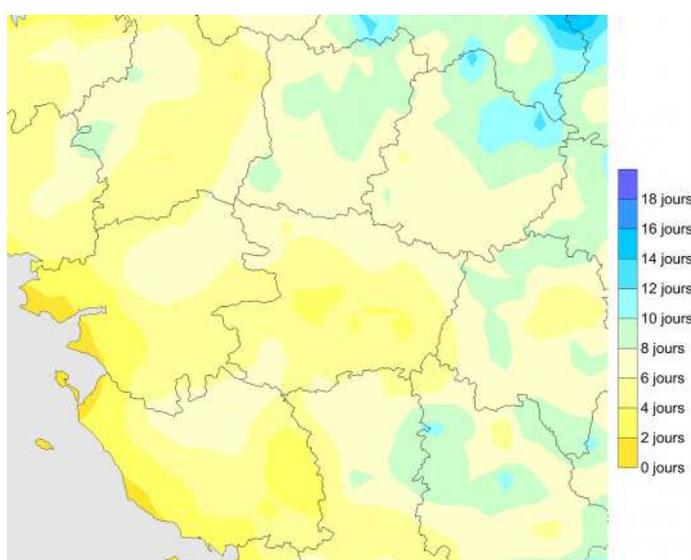


Illustration 30: Nombre moyen de jours de gel en mars-avril (1989-2018)

Les séries chronologiques suivantes permettent de comparer les données de la forêt de Mayenne (53) qui suit une progression plus lente que le reste de la région et de la forêt de Soubise (85) située dans la zone où le froid disparaît plus vite.

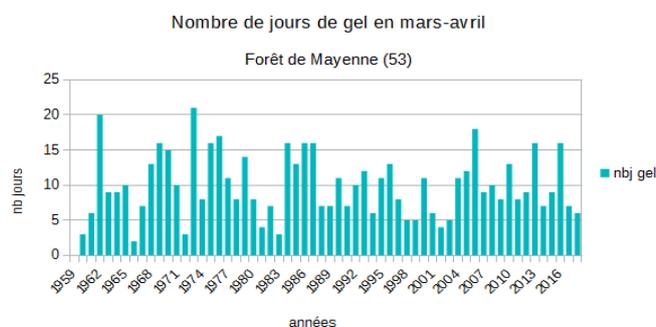


Illustration 31: Nombre de jours de gel en mars-avril à Mayenne (1959-2018)

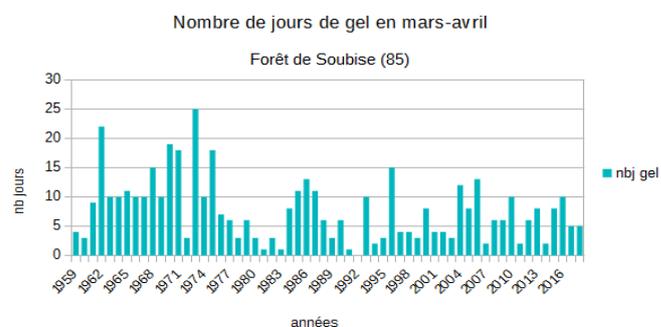


Illustration 32: Nombre de jours de gel en mars-avril à Soubise (1959-2018)

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 ligériens examinés (Soubise et Saumurois). On assiste donc à une diminution globale 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 la plus grande partie de la région, cette hausse étant même supérieure en Maine-et-Loire et en Sarthe, de 1,6 à 2 degrés, en moyenne.

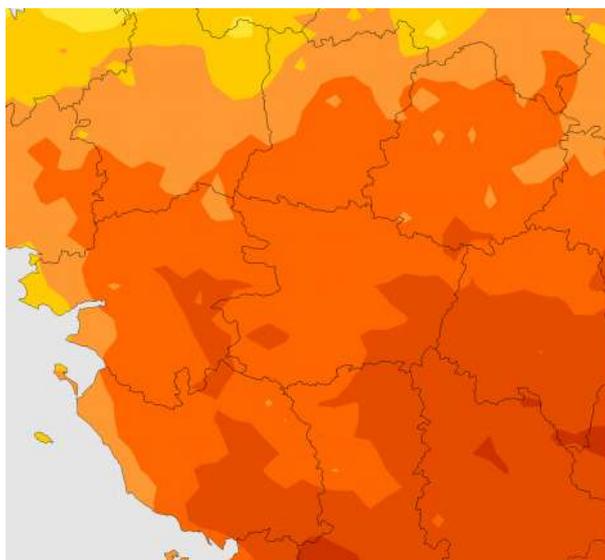


Illustration 33: Moyennes des températures maximales d'été (1959-1988)

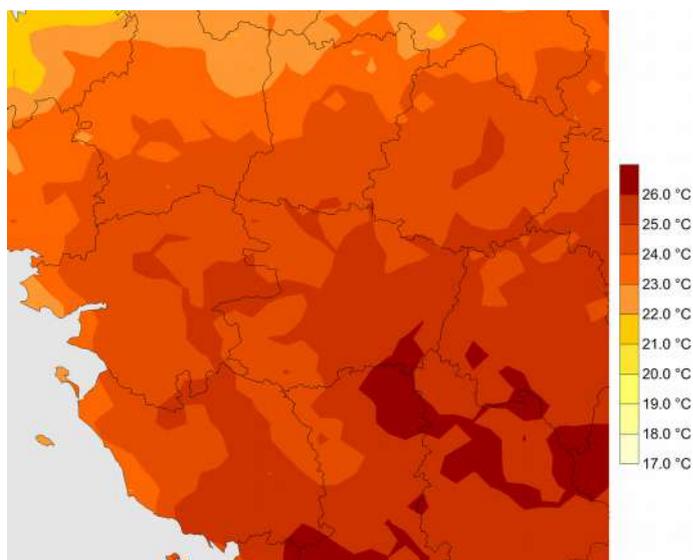


Illustration 34: Moyennes des températures maximales d'été (1989-2018)

Les jours de chaleur (> 25 °C) entre avril et octobre augmentent globalement d'une douzaine de jours par an entre 1959-1988 et 1989-2018, un peu moins sur le nord de la Mayenne (+ 8 à 10 jours) mais davantage sur le Layon et le Saumurois où le gain atteint jusqu'à 27 jours !

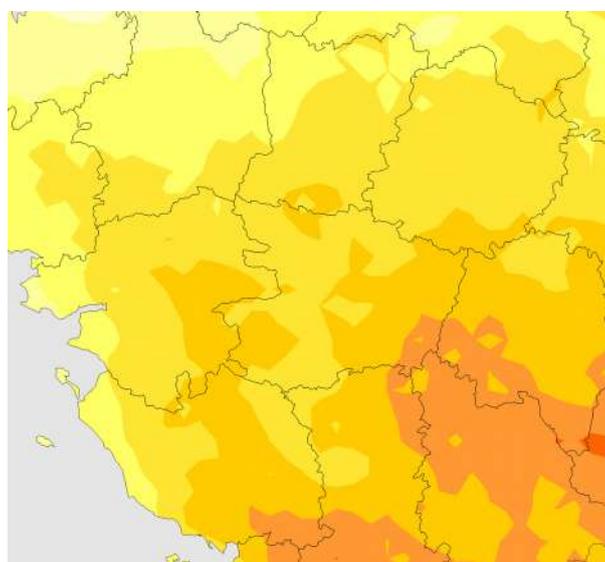


Illustration 35: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1959-1988)

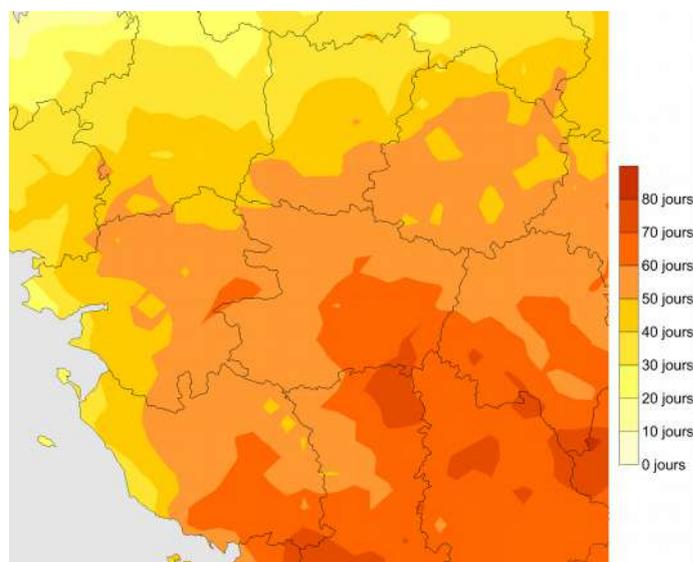


Illustration 36: Nombre moyen de jours de chaleur d'avril à octobre (1989-2018)

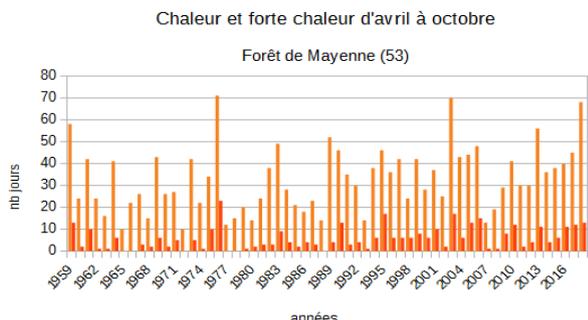


Illustration 37: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre à Mayenne (1959-2018)

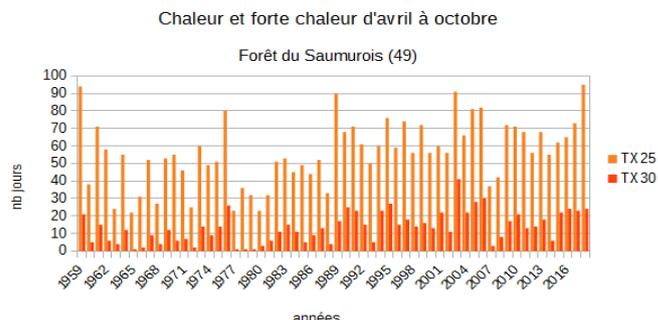


Illustration 38: nombre de jours de chaleur et forte chaleur d'avril à octobre en Saumurois (1959-2018)

On constate globalement une fréquence plus grande du phénomène de forte chaleur. Sur la forêt du Saumurois, les années 2003 à 2006, puis 2015 à 2018 ont connu plus de 20 jours par an avec des températures égales ou supérieures à 30 °C. Avant 2003, dépasser le seuil de 30°C plus de 20 jours par an présente une occurrence plus ponctuelle : en 1959, en 1976, en 1990 et 1991, en 1994 et 1995.

En forêt de Mayenne située en zone plus fraîche, on compte tous les ans plus de 30 jours à 25 °C ou plus ces 10 dernières années, alors qu'avant 1976, ce phénomène n'arrivait qu'une année sur 3 !

Les nuits tropicales ($\geq 18\text{ °C}$) telles que définies au paragraphe 3.1 sont également en augmentation.

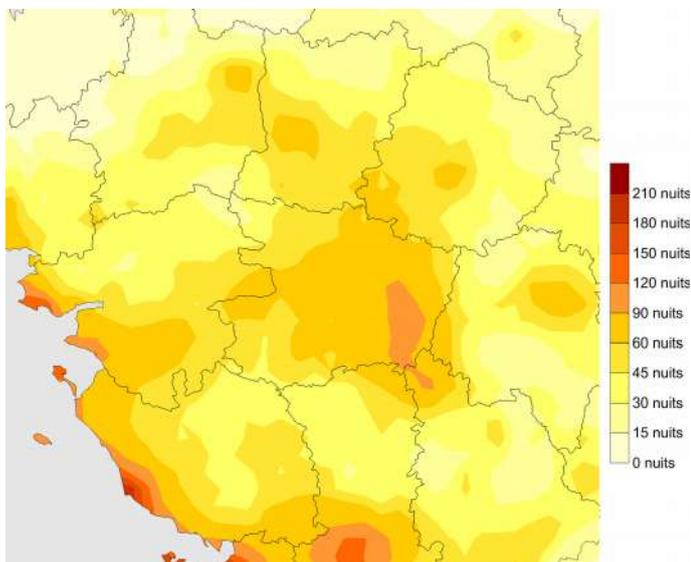


Illustration 39: Nombre total de nuits tropicales 1959-1988

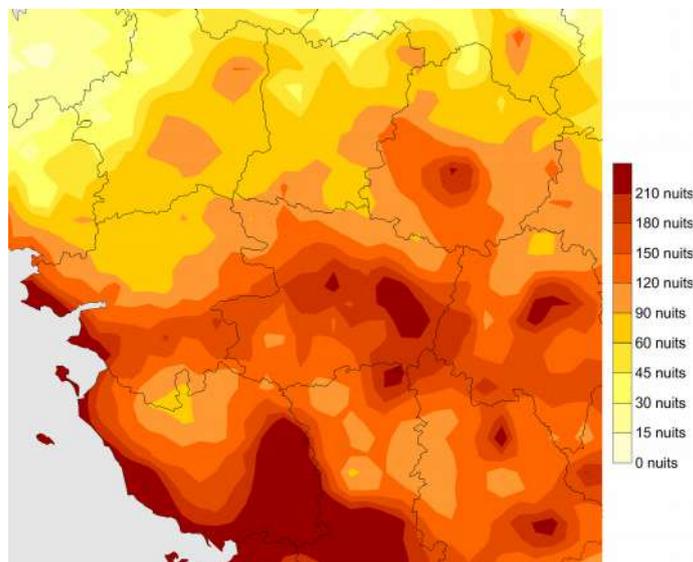


Illustration 40: Nombre total de nuits tropicales 1989-2018

Le phénomène est particulièrement marqué sur les côtes et le sud-est de la Vendée, qui gagne plus de 300 nuits de ce type sur la période de 30 ans, soit environ 10 nuits en plus par an ! Ailleurs, le phénomène est moins rapide, de l'ordre d'une centaine de nuits au total, gagnées entre 1959-1988 et 1989-2018. C'est encore moins sur la Mayenne, le nord de la Loire-Atlantique et le nord de la Sarthe avec un gain total de 20 à 60 nuits entre les 2 périodes de 30 ans.

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 forêt de Soubise, 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 depuis 2003 et s'accroît même.

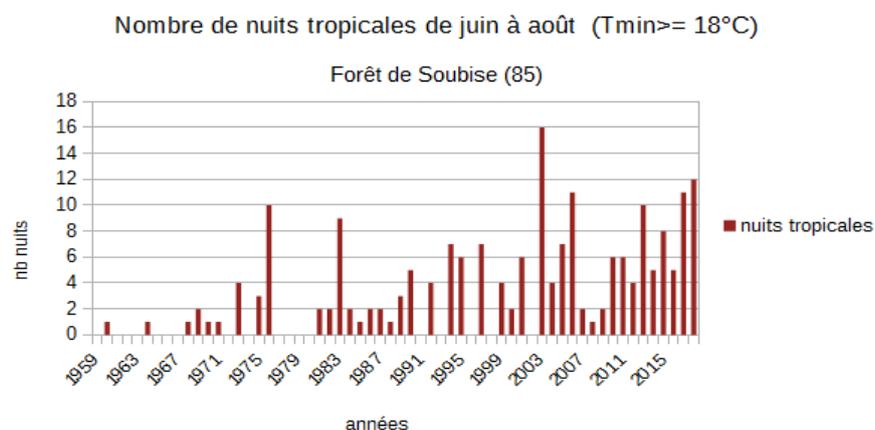


Illustration 41: Nombre de nuits à 18°C ou plus de juin à août à Soubise (1959-2018)

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

La situation n'est pas homogène, on observe une augmentation des cumuls de précipitations entre les 2 périodes sur la Loire-Atlantique et l'ouest du Maine-et-Loire, de l'ordre de 5 à 10 %, une diminution de la pluviométrie sur les reliefs du nord-ouest de la Mayenne, de l'ordre de 5 à 10 %, et une stagnation sur la plus grande partie du territoire (Sarthe, Vendée, sud de la Mayenne, est du Maine-et-Loire). La distribution spatiale des précipitations évolue peu, les forts cumuls se produisent sur les collines de Vendée et du nord-est de la région, où les reliefs sont plus marqués et captent sur leurs versants sud et ouest l'essentiel du contenu des perturbations atlantiques. Les régions les moins arrosées restent l'Anjou, le Baugeois, le Layon et le Saumurois.

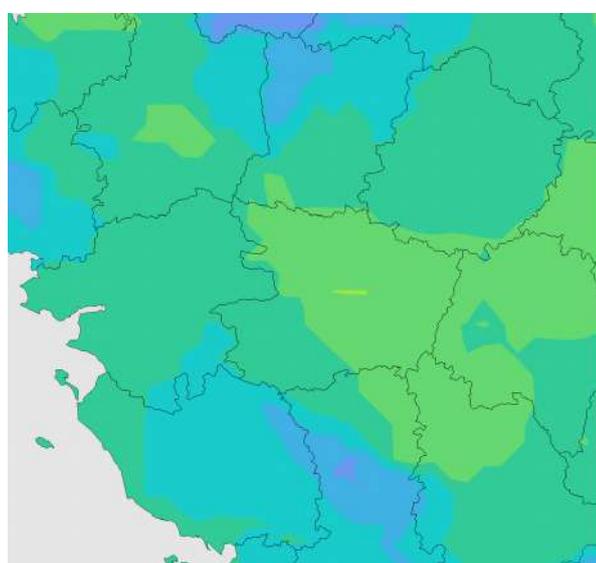


Illustration 42: Cumuls moyens annuels de précipitations 1959-1988

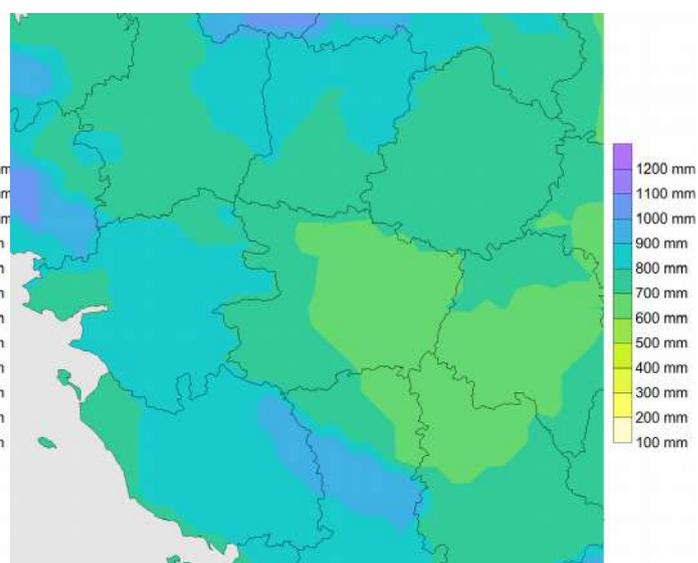


Illustration 43: Cumuls moyens annuels de précipitations 1989-2018

Les séries annuelles de la pluviométrie en forêt de Mayenne et en forêt du Gâvre montrent les comportements différents de la pluviométrie sur les deux territoires : diminution au nord-ouest de la Mayenne, légère augmentation sur l'ouest de la région.

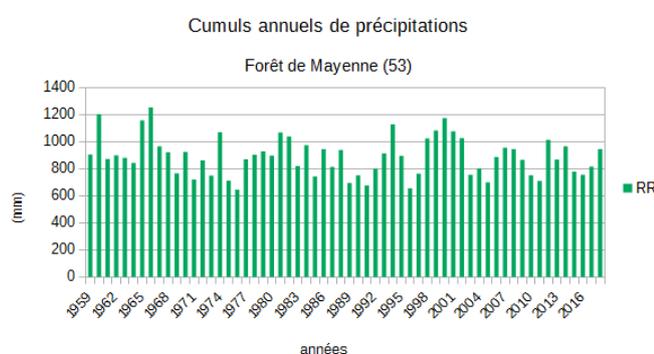


Illustration 44: Cumuls annuels de précipitations à Mayenne 1959-2018

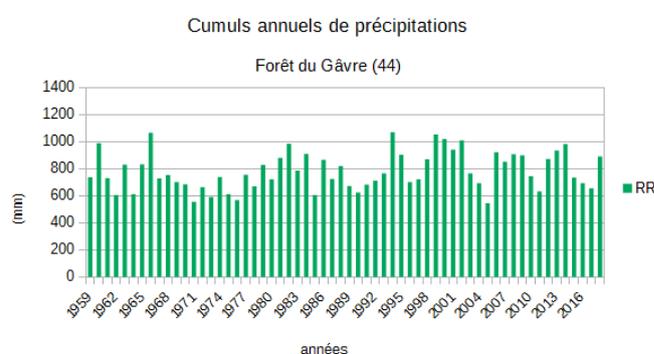


Illustration 45: Cumuls annuels de précipitations au Gâvre 1959-2018

Pour comprendre à quelle période de l'année se produisent les évolutions constatées, la pluviométrie moyenne des 2 périodes de 30 ans est comparée saison par saison à Nantes, à Angers et à Mayenne.

période	hiver			printemps			été			automne			année		
	Nantes	Angers	Mayenne	Nantes	Angers	Mayenne	Nantes	Angers	Mayenne	Nantes	Angers	Mayenne	Nantes	Angers	Mayenne
De 30 ans															
1959-1988	240	174	250	186	153	202	139	124	151	239	174	237	804	625	841
1989-2018	257	197	250	175	165	190	139	138	163	235	193	226	806	694	829

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

Les cumuls annuels n'évoluent pas à Nantes, baissent faiblement à Mayenne mais augmentent de 11 % à Angers. La pluviométrie augmente en toute saison à Angers, de 8 % au printemps à 13 % en hiver. A Nantes, la pluviométrie hivernale augmente aussi (7 %) mais baisse faiblement le reste de l'année, ce qui conserve l'équilibre annuel. A Mayenne, l'augmentation de la pluviométrie estivale (+8 %) ne compense pas la diminution sur les autres saisons. Ces constats traduisent l'influence océanique sur la façade atlantique jusqu'aux premiers reliefs rencontrés et l'influence plus continentale en Mayenne et en Sarthe.

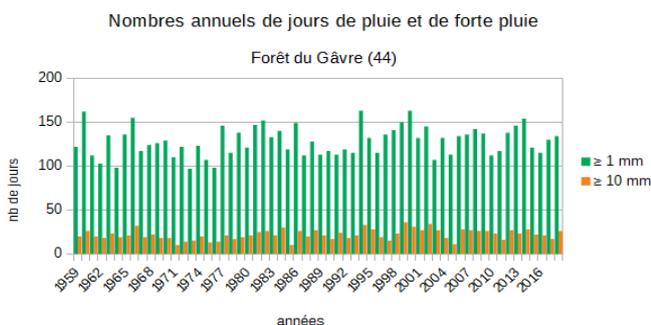


Illustration 47: Evolution chronologique des jours de pluie annuels au Gâvre (1959-2018)

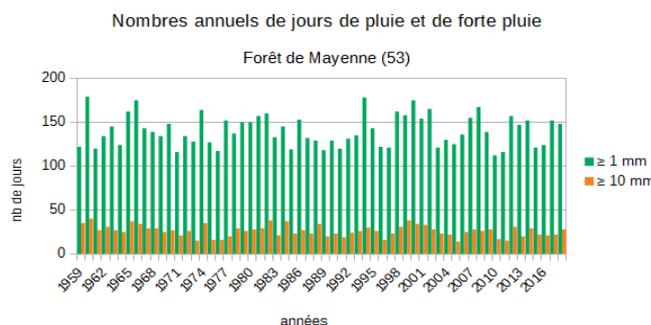


Illustration 48: Evolution chronologique des jours de pluie annuels à Mayenne (1959-2018)

Une faible tendance à la hausse du nombre de jours de pluie semble se dégager sur la forêt du Gâvre et une tendance à la baisse sur la forêt de Mayenne, à mettre en relation avec l'évolution de la pluviométrie annuelle constatée plus haut sur les cartes. Ces faibles tendances ne permettent pas d'affirmer que les événements pluvieux sont réellement plus nombreux ou plus abondants.

5.2.2 Précipitations estivales (juin à août)

La seule zone où les précipitations estivales baissent est la région des Mauges qui voit ses cumuls diminuer de 5 à 10 %. A l'inverse, la Sarthe, l'Anjou et le Baugeois connaissent l'augmentation la plus marquée, de l'ordre de 5 à 10 %. Les pluies d'été, d'origine plus instable, ont un comportement différent des précipitations du reste de l'année, et sont plus accentuées sur les territoires plus continentaux. Le reste de la région voit sa pluviométrie légèrement augmenter, avec un gain de l'ordre de 5 %.

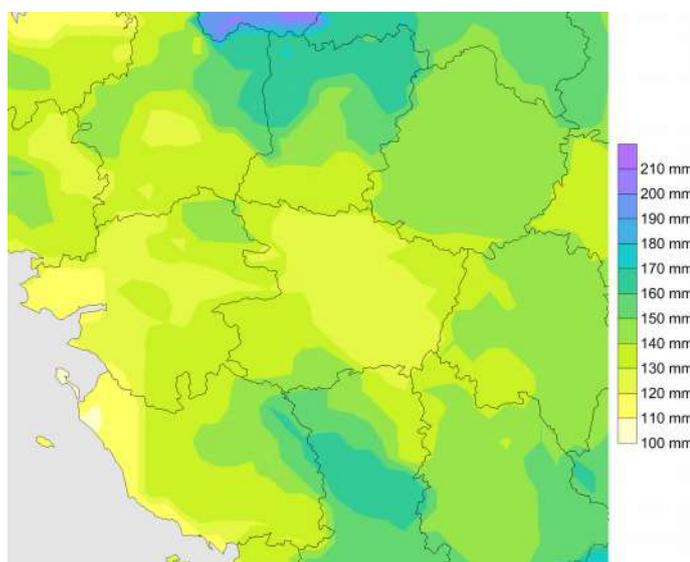


Illustration 49: Cumuls moyens de précipitations en été 1959-1988

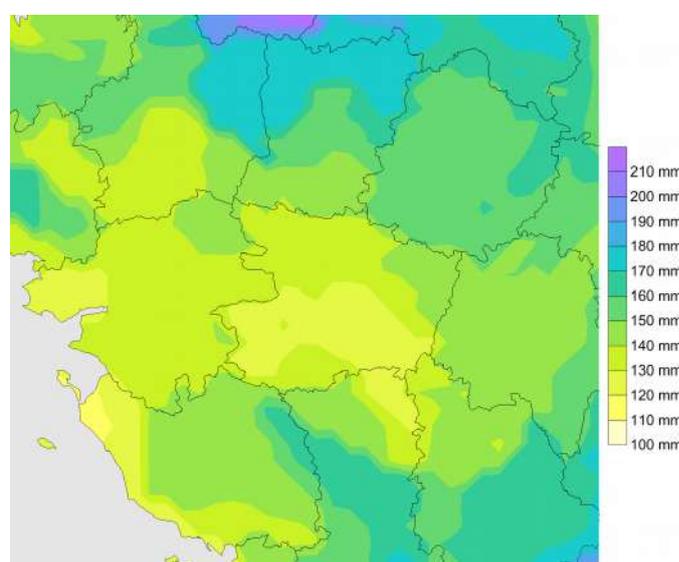


Illustration 50: Cumuls moyens de précipitations en été 1989-2018

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

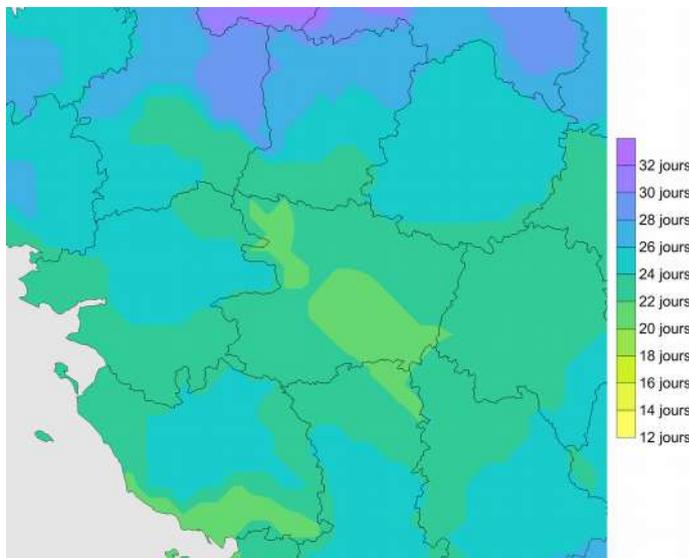
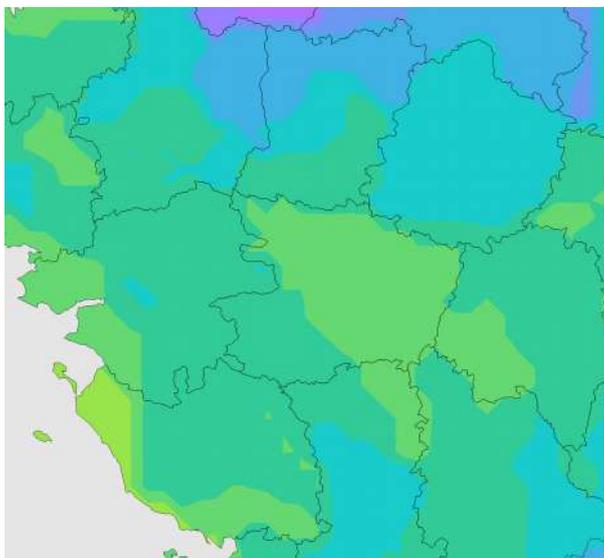


Illustration 51: Nombre moyen de jours de pluie en été 1959-1988

Illustration 52: Nombre moyen de jours de pluie en été 1989-2018

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. Cette hausse est minime par rapport au nombre de jours de pluie, mais elle peut expliquer en partie l'augmentation des précipitations estivales et apporter l'information que les épisodes de pluie sont plus nombreux et par conséquent pas forcément plus intenses. En été, il pleut en moyenne 1 jour sur 3 sur les zones de relief, 1 jour sur 4 ailleurs.

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

En lien avec la diminution des pluies estivales, les Mauges perdent environ 5 % de hauteur d'eau

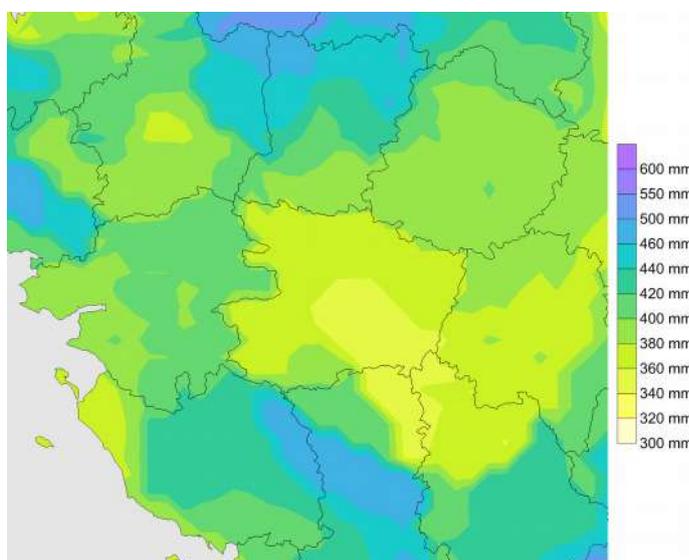
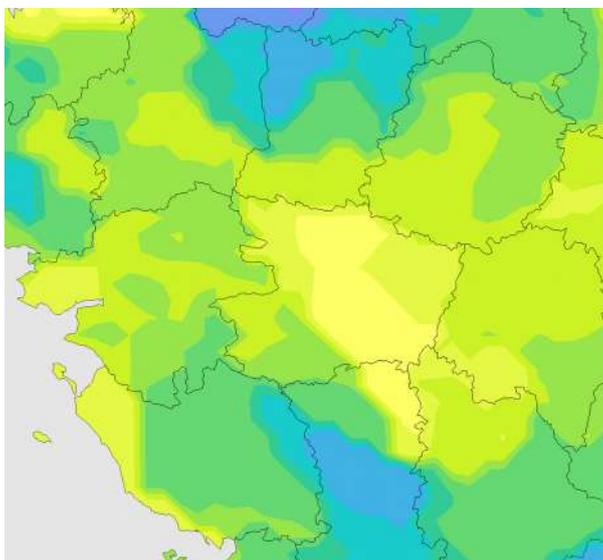


Illustration 53: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1959-1988)

Illustration 54: Cumuls moyens de précipitations d'avril à octobre (1989-2018)

sur la période de végétation, ce qui signifie que la perte estivale (de 5 à 10 %) est un peu compensée par les pluies de printemps et/ou d'automne, contrairement à ce qu'on a observé sur la région de Nantes ou de Mayenne au paragraphe 5.2.1.

L'autre territoire qui connaît une diminution de sa pluviométrie à cette période est le nord-ouest de la Mayenne, qui perd également environ 5 %, ce qui signifie que le gain estival (moins de 5 %) est effacé par des pertes au printemps ou à l'automne conformément à ce qui est constaté sur une grande partie des Pays-de-la-Loire suivant les exemples de Mayenne ou de Nantes donnés au paragraphe 5.2.1.

Ailleurs, la période de végétation voit plutôt ses cumuls augmenter, jusqu'à 12 % sur l'Anjou, le Layon et le Saumurois, de 5 à 10 % sur la Sarthe, la Loire-Atlantique et la Vendée.

5.3 L'évapotranspiration potentielle ETP

5.3.1 L'ETP annuelle

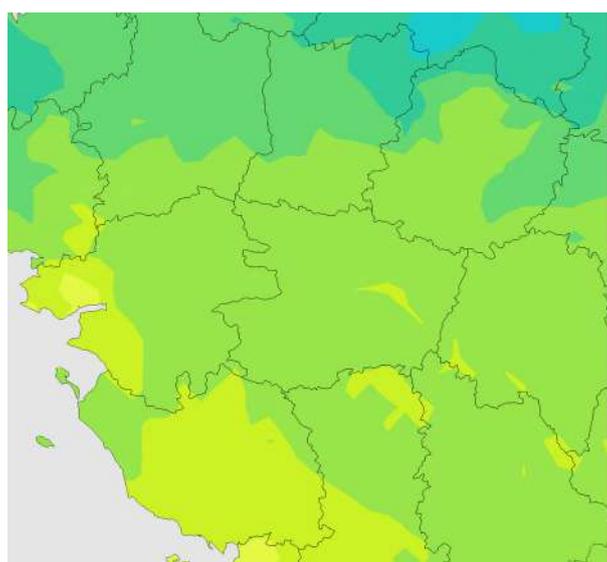


Illustration 56: Cumuls moyens annuels d'ETP 1959-1988

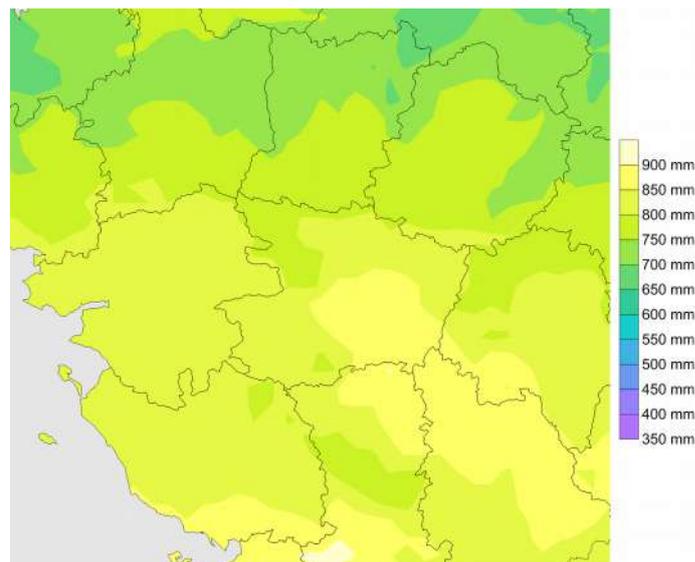


Illustration 55: Cumuls moyens d'ETP 1989-2018

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 de 40 à 80 mm sur la Vendée, les côtes de Loire-Atlantique, la Mayenne, la Sarthe, et de 80 à 120 mm sur le reste de la Loire-Atlantique et le Maine-et-Loire, voire davantage sur le Layon et le Saumurois. Ces valeurs représentent 15 à 20 % d'augmentation pour un axe allant du nord de Nantes à Saumur et inférieure à 10 % ailleurs. La forte hausse

d'ETP est directement liée à la forte hausse 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 Pays Nantais, les Mauges, le Layon et le Saumurois, ainsi que le Haut-Maine, le Pail et les Alpes Mancelles où l'augmentation représente de 15 à 20 %.

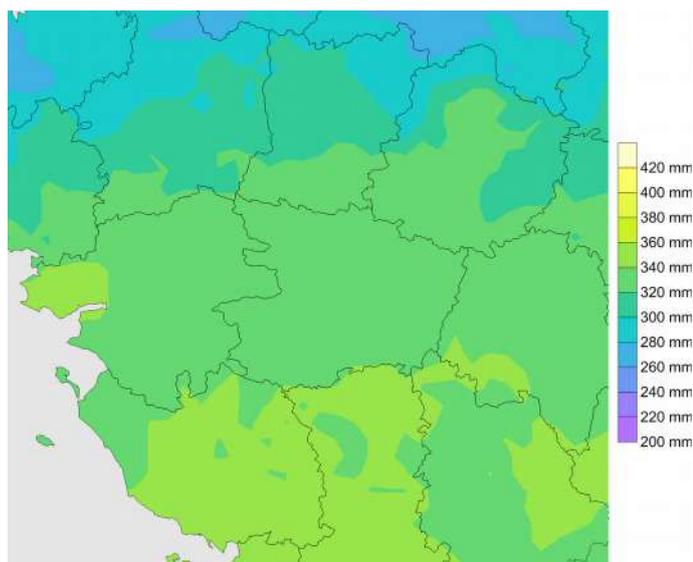


Illustration 57: Cumuls moyens d'ETP en été 1959-1988

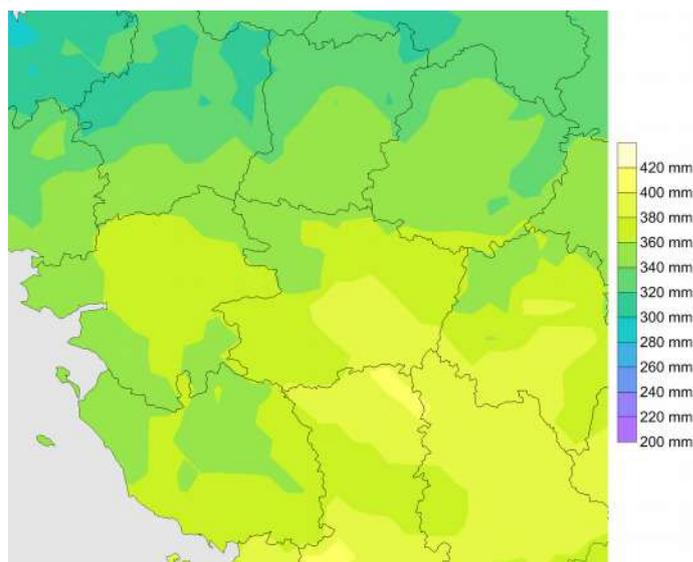


Illustration 58: Cumuls moyens d'ETP en été 1989-2018

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

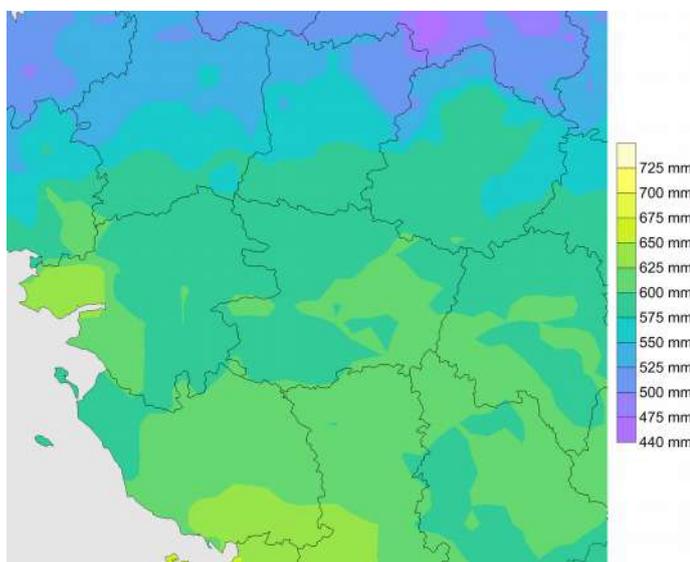


Illustration 59: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1959-1988)

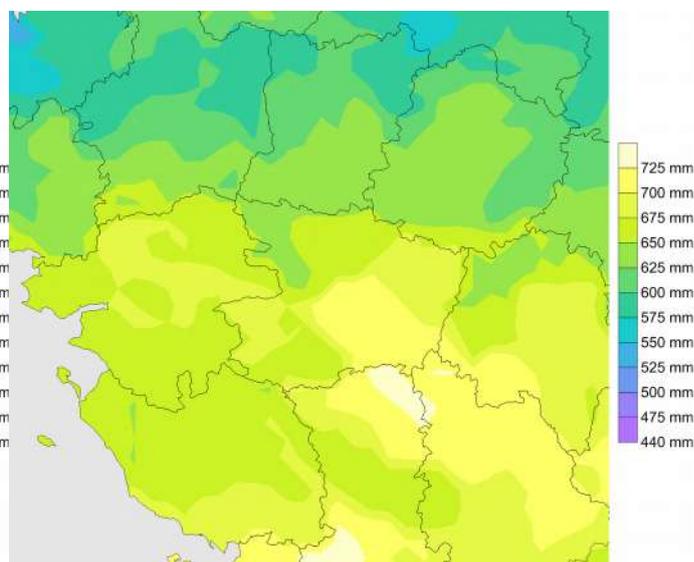


Illustration 60: Cumuls moyens d'ETP d'avril à octobre (1989-2018)

potentielle en période de végétation.

Les valeurs de la hausse sont de l'ordre de 40 à 60 mm pour la Mayenne, la Sarthe et la Vendée, de 70 à 110 mm sur la Loire-Atlantique et le Maine-et-Loire, 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, et correspond grossièrement à la vallée de la Loire, du nord de Nantes à Saumur.

5.4 Indicateurs bioclimatiques

Les précipitations sont en légère augmentation pour l'ouest de la région, en légère diminution pour les zones les plus éloignées de la mer, 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

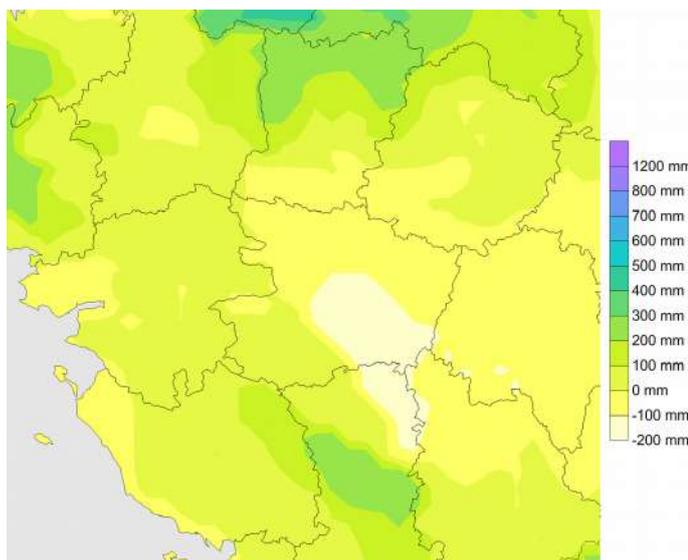


Illustration 61: Bilans moyens annuels P-ETP 1959-1988

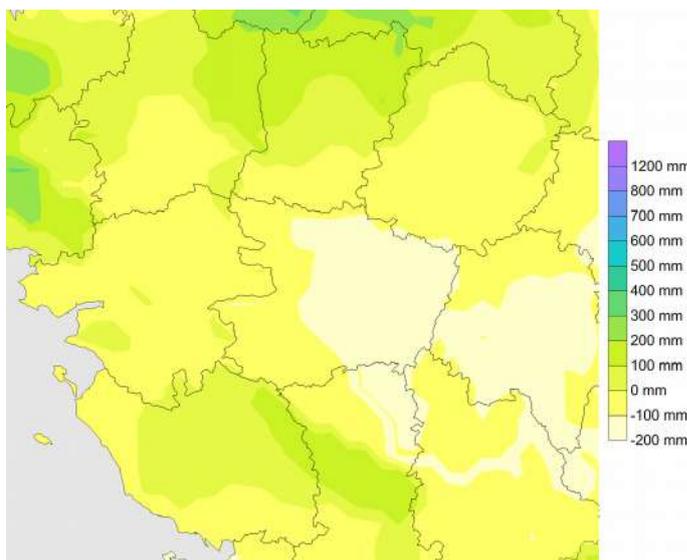


Illustration 62: Bilans moyens annuels P-ETP 1989-2018

Sur l'année, le bilan P-ETP perd entre 50 et 100 mm, ce qui représente pour la côte atlantique, la Vendée et le sud de la Mayenne -20 à -40 % du bilan annuel de la période 1959-1988 ! Les écarts les plus importants se portent sur le Layon et le Saumurois et atteignent une baisse de 50 à 80 %!

Précipitations (RR) et évapotranspiration (ETP)Forêt du Gâvre (44)

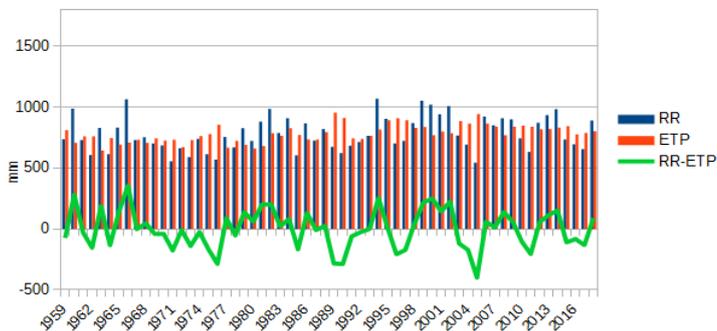


Illustration 63: Evolution du bilan hydrique annuel au Gâvre (1959-2018)

Précipitations (RR) et évapotranspiration (ETP)Forêt du Saumurois (49)

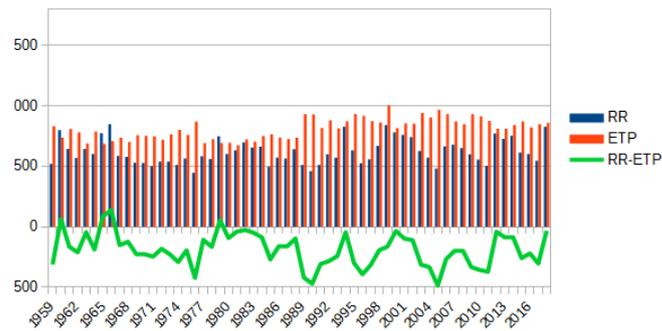


Illustration 64: Evolution du bilan hydrique annuel en Saumurois (1959-2018)

L'évolution du bilan hydrique année par année met en évidence des périodes plus sèches comme les années 1976, 1989, 1990 ou encore 2005.

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

En été, la baisse de bilan entre les 2 périodes concerne surtout la Loire-Atlantique et le Maine-et-Loire avec une perte de 20 à 60 mm en allant du littoral vers les Mauges, le Layon et le Saumurois. La Vendée, la Mayenne et la Sarthe affichent une baisse de bilan plus limitée, de l'ordre de 20 à 40 mm. Sur l'été, c'est une diminution de bilan de 25 à 50 %.

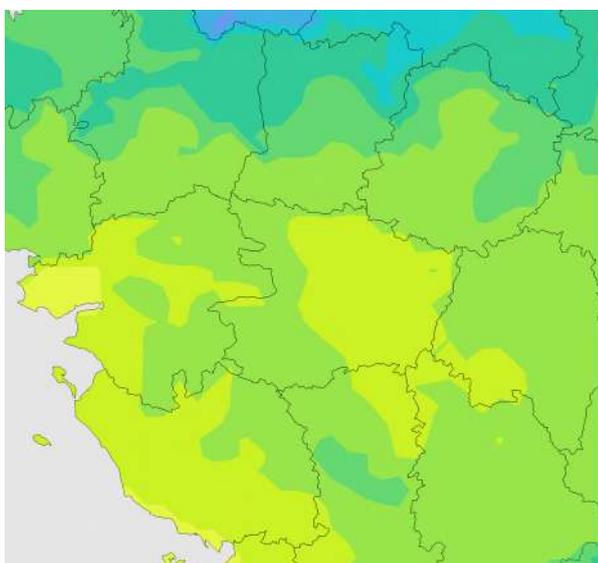


Illustration 65: Bilans moyens P-ETP en été 1959-1988

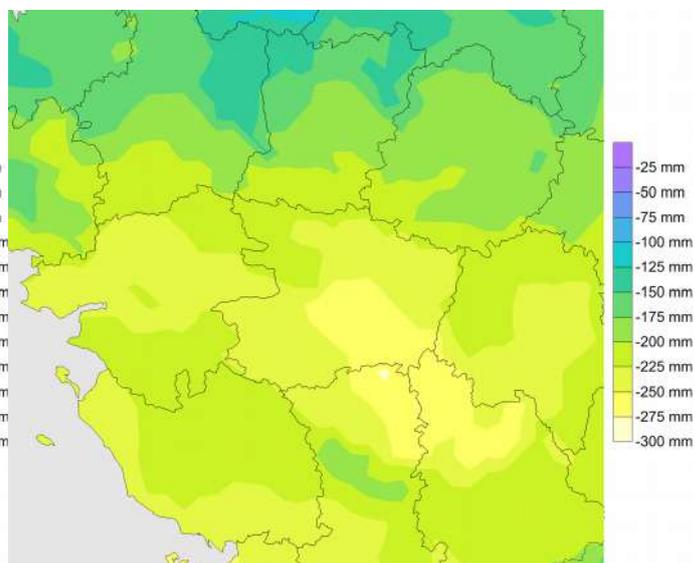


Illustration 66: Bilans moyens P-ETP en été 1989-2018

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

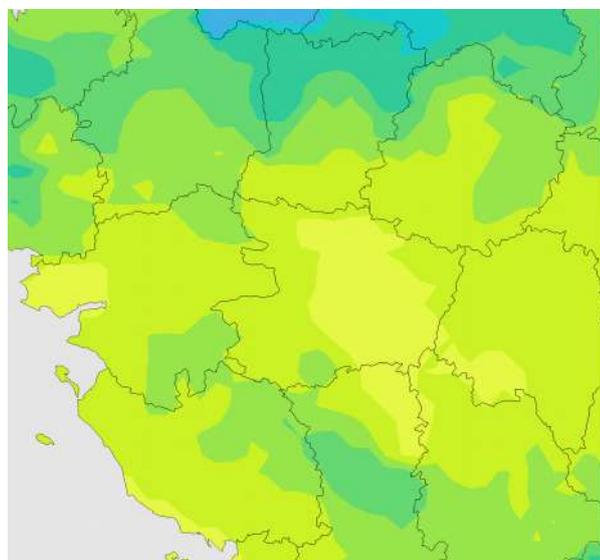


Illustration 67: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1959-1988)

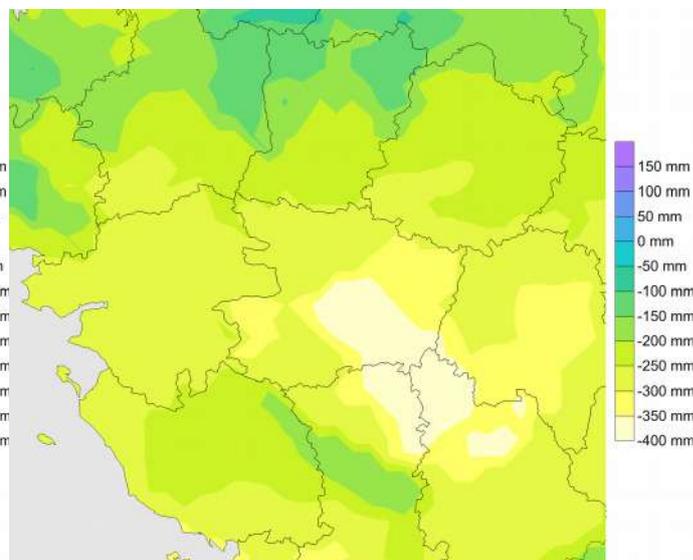


Illustration 68: Bilans moyens P-ETP d'avril à octobre (1989-2018)

Pour cette période, la baisse du bilan entre les 2 périodes varie de 20 mm (-10%) sur le sud de la Mayenne, à 100 mm (-30 %) au sud du Maine-et-Loire. L'augmentation de la pluviométrie pour une grande partie de la région sur la période de végétation explique sans doute pourquoi la baisse du bilan sur ces 7 mois n'est pas plus forte.

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.

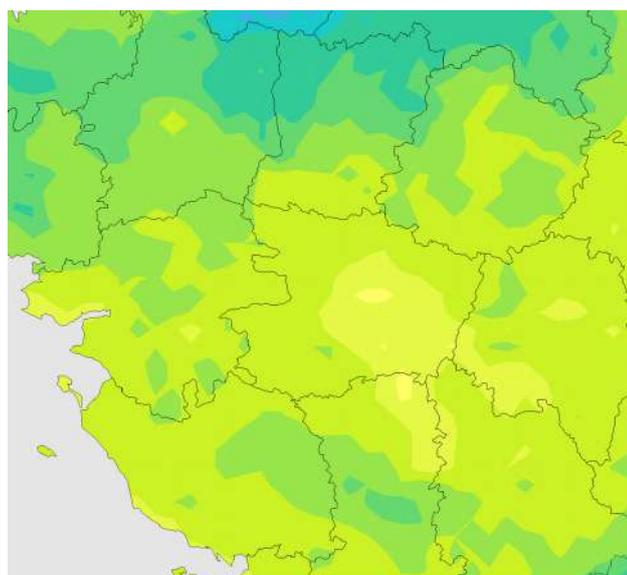


Illustration 69: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1959-1988

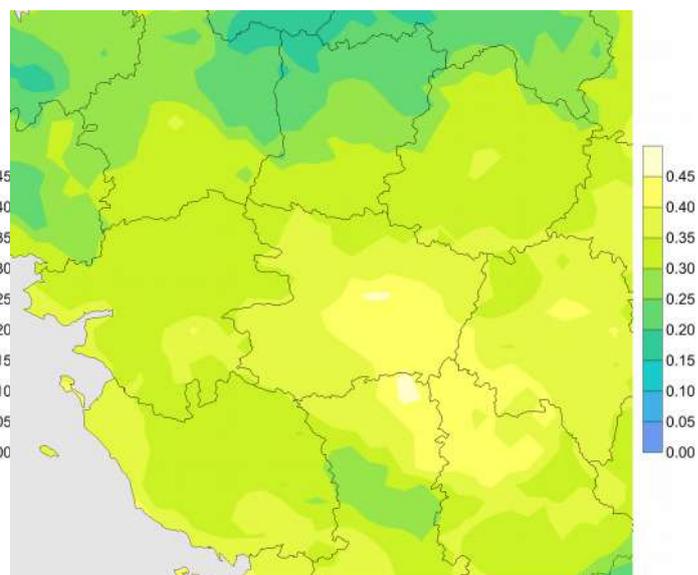


Illustration 70: Pseudo-déficit hydrique relatif annuel 1989-2018

Entre 1959-1988 et 189-2018, le déficit hydrique grimpe de 0,05 sur tous les territoires, ce qui représente 15 % d'augmentation sur les zones les plus sèches (Layon et Saumurois), 30 % d'augmentation sur les zones les plus humides (nord-ouest de la Mayenne).

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 les Pays-de-la-Loire 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 sur la Loire-Atlantique et le nord du Maine-et-Loire en perdant en moyenne 10 à 15 mois secs sur 30 ans, soit 1 mois tous les 2 ans. Partout ailleurs, l'indicateur augmente, avec une moyenne de 5 à 10 mois secs supplémentaires pour 30 ans. La hausse est plus sensible sur la Sarthe avec un gain de l'ordre de 15 mois sur le sud du département.

Les séries chronologiques sur la période de végétation montrent bien la diminution du nombre de mois secs sur la Loire-Atlantique et une relative stagnation de l'indicateur sur la Sarthe. Elles révèlent également la succession d'années sèches tout au long des séries, notamment la période

1989-1991.

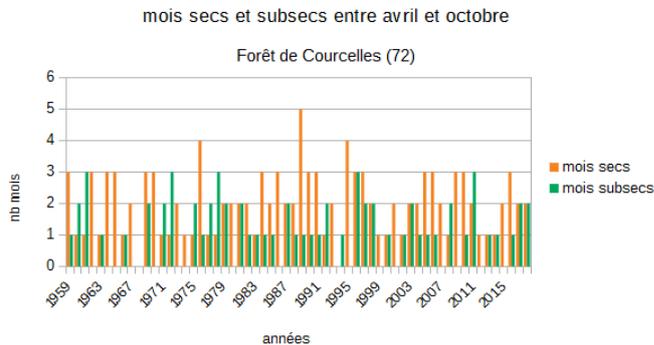
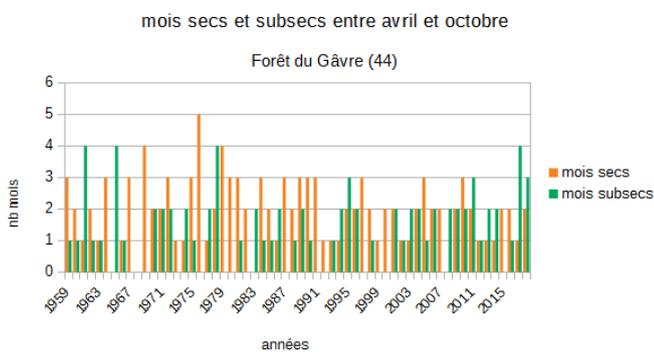


Illustration 72: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre au Gâvre (1959-2018)

Illustration 71: Nombre de mois secs et subsecs entre avril et octobre à Courcelles (1959-2018)

Le nombre de mois subsecs ($2T < P < 3T$) est en légère hausse, et la méthode de calcul suivant l'année-type permet de cartographier les 2 périodes 1959-1988 et 1989-2018. Sont touchées par cette hausse le littoral atlantique, les Gâtines, le sud de la Mayenne et la Sarthe.

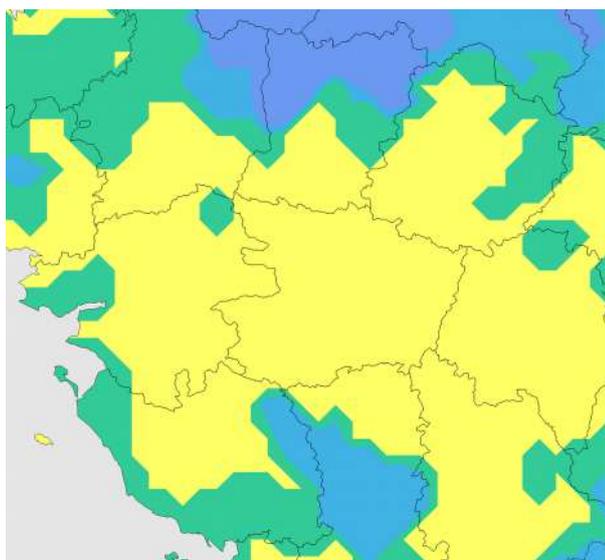


Illustration 73: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1959-1988

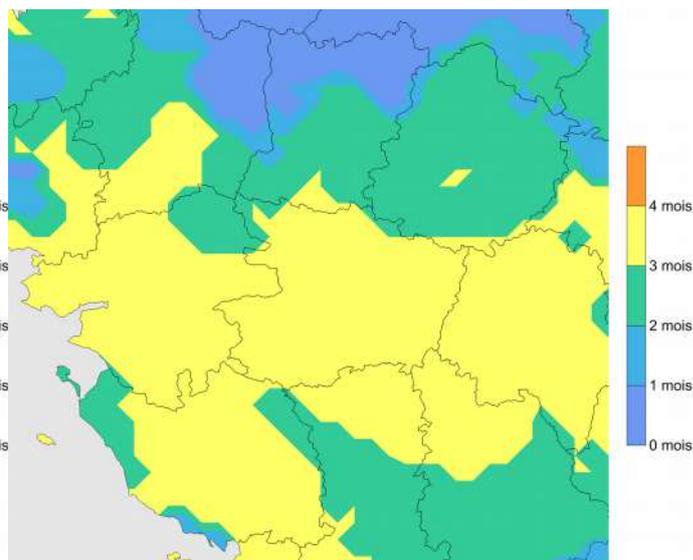


Illustration 74: Nombre moyen annuel de mois subsecs 1989-2018

5.5 Synthèse des tendances depuis 1959

Les Pays-de-la-Loire constituent une région très hétérogène dont l'évolution du climat présente de multiples aspects.

La hausse des températures est générale mais se traduit différemment suivant les territoires :

- l'est des Pays-de-la-Loire (Layon, Saumurois, sud Sarthe) connaît une élévation marquée des températures maximales, particulièrement les températures d'été (de 1,6 à 2 °C), ce qui se traduit par une augmentation importante du nombre de jours de chaleur en saison de végétation (jusqu'à 27 jours supplémentaires par an)
- le centre de la Mayenne, qui correspond à la vallée de la Mayenne, semble conserver une certaine inertie par rapport à l'évolution des températures. La hausse est confirmée mais limitée par rapport aux territoires voisins beaucoup plus réceptifs, le phénomène est visible sur les températures maximales (de +0,6 à +0,8 °C) comme sur les températures minimales (de +0,2 à +0,4 °C), et la moindre évolution des phénomènes de chaleur et de gel
- on assiste également à un recul du froid, qui se traduit par une élévation des températures hivernales (1 °C en moyenne) et une diminution des gelées au printemps qui atteint jusqu'à -6 jours sur les reliefs de la région, ce qui favorise un développement plus précoce de la végétation
- les côtes atlantiques sont préservées du fort réchauffement, mais sont plus sensibles au réchauffement nocturne et le nombre de nuits dites tropicales augmente plus vite qu'ailleurs en raison de la proximité de la mer dont l'inertie thermique est plus grande (gain de 10 nuits par an avec une température nocturne à 18 °C ou plus).

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, un allongement de la saison de végétation amenant un développement de la végétation de plus en plus précoce et des gelées moins fréquentes. Il n'existe cependant pas de signe relatif aux dates de dernières gelées, ce qui est à relier au fait que les températures les plus froides évoluent moins vite que les températures les plus chaudes.

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

La pluviométrie présente une forte variabilité. Les 4 périodes de 30 ans disponibles montrent des fluctuations et ne peuvent permettre de conclure à des tendances. Sur certains territoires, en

particulier en proximité de la Loire, on constate une augmentation significative de la pluviométrie annuelle (de 5 à 10 %). On observe également une diminution sur le nord-ouest de la Mayenne (les collines d'Ernée) qui perd 5 à 10 %. Ailleurs, il ne semble pas exister d'évolution tangible de la pluviométrie annuelle.

Suivant les saisons, les territoires se comportent différemment :

- en été, les précipitations baissent sur les Mauges mais le reste de la région bénéficie plutôt d'une petite augmentation, plus visible sur la Sarthe et le nord-est du Maine-et-Loire (de + 5 à 10 %). Cette augmentation est associée à un nombre de jours de pluie légèrement croissant, en particulier sur le littoral atlantique (+2 à 3 jours) et ne peut pas être imputée uniquement à des pluies qui seraient plus intenses (orages par exemple).
- la hausse de la pluviométrie hivernale compense les variations observées au printemps et à l'automne, sauf sur les collines d'Ernée.

En lien avec l'augmentation de la pluviométrie, on constate sur la Loire-Atlantique et le nord du Maine-et-Loire une diminution du risque de mois secs. En revanche, l'indicateur « mois subsecs » semble plutôt augmenter. Ceci est à mettre en parallèle avec l'augmentation de l'ETP, plus forte sur le Layon et le Saumurois.

Les Pays-de-la-Loire sont une mosaïque de territoires où la synthèse des tendances climatiques est compliquée par les effets combinés du réchauffement, de l'augmentation du rayonnement et de la grande variabilité spatiale et saisonnière de la pluviométrie. Dans ces conditions, les départements du Maine-et-Loire, de la Sarthe et de la Vendée sont susceptibles de connaître les situations les plus critiques, car très dépendants d'une pluviométrie aléatoire.

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 européenne, 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 XXI^{ème} 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 5^e 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

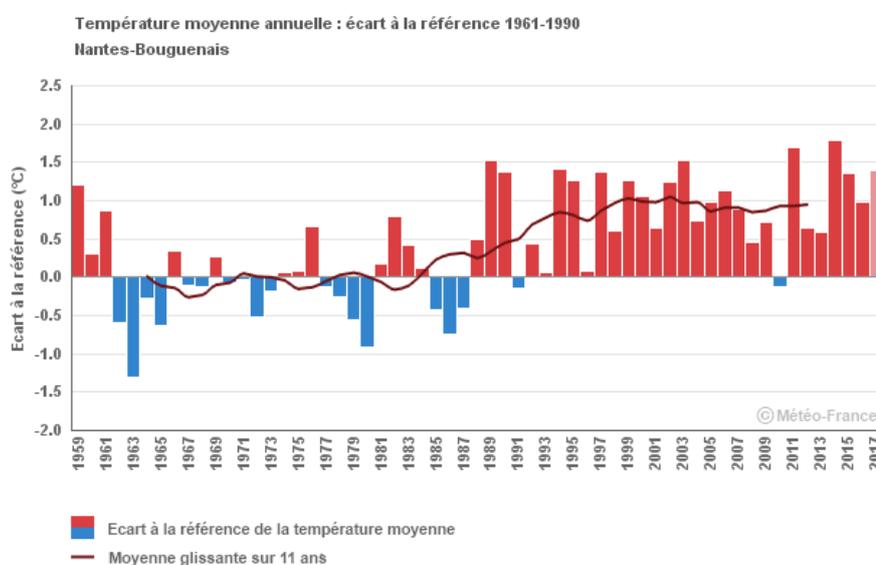
en déduisent des projections climatiques globales ou régionales. Les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques compatibles avec les RCP.

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/m^2 (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

Dans les Pays-de-la-Loire 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 sur les Pays-de-la-Loire ont été sensiblement plus nombreuses au cours des 36 dernières années que sur la période antérieure.

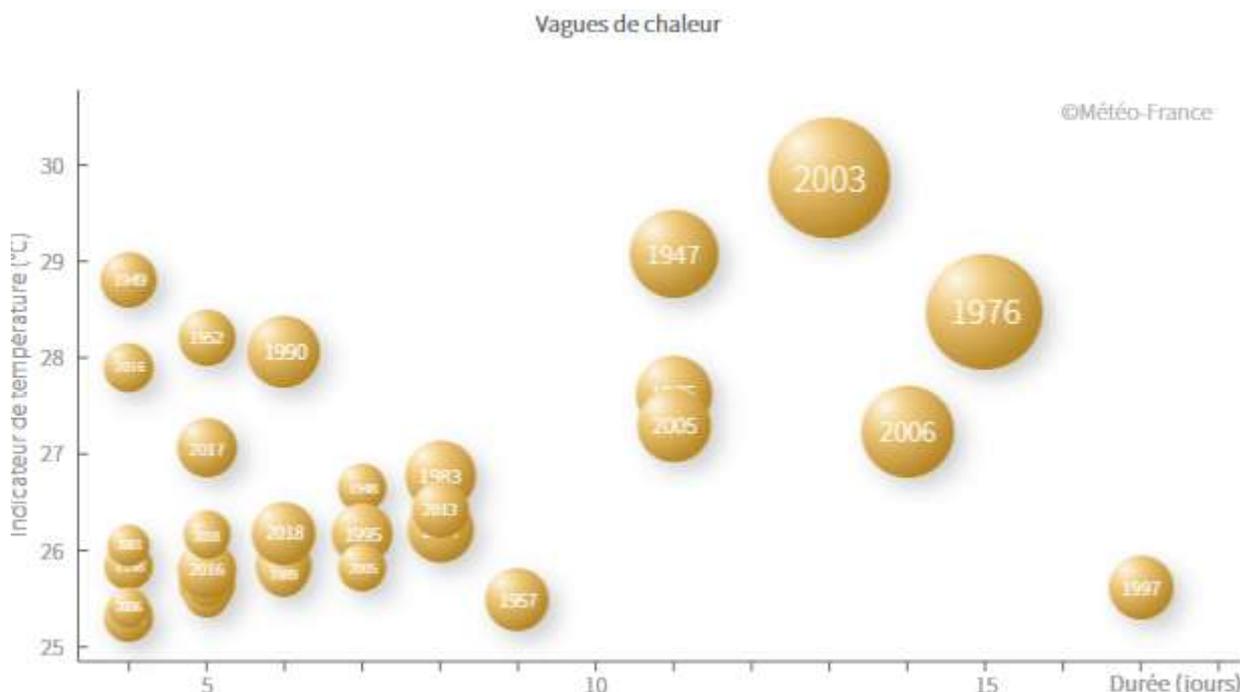


Illustration 75: Vagues de chaleur sur les Pays-de-la-Loire depuis 1947

Les canicules observées du 3 au 15 août 2003 et du 22 juin au 6 juillet 1976 sont 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

1 Au moment de la finalisation de ce rapport, de nouveaux records sont tombés sur les Pays-de-la-Loire 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>).

importante. Sur la période 1959-2018, les tendances annuelles et saisonnières sont globalement peu marquées.

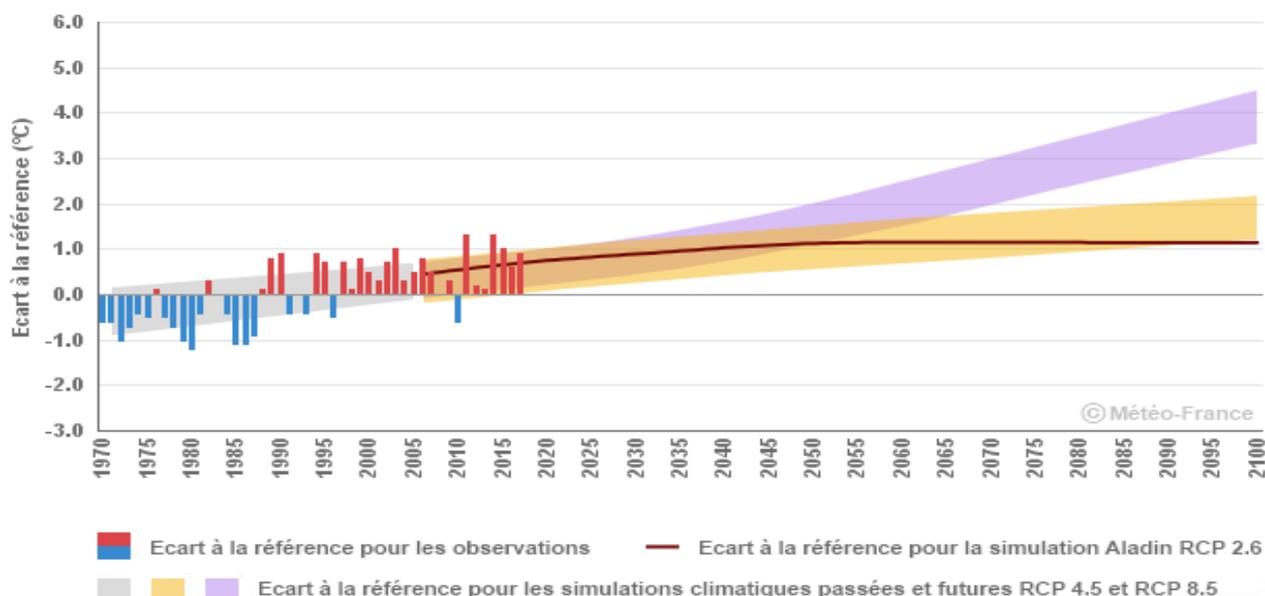
Faute d'un accroissement marqué du cumul de pluie, l'augmentation de la température favorise donc l'augmentation de phénomènes comme la sécheresse et le déficit en eau dans le sol, essentiellement par effet d'évaporation. Cependant, les changements d'humidité des sols sont encore peu marqués, et on note actuellement 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 ?

Dans les Pays-de-la-Loire, 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 4 °C à l'horizon 2071-2100. Le nombre de journées chaudes est également en augmentation. 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 19 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 51 jours selon le RCP8.5.

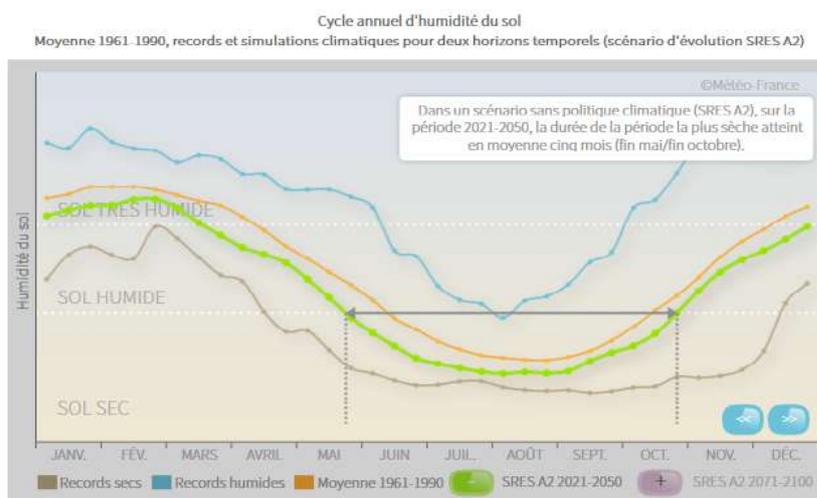
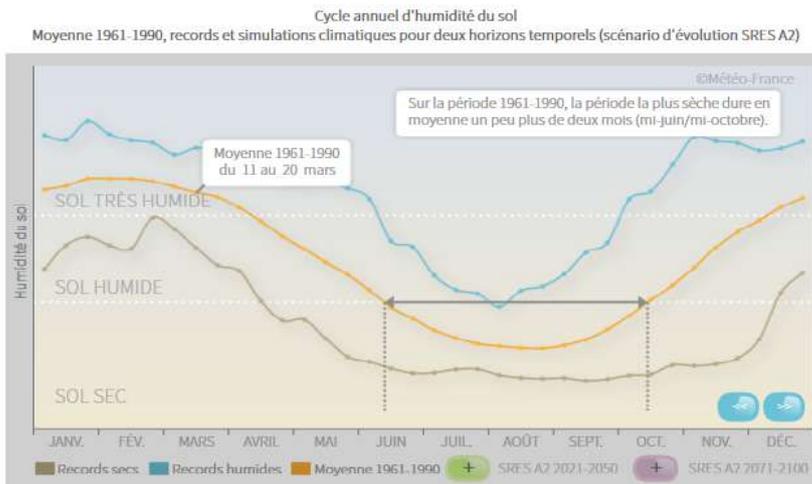
Température moyenne annuelle en Pays de la Loire : écart à la référence 1976-2005
Observations et simulations climatiques pour trois scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5



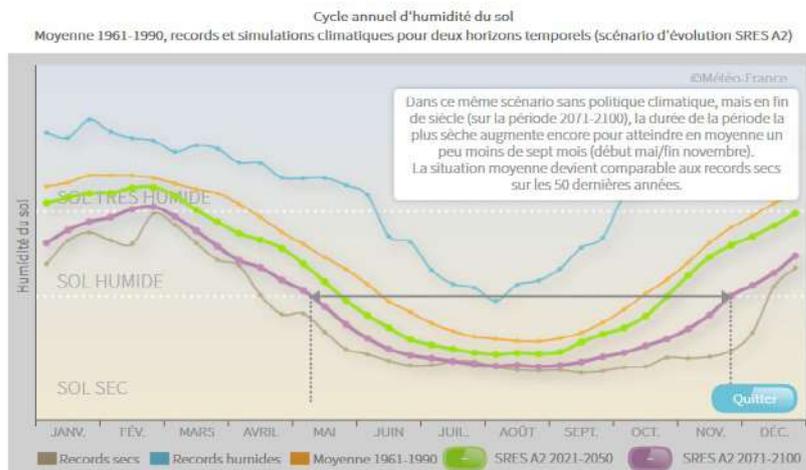
Le nombre de gelées est également en diminution. Jusqu'au milieu du XXI^e siècle cette diminution est assez similaire d'un scénario à l'autre. À l'horizon 2071-2100, cette diminution serait de l'ordre de 17 jours par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP4.5 et de 22 jours selon le RCP8.5.

Quel que soit le scénario considéré, 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 les Pays-de-la-Loire entre la période de référence climatique 1961-1990 et les horizons temporels proches 2021-2050 (courbe verte) ou lointains 2071-2100 (courbe violette) 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 des Pays-de-la-Loire, la hausse des températures est une certitude qui se traduit différemment sur les côtes et dans l'intérieur, sur le nord de la région et sur le sud. Il est 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, en raison de sa variabilité temporelle combinée à une grande variabilité spatiale. Pourtant les excès d'eau comme 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 débordent 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.

Évapotranspiration 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.

Évapotranspiration 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

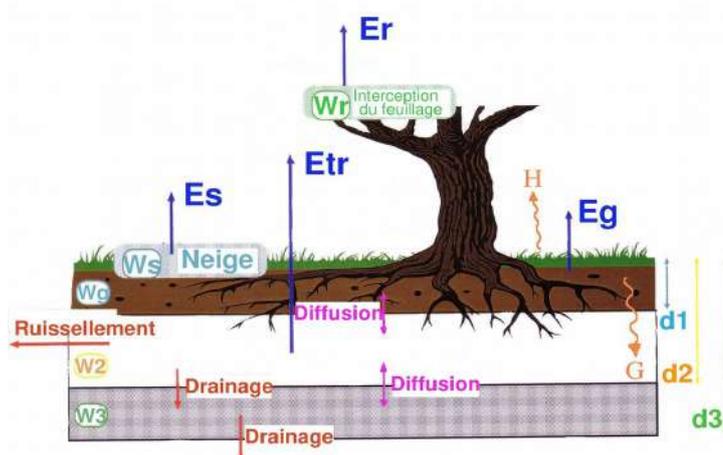


Illustration 76: Modélisation ISBA utilisée dans SIM

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 $E_{tr}+E_r+E_g+E_s$. 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

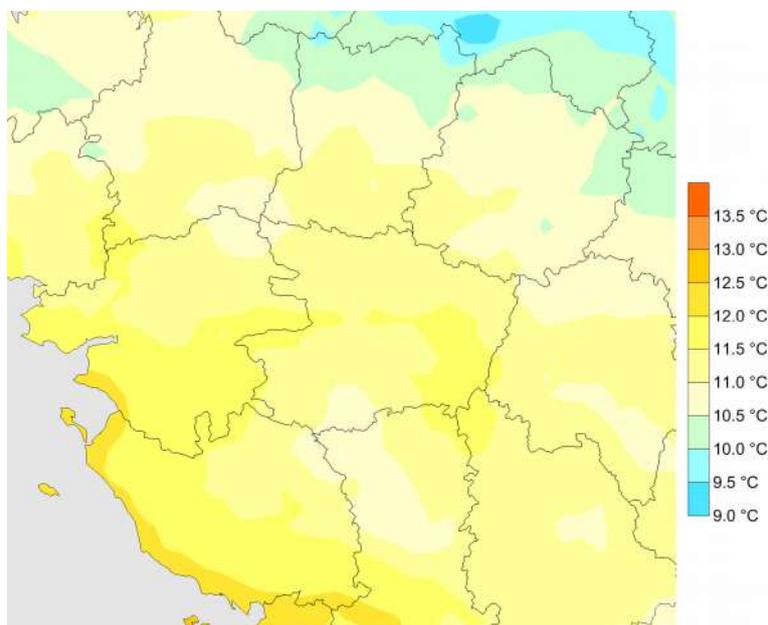


Illustration 77: Températures moyennes annuelles 1959-1988

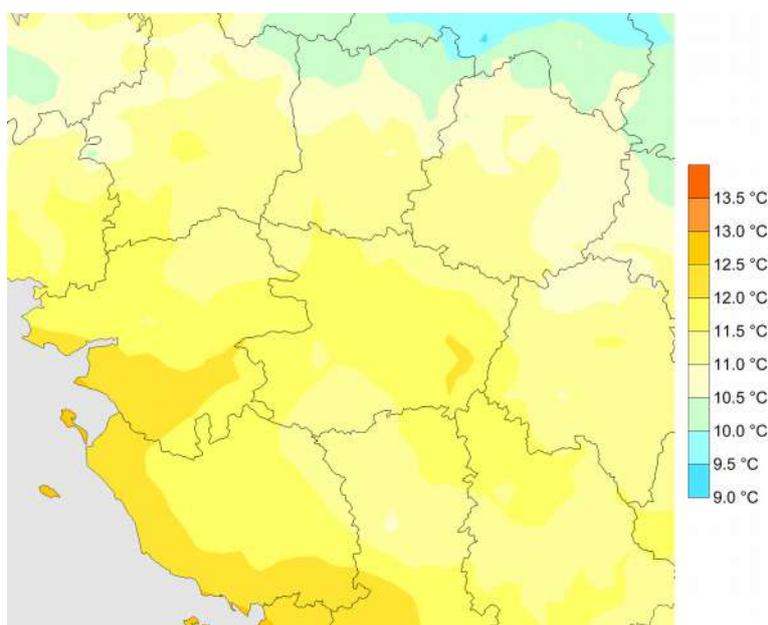


Illustration 78: Températures moyennes annuelles 1969-1998

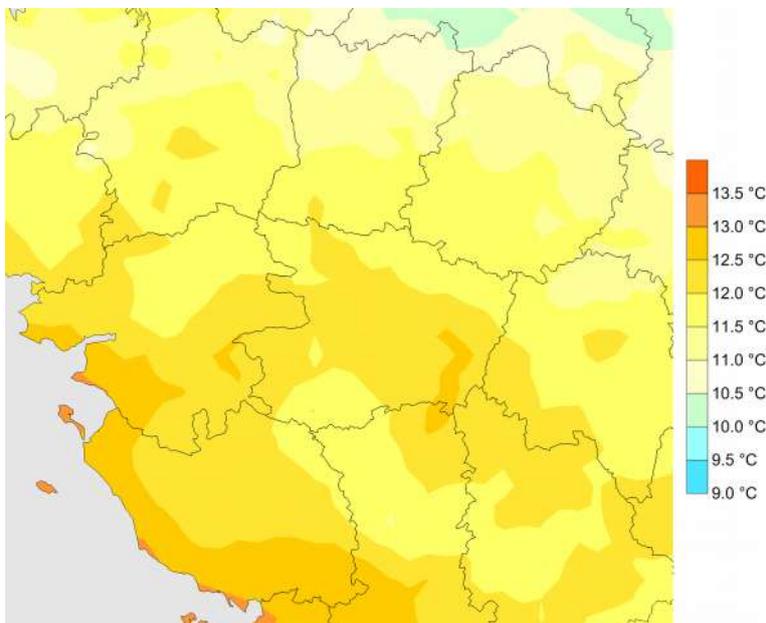


Illustration 79: Températures moyennes annuelles 1979-2008

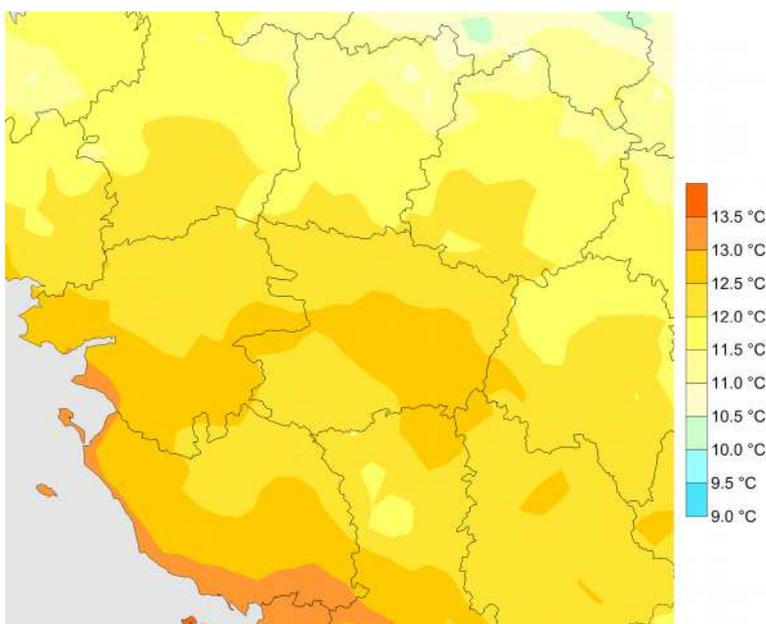


Illustration 80: Températures moyennes annuelles 1989-2018

A.2. Précipitations moyennes annuelles

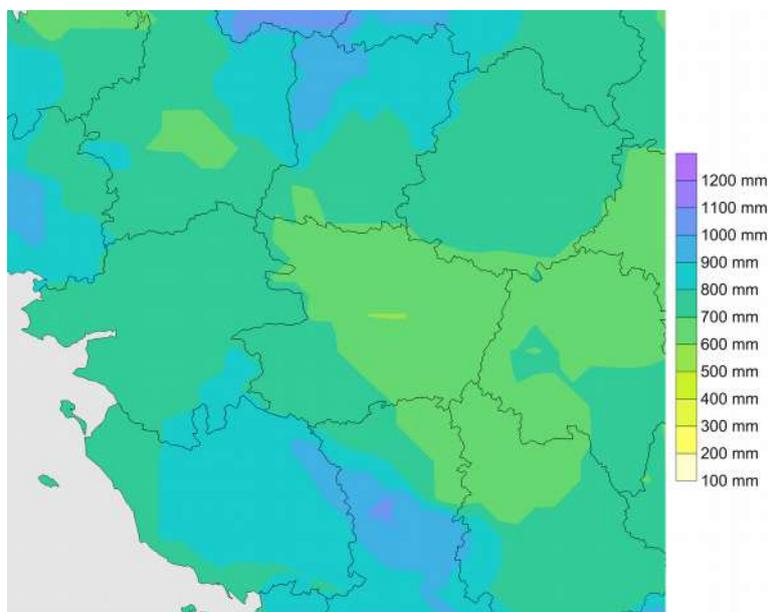


Illustration 81: Précipitations moyennes annuelles 1959-1988

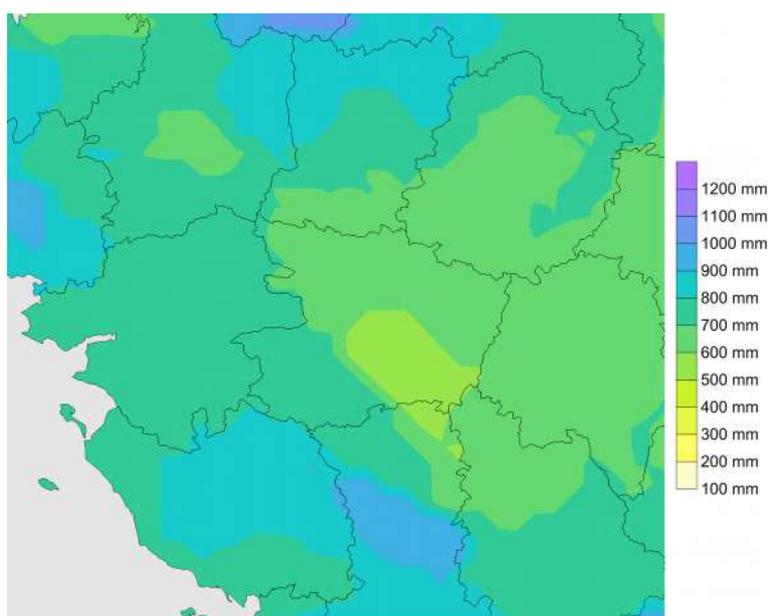


Illustration 82: Précipitations moyennes annuelles 1969-1998

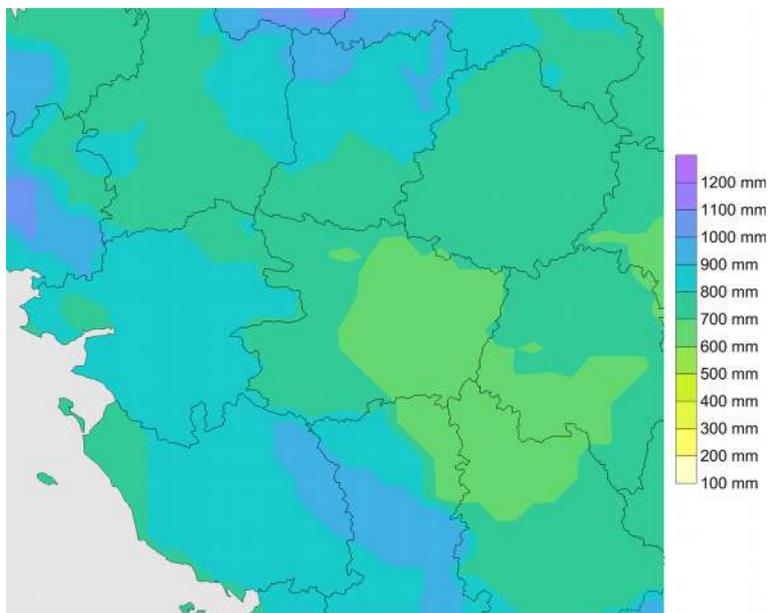


Illustration 83: Précipitations moyennes annuelles 1979-2008

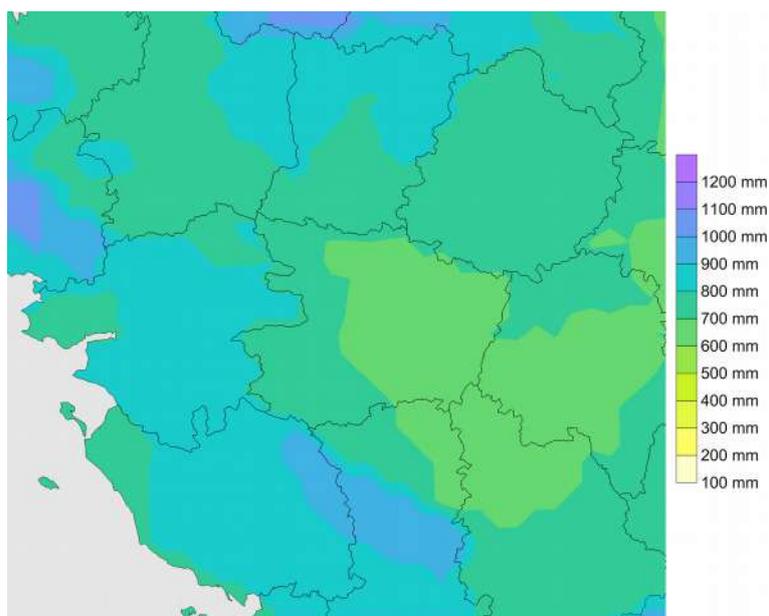


Illustration 84: Précipitations moyennes annuelles 1989-2018

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

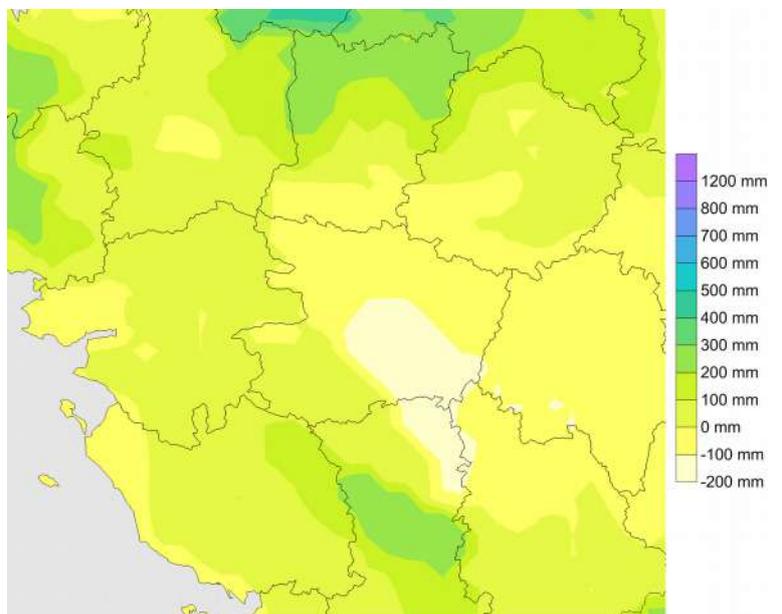


Illustration 85: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1959-1988

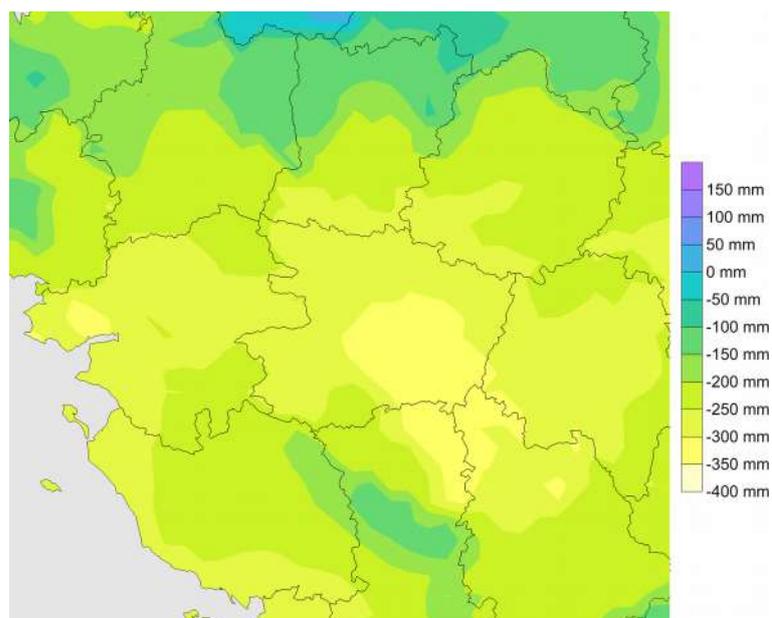


Illustration 86: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1969-1998

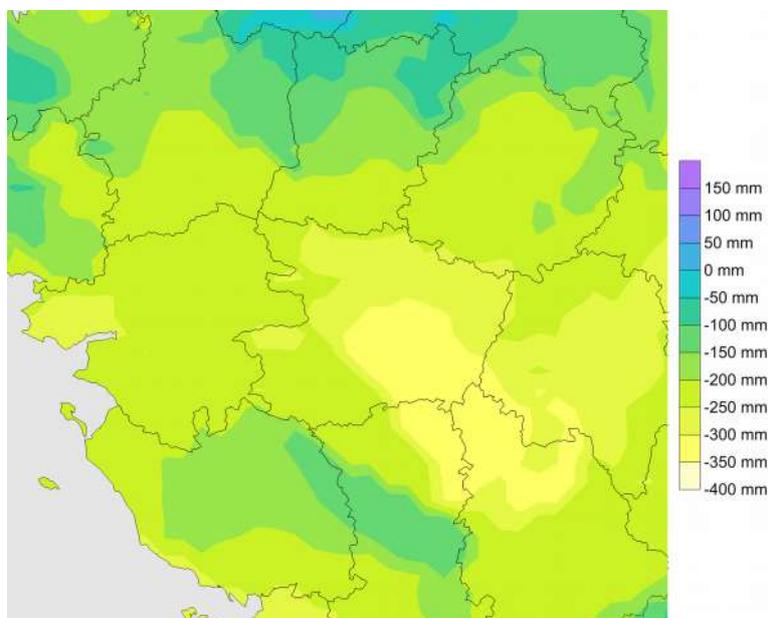


Illustration 87: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1979-2008

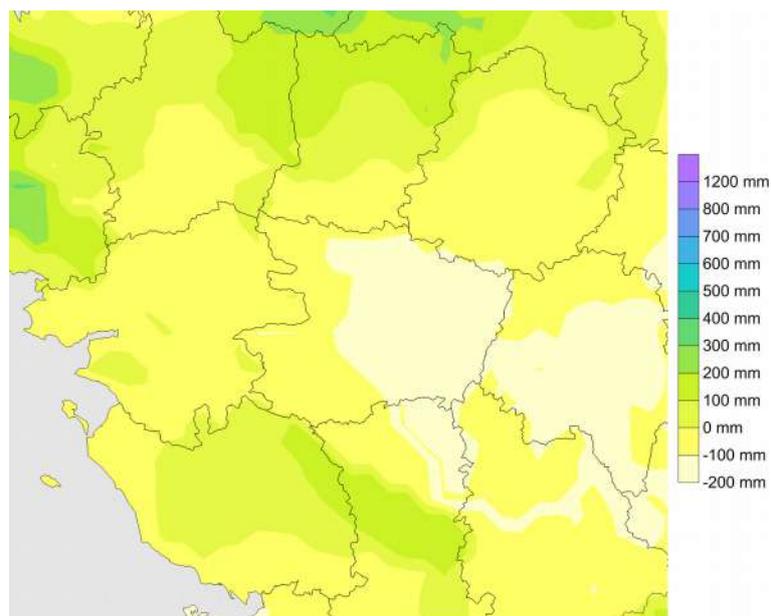


Illustration 88: Bilans (précipitations - ETP) d'avril à octobre 1989-2018

