

Introduction

L'étude de Météo France montre que dans les Pays de la Loire, la hausse des températures est une certitude. 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 néanmoins importante concernant l'évolution des précipitations. La comparaison entre 1959-1988 et 1989-2018 montre que globalement il n'y a pas d'évolution des hauteurs d'eau annuelles. On notera seulement une augmentation significative de la pluviométrie annuelle sur certains territoires (en particulier en proximité de la Loire : Loire atlantique et ouest du Maine et Loire) et une diminution significative sur le nord-ouest de la Mayenne (les collines d'Ernee). Les projections climatiques ne montrent pas de tendance d'évolution des précipitations annuelles d'ici la fin du XXIe siècle.

Les forestiers s'inquiètent depuis quelques décennies de l'impact des sécheresses estivales et des fortes chaleurs sur nos forêts (dommages causés aux arbres, dépérissements induits). L'évolution des conditions climatiques posent également au sylviculteur ligérien la question de l'adéquation de certaines essences sur le long terme pour la production forestière. L'évolution de certains problèmes sylvosanitaires, semblant être en lien avec le climat, suscite également des interrogations sur l'avenir de certaines essences.

Au regard des indicateurs climatiques fournis par Météo France la question posée est ainsi : quelles peuvent être les conséquences des évolutions climatiques sur la forêt régionale ? Cette connaissance du risque climatique ne peut aujourd'hui plus être ignorée et doit être intégrée dans les réflexions préalables dans la gestion forestière.

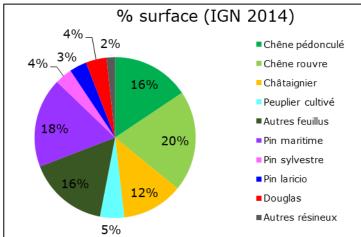
Pour l'analyse des conséquences des évolutions climatiques sur la forêt ligérienne, le Centre Régional de la Propriété Forestière Bretagne-Pays de la Loire a fait d'une part le bilan des évolutions forestières régionales déjà constatées pouvant être reliées à celles du climat. Il s'appuie notamment sur les observations réalisées depuis trois décennies par le Département de la santé des forêts (DSF). Le DSF suit différentes stratégies dans le cadre du dispositif national de surveillance de la santé des forêts. Pour cette étude, ce sont les données de signalement de la veille sanitaire récoltées depuis 1989 par les correspondants-observateurs qui ont été utilisées. Différents correspondants-observateurs de la DRAAF, la DDT ou du CRPF ont été interrogés pour étayer l'analyse. L'analyse des données du DSF et les entretiens avec différents correspondants-observateurs et/ou techniciens forestiers ont été réalisés dans le cadre d'un stage de Licence Professionnelle. De plus, un regard a été porté sur les 15 derniers bilans DSF « 4 pages » produits annuellement pour compléter ce travail.

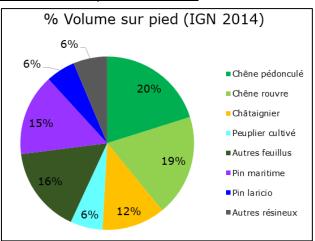
D'autre part, avec les constats actuels et les scénarios climatiques futurs existants, des éléments de prospectives sont avancés sur les risques sylvicoles prévisibles à l'avenir. Pour caler avec le pas de temps de la forêt, l'analyse se porte sur les évolutions climatiques d'ici à 2100. Face à certaines inconnues régionales, ce travail se nourrit également de constats nationaux et de prospectives avancées dans la littérature actuelle concernant l'impact du climat sur la forêt. Le présent travail est rédigé sous forme de fiches, pour une meilleure utilisation en termes de vulgarisation :

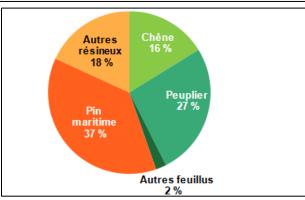
- Fiche n°1 : les principales essences forestières de production en Pays de la Loire et leurs exigences climatiques
- Fiche n°2 : l'impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres
- Fiche n°3 : l'évolution de l'aire bioclimatique des essences forestières régionales
- Fiche n°4 : évolution des causes abiotiques de dommages sur la forêt régionale en lien avec le climat
- Fiche n°5: évolution des causes biotiques de dommages forestiers en lien avec le climat
- Fiche n°6 : les perspectives pour le développement forestier ligérien face au changement climatique

Les principales essences forestières de production en Pays de la Loire et leurs exigences climatiques

Part des différentes essences forestières de production en Pays de La Loire







Répartition du volume bois d'œuvre récolté par essence, <u>Source</u>: Agreste –enquête exploitations forestières et scieries 2018

Exigences climatiques des différentes essences forestières de production en Pays de la Loire

	Température moyenne annuelle –optimum aire de répartition	Pluviométrie annuelle –aire de répartition	Autres
Chêne pédonculé	8 à 12 °C	>600 mm pendant la saison de végétation	RUM >150 mm
Chêne sessile	8 à 12 °C	>600 mm	RUM >130 mm
Châtaignier	9 à 13°C	Entre 600 et 900 mm	T° max estivales <25°C favorables Déficit hydrique estival P-ETP>- 220mm Sensibilité à la sécheresse moindre si RUM > 100 mm
Hêtre	7 à 10°C	> 750-800 mm par an 250-300 mm pendant la saison de végétation (avril à octobre) Forte humidité atmosphérique requise	Résistance au gel hivernal mais craint les contextes trop froids (T° moyenne de janvier < -2°C) Sensible à la sécheresse printanière Sensible aux gelées tardives en contexte de plaine
Pin maritime	11 à 15 ℃	Entre 550 et 1200 mm avec un optimum de 800 mm	Très sensible au froid hivernal et aux gelées Exigeant en humidité et chaleur estivale
Douglas vert	8 à 11 °C	Au moins 700 mm avec un optimum entre 800 et 1200 mm	Sensible aux à-coups climatiques
Pin laricio de corse	9 à 10°C	Entre 800 et 1500 mm	Supporte bien les sécheresses estivales
Cèdre de l'atlas	7,5 à 15°C Températures maximales de juillet pouvant dépasser 30°C	Optimum entre 800 et 1500 mm	Supporte bien les sécheresses estivales Sensible aux gelées tardives

Fiche 2

Impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres

L'allongement du cycle annuel de développement des arbres

Les phénomènes phénologiques comme le débourrement des arbres ou la chute des feuilles sont fortement corrélés à la température. L'augmentation des températures a ainsi un impact sur le fonctionnement physiologique des arbres.

Les constats

Il n'existe pas d'étude spécifique en Pays de la Loire à cet égard. Néanmoins, de façon globale, un allongement du cycle annuel des arbres a été constaté en région tempérée.

- Au printemps : la floraison et le débourrement des espèces forestières ont avancé en moyenne de trois jours par décennies au cours des cinquante dernières années ;
- A l'automne : l'entrée en sénescence des feuilles a tendance à se produire plus tardivement, en moyenne un jour et demi par décennie.

La saison de végétation est ainsi allongée. Cela a un effet positif sur la production forestière qui augmente. Néanmoins, si l'augmentation des températures permet d'allonger la période de végétation des arbres, les besoins en eau s'en trouvent augmentés. Le risque de stress hydrique est alors accru pour les essences forestières situées en condition limite vis-à-vis de leur besoin en eau.

La coordination des événements phénologiques avec les variations climatiques est un facteur majeur dans l'adaptation des espèces aux conditions climatiques (capacité des arbres à minimiser les dommages liés au froid tout en maximisant la phase de croissance). Elle conditionne en partie leur aire de répartition (Chuine et Beaubien, 2001). La capacité des espèces à adapter leur cycle de développement en réponse aux changements climatiques définira en partie leur faculté à se maintenir dans le futur.

Les projections futures

Sur le territoire national, l'étude de l'influence du changement du climat sur la phénologie des arbres s'appuie sur le réseau RENECOFOR1 (Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers).

A partir des données de ce réseau, des modèles de dates moyennes de débourrement, de jaunissement et de longueur de végétation ont été établis pour les chênes² et le hêtre (Lebourgeois et al, 2010). Ces modèles ont été utilisés pour définir sur la France entière à partir de données climatiques spatialisées, les dates moyennes sur la période 1991-2000 et 2071-2100. Différents scénarios et modèles climatiques ont été utilisés pour la projection future.

Le résultat de ces travaux met en avant que la durée de végétation va augmenter et de façon différenciée selon les espèces et les régions. Globalement, les modèles prédisent d'ici à 2100 un débourrement plus précoce et un jaunissement plus tardif et donc un rallongement de la saison de végétation d'au moins 10 jours dans de nombreuses régions (entre 20-40 jours sur la façade atlantique pour le scénario le plus pessimiste).

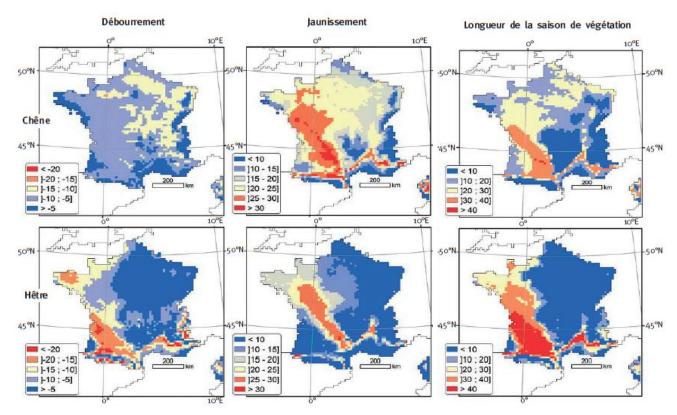
¹ Depuis 1992, le réseau RENECOFOR a pour mission de détecter et mieux comprendre d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers. Constitué de 102 sites permanents, il constitue la partie française du réseau de suivi des écosystèmes forestiers installés dans 34 pays européens. Cette volonté fait suite aux dépérissements des forêts attribués aux "pluies acides", dans l'est de la France et de l'Europe. Depuis 2008, les questions concernant l'impact du changement climatique et la biodiversité ont été ajoutées à cette 1ère problématique.

² Sessile ou pédonculé de façon indifférenciée, ces deux espèces ayant une réponse phénologique très similaire aux conditions climatiques.

Impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres

Il est mis en évidence également que pour les chênes, l'avance du débourrement serait moins importante dans l'Ouest, excepté la frange côtière, tandis que le retard du jaunissement y serait plus important.

Néanmoins, plusieurs aspects n'ont pu être pris en compte dans ces projections comme par exemple l'évolution de l'effet des différents facteurs climatiques (effet de la sécheresse plus déterminant que celui de la température ?) ou encore les capacités adaptatives des espèces à ajuster leur réponse au réchauffement.



<u>Figure 5</u> Cartes potentielles des variations prédites (en jours) à la fin du XXIe SIÈCLE (2071-2100) des dates de débourrement, de jaunissement et de la durée de la saison de végétation (Lebourgeois et al, 2010)

Dans cette étude, 4 modèles de circulation atmosphériques (HadCM3, CSIRO2, CGCM2 et PCM) correspondant à deux scénarios socioéconomiques A2 et B2 ont été utilisés. Le scénario A2 représente le schéma le plus défavorable avec une augmentation forte de la population sans avancée technologique majeure. L'hypothèse B2 correspond à une croissance mondiale modérée avec des mesures fortes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. HadCM3 est le nom d'un des modèles climatiques existant selon le scénario A2.

Sur la <u>Figure 5</u>, chaque carte correspond à la différence entre la date moyenne observée sur la période 1991-2000 et celle prédite selon l'hypothèse A2-HadCM3 pour la période 2071-2100. Pour le débourrement, une valeur négative correspond à une date plus précoce. Pour le jaunissement et la saison de végétation, des valeurs positives correspondent respectivement à un retard du jaunissement et à un allongement de la saison de végétation.

Impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres

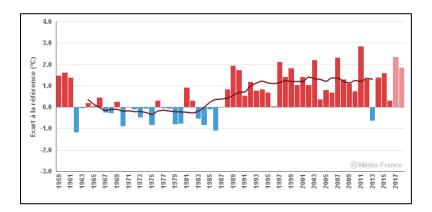
(2) L'impact des chaleurs d'automne, d'hiver et de printemps

Les constats

Avec cette tendance de fond concernant la hausse des températures, des températures anormalement élevées pour la saison en dehors de la période estivale (sans atteindre des records absolus) sont constatées plus fréquemment. Cela peut avoir des impacts non négligeables sur la végétation forestière (DSF, Ephytia, 2015) :

- (1) Un automne particulièrement doux peut contrarier les mécanismes d'aoûtement³ des pousses et prédisposer à des dommages lors de gels précoces.
 - → Les trois automnes les plus chauds depuis 1959 dans les Pays de la Loire, 2006, 2011 et 2014, ont été observés au XXIème siècle.
- (2) Au cours de l'hiver, lors de périodes bien ensoleillées pendant la journée, les températures s'élèvent et peuvent réactiver la transpiration au niveau du feuillage des résineux. Si la température du sol est en dessous du seuil d'absorption des racines, la demande en eau de la partie aérienne ne peut être satisfaite. Cela se traduit alors par un dessèchement des aiguilles. Ce rougissement physiologique est plus particulièrement observé chez le douglas en fin d'hiver et peut être cause de mortalités dans les jeunes plantations.
 - → Les trois hivers les plus chauds depuis 1959 dans les Pays de la Loire ont été observés en 1989/1990, 1994/1995 et 2015/2016.
- (3) En début de printemps, des températures douces peuvent déclencher un débourrement précoce qui augmente sérieusement les risques de dégâts en cas de gelées tardives.
 - → Les trois printemps les plus doux depuis 1959 dans les Pays de la Loire, 2007, 2011 et 2017, ont été observés au XXIème siècle.

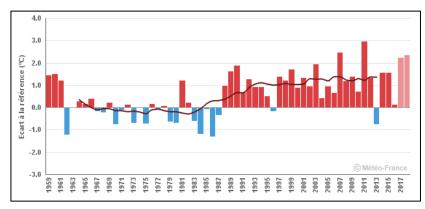
Le site climat HD⁴ permet d'avoir un regard plus détaillé sur l'évolution des conditions saisonnières, hors période estivale sur la région Pays de la Loire de 1959 à nos jours. Pour toutes les saisons, des écarts élevés (>1°C) des températures moyennes saisonnières avec la normale sont de plus en plus fréquents depuis la fin des années 80.



Station Nantes-Bouguenais

Station Le Mans

<u>Figure 6</u> Température moyenne printanière pour deux stations ligériennes : écart à la référence 1961-1990



³ Aoûtement : processus de lignification des jeunes rameaux des arbres à l'arrivée du froid

⁴ http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

Impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres

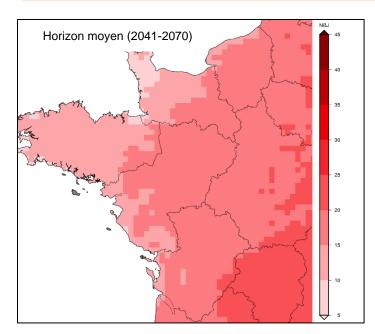
2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Déficit hydrique du printemps à l'automne		Automne exceptionnellement chaud (inégalé depuis 1950)	Avril aussi chaud qu'un mois de juin	Mois de février anormalement chaud	Fort déficit hydrique automnal et estival de juillet à octobre	
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Allongement de la période de végétation : débourrement précoce des arbres, croissance tardive forte chez les chênes, automne avec température dépassant la normale			Douceur de l'automne et de l'hiver	Pour la 3ème année consécutive, allongement de la période de végétation, avec des conséquences encore mal connues.	Déficit estival marqué, fin d'année sans précipitations, hiver exceptionnellement doux		

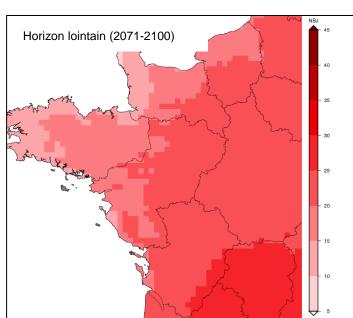
<u>Figure 7</u> Niveaux d'impact de la sécheresse estivale en Pays de la Loire indiqués dans les bilans du DSF de 2003 à 2018 et indication des années particulières concernant les conditions de température au printemps, à l'automne et à l'hiver

problème absent ou à un niveau faible problème nettement présent, impact modéré Problème très présent, impact fort

Les projections futures

Sur le site Climat HD développé par Météo France, il est possible d'avoir un regard sur les résultats de différents modèles climatiques sur l'évolution du nombre de jours anormalement chauds (température maximale supérieure de plus de 5°C à la normale) pour une saison donnée. Ceux-ci prédisent une augmentation de ce phénomène en toute saison. Les problèmes cités ci-dessus pourraient devenir plus fréquents. De plus, à long terme, des hivers trop doux devraient perturber la levée de dormance des bourgeons et des graines.





<u>Figure 8</u> Nombre de jours anormalement chauds - Moyenne printanière Scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO2 (RCP4.5) Expérience : Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France

Les constats

Le climat conditionne la présence des espèces d'arbre. Chaque essence a des exigences climatiques propres pour pouvoir se maintenir durablement en un lieu donné. On parle d'aire bioclimatique de répartition d'une essence forestière. Avec le changement climatique ces aires sont amenées à évoluer. Face à ce changement, trois issues sont possibles :

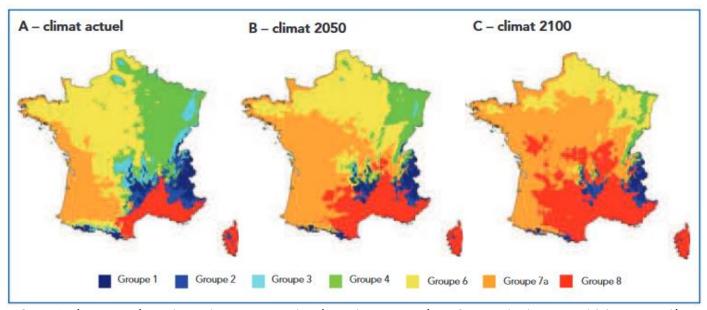
- Déclin et disparition des essences en place n'étant plus adaptées aux conditions du milieu ;
- Migration progressive vers le nord ou en altitude pour les espèces disposant de bonnes capacités de dispersion ;
- Adaptation locale des espèces aux nouvelles conditions.

Il est admis qu'un degré de température en plus équivaut à un déplacement de cette aire de 180 km vers le Nord et de 150 m en altitude tandis que la vitesse de migration naturelle des espèces ne dépasse pas 50 km par siècle...

Face à la rapidité du changement climatique, une grande incertitude est à considérer concernant la capacité de migration et d'adaptation des espèces dans des délais aussi courts. Ce sont surtout les arbres situés sur leur marge méridionale ou inférieure de leur aire naturelle actuelle de répartition qui sont susceptibles d'être affectés dans un futur proche à cause du déficit hydrique. De grandes inconnues concernant la compétition entre les espèces et les interactions avec les pathogènes et ravageurs sont aussi à prendre en considération.

Les projections futures

Des travaux ont été réalisés par l'INRA il y a une dizaine d'années pour estimer l'évolution des aires bioclimatiques potentielles d'ici la fin du siècle (Projet CARBOFOR, Badeau et al., 2005), selon différents scénarios climatiques (scénarios SRES). Les cartes obtenues ne prédisent pas la répartition future des espèces (de nombreux facteurs ne pouvant être intégrés dans les modèles) mais donnent des tendances acceptées par la communauté scientifique sur ce sujet. Pour ce qui concerne la façade Ouest de la France, l'aire bioclimatique potentielle des essences des plaines du Sud-Ouest et des essences méditerranéennes devrait remonter vers le Nord. Pour exemple, on estime que le chêne vert connaîtrait une grande expansion due aux hausses de températures. En revanche, les essences des groupes montagnards et continentaux auraient tendances à régresser fortement (exemple emblématique du hêtre dont l'aire potentielle serait réduite en 2100 au nord-est de la France).



<u>Figure 9</u> Répartition géographique de sept groupes biogéographiques estimée en fonction du climat actuel (A) et extrapolée au climat futur (B et C - Modèle considérant +2,5°C en 2100)

Le groupe 6 regroupe des espèces de l'étage collinéen, fréquentes dans le Sud et l'Ouest et plus rares dans le Nord et le Nord-Est (par exemple, le châtaignier).

Le groupe 7a correspond à l'ensemble des espèces de la moitié ouest et pouvant s'étendre jusque dans le midi (par exemple le pin maritime, le chêne tauzin).

Le groupe 8 rassemble l'ensemble des espèces méditerranéennes (par exemple, le pin d'Alep).

Les cartographies des données climatiques récentes de la présente étude peuvent permettre de brosser de grandes tendances concernant l'évolution de l'aire climatique des principales essences forestières ligériennes. Attention, ce tableau donne des tendances d'adaptation <u>climatique</u> des essences dans la région mais sans prendre en compte les autres conditions du milieu qui conditionnent leur présence également. Il ne s'agit que de prospectives : il faut bien évidemment prendre en compte tous les facteurs du milieu dans les choix sylvicoles et ne pas tirer de conclusions hâtives.

Le chêne pédonculé: L'étude chênaie atlantique (2007-2013) a permis de relever dans la région autour de 10% de peuplements inventoriés dépérissant. Cette étude a également clairement mis en évidence que l'indicateur P-ETP est fortement corrélé aux taux de dépérissement des chênaies atlantiques. Un plus fort taux de placettes dépérissantes a été remarqué là où P-ETP sur la période de végétation était inférieur à - 300 mm/an, avec moins de dépérissements dans la zone la plus favorable (avec P-ETP>- 225 mm/an). Les années critiques en terme de dépérissement correspondent aux années très sèches où le P-ETP sur la période de végétation est <310 mm/an. Les cartographies de notre étude produites pour la moyenne de P-ETP en période de végétation font apparaître entre les périodes 1959-1988 et 1989-2018, une zone climatique défavorable au chêne pédonculé dans toute la partie Sud et Est du Maine et Loire, avec la situation la plus critique dans le Saumurois (Fiqure 11). On passe de -300<P-ETP<-250 à -400<P-ETP<-350 sur cette partie du Maine et Loire. De plus, les graphiques produits permettent de remarquer un nombre plus fréquent d'années défavorables climatiquement pour le chêne pédonculé, avec un P-ETP qui a pu être même proche de -400 mm en 1976, 1989 et 1996, 2005 et 2011 dans le Saumurois (Figure 12). Le risque climatique pour le chêne pédonculé est donc le plus fort actuellement dans le Maine et Loire. On peut craindre avec la variabilité de la pluviométrie et si l'augmentation du déficit hydrique en période de végétation se poursuit sur la même tendance des 30 dernières années que l'ensemble du territoire ligérien deviennent climatiquement défavorable au chêne pédonculé d'ici à 2100. Météo France prédit avec le scénario 4.5 une augmentation de température de 1.5°C d'ici à 2100 et de 4°C avec le scénario 8.5. On peut mettre cela en parallèle avec la carte de vulnérabilité du chêne pédonculé face au dépérissement produite également lors de l'étude chênaie atlantique, en considérant une évolution de + 2°C d'ici à 2100 et en l'absence de sylviculture dynamique (Figure 10). En Pays de la Loire, il apparaît que seul le Nord de la Mayenne resterait en zone de vulnérabilité climatique faible.

Ces constats climatiques étant posés, il faut bien sûr ne pas négliger les facteurs compensateurs du sol (réserve utile en eau) qui peuvent tout de même permettre au chêne pédonculé d'être en station. Il est cependant indispensable de limiter le chêne pédonculé aux stations les plus favorables et en appliquant une sylviculture dynamique.

<u>Le chêne sessile</u>: La fiche d'autécologie du chêne sessile de l'IRSTEA mentionne qu'il y a beaucoup de divergences et d'incertitudes quant aux effets du changement climatique sur cette essence selon les modèles et les scénarios utilisés. Sa croissance peut être impactée, à la suite de fortes sécheresses (pendant 2 à 4 ans) mais il est peu sensible aux canicules.

Le châtaignier: Les études existantes en France sur cette essence permettent d'affirmer que le dépérissement de cette essence est très élevé quand le déficit hydrique estival est supérieur à 220 mm. De plus, cette essence est dans un optimum de production quand la température maximale estivale est inférieure à 25°C. Les cartographies produites dans la présente étude permettent de mettre en évidence l'évolution depuis 30 ans de la zone climatiquement favorable au châtaignier en Pays de la Loire (Figure 13): celle-ci a diminuée de façon importante, la Mayenne restant le seul département où les conditions climatiques restent optimales pour le châtaignier. Le châtaignier est à réserver sur les meilleures stations ayant des facteurs de compensation (réserve utile en eau du sol importante...) face au risque de stress hydrique. Avec la poursuite du réchauffement, on peut supposer que le châtaignier ne se trouvera plus dans son optimum climatique dans toute la région.

Le pin maritime: Avec la hausse de la température moyenne annuelle, les hivers plus doux et la baisse du nombre de jour de gel, l'aire climatique du pin maritime s'étend favorablement vers la Mayenne. Les principales contraintes à prendre en compte visà-vis de cette essence sont néanmoins l'augmentation du risque incendie avec la hausse des températures et un avenir menacé par la possible arrivée en France du nématode du pin. Les épisodes de sécheresse en Pays de la Loire pourraient être impactant de façon importante s'ils sont concomitants avec un problème parasitaire (chenille processionnaire, armillaire..).

<u>Le douglas vert</u>: La pluviométrie annuelle optimale pour le douglas est de 800 mm. Il peut poursuivre sa croissance lors de sécheresse modérée (peu de déficit pluviométrique et bonne réserve en eau du sol) mais est néanmoins sensible aux à-coups climatiques. Le stress hydrique peut être source de dégâts directs comme des fentes de sécheresses, des rougissements de feuillage, un rougissement physiologique sur les jeunes arbres... La pluviométrie annuelle est limite pour le douglas dans le Maine et Loire, la Sarthe, le Nord-Ouest de la Vendée, la partie Sud de la Mayenne, dans le Val de Loire et le Nord du bocage angevin (en Loire-Atlantique). Le risque climatique étant croissant, il est ainsi préconisé de le réserver aux très bonnes stations forestières permettant d'éviter ce stress hydrique (pluviométrie >800 mm, réserve en eau du sol suffisante, sol bien drainé).

Le pin laricio de Corse : Cette essence supporte bien les sécheresses estivales. Elle est sensible à la maladie des bandes rouges qui est favorisée par les hivers et printemps doux et humides. Le rapport de l'étude Dolar (Perret et al, 2019) indique de réserver le pin laricio aux stations qui lui sont le plus adaptées et d'éviter son implantation lorsque les conditions locales sont favorables à la maladie (importance des précipitations du mois d'avril, fréquence des épisodes pluvieux en juin, surfaces de pin laricio déjà importantes localement). D'après ce rapport, l'accentuation de la fréquence des sécheresses pourrait faire régresser cette maladie.

A partir des seuils climatiques définissant les zones à risques pour le chêne pédonculé, mis en évidence par l'étude, des cartes de vulnérabilité ont été établies avec les moyennes trentenaires 1960-1990 puis avec des hypothèses de hausses de la température annuelle moyennes de +1 et +2°C, correspondant au réchauffement attendu dans les 50 prochaines années.

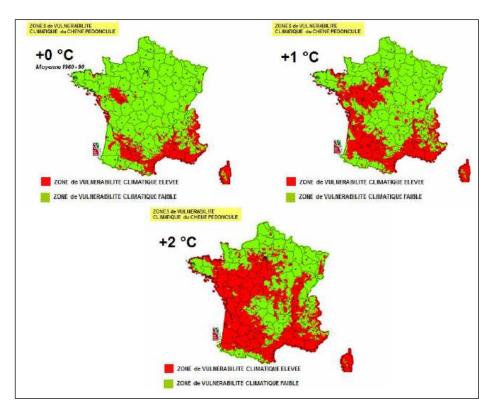


Figure 10 Zones de vulnérabilité du chêne pédonculé selon 2 scénarios d'évolution de la température d'ici à 2050

(Etude chênaie atlantique, Lemaire, 2012)

Ecarts cumuls de précipitations et d'ETP en période d'étiage (avril à octobre Moyennes 1959-1988 Ecarts cumuls de précipitations et d'ETP en période d'étiage (avril à octobre) Moyennes 1989-2018

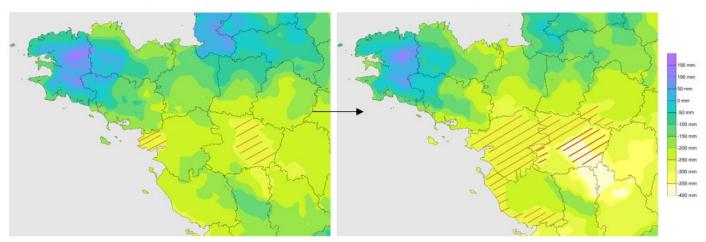


Figure 11 Evolution du P-ETP en période de végétation
Hachures oranges : Zone climatique a priori peu favorable au chêne pédonculé
Hachures rouges : zone climatique à priori défavorable climatiquement au chêne pédonculé

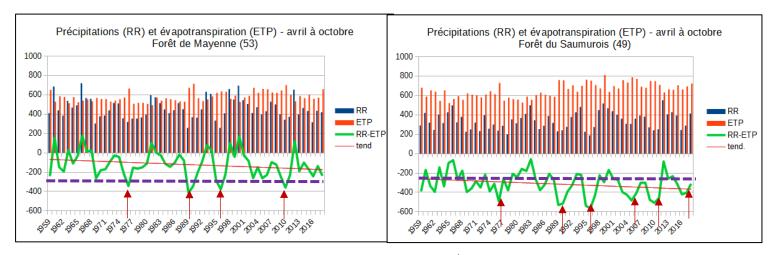


Figure 12 Evolution chronologique de P-ETP pour deux sites différents en Pays de la Loire – La courbe pointillée violette marque la limite de -300 mm, les flèches rouges les années particulièrement marquées

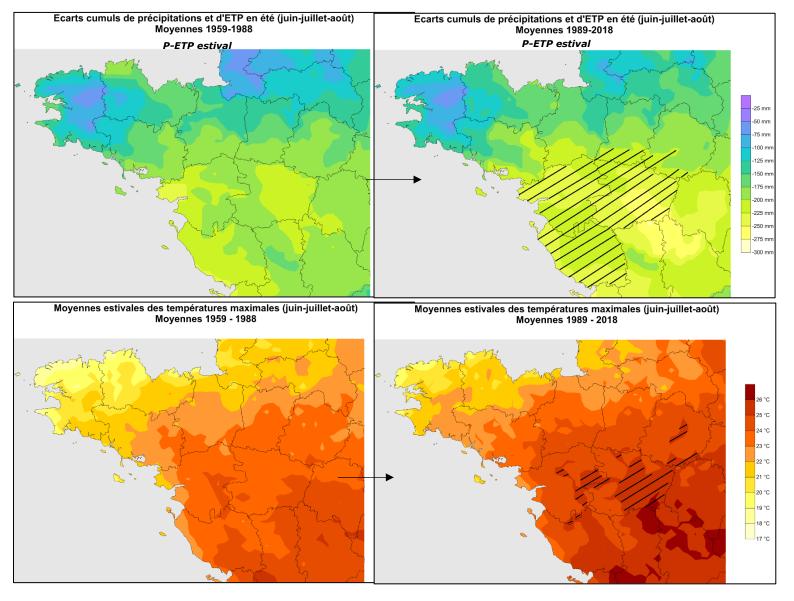


Figure 13 Evolution de certains indicateurs climatiques entre 1959-1988 et 1989-2018 - zones en limite climatique (pour l'indicateur concerné) pour le châtaignier en hachuré noir

Impact des épisodes de sécheresse et/ou de canicule : les effets directs

Les constats

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. 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 chaude depuis 1947. De nouveaux records sont tombés en 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.

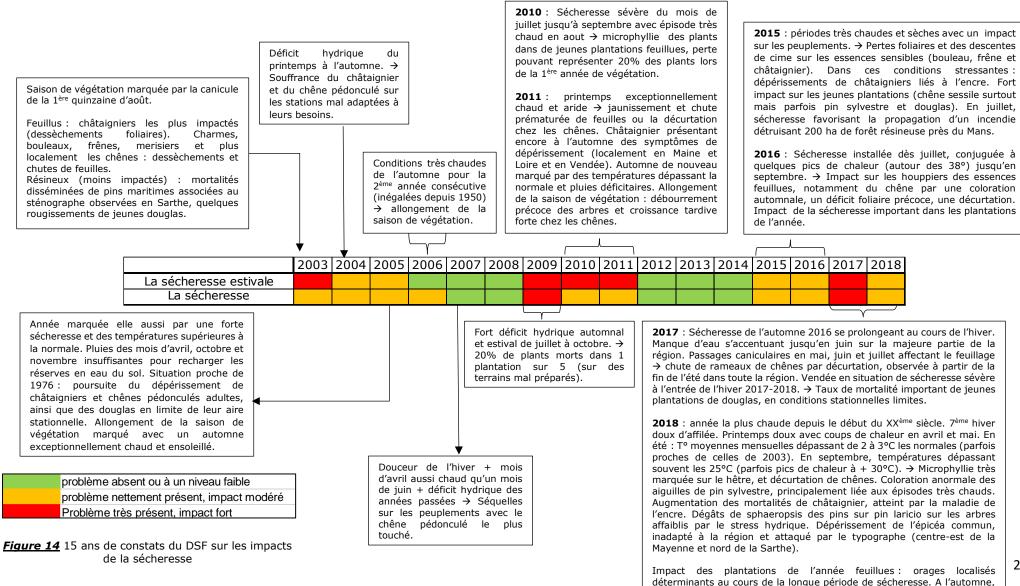
Un léger manque de pluie n'affecte pas les arbres. Tant que le sol n'est pas trop asséché, les arbres vont en effet puiser l'eau dont ils ont besoin en profondeur. La situation se complique lorsque le manque de précipitations se prolonge et que les réserves en eau du sol ne sont plus remplies qu'à 40 % et moins. Les arbres souffrent alors de stress hydrique (plus ou moins marqué selon les essences).

Les périodes de sécheresse, les fortes chaleurs ou les canicules sont causes de stress hydrique, avec des impacts directs sur les arbres :

Effets de la sécheresse du sol (au printemps ou en été)	Impacts sur l'arbre	
Fermeture des stomates des feuilles pour limiter la transpiration de l'arbre	Ir Limitation de l'entrée du CO₂ dans les feuilles → ralentissement of photosynthèse → impact négatif sur la croissance en diamètre et haute l'arbre proportionnellement à l'intensité de la sécheresse	
	Arrêt des mécanismes naturels de refroidissement de la surface des feuilles → effet de brûlure (rougissement des tissus)	
Cavitation dans les vaisseaux conducteurs de la sève brute entrainant une rupture de la conductivité de l'eau dans l'arbre (embolie gazeuse)	Dessèchement des organes vivants, d'abord au niveau des feuilles, puis en cas d'aggravation, des branches voire de l'arbre entier Dessèchement, mortalité de plants Dessèchement des houppiers Mortalité d'individus adultes isolés ou en peuplement	
Effets possibles des fortes chaleurs et des canicules estivales	Impacts sur l'arbre	
A la sécheresse du sol, s'ajoute l'effet aggravant de la sécheresse de l'air qui augmente le risque d'échauffement des feuilles.	Flétrissement des feuilles et pousses de l'année : chute précoce du feuillage pour les feuillus, rougissement des houppiers chez les résineux Chez les feuillus, la perte du feuillage ne permet pas de prédire la survie des arbres les années suivantes. Chez les résineux par contre, un rougissement important du feuillage, souvent en cime, est très fréquemment gage de mortalité à terme. Douglas, arbres à écorce fine (jeunes arbres, hêtre, érable) : risque de « coups de soleil » pouvant se traduire par une nécrose du cambium, par des fissurations	
	de l'écorce et par des craquèlements par plage Epicéas, sapin de Vancouver : fentes de sécheresse (fentes radiales) au niveau des troncs	

Le risque de dégâts est plus important pour les lisières ou les versants exposés au sud. Les espèces ont développé au cours de l'évolution des stratégies variées vis-à-vis des sécheresses, ce qui se traduit par des différences de sensibilité notables. Les espèces méditerranéennes (comme le chêne vert ou le cèdre) sont plus résistantes que les espèces de climat tempéré ou montagnard.

Impact des épisodes de sécheresse et/ou de canicule : 15 ans de constats du DSF en Pays de la Loire



taux de mortalité élevé par endroits pour les chênes sessiles (20 à 40 %).

Fiche 4

Évolution des causes abiotiques de dommages sur la forêt régionale en lien avec le climat

Impact des épisodes de sécheresse et/ou de canicule : les effets indirects

Les constats

La sécheresse peut également induire les effets suivants :

- (a) **Déficit foliaire** des arbres plus ou moins important (par microphyllie, par chute ou manque de feuille, par mortalité de branche) : ce phénomène est plus fréquemment observé chez le chêne pédonculé et l'épicéa. La microphyllie est souvent très marquée chez le hêtre en Pays de la Loire.
- (b) **Fructification abondante** des arbres l'année suivant la sécheresse : cela a notamment été observé avec le hêtre suite à la canicule de 2003.
- (c) **Recrudescence des parasites de faiblesses** : insectes ou champignons, ce sont des parasites qui s'attaquent préférentiellement aux arbres affaiblis, notamment suite à un stress climatique.

(d) Augmentation des vagues de dépérissements

Le terme « dépérissement » est utilisé pour traduire une altération durable de l'aspect extérieur des arbres (mortalité d'organes pérennes, réduction de la qualité et quantité du feuillage) et une réduction de la vitalité (croissance). La mort d'un certain nombre d'arbres est observée mais l'issue n'est pas obligatoirement fatale (Delatour, 1990).

Le dépérissement est un phénomène complexe puisque plusieurs facteurs interviennent :

- (1) Des facteurs prédisposant (sol inadapté, peuplement vieillissant, mauvaise préparation du sol et/ou plantation...);
- (2) Des facteurs déclenchant (stress engendré par les conditions climatiques, engendré par une défoliation d'insecte importante...);
- (3) Des facteurs aggravant (parasites de faiblesse : insectes cambiophages, pourridiés racinaires...).

La sécheresse et le stress hydrique en résultant sont souvent facteurs déclenchant de dépérissements.

→ Zoom sur les cas de dépérissement du chêne pédonculé dans la région

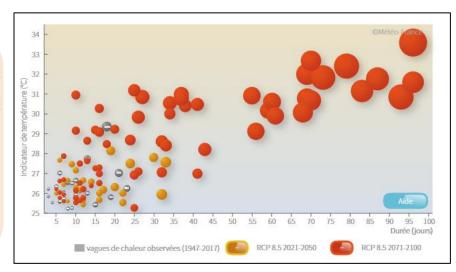
En Pays de la Loire, le cas de dépérissement le plus fréquemment observé depuis plusieurs décennies est celui du chêne pédonculé. Les chênaies pédonculées sont particulièrement exposées à des facteurs prédisposants aux dépérissements :

- (1) Vieillissement important de peuplements souvent en manque de sylviculture : ce manque de sylviculture explique simplement certains cas locaux de dépérissement.
- (2) Présence du chêne pédonculé sur des stations peu favorables : du fait de son caractère pionner, la présence du chêne pédonculé sur des stations avec un sol à faible richesse chimique et avec un défaut d'alimentation en eau est souvent facteur prédisposant au dépérissement pour cette essence très exigeante.
- (3) Défoliations de printemps dues aux géométrides et à l'oïdium : ces facteurs affaiblissent d'autant plus les arbres.

Les chênaies pédonculées sont donc souvent intrinsèquement sensibles au stress climatique, comme cela a été observé suite aux sécheresses de 1989 ou suite à la canicule de 2003. De plus, des ouvertures fortes dans les peuplements trop denses ou vieillis entraînent irrémédiablement des stress sur les arbres survivants d'autant que des stress climatiques et biotiques sont concomitants. Le morcellement de la propriété au sein de certains massifs forestiers génère parfois des effets de lisières lors de coupes rases qui ont des effets similaires.

Les projections futures

La fréquence et la sévérité des vagues de chaleur en France devraient augmenter au XXIe siècle, mais avec un rythme différent entre l'horizon proche (2021-2050) et la fin de siècle (2071-2100). Si rien n'est fait pour stabiliser ou diminuer les émissions de gaz à effet de serre, un doublement de la fréquence des événements est attendu vers le milieu du siècle. En fin de siècle, les vagues de chaleur pourraient être bien plus fréquentes qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus sévères et plus longues, avec une période d'occurrence étendue de la fin mai au début du mois d'octobre.



<u>Figure 15</u> Vagues de chaleur en France : observations et simulations climatiques (scénario d'évolution RCP 8.5)

Ce sont surtout les essences situés en limite de leur aire climatique ou sur des stations non adaptées qui sont les plus vulnérables et qui seront les plus affectées à l'avenir par le stress hydrique.

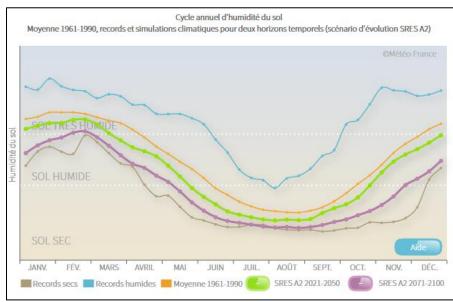


Figure 16 Cycle annuel d'humidité du sol en Pays de la Loire et projections climatiques selon le scénario SRES A2 Source : Site internet Climat HD, Météo France (2019)

La comparaison du cycle annuel d'humidité du sol⁵ sur les Pays de la Loire entre la période de référence climatique 1961-1990 et les horizons temporels proches (2021-2050) ou lointains (2071-2100) sur le XXIe siècle (selon un scénario SRES A2, le pessimiste) montre assèchement important en toute saison. En termes d'impact potentiel pour la végétation, 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 pourrait fin de siècle en correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui.

Si les précipitations évoluent peu (pas de tendance d'évolution indiquée par Météo France), cela risque de se traduire par une sensibilité plus élevée des jeunes plantations aux dommages liés à la sécheresse du sol.

⁵ L'humidité du sol est exprimée à partir de l'indice d'humidité des sols (en anglais: Soil Wetness Index ou SWI) représentant pour une plante le ratio entre le contenu en eau disponible dans le sol un jour donné et sa valeur maximum. Le SWI varie principalement entre les valeurs 0 (sol extrêmement sec) et 1 (sol extrêmement humide). En dessous de 0,5 un sol est considéré comme sec et au-dessus de 0,8 comme très humide.

Le gel

Les constats

Les gelées (température descendant en dessous de 0°C) peuvent provoquer des dégâts sur les arbres :

- (1) **Gelées d'automne, ou gelées précoces** : en début d'automne, il faut en général 5 à 10 jours de refroidissement progressif (aoûtement) pour que l'écorce des pousses de l'année durcisse et devienne protectrice. Si une gelée survient avant cet endurcissement, elle peut provoquer des dégâts sur les pousses imparfaitement lignifiées. L'essence particulièrement sensible dans la région est le douglas.
- (2) **Gelées de printemps, ou gelées tardives** : ces gelées affectent les pousses, notamment la pousse terminale, d'un arbre dont les bourgeons viennent de débourrer. Elles entraînent des déformations, des pertes de production, et même la mort de l'arbre en cas de répétition.

Depuis 1997, 60 signalements du DSF concernant des dégâts dus au gel sont enregistrés en Pays de la Loire. Ceux-ci concernent essentiellement le chêne sessile (22 signalements) et le châtaignier.

Le nombre de signalements étant faible au global, il est difficile de mettre en évidence une évolution dans l'occurrence de ces signalements. Néanmoins, les années particulières ressortent : 2010, 2012, 2016 et 2017.

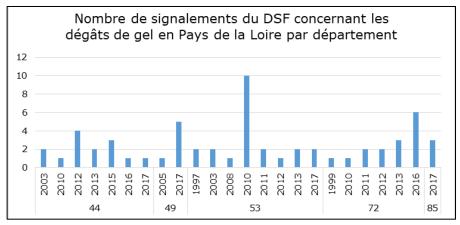


Figure 17 Nombre de signalements concernant les dégâts de gel en Pays de la Loire

La Mayenne est le département où le nombre de dégâts liés au gel recensés est le plus grand. Suivent la Sarthe et la Loire-Atlantique. Le nombre de dégâts de gel recensé reste faible pour le Maine et Loire et la Vendée.

Les projections futures

La présente étude climat indique un nombre de jour de gel printanier en moyenne en baisse de -4 à -6 jours en Pays de la Loire entre la période 1959-1988 et 1989-2018. Cette diminution est sans incidence constatée à ce stade sur les « accidents » de type gelée tardive (occurrence pas forcément moins tard). La même absence de tendance est constatée pour les premières gelées d'automne.

La tendance à la baisse va se poursuivre d'après les prédictions de Météo France. Cette diminution serait de l'ordre de 17 jours (moyenne annuelle) par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP4.5 et de 22 jours selon le RCP8.5. Si l'on regarde les cartes en **Figure 18**, avec ces prédictions on se rend compte que le phénomène de gel deviendra rare en Pays de la Loire.

Avec le réchauffement climatique et l'allongement de la période de végétation qui en découle, il est néanmoins à craindre :

- un débourrement plus précoce des arbres et donc une augmentation de leur sensibilité aux gelées tardives ;
- des dégâts de gel automnal sur des arbres à l'aoûtement perturbé.

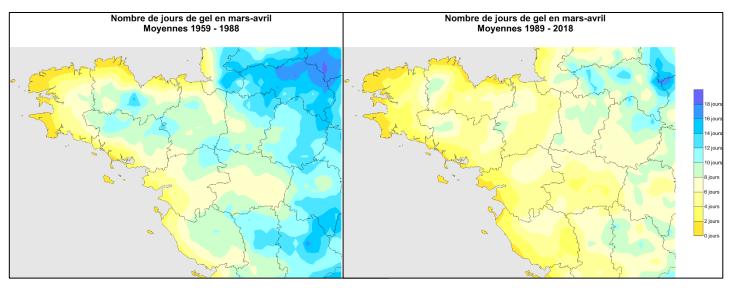


Figure 18 Evolution du nombre de jour de gel annuel moyen pour les deux périodes trentenaires 1959-1988 et 1989-2018

Les autres phénomènes climatiques (tempêtes⁶, grêle, neige...)

Les constats

Le nombre de tempêtes ayant affecté la région Pays De la Loire est très variable d'une année sur l'autre. Sur l'ensemble de la période, on observe une tendance à la baisse significative du nombre de tempêtes mais sans lien établi avec le changement climatique. Les travaux qui ont été menés sur les tempêtes ne montrent aucune tendance significative sur leur intensité.

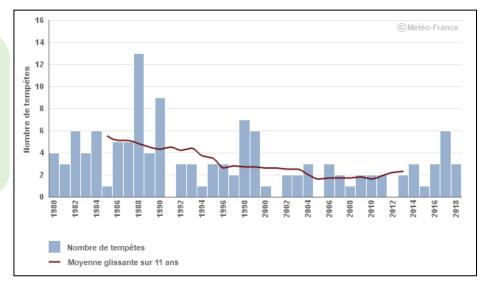


Figure 19 Nombre de tempêtes par an en Pays de la Loire de 1980 à 2018

Les Pays de la Loire font partie, comme la Bretagne, d'une des régions métropolitaines les moins touchées par les orages (15 journées concernées en moyenne par an sur l'ensemble du territoire). Les autres phénomènes comme la grêle ou la neige ne sont pas fréquents mais pas totalement absent non plus, en particulier dans la Sarthe et la Mayenne.

Ces évènements climatiques ont des impacts sur la forêt. La **Figure 20** recense notamment les phénomènes marquants de ces 20 dernières années pour la forêt ligérienne.

Les projections futures

L'état actuel des connaissances ne permet pas d'affirmer que les tempêtes, les épisodes de grêle, les orages ou les chutes de neige seront sensiblement plus nombreux ou plus violents en France métropolitaine au cours du XXIe siècle.

⁶ Une tempête est une zone étendue de vents violents (vents moyens atteignant au moins 89 km/h) générés aux moyennes latitudes par un système de basses pressions (dépression).

Importantes chutes de neige au mois de février sur le littoral → nombreux bris de branches dans des peuplements de pins maritimes de tous âges.

Fort coup de vent fin juillet aux alentours du Lude → chablis de peupliers. Chutes de neige fin octobre dans la moitié nord de la Mayenne → bris de cimes ou courbures de branches de jeunes troncs.

2013 : Mois de mai étant l'un des mois les plus froids en 30 ans → débourrement avec un retard d'environ 3 semaines mais gelées très tardives affectant quand même les pousses de jeunes plants. Automne : gelées précoces touchant localement les tissus imparfaitement lignifiés.

Orages violents en juillet accompagnés de rafales de vent importantes. Quelques chablis en Mayenne sur des sols saturés en eau. Tempête Dirk : de faibles dégâts disséminés sur la région.

2014: Orages parfois violents → blessures aux rameaux, provoquées par les orages de grêle, permettant l'installation du sphaeropsis des pins dans les pins laricio. Forts coups de vent en début d'année provoquant quelques chablis d'arbres isolés.

Pic de froid tardif en février avec, à l'intérieur des terres, deux semaines cumulées d'occurrence de gel, et un épisode neigeux marqué en Sarthe. → Quelques dégâts disséminés sur les plantations de l'année occasionnés par la neige lourde (sud-est du Mans) et le vent (littoral atlantique).

2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018

Gel

Grêle ou neige

Tempête ou vents forts

2003 : Fort coup de vent mi-juilllet ayant cassé de nombreux peupliers : 600 ha (soit un à deux ans de 2010 : Grosses vague de froid tombant à la fin de l'automne 2009 sur des arbres encore en végétation → impacts identifiés en 2010 en Mayenne sur des châtaigniers. Période de gel/dégel→ déchaussement des mottes de quelques plantations d'un an en terrain agricole. Gel tardif de mai → mortalités >20% dans de jeunes boisements de chênes sessiles dans le nord de la Sarthe.

Tempête Xynthia → quelques chablis disséminés dans le sud de la Sarthe et l'Est du Maine et Loire.

2011 : Tempête hivernale Joachim \rightarrow pas de dommages forestiers notables.

Gelées d'avril \rightarrow dégâts sur de jeunes châtaigniers en Mayenne et en Sarthe

Vague de froid intense durant les 15 premiers jours de février → dégâts de gélivure sur peupliers. Gelées tardives de mi-avril à mi-mai en plein débourrement → impacts sur les jeunes pousses de nombreuses essences feuillues → contribue à l'aspect clair du feuillage des chênes.

2015: Déficit hydrique + chutes de grêle → favorables à la diffusion du Sphaeropsis des pins.

Gelées tardives \rightarrow quelques brûlures de feuillage en Loire-Atlantique.

Coups de vent violents de fin-août et septembre → bris de branches charpentières et des chablis disséminés dans le Maine-et-Loire, la Mayenne et la Sarthe.

2016 : Gelées d'avril et mai « historiques » dans le Saumurois et l'Anjou → nécrose des pousses feuillues, endommageant particulièrement les petits plants et semis de chênes.

Averses de grêle en début d'année dans plusieurs endroits de la région → augmentation du sphaeropsis des pins dans la Sarthe.

Fortes rafales de vent en septembre soufflant à plus de 100 km/heure à l'intérieur des terres → peupleraies endommagées dans le Maine-et-Loire et Mayenne.

2017: Vents violents en fin d'hiver, de fortes gelées tardives. Dégâts conséquents de la violente tempête Zeus du 6 mars sur peuplier dans le Maine-et-Loire (des plantations touchées à 50 % dans l'est du département), et disséminés sur douglas et épicéas de Sitka.

<u>Figure 20</u> 15 ans d'observations DSF concernant le gel, les tempêtes, la grêle...

Les incendies

Les constats

On parle d'incendie de forêt lorsque le feu couvre une surface minimale de 0,5 hectare et qu'une partie au moins des étages arbustifs et/ou arborés est détruite.

Météo-France a constaté que le risque incendie augmente depuis les années 1960 et devrait encore augmenter au cours du XXIe siècle. Les zones exposées à ce risque devraient s'étendre vers le Nord-Ouest (Pays-de-la-Loire, Centre-Val-de-Loire et Bretagne).

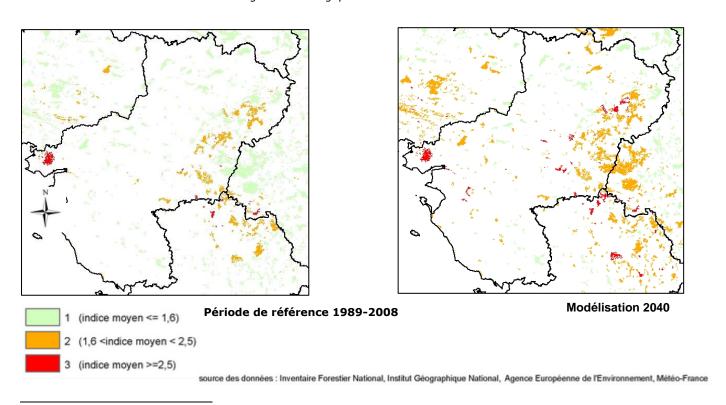
La Sarthe et l'Est du Maine et Loire sont les zones les plus sensibles au risque incendie en Pays de la Loire à cause de leurs températures plus élevées et de la composition des peuplements forestiers (pins maritimes).

Les projections futures

Les effets du changement climatique pourraient aggraver le risque incendie en forêt car des températures plus élevées favoriseraient la transpiration des plantes et la diminution de l'eau contenue dans les sols. Ainsi les sécheresses accrues augmenteraient la sévérité et la rapidité des incendies. Il est également probable que la saison des incendies de forêt s'allongerait dans l'année, passant de 3 mois à 6 mois dans le futur.

Pour visualiser cette évolution, Météo-France a créé en 2010 avec l'aide de l'Office National des Forêts (ONF) et de l'Inventaire Forestier National (IFN), une cartographie des zones actuelles (1989-2008) et des zones à moyen terme (2040), de vulnérabilité aux feux de forêts des principaux peuplements à l'aide de l'Indice Forêt Météo⁷ (IFM).

<u>Figure 21</u> Sensibilité aux incendies de forêts estivaux des massifs forestiers >100 ha aux conditions de danger météorologique modélisées à l'horizon 2040



⁷ Indice Forêt Météo (IFM): il permet d'estimer le danger météorologique de feux de forêts en tenant compte de la probabilité de son éclosion et de son potentiel de propagation. Cet indice est calculé à partir de données météorologiques simples: température, humidité de l'air, vitesse du vent et précipitations. Ces données alimentent un modèle numérique qui simule l'état hydrique de la végétation et le danger météorologique d'incendie qui en découle. Les simulations de l'IFM faites par Météo-France en 2010 confirment que pour l'horizon 2040 il n'y a pas de différence sensible entre les résultats pour 3 scénarios SRES qui peuvent être considérées comme relatifs à trois simulations différentes du même climat (simulations différentes de la concentration en gaz à effets serre selon trois scénario socio-économiques différents).

Les constats

Les parasites (pathogènes ou ravageurs) sont souvent très sensibles à la température. Ceux que l'on peut rencontrer en forêt ne font pas exception :

- (1) l'augmentation des températures favorise leur expansion vers le Nord pour certains ;
- (2) les conditions de températures douces ou des épisodes de chaleur plus fréquents, quand ils sont couplés certaines années à de l'humidité, rendent les conditions favorables à une expression accrue de certains pathogènes (souvent des champignons) ;
- (3) le stress induit aux arbres par les épisodes de sécheresse ou de canicule favorise l'expression des parasites de faiblesse. Il semblerait que les insectes cambiophages, xylophages et piqueurs suceurs se développent mieux sur les arbres stressés au contraire des insectes défoliateurs et gallicoles.

Les projections futures

La plupart des parasites sont sensibles aux évolutions de la température. La poursuite du réchauffement devrait avoir les conséquences suivantes :

- (1) Modification des aires de répartition des pathogènes et ravageurs
- Influence de la T°C et de l'humidité sur la plupart des cycles biologiques : influence globalement positive sur leur développement ;
- Modification des cortèges des champignons et d'insectes.
 - (2) Des impacts liés à la modification de la physiologie de l'arbre hôte
- Modification de la coïncidence phénologique entre hôte et parasite ;
- Affaiblissement des arbres soumis à des sécheresses récurrentes ;
- Augmentation de la masse foliaire liée au taux de CO₂ plus élevé (favorable aux défoliateurs) ;
- Augmentation de la capacité de croissance et production (défavorable aux pourridiés des racines).

Une analyse des bilans 4 pages du DSF depuis les 20 dernières années a permis d'identifier les principaux pathogènes ou ravageurs affectant la forêt ligérienne pouvant avoir une évolution en lien avec le climat.

L'évolution des signalements des correspondants-observateurs du DSF depuis 1989 concernant ces pathogènes ou ravageurs identifiés a été ensuite étudiée en regard des évolutions climatiques constatées en Pays de la Loire.

Les six problèmes ciblés sont les suivants :

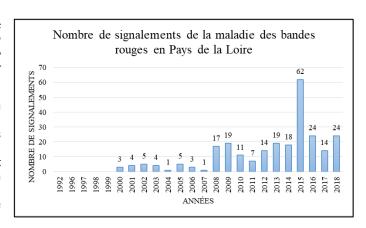
- La maladie des bandes rouges (Dothistroma septosporum, Dothistroma pini),
- La processionnaire du pin (Thaumetopoea pityocampa),
- Le sphaeropsis du pin (Diplodia pinea),
- L'oïdium du chêne (Micropsphaera alphitoïdes),
- Le bombyx disparate (Lymantria dispar),
- La maladie de l'encre (Phytophthora cambivora).

Les pages suivantes détaillent les évolutions de ces pathogènes ou ravageurs dans la région au regard des signalements du DSF et en les mettant en perspective avec celles du climat.

La maladie des bandes rouges

Maladie foliaire impactant surtout le pin laricio de Corse. Les peuplements touchés par la maladie n'enregistrent que très peu de mortalité. Toutefois, dans les zones très marquées, la maladie a un impact important sur la croissance des arbres, en hauteur et en diamètre.

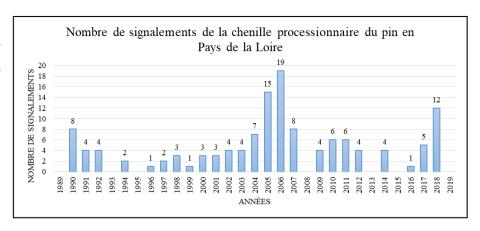
Impact du climat sur le problème : L'humidité est nécessaire au développement du champignon et à la dispersion de ses spores. La durée d'humidité prolongée et la fréquence des précipitations pendant la saison de végétation peuvent entrainer un développement des foyers. Une succession d'années humides et chaudes serait une des causes initiales de l'augmentation de la maladie. Suite à des périodes de 8 heures de feuillage humide, des sècheresses de plus de 24 heures ralentiraient, voire stopperaient, le développement de la maladie.



Evolution en Pays de la Loire: La maladie des bandes rouges est présente aujourd'hui pratiquement dans toutes les plantations de pin laricio. Les signalements concernent principalement les zones où la sévérité est très importante. La carte fournit ainsi plus une information sur l'importance de l'expression du phénomène selon les années qu'une progression spatio-temporelle. Il est supposé que l'émergence et l'importance de l'impact de la maladie sont essentiellement dues à la sylviculture (boisement en monoculture de pin laricio, à forte densité) et au climat. Les printemps chauds et humides sont en effet favorables au développement des symptômes. La maladie induit des pertes foliaires de pins parfois très fortes. Répétées sur plusieurs années, ces défoliations induisent une baisse de croissance pouvant remettre en cause l'intérêt des plantations de pin laricio. Même si les périodes de sécheresse estivale pourraient limiter l'intensité des attaques, les variations climatiques ne seront probablement pas linéaires et l'accroissement de la pluviométrie et des températures printanières pourraient prolonger les périodes favorables au développement de la maladie.

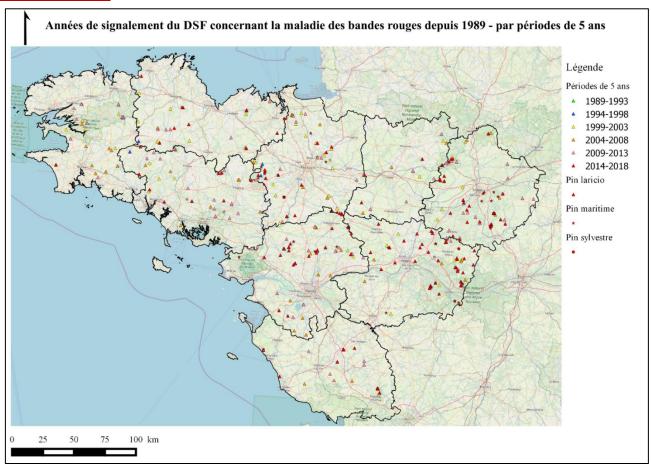
La processionnaire du pin

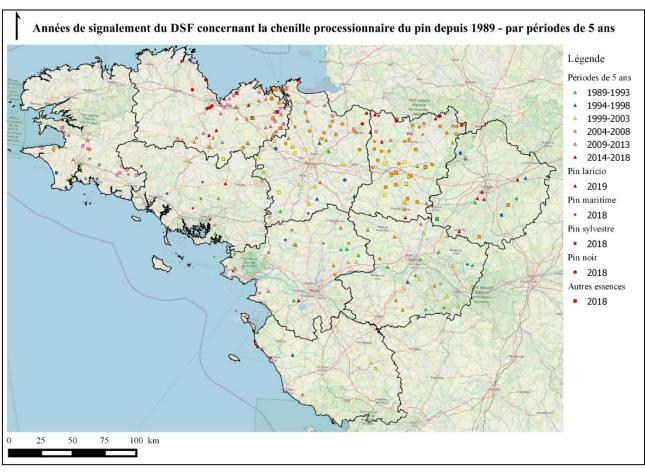
Cette chenille cause des défoliations sur pins laricio principalement et pin maritime. Les arbres affaiblis ou susceptibles de subir des défoliations répétées (jeunes plantations) peuvent souffrir plus durablement et devenir moins résistants à des attaques de parasites de faiblesse. La processionnaire a un impact plus sur la santé humaine que sur la santé végétale.



<u>Impact du climat sur le problème</u>: Avec un développement lié aux conditions climatiques chaudes, l'expansion de l'aire de répartition de la processionnaire du pin fait partie des indicateurs du changement climatique retenus par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC). L'insecte thermophile est sensible à différents aléas climatiques selon la période de son cycle biologique. Une forte pluviosité en hiver affaiblit les chenilles, engendre des mortalités de nymphes dans le sol et enfin une canicule estivale peut détruire les œufs et les jeunes larves. Cependant, l'aire de répartition de la processionnaire du pin continue à s'étendre vers le Nord (Gaudry et al, 2018).

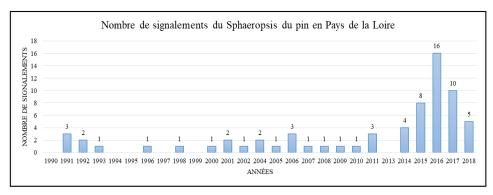
<u>Evolution en Pays de la Loire</u>: Dans les années 80-90, les conditions de température n'étaient pas suffisantes pour favoriser la présence de la chenille dans le Nord de la zone d'étude. L'augmentation progressive des températures l'a fait progresser. Ce ravageur a traversé le département de la Mayenne en moins de 10 ans. On remarque des pics de signalements sur les graphiques en 2005-2006. Le nombre de signalements a diminué les années suivantes car les signalements se sont concentrés par la suite sur le front de colonisation. Des anomalies dans le cycle de la processionnaire ont également été observées : les nids sont parfois confectionnés plus précocement et plus petits depuis cinq ans. Les processions peut débuter en janvier voire novembre (phénomène notamment observé localement lors de l'automne très doux en 2009). Il est probable que ces anomalies soient dues à l'augmentation des températures.





Le sphareopsis du pin

Champignon attaquant principalement les pins laricio et sylvestre, capable de coloniser diverse tissus sans provoquer de désordres. Il devient pathogène suite à un stress et provoque alors des nécroses corticales et le dessèchement des branches. L'impact de la maladie est moins important sur les jeunes sujets (plantations et régénérations naturelles).

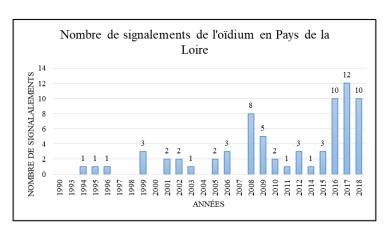


<u>Impact du climat sur le problème</u>: Ce champignon préalablement présent dans les tissus se développe et s'exprime généralement suite à des stress abiotiques: épisodes de stress hydrique prononcé ou orage de grêle. Les températures élevées ont favorisé le développement du pathogène, champignon thermophile. En période humide (de mars à octobre, mais surtout entre avril-juin) l'optimum de température de germination de ses spores se situe entre 22°C et 32°C (Peterson, 1981).

<u>Evolution en Pays de la Loire</u>: Le sphaeropsis est présent dans tous les départements. Des dégâts sont apparus suite à des orages de grêle et des stress hydriques, notamment en 2015, 2016 et 2017 dans la zone d'étude, et ont favorisé l'expression du pathogène. Les peuplements installés sur des sols à faible réserve utile en eau ou des expositions chaudes, ont été les plus impactés. L'incertitude liée aux difficultés d'identification du pathogène pourrait minimiser l'étendue de sa présence. L'augmentation d'épisodes de sècheresses semblerait favoriser l'expression de ce pathogène. Les températures continueront de croître avec des périodes de stress hydrique plus importantes et plus longues. L'impact du sphareopsis devrait continuer à augmenter dans les années à venir.

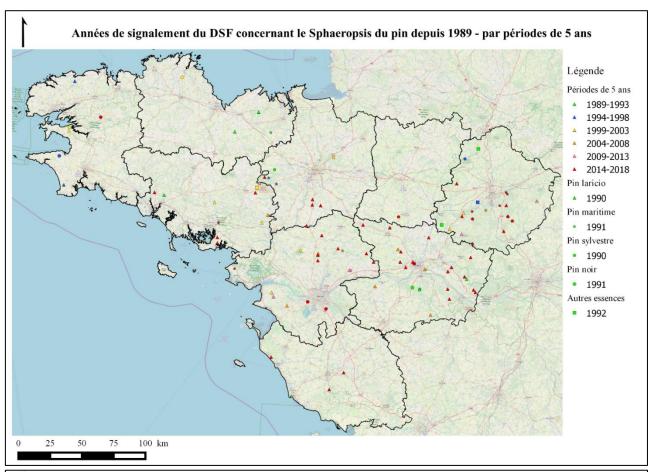
L'oïdium des chênes

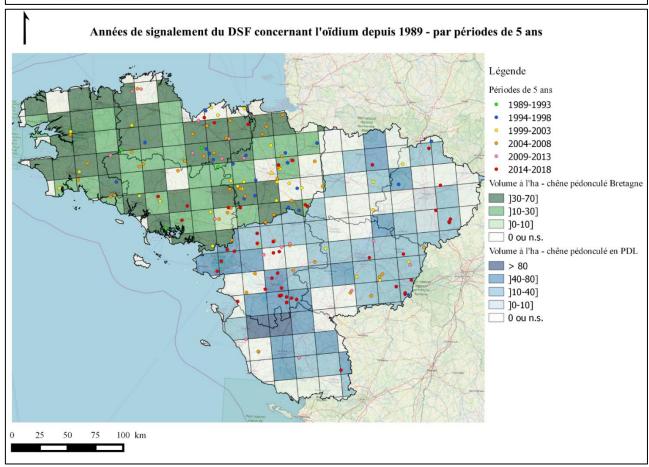
Ce champignon est un parasite des feuilles de chênes. Le chêne pédonculé est plus sensible que le chêne sessile à ses attaques. L'oïdium provoque le dessèchement et le brunissement des feuilles atteintes puis leur chute prématurée. Dans les jeunes plantations et les régénérations naturelles, il peut être particulièrement virulent et provoquer des mortalités. Chez les arbres adultes, on constate une légère baisse de croissance mais pas de mortalités directes. Associé à d'autres facteurs, il participe au processus de dépérissement des chênaies.



<u>Impact du climat sur le problème</u>: Les stations ensoleillées sont plus fréquemment soumises à la pression du champignon. Cette pression est accentuée par des pluies d'orage lors de périodes estivales sèches. Les gelées tardives favorisent également l'action de l'oïdium. Il a été mis en évidence que les pics du champignon correspondent aux années où les hivers sont plus doux (Desprez-Lousteau et al, 2017). L'accumulation des deux facteurs climatiques (hivers doux et printemps alternant humidité et sécheresse) favorise son développement.

<u>Evolution en Pays de la Loire</u>: Le problème est globalement présent dans toute la région. Les signalements de ce problème sur les jeunes plantations est plus fréquent qu'en peuplement adulte: le pathogène peut en effet provoquer une mortalité s'il est cumulé à d'autres facteurs comme le gel par exemple. Quand les plants présentent une forte proportion d'oïdium sur leurs feuilles (>30%), cela peut avoir un impact négatif sur leur croissance. Les graphiques indiquent une progression des signalements sur les trois dernières années dans la région. La succession d'hiver doux humides ainsi que la fréquence des printemps arrosés et chauds a dû jouer un rôle sur la présence du pathogène. Par contre, il difficile de prévoir son impact à venir compte-tenu de l'incertitude sur l'évolution de la pluie.



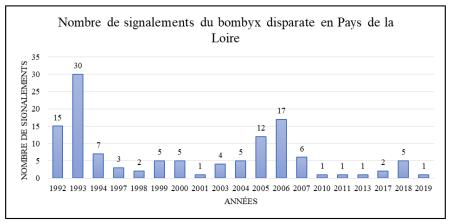


Fiche 5

Évolution des causes biotiques de dommages forestiers en lien avec le climat

Le bombyx disparate

Le bombyx disparate est l'un des plus importants défoliateurs des chênaies françaises. En cas de grosse pullulation, il s'intéresse à un grand nombre de végétaux. Les défoliations, même totales, ne provoquent pas la mortalité directe des arbres mais leur répétition dans un contexte de stress hydriques climatiques successifs constitue un facteur supplémentaire d'affaiblissement des chênaies.

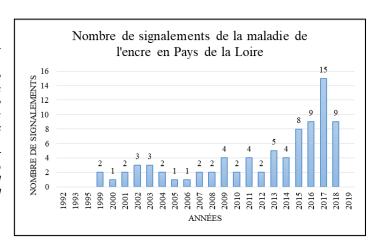


<u>Impact du climat sur le problème</u>: Le bombyx est un insecte plutôt thermophile. Il aurait tendance à apparaître massivement suite à de fortes sécheresses. L'augmentation des températures serait favorable à la biologie de l'insecte.

Evolution en Pays de la Loire: Les populations de bombyx disparate ont fortement augmenté les années suivant les sécheresses de 1989 à 1991. Une phase de pullulation, causant des défoliations importantes, a été observée en 1992. Après deux ans, les populations ont chuté du fait de plusieurs facteurs (cortège de parasites efficaces contre le bombyx, manque de disponibilité en nutriment...). Suite aux étés particulièrement secs de 2015 à 2018 un scénario semblable semble se reproduire avec une présence accrue de l'insecte dans l'ensemble des chênaies françaises, sans forcément que des défoliations importantes y soient associées. Une vigilance accrue est donc portée à ce défoliateur car l'action combinée de ce dernier avec les effets de la sécheresse pourraient entrainer de fortes perturbations dans les peuplements.

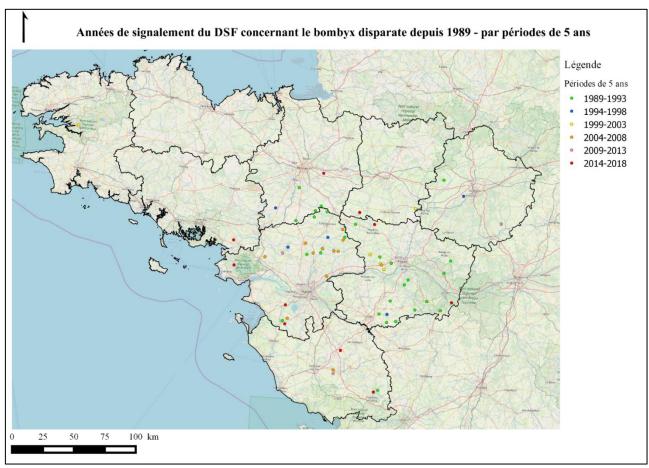
La maladie de l'encre

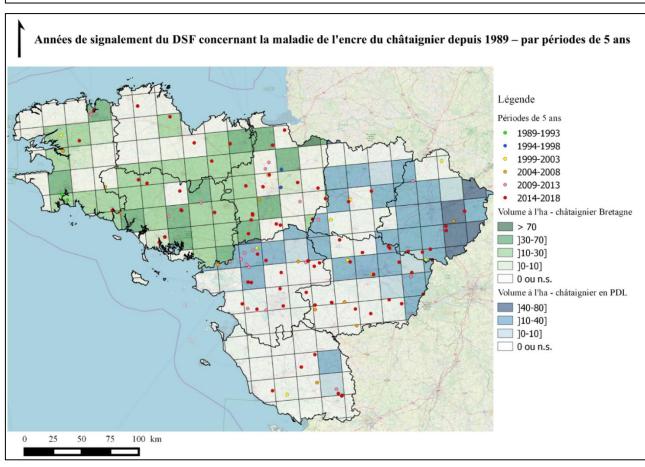
L'encre du châtaignier est causée par un complexe de deux agents pathogènes fongiques du genre Phytophthora (P. cambivora et P. cinnamomi). Leur dispersion à longue distance se fait par le transport de sol ou de plants contaminés. L'encre détruit tout ou partie du système racinaire de l'arbre en commençant par les plus jeunes racines. Les arbres atteints sont particulièrement sensibles au stress hydrique du fait de leur système racinaire dégradé. Les dépérissements de châtaignier liés à l'encre ont augmentés depuis une vingtaine d'années. Ce pseudo champignon se développe préférentiellement en station mal drainée. A fortiori en année humide, le tassement du sol constitue un facteur aggravant.



<u>Impact du climat sur le problème</u>: Des hivers doux et des printemps pluvieux favorisent la propagation du pathogène. Des étés secs déclenchent des mortalités d'arbres au système racinaire préalablement très nécrosé par la maladie.

Evolution en Pays de la Loire : L'agent pathogène a bénéficié de conditions climatiques favorables à son développement et sa dispersion entre 1999 et 2002 avec des étés pluvieux et des hivers doux. La sécheresse de 2003 a favorisé l'expression de la maladie. Aujourd'hui, la maladie de l'encre est présente dans tous les départements et continue de s'étendre. On observe un pic de signalement en 2016-2018 : le climat chaud et humide de juin 2016 a pu permettre une multiplication et un déplacement important du pathogène dans le sol. La douceur des trois derniers hivers n'a pas permis de le réguler comme à l'habitude et les printemps humides l'ont largement favorisé. Enfin, les étés secs ont provoqué une forte mortalité sur les arbres atteints. La maladie de l'encre est devenue virulente même sur les bonnes stations. Les hivers doux et les périodes estivales chaudes lui seront favorables. Le châtaignier, 3ème essence régionale en termes de surface, est désormais celle qui pose le plus question quant à son avenir dans la région.





L'évolution d'autres pathogènes et ravageurs en lien avec le climat

D'autres ravageurs pourraient voir leurs conditions de développement évoluer dans la région ou leur impact devenir plus important.

Le déphasage induit par le réchauffement climatique entre l'éclosion des œufs d'un parasite et l'apparition des feuilles de l'arbre peut limiter les pullulations. Néanmoins, les hivers doux peuvent favoriser la survie hivernale de certains parasites et ainsi le maintien durable de populations épidémiques. C'est le cas par exemple de la processionnaire du chêne dans la partie nord de son aire. Celle-ci cause des défoliations parfois totales. Mais cela n'a un réel impact qu'en cas de défoliations successives qui vont affaiblir l'arbre et le prédisposer à des attaques de pathogènes ou ravageurs secondaires.

L'augmentation des températures est aussi favorable aux autres défoliateurs signalés en Pays de la Loire (géométrides, chrysomèles, bombyx cul brun...).

Le bupreste du chêne, présent en Pays de la Loire profite également de la hausse des températures pour remonter vers le Nord. Ce coléoptère peut avoir des impacts importants surtout dans les renouvellements et les jeunes peuplements (dessèchement de branches).

Fiche 6

Les perspectives pour le développement forestier ligérien face au changement climatique

Avec les précédents constats, plusieurs axes de développement forestier sont à suivre pour orienter la gestion forestière régionale en prenant en compte les changements climatiques.

Axe 1 : améliorer la connaissance du milieu forestier

Il est aujourd'hui impératif pour le forestier d'intégrer le risque climatique dans ses choix de gestion. Un préalable est déjà de bien connaître le milieu et d'implanter ou favoriser une essence au bon endroit. Un arbre implanté sur un sol non adapté à ses exigences écologiques sera plus vulnérable en cas de « coups durs » climatiques qu'un autre qui est bien adapté au sol. A l'inverse, un arbre peut être situé en conditions limites d'un point de vue climatique mais avec un sol profond à forte réserve utile en eau, il ne va pas forcément souffrir d'un épisode sec (effet de compensation).

Les données climatiques spatialisées produites en 2019 sur la région améliorent la connaissance locale du climat pour le diagnostic de terrain : elles sont à intégrer pour les diagnostics individuels réalisés par le CRPF auprès des propriétaires forestiers. Ces données pourraient être valorisées dans la production de guides de stations permettant de distinguer des zones climatiques et avec des conseils de gestion adaptés en conséquence. C'est par exemple le travail qui a été réalisé en Normandie : le guide des stations paru en 2018 préconise des essences de reboisement selon le type de station mais également selon l'adaptation climatique future de l'essence supposée à moyen et long terme (2050-70 ou 2100) dans la zone climatique où s'effectue le diagnostic.

Par ailleurs, des outils spécifiques sont déjà développés au niveau national dans le cadre du RMT Aforce (Un Réseau français pour l'Adaptation des Forêts au Changement climatique) pour aider à améliorer le diagnostic de terrain avec cette intégration du risque climatique.

L'outil BioClimSol a notamment été développé par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF). Cet outil vise à aider le forestier dans la gestion des peuplements et le choix des essences pour les actions de boisements et reboisement dans un contexte de changement du climat. Il permet de cartographier des "zones de vigilance climatique" spécifiques à chaque essence en s'appuyant sur des données climatiques spatialisées. Dans la démarche BioClimSol, un diagnostic des stations forestières et des peuplements déjà en place doit également être réalisé pour prendre en compte les phénomènes de compensations potentiels (humidité atmosphérique, réserve utile maximale...) et préconiser une gestion la plus adaptée possible. Une application mobile, appelée FORECCAST by BioClimSol, est en cours de tests pour pouvoir utiliser le diagnostic BioClimSol sur le terrain. L'application devrait être disponible en 2021.

D'autre part, le projet CARAVANIKS est en cours de lancement pour valoriser les résultats des études CARAVANE⁸ et IKSMAP⁹ sous la forme d'une plateforme informatique permettant d'évaluer à l'échelle des sylvoécorégion l'adaptation potentielle des essences en un endroit donné selon les données climatiques modélisées. Le développement de ce site aura lieu en 2020.

Il est nécessaire de tester ces outils régionalement et accompagner les forestiers dans leur utilisation.

Axe 2 : accompagner le choix des essences et des provenances

Le choix des essences et provenances pour l'adaptation de la forêt régionale au changement climatique doit se faire d'une part en accompagnant les preneurs de décisions de gestion en forêt à l'utilisation des outils précédemment évoqués et d'autre part en développant l'expérimentation en forêt avec des tests d'essences ou de provenances potentiellement plus adaptées à moyen et/ou long terme au changement climatique.

Quelques essais de référence ont été déjà installés en Pays de la Loire. Deux arboreta (à Avoise et à Bécon-les-Granits) ont été notamment installés il y a une dizaine d'années dans le cadre du projet européen REINFFORCE (RÉseau INFrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des FORêts au Changement climatiquE. REINFFORCE comprend 38 arboreta¹⁰ et 41 sites d'expérimentations sur la face atlantique partant du Portugal jusqu'à l'Ecosse pour connaître de manière anticipée la réaction des peuplements et des essences au changement climatique.

8

⁸ Projet Aforce (ONF et CNPF) : production de fiches essences détaillées selon 36 critères pour avoir des références sur un grand nombre d'essences « canditates » pour l'introduction dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

⁹ Projets AForce + Labex Arbre à Nancy (CNPF, ONF, INRA, IRSTEA, Agroparistech, Météo France) : caractérisation de l'aire des essences par un seuil par indicateur (modélisation actuelle et future) avec pour objectif d'analyser le risque climatique en prenant en compte l'incertitude, à l'échelle Sylvoécorégions.

¹⁰ Les arboreta comprennent une base commune composée du même matériel végétal : 38 essences représentées par 1 à 9 provenances par essence, soit 127 Unités génétiques implantées par placettes, suivies et mesurées tous les ans par les techniciens de secteur (hauteur et circonférence). La croissance, la vigueur et l'état sanitaire des arbres sont également observés.

Fiche 6

Les perspectives pour le développement forestier ligérien face au changement climatique

Dans le cadre de son stage de Licence Professionnelle au CRPF pour cette étude en 2019, Diane BEHR a interrogé différents techniciens forestiers du CRPF Bretagne-Pays de la Loire et autres personnels du Département de la Santé de Forêts (DRAAF, DDT) sur l'expérimentation d'essences potentiellement plus adaptées aux changements du climat. Les essences « candidates » les plus fréquemment citées par les techniciens forestiers ou les autres professionnels de la filière rencontrés sont les suivantes :

Essences résineuses : Cèdre de l'Atlas, Sapin de Nordmann, Pin taeda, Pin radiata Essences feuillues : Chêne pubescent, Robinier faux-acacia, Chêne vert, Chêne liège

Dans les retours obtenus, il semble que l'expérimentation en forêt en Pays de la Loire de ces essences reste limitée. Le test de ces essences (sur des terrains adaptés) est à encourager. D'autre part, le test de provenances potentiellement plus résistantes à la sécheresse (ex : provenance Californie pour le Douglas) ou aux maladies (ex : hybrides de châtaignier vis-à-vis de l'encre) sont également à développer.

Axe 3 : Accompagner les changements de pratique sylvicole

Face au changement du climat, la sylviculture peut également être adaptée pour améliorer la capacité de résilience des peuplements.

Dans le cadre de REINFFORCE, deux sites de démonstration ont notamment été installés pour tester des sylvicultures adaptatives :

A Avoise

- Développement d'une sylviculture adaptative en peuplement de Douglas de 15 ans (dans une zone climatique sensible en France pour le Douglas) pour amoindrir l'impact du changement climatique et maintenir la production de bois de qualité ;
- Objectif : évaluer l'effet des éclaircies sur le stress hydrique potentiel ;
- Placettes suivies : une placette « témoin », une placette sans éclaircie, une placette avec éclaircie légère en 2012 (35% de prélèvement) et une placette avec une éclaircie forte en 2012 (55% de prélèvement).

A Précigné

- Développement d'une nouvelle sylviculture pour atténuer les impacts du changement climatique et maintenir la production de bois de qualité ;
- Peuplement de chêne de 80 ans dans une zone à haute sensibilité pour le chêne concernant le changement climatique et affecté de dépérissement lié au climat ;
- Réalisation d'un diagnostic ARCHI¹¹ puis test d'une éclaircie localisée (détourage). Comparaison de l'état sanitaire des arbres détouré avec ceux non détourés ;
- Deux placettes : un dispositif « témoin » pas éclairci et un dispositif éclairci.

Les renouvellements de peuplements peuvent également faire l'objet d'une sylviculture potentiellement plus adaptée face à la contrainte climatique :

- Plantation dans le recru pour favoriser le maintien d'une ambiance forestière, la protection des plants et le mélange d'essence ;
- Plantations mélangées (diversifier les sensibilités aux risques climatiques).

Enfin dans un contexte de changement climatique, il est plus que fondamental de privilégier les techniques respectueuses des sols lors des interventions en forêt (que ce soit pendant l'exploitation des bois ou en préparation d'un renouvellement de peuplement).

L'installation d'un référentiel régional sur des essais de nouvelles essences/provenances et de sylvicultures adaptatives serait nécessaire pour avoir des éléments techniques à vulgariser auprès des propriétaires forestiers pour pouvoir les inciter à adapter leurs forêts et/ou méthodes face au changement climatique. Ce type de Référentiel Forestier Régional existe en Bretagne depuis 2001, avec environ 170 références suivies.

¹¹ ARCHI : méthode de diagnostic développée par l'IDF pour apprécier la dynamique de réaction des arbres après un stress à partir de l'observation de l'architecture de leur houppier.

Jour de chaleur

Jour de très forte chaleur

Températures maximales >25°C

Températures maximales >30°C.

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 : 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 une quantité d'eau équivalente à l'ETP.

Evapotranspiration réelle : un couvert végétal de par sa structure offre une certaine résistance au transfert de la vapeur d'eau 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.

Scénarios SRES et scénarios RCP

L'analyse des experts du GIEC entre 2001 et 2007 reposait sur un faisceau de futurs possibles de nos sociétés et de nos modes de vie. Ces scénarios socio-économiques (SRES), organisés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2), étaient traduits chacun en termes d'émissions de gaz à effet de serre pour le XXIème siècle. Ces évolutions des émissions ou des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles simulant le climat futur.

Famille A1	Famille A2	Famille B1	Famille B2	
Elle postule une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite. De nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont introduites rapidement.		démographique que la famille A1 mais avec une économie rapidement dominée par les services et dotée de technologies	plans économiques et technologiques, qui voit sa population atteindre à 10 milliards d'habitants en 2100, sans cesser	

Lors de la préparation du 5ème Rapport du GIEC (2014), une approche différente a été adoptée afin d'accélérer le processus d'évaluation. Les experts du GIEC ont cette fois définie 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 (Profils représentatifs d'évolution de concentration).

Les quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre retenus par les experts du GIEC dans le 5 eme 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. Ces RCP sont utilisés par les différentes équipes d'experts 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.

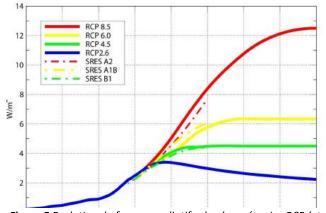


Figure 5 Evolution du forçage radiatif selon les scénarios RCP (et les anciens scénarios SRES de 2007)

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

Le profil RCP 8.5 est le plus extrême (pessimiste). Il est un peu plus fort que le scénario le plus marqué utilisé dans les simulations du rapport du GIEC 2007 (A2). Les profils RCP 6.0 et RCP 4.5 correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios A1B et B1. Enfin, le profil RCP 2.6 est sans équivalent dans les anciennes propositions du GIEC. En effet, sa réalisation implique l'intégration des effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Livres

Nageleisen, Saintonge, Piou, Riou-Nivert (2010), La santé des forêts, CNPF/IDF, 608 pages.

Picard, Legay, Landamann (2015). L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, La documentation française, 181 pages.

Articles et études

Badeau, Dupouey, Cluzeau, Drapier (2007). Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. RDV techniques hors-série n°3, pages 62-66.

Baudran, Blanchard, Loyer (2008). Caractérisation et évolution du climat. Quelles conséquences pour la végétation forestière ? Nantes : CRPF Bretagne-Pays de la Loire, 44 p.

Behr (2019), Etude des conséquences de l'évolution du climat sur la forêt en Bretagne et Pays de la Loire. Rapport de stage de Licence professionnelle « De la gestion forestière durable à la commercialisation des bois et dérivés » (Université de Reims Champagne-Ardennes). Rennes : CRPF Bretagne-Pays de la Loire, 96 p.

Bouvier, Blanchin, Colombet (2012). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques. CRPF Bretagne-Pays de la Loire, 48 p.

Dupouey (2013). Forêt et changement climatique, quelques éléments issus de la recherche. Forêt entreprise, n°211, pages 24-29.

Lebourgeois, Pierrat, Perez, Piedallu, Cecchini, Ulrich (2010). Changement des dates de débourrement et de jaunissement des chênaies et des hêtraies françaises au cours du XXIe siècle. Revue Forestière Française LXII: pages 608-624.

Lebourgeois, Pierrat, Perez, Cecchini, Ulrich (2011). Rallongement de la saison de végétation des hêtraies et des chênaies françaises dans les prochaines décennies. Conséquences possibles sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. RDV techniques n°33-34 : pages 39-46.

Lemaire, Maréchal (2011). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques : comprendre et agir. Forêt entreprise, n°198 : pages 48-50.

Sites internet

Alim'agri (2019), La Santé des forêts, URL : https://agriculture.gouv.fr/la-sante-des-forets

CNPF (2019), Bioclimsol, autécologie des essences, URL : https://www.cnpf.fr/n/bioclimsol-autecologie-des-essences/n:226

IDF-CNPF (2019), AFORCE, Un réseau Français pour l'Adaptation des Forêts au Changement climatique, Url : https://www.reseau-aforce.fr/n/effets-attendus-du-changement-climatique-sur-l-arbre-et-laforet/n:3254

Météo France (2019), Climat HD, Url: http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

Météo France (2019), Drias, Url: http://www.drias-climat.fr/

Météo France (2010), http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-feux-de-forets

Ephytia (2019), Url: http://ephytia.inra.fr/fr/Home/index

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2019), Alim'agri, UrL:

https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres