

Partie 2 : Etude des conséquences des évolutions climatiques en Bretagne sur la forêt



Centre Régional de la Propriété Forestière
BRETAGNE – PAYS DE LA LOIRE

Décembre 2019
CRPF Bretagne-Pays de la Loire

AVANT-PROPOS

L'étude de Météo France montre qu'à l'échelle de la Bretagne, la hausse des températures est une certitude. Il est cependant indéniable que l'augmentation de la fréquence des périodes de canicule en été, la diminution de la fréquence des hivers froids, l'augmentation des températures aux saisons intermédiaires ont déjà des effets sur la végétation. Toutes les projections climatiques s'accordent à prévoir une accentuation de ce réchauffement pour la seconde moitié du XXIème siècle. L'incertitude est néanmoins importante concernant l'évolution des précipitations en Bretagne. La comparaison des périodes 1959-1988 et 1989-2018 révèle une augmentation des précipitations de l'été à l'hiver, et une diminution printanière peu marquée (-5 % au plus). Le Finistère et plus généralement les reliefs de l'ouest breton bénéficient d'une hausse plus importante de la pluviométrie par rapport au reste de la région, dont une partie est due aux pluies d'été. Néanmoins, la pluviométrie a fluctué depuis les années 60, ce qui ne permet pas de conclure à une tendance, et 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 breton 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 bretonne, 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 20 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 régionalement, 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, dans un but de vulgarisation :

Fiche n°1 : les principales essences forestières de production en Bretagne et leurs exigences climatiques

Fiche n°2 : l'impact des évolutions climatiques sur le développement des arbres

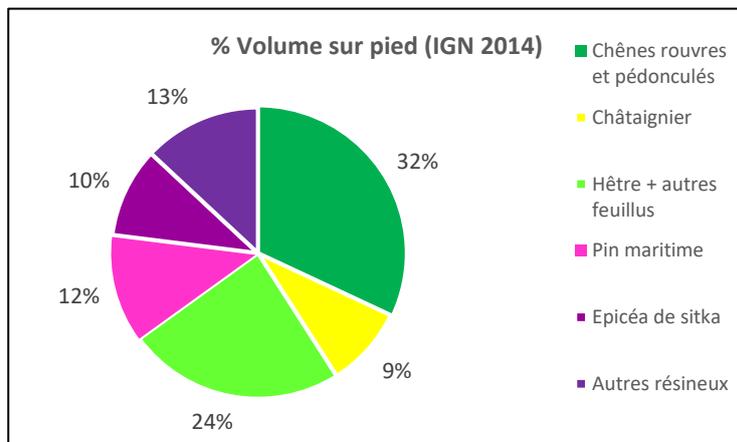
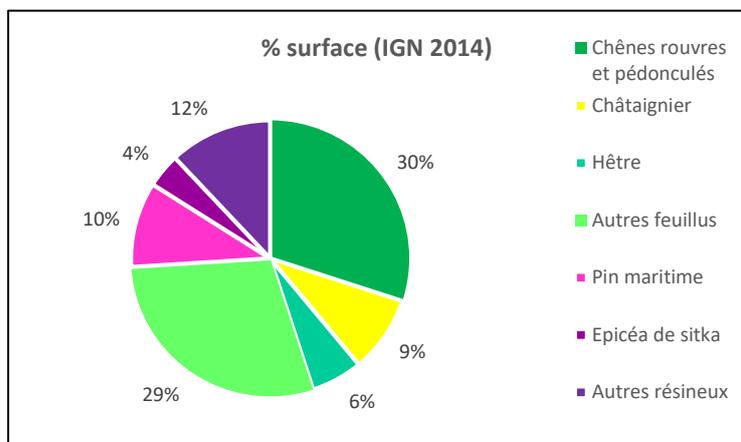
Fiche n°3 : l'évolution de l'aire bioclimatique des essences forestières régionales

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 breton face au changement climatique

Part des différentes essences forestières de production en Bretagne



Exigences climatiques des différentes essences forestières de production en Bretagne

	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 mais en Bretagne la pluviométrie associée aux peuplements les plus productifs est généralement >750 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 ¹ Forte humidité atmosphérique requise	Résistance au gel hivernal mais craint les contextes trop froids (quand T° moyenne de janvier < -2°C) Sensible à la sécheresse printanière Sensible aux gelées tardives en contexte de plaine
Chêne rouge	4 à 15°C	> 600 mm	Sensible à la sécheresse estivale Sensible aux gelées tardives
Epicéa de sitka	NR	>900 mm par an dont 130 mm les mois d'été	Sensible à la sécheresse estivale Sensibilité au gel printanier et automnal
Pin maritime	11 à 15 °C	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 Tolère les sécheresses modérées mais sensible aux sécheresses intenses
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

¹ Saison de végétation : avril à octobre

(1) 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 Bretagne 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 retrouvent augmentés. Le risque de stress hydrique est alors accru pour les essences forestières situées en condition limite vis-à-vis de leurs besoins en eau (ex : le hêtre, le sapin pectiné...).

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 RENECOFOR² (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 dates jaunissement et de longueur de végétation ont été établis pour les chênes³ 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 2001-2100. 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 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).

² 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 1^{ère} problématique.

³ Sessile ou pédonculé de façon indifférenciée, ces deux espèces ayant une réponse phénologique très similaire aux conditions climatiques.

Il est mis en évidence également que pour les chênes, l'avance du débourrement serait moins importante dans l'Ouest 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.

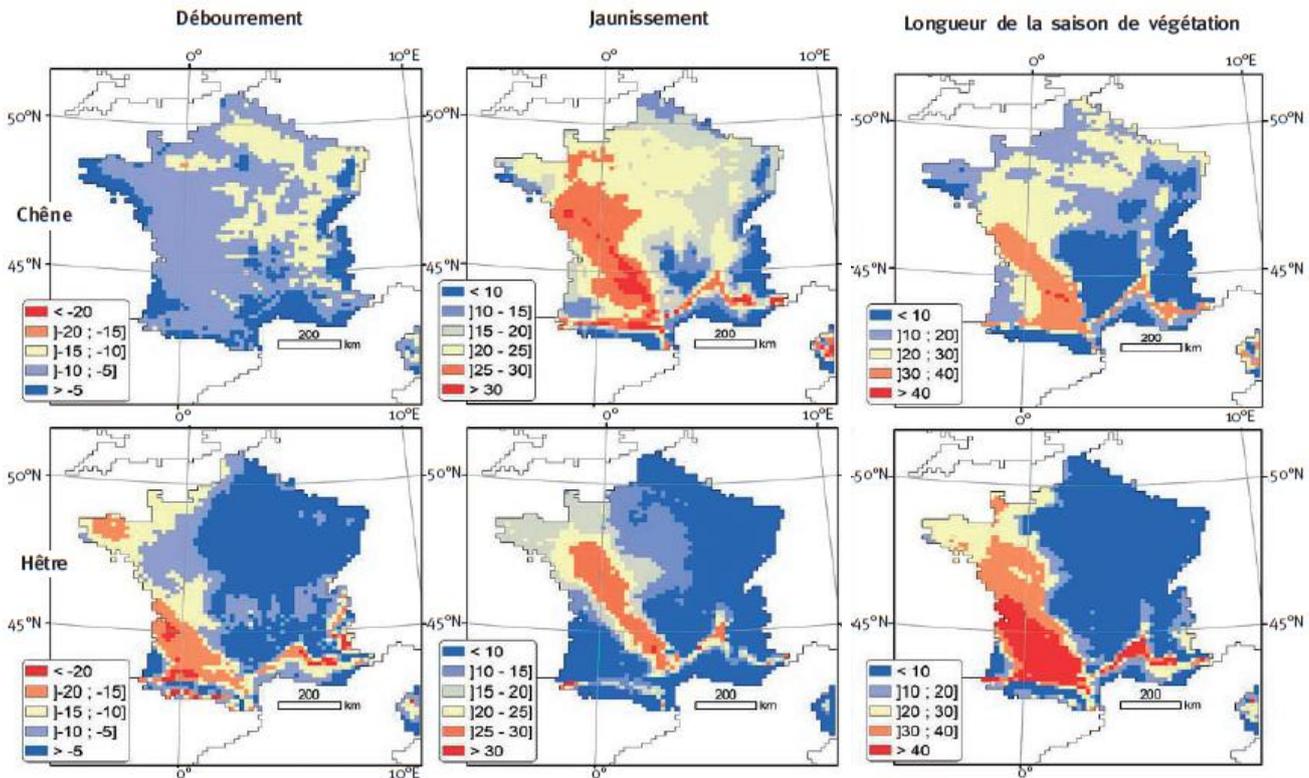


Figure 1 Cartes potentielles des variations prédites (en jours) à la fin du XXI^e SIÈCLE (2071-2100) des dates de débournement, de jaunissement et de la durée de la saison de végétation (Lebourgeois et al, 2010)

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 **Figure 1**, 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 débournement, 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.

(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'aoûtement⁴ des pousses et prédisposer à des dommages lors de gels précoces.

→ Les trois automnes les plus chauds depuis 1959 en Bretagne ont été observés au XXIème siècle (2006, 2011 et 2014).

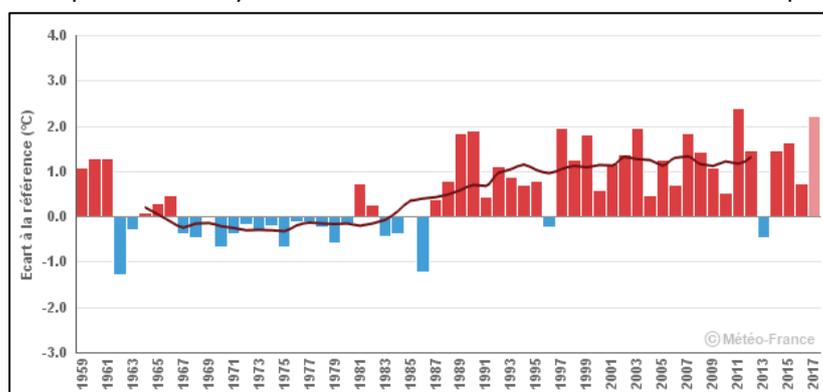
(2) Au cours de l'hiver, lors de périodes bien ensoleillées pendant la journée, les températures s'élèvent et peuvent réactiver la transpiration au niveau du feuillage des résineux. Si la température du sol est en dessous du seuil d'absorption des racines, la demande en eau de la partie aérienne ne peut 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.

→ L'hiver 2015-2016 suivi de l'hiver 1989-1990 sont les deux hivers les plus doux depuis 1959 en Bretagne.

(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.

→ Le printemps (avec l'été) est une des saisons où le réchauffement a été pour l'instant le plus marqué. Les trois printemps les plus chauds depuis 1959 en Bretagne ont été observés au XXIème siècle (2007, 2011 et 2017).

Le site climat HD⁵ permet d'avoir un regard plus détaillé sur l'évolution des conditions saisonnières, hors période estivale sur la région Bretagne 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 Brest-Guipavas Station

Station Rennes-Saint-Jacques

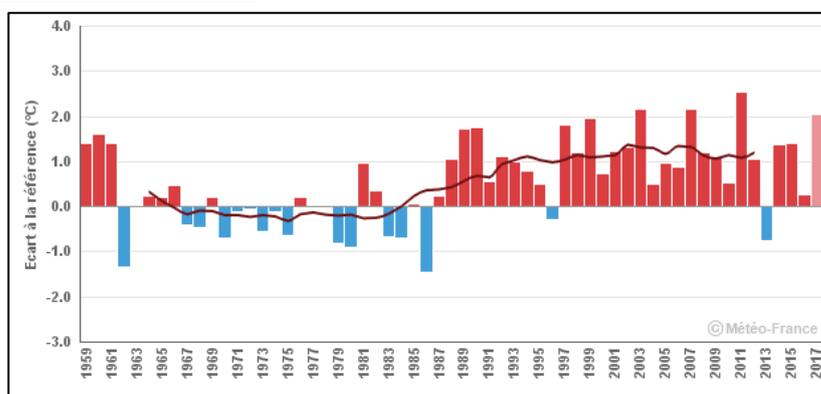


Figure 2 Température moyenne printanière pour deux stations bretonnes : écart à la normale (moyenne 1961-1990)

⁴ Aoûtement : processus de lignification des jeunes rameaux des arbres à l'arrivée du froid

⁵ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
		sécheresse printanière					sécheresse automnale	sécheresse hivernale et printanière	chaleurs anormales de mai à octobre	

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

Figure 3 Niveau d'impact de la sécheresse estivale en Bretagne indiqués dans les bilans du DSF de 1998 à 2018 et indication des années particulières concernant les conditions de température au printemps, à l'automne et à l'hiver

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.

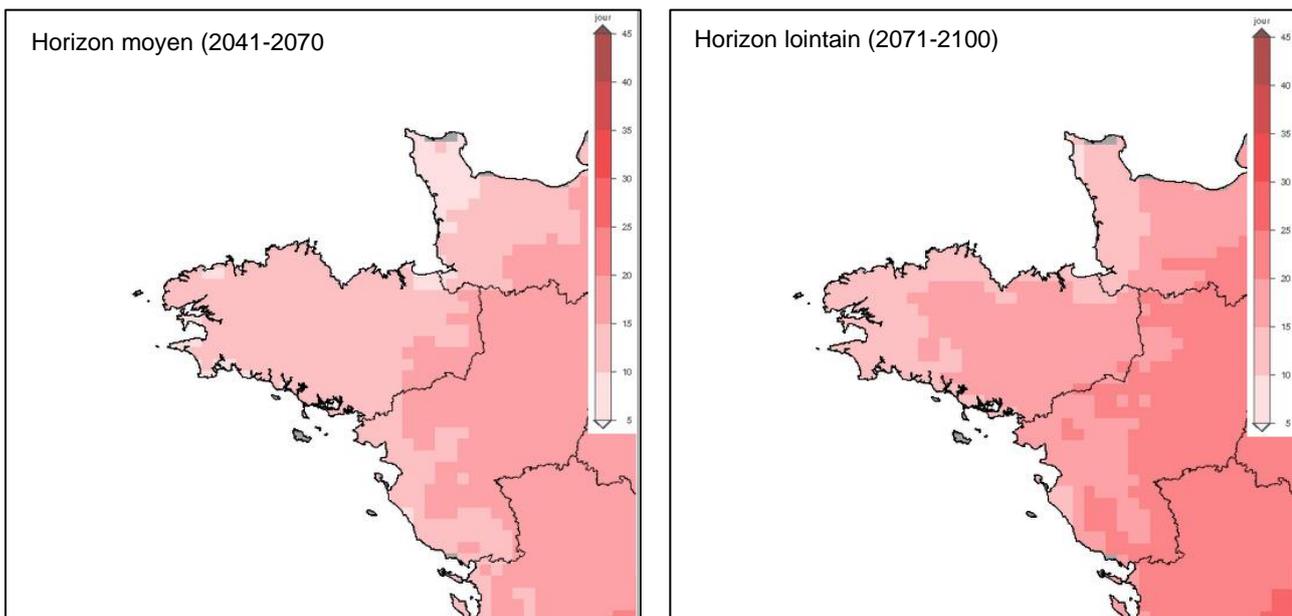


Figure 4 Nombre de jours anormalement chauds - Moyenne printanière
 Scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO2 (RCP4.5)
 Expérience : Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France

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, celles-ci n'étant plus adaptées au milieu ;
- Migration 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, il y a une grande incertitude quant à la capacité de migration et d'adaptation des espèces dans délais aussi courts. Ce sont surtout les arbres situés sur la 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 NE de la France).

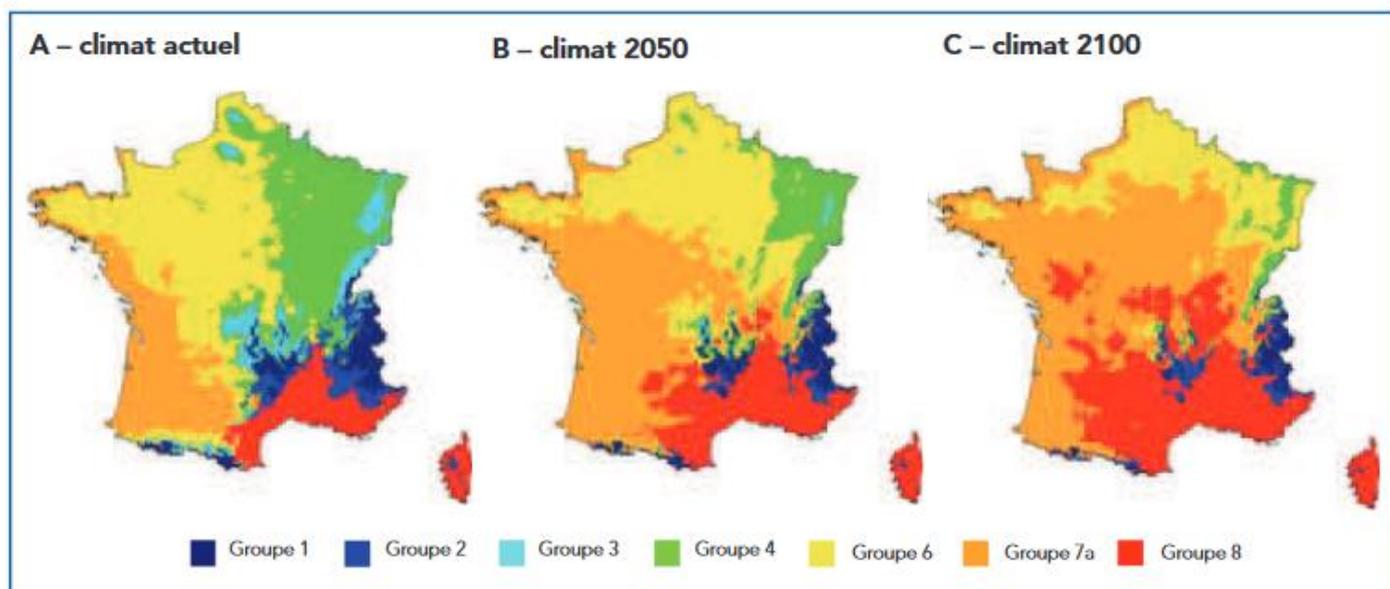


Figure 2 Répartition géographique de sept groupes biogéographiques estimée en fonction du climat actuel (A) et extrapolée au climat futur (B et C - Modèle considérant +2,5°C en 2100)

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, le chêne vert).

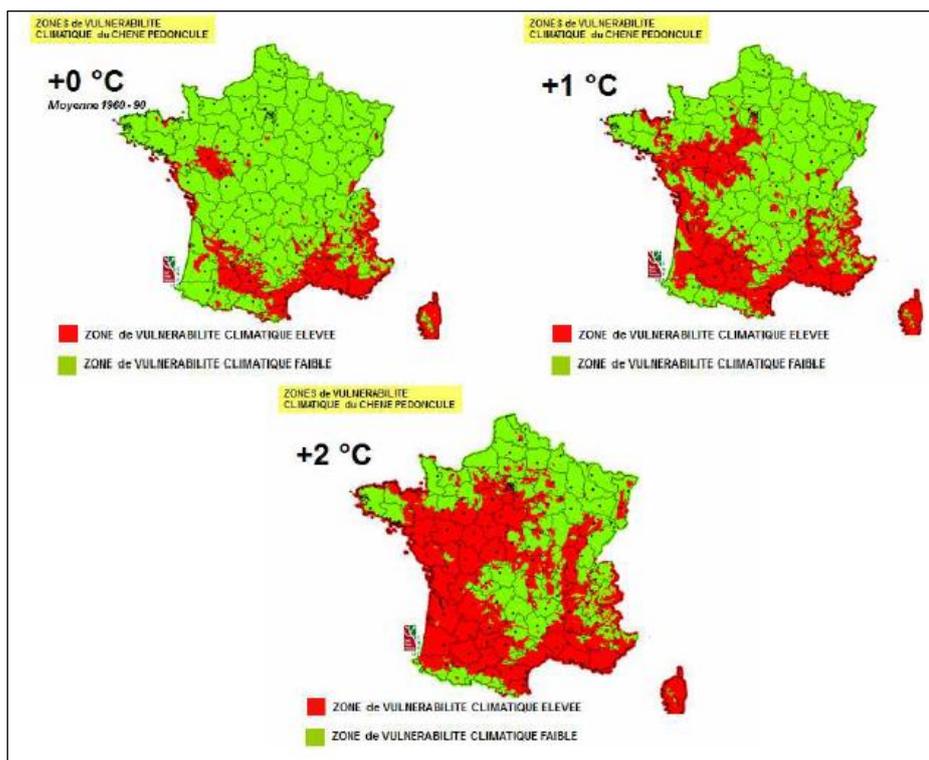
Les cartographies des données climatiques récentes de la présente étude peuvent permettre de dresser de grandes tendances concernant l'évolution de l'aire climatique des principales essences forestières bretonnes. **Attention, ce tableau donne des tendances d'adaptation climatique des essences dans la Région mais sans prendre en compte les autres conditions du milieu qui conditionnent leur présence également** (notamment le sol et la topographie). Ce ne sont que des prospectives : il faut bien évidemment prendre en compte tous les facteurs du milieu dans les choix sylvicoles et ne pas faire de conclusions hâtives.

Le chêne pédonculé : L'étude chénaie atlantique (2007-2013) a permis notamment de produire une carte de vulnérabilité du chêne pédonculé face au dépérissement en considérant une évolution de + 2°C d'ici à 2100 et en l'absence de sylviculture dynamique (**Figure 6**). En Bretagne, il apparaît que la zone à risque se situe en majorité sur la partie est (département de l'Ille et Vilaine et extrémités Est du Morbihan et des Côtes d'Armor). Cette étude a également clairement mis en évidence que l'indicateur P-ETP est fortement corrélé aux taux de dépérissement des chênaies atlantiques. Les données climatiques récentes obtenues dans la présente étude montrent une baisse du bilan hydrique climatique marquée plus particulièrement en Ille et Vilaine et dans l'Est du Morbihan. C'est dans cette zone que le chêne pédonculé commence à souffrir et où il devrait continuer d'être menacé dans un horizon proche (2050) sur les stations mal adaptées et en l'absence de sylviculture. A un horizon 2071-2100, la hausse de température prédite par Météo France par rapport à la période 1976-2005 serait autour de 1,5°C pour le scénario 4.5 et de 3°C pour le scénario 8.5. L'aire climatique favorable au chêne pédonculé risque donc certainement de se réduire drastiquement et d'être cantonnée au centre Ouest Bretagne à la fin du siècle.

Le chêne sessile : 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. S'il devrait continuer à être climatiquement adapté dans la région, le risque climatique devrait augmenter sensiblement pour les jeunes peuplements (effets des sécheresses/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 (**Figure 7**) permettent de mettre en évidence l'évolution depuis 30 ans de la zone climatiquement favorable au châtaignier en Bretagne : celle-ci a diminué avec la partie Sud de l'Ille et Vilaine (en dessous de l'axe Rennes-Paimpont) et l'Est du Morbihan qui ne semblent plus climatiquement favorables. Cela est confirmé par les techniciens du CRPF remarquant depuis une dizaine d'années la sensibilité de cette essence dans le Sud 35. Dans cette zone-là, il est conseillé de ne pas reboiser avec cette essence à moins d'effets de compensation importants : versant nord, bas de versant, réserve utile supérieure à 150 mm. Avec la poursuite du réchauffement, on peut supposer que l'aire climatique favorable risque de se cantonner au Centre Ouest Bretagne à la fin du siècle.

Le hêtre : Le hêtre a besoin d'humidité atmosphérique et craint les coups de chaleur. Il est sensible aux gelées et aux sécheresses printanières mais présente une capacité de récupération importante suite à un stress hydrique. Dans la région, il doit être limité aux secteurs les plus arrosés avec une forte restriction concernant le bassin de Rennes où la pluviométrie annuelle est tout juste suffisante. L'étude a montré que la pluviométrie avait globalement légèrement augmenté depuis 1959, sans tendance avérée. Si globalement les conditions de pluviométrie se maintiennent, il est à craindre pour le hêtre l'augmentation du déficit hydrique en période de végétation et estival et l'intensification des phénomènes de chaleur et sécheresses (surtout en Ille et Vilaine et dans l'Est des Côtes d'Armor).



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 trentennaires 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 3 Zones de vulnérabilité du chêne pédonculé selon 2 scénarios d'évolution de la température d'ici à 2050

(Etude chênaie atlantique, Lemaire, 2012)

L'épicéa de sitka : Globalement, d'un point de vue climatique, la pluviométrie favorable à l'épicéa de Sitka reste cantonnée aux reliefs de l'Ouest breton avec une augmentation des précipitations estivales plus marquée dans cette zone là que dans le reste de la région. L'épicéa de Sitka ne tolérant pas le déficit hydrique estival marqué, il faut craindre pour l'avenir l'effet de sécheresses et canicules plus fréquentes sur cette essence.

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 devrait logiquement s'étendre vers le Nord et l'Ouest en Bretagne. Concernant la température annuelle moyenne, il n'y a guère plus que les Monts d'Arrée et les Montagnes noires qui ne lui sont pas favorables. Les principales contraintes à prendre en compte vis-à-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 Bretagne pourraient être impactant de façon importante s'ils sont concomitants avec un problème parasitaire (chenille processionnaire, armillaire..).

Le douglas vert : Le douglas 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 climatique. 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... Il est donc à réserver aux bonnes stations forestières permettant d'éviter le stress hydrique (pluviométrie suffisante, réserve en eau du sol suffisante, sol bien drainé). D'un point de vue purement climatique (exigence pluviométrique, température moyenne annuelle), il reste moins adapté dans l'Ille et vilaine (à part dans le Pays de Fougères), le Nord Est des Côtes d'Armor et dans le Sud-Est du Morbihan (déficit hydrique estival plus marqué et températures moyennes annuelles plus importantes).

Le chêne rouge d'Amérique : Le chêne rouge qui est sensible à la sécheresse risque de souffrir à l'avenir avec l'augmentation de ce risque dans l'Ille et Vilaine et l'Est du Morbihan : il est donc à réserver aux sols avec une bonne réserve en eau et là où les précipitations sont les plus favorables. Il est également potentiellement sensible à l'encre : il faut le réserver aux stations bien drainées.

Le pin laricio de corse : Cette essence supporte bien les sécheresses estivales mais est néanmoins sensible à la maladie des bandes rouges qui est favorisée par les hivers et printemps doux et humides.

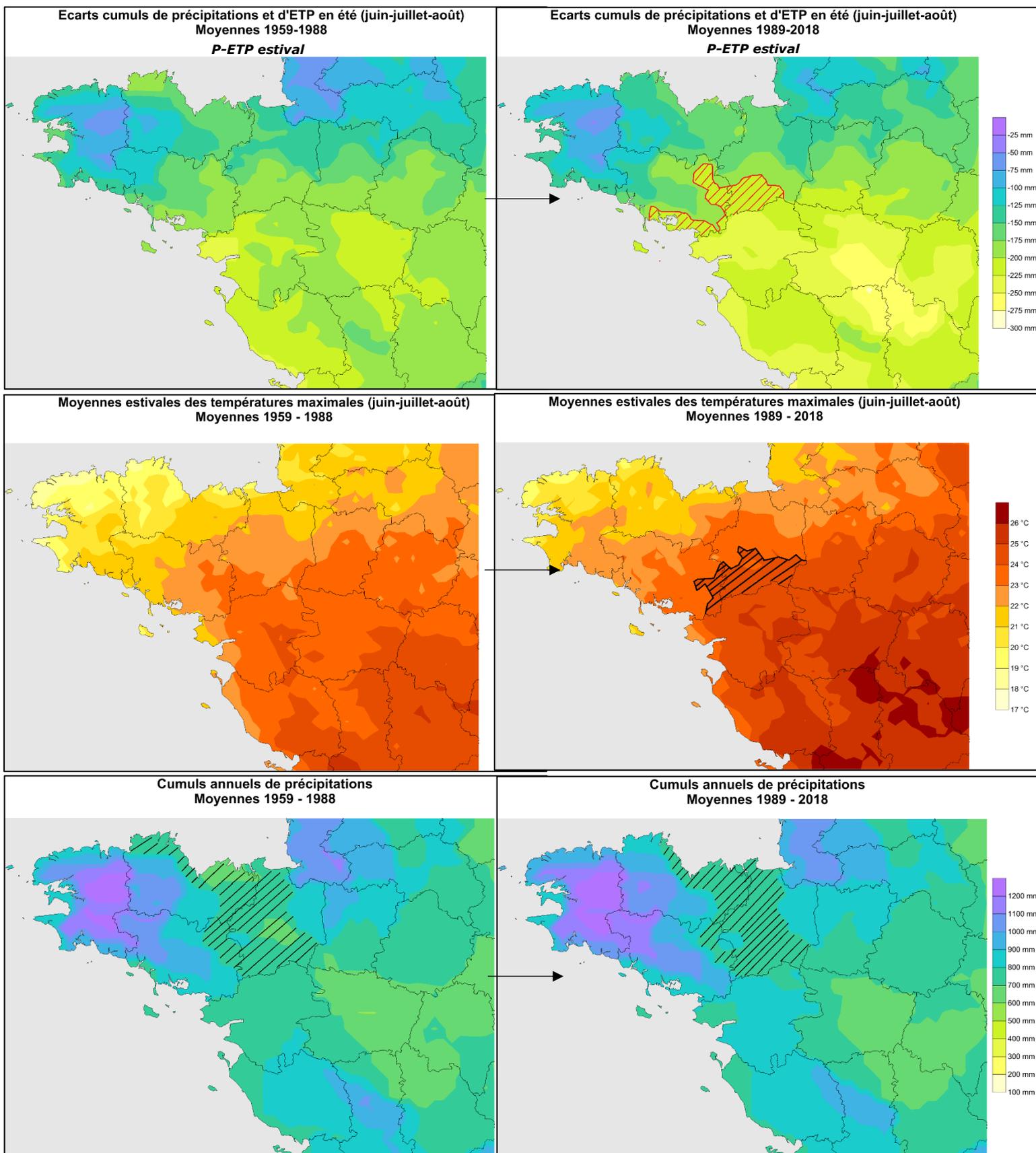


Figure 4 Evolution de certains indicateurs climatiques entre 1959-1988 et 1989-2018 - zones en limite climatique pour le châtaignier selon les différents indicateurs

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

Les constats

Les vagues de chaleur recensées depuis 1947 en Bretagne ont été sensiblement plus nombreuses au cours des 36 dernières années que sur la période antérieure. Les canicules observées en Bretagne du 2 au 17 août 2003 et du 22 juin au 6 juillet 1976 sont de loin les plus sévères survenues sur la région. Jusque-là, la journée la plus chaude depuis 1947 avait été observée en 2003. De nouveaux records sont tombés en Bretagne lors de la vague de chaleur du 23 au 25 juillet 2019, survenant après une première vague inédite du 26 au 29 juin.

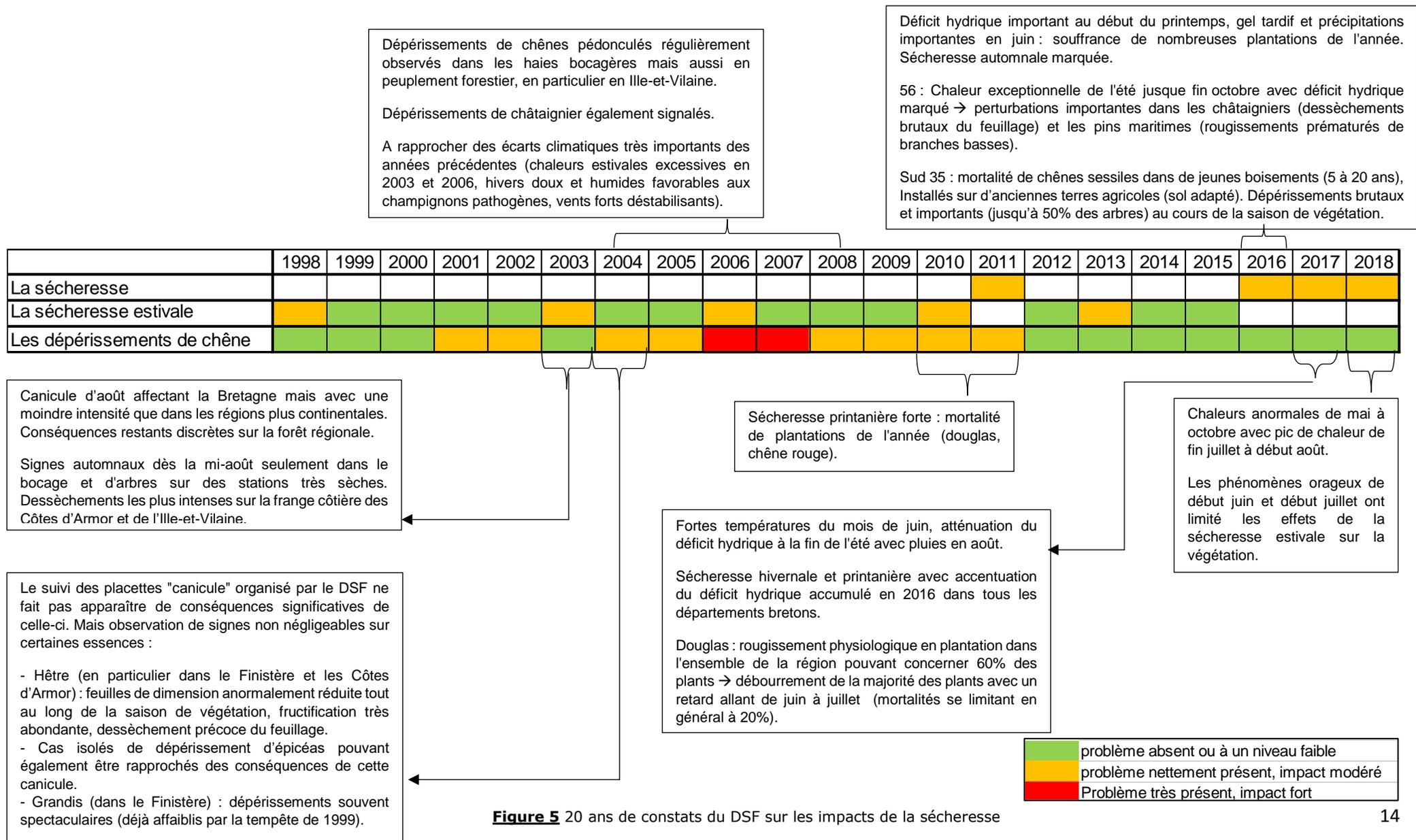
Un léger manque de pluie n'affecte pas les arbres. Tant que le sol n'est pas trop asséché, les arbres vont en effet puiser l'eau dont ils ont besoin en profondeur. **La situation se complique lorsque le manque de précipitations se prolonge et que les réserves en eau du sol ne sont plus remplies qu'à 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	Limitation de l'entrée du CO ₂ dans les feuilles → ralentissement de la photosynthèse → impact négatif sur la croissance en diamètre et hauteur de 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 entraînant 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'individu 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 craquements 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 : 20 ans de constats du DSF en Bretagne



Dépérissements de chênes pédonculés régulièrement observés dans les haies bocagères mais aussi en peuplement forestier, en particulier en Ille-et-Vilaine.

Dépérissements de châtaignier également signalés.

A rapprocher des écarts climatiques très importants des années précédentes (chaleurs estivales excessives en 2003 et 2006, hivers doux et humides favorables aux champignons pathogènes, vents forts déstabilisants).

Déficit hydrique important au début du printemps, gel tardif et précipitations importantes en juin : souffrance de nombreuses plantations de l'année. Sécheresse automnale marquée.

56 : Chaleur exceptionnelle de l'été jusque fin octobre avec déficit hydrique marqué → perturbations importantes dans les châtaigniers (dessèchements brutaux du feuillage) et les pins maritimes (rougissements prématurés de branches basses).

Sud 35 : mortalité de chênes sessiles dans de jeunes boisements (5 à 20 ans), Installés sur d'anciennes terres agricoles (sol adapté). Dépérissements brutaux et importants (jusqu'à 50% des arbres) au cours de la saison de végétation.

Canicule d'août affectant la Bretagne mais avec une moindre intensité que dans les régions plus continentales. Conséquences restants discrètes sur la forêt régionale.

Signes automnaux dès la mi-août seulement dans le bocage et d'arbres sur des stations très sèches. Dessèchements les plus intenses sur la frange côtière des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine.

Sécheresse printanière forte : mortalité de plantations de l'année (douglas, chêne rouge).

Chaleurs anormales de mai à octobre avec pic de chaleur de fin juillet à début août.

Les phénomènes orageux de début juin et début juillet ont limité les effets de la sécheresse estivale sur la végétation.

Fortes températures du mois de juin, atténuation du déficit hydrique à la fin de l'été avec pluies en août.

Sécheresse hivernale et printanière avec accentuation du déficit hydrique accumulé en 2016 dans tous les départements bretons.

Douglas : rougissement physiologique en plantation dans l'ensemble de la région pouvant concerner 60% des plants → débourrement de la majorité des plants avec un retard allant de juin à juillet (mortalités se limitant en général à 20%).

Le suivi des placettes "canicule" organisé par le DSF ne fait pas apparaître de conséquences significatives de celle-ci. Mais observation de signes non négligeables sur certaines essences :

- Hêtre (en particulier dans le Finistère et les Côtes d'Armor) : feuilles de dimension anormalement réduite tout au long de la saison de végétation, fructification très abondante, dessèchement précoce du feuillage.
- Cas isolés de dépérissement d'épicéas pouvant également être rapprochés des conséquences de cette canicule.
- Grandis (dans le Finistère) : dépérissements souvent spectaculaires (déjà affaiblis par la tempête de 1999).

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

La sécheresse peut également induire indirectement 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.

(b) **Fructification abondante** des arbres l'année suivant la sécheresse : cela 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 cambioptères, 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 Bretagne, le cas de dépérissement le plus fréquemment observé depuis plusieurs décennies est celui du chêne pédonculé. Les chênaies pédonculées bretonnes sont particulièrement exposées à des facteurs prédisposants aux dépérissements :

- (1) Vieillesse importante 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 pionnier, 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 bretonnes 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.

Parmi les facteurs aggravants du dépérissement de chêne pédonculé en Bretagne, on observe notamment l'armillaire et les agriles.

Les projections futures

La fréquence et la sévérité des vagues de chaleur en France devraient augmenter au XXI^e 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.

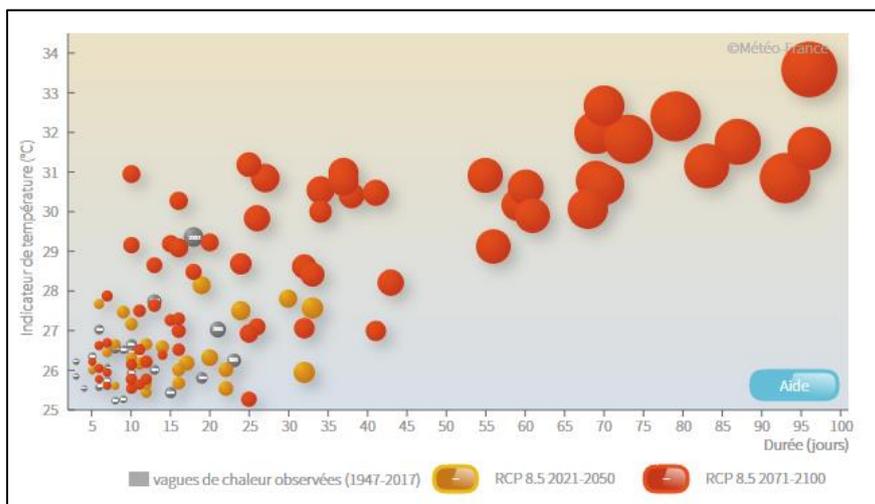


Figure 6 Vagues de chaleur en France : observations et simulations climatiques (scénario d'évolution RCP 8.5)

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 affectés à l'avenir par le stress hydrique.

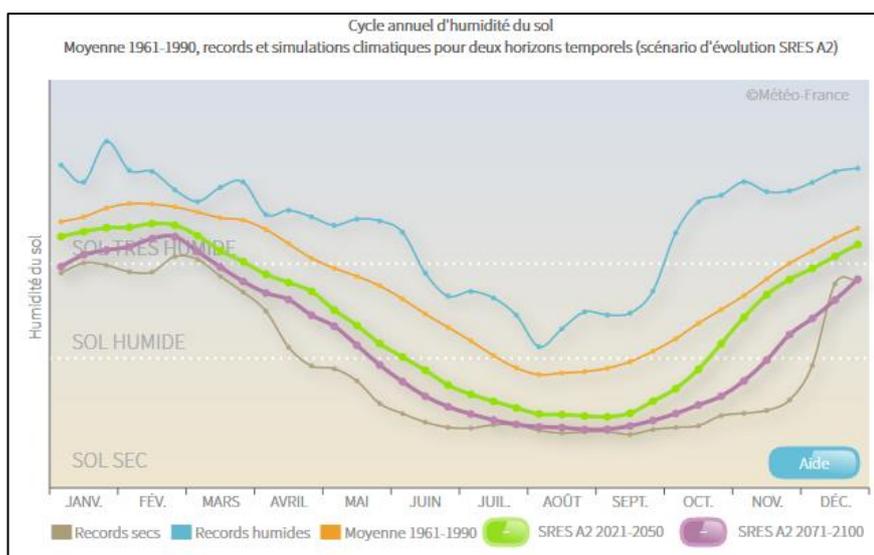


Figure 7 Cycle annuel d'humidité du sol en Bretagne et projections climatiques selon le scénario SRES A2

La comparaison du cycle annuel d'humidité du sol⁶ sur la Bretagne entre la période de référence climatique 1961-1990 et les horizons temporels proches (2021-2050) ou lointains (2071-2100) sur le XXI^e siècle (selon un scénario SRES A2, le plus pessimiste) montre un 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 sol en fin de siècle pourrait 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 de l'année aux dommages liés à la sécheresse du sol.

⁶ 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 selon leur occurrence :

- (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. Les essences particulièrement sensibles dans la région sont le douglas et l'épicéa de sitka.
- (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 1991, 93 signalements du DSF concernant des dégâts dus au gel sont enregistrés en Bretagne. Ceux-ci concernent essentiellement le chêne sessile ou pédonculé (34 signalements), le châtaignier (15) et le hêtre (9).

Le nombre de signalement étant faible au global et dépendant fortement de l'observateur, il est difficile de mettre en évidence une évolution dans l'occurrence de ces signalements. Néanmoins, les années particulières ressortent : 1995, 1997, 1999, 2010 et 2017. Le département 35 est celui où le nombre de dégâts liés au gel recensés est le plus grand (mais faible écart avec les autres départements).

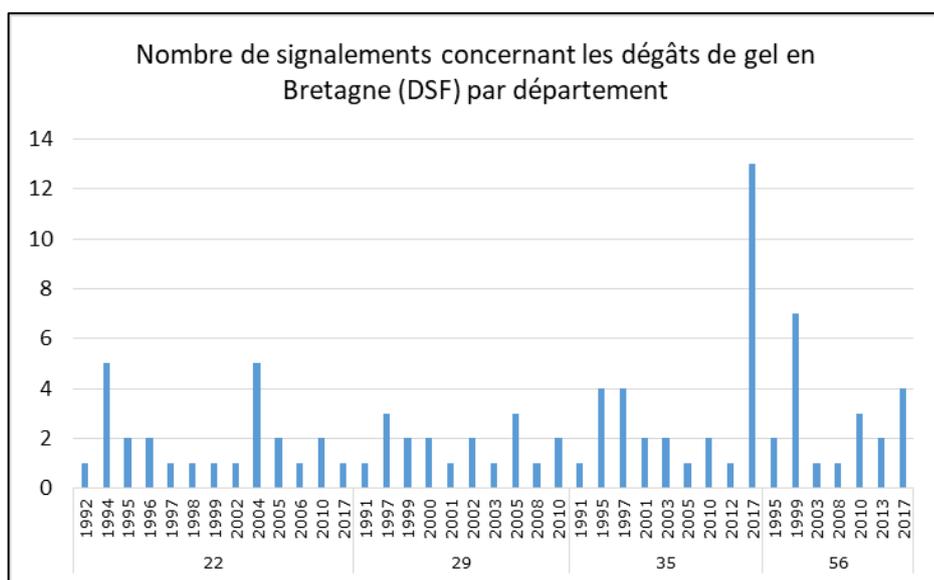


Figure 8 Nombre de signalements concernant les dégâts de gel en Bretagne

Les projections futures

La présente étude climat indique un nombre de jour de gel annuel en moyenne en baisse de -4 à -6 jours en Bretagne 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 11 jours par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario RCP4.5 et de 17 jours selon le RCP8.5. Si l'on regarde les cartes en **Figure 12**, avec ces prédictions on se rend compte que le phénomène de gel deviendra rare en Bretagne.

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.

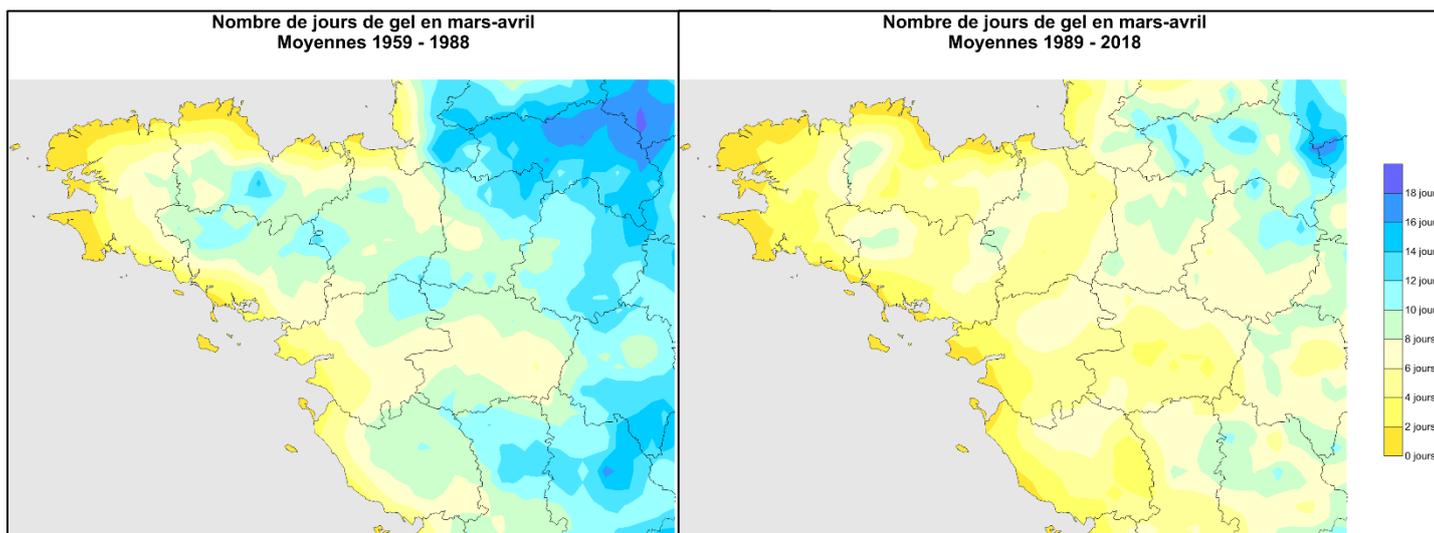


Figure 9 Evolution du nombre de jour de gel annuel moyen pour les deux périodes trentennaires 1959-1988 et 1989-2018

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

Les constats

Le nombre de tempêtes ayant affecté la région Bretagne 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 quant à l'intensité des tempêtes en Bretagne.

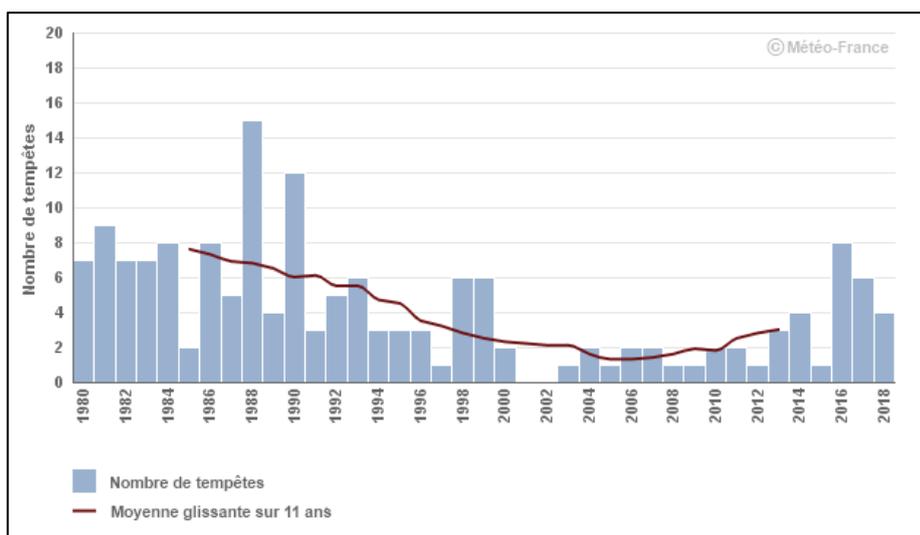


Figure 10 Nombre de tempêtes par an en Bretagne de 1980 à 2018

La Bretagne est la région métropolitaine la moins touchée par les orages (12 journées concernées en moyenne par an à Rennes). Les autres phénomènes extrêmes comme la grêle ou la neige ne sont pas fréquents.

Ces événements climatiques ont des impacts sur la forêt. La **Figure 14** recense notamment les phénomènes marquants de ces 20 dernières années pour la forêt bretonne.

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 XXI^e siècle.

Gelées tardives dans le NO du 56 (châtaignier, chêne rouge, érable sycomore et merisier) lié à un débourrement précoce de la végétation (printemps très doux).

Tempêtes exceptionnelles Lothar et Martin : au total, la région a enregistré 269 000 m³ de chablis. Pour les forêts domaniales, les dégâts sont essentiellement concentrés dans les hêtraies du 35. En forêt privée, ce sont les pineraies qui ont été les plus affectées.

Arrière-saison exceptionnellement longue et douce
→ maintien du feuillage sur les arbres à feuilles caduques très tard dans la saison (jusqu'au 15 décembre).

Tout début avril : **très forte gelée tardive dans l'ouest**
→ beaucoup de jeunes pousses brûlées par le gel, des plantations d'épicéas de Sitka en bas de versant sinistrées à 100%.

Forte chute de grêle dans le 22 → feuillage des feuillus entièrement haché par des grêlons de grosse dimension.

En novembre : **forte chute de neige lourde** → chutes de branches dans le Nord 35.

Gelées tardives (avril-mai) ayant occasionné des dégâts sur les plantations de l'année (destruction du feuillage et mortalité de pousses de l'année, retard de croissance).

Tempête Zeus en mars provoquant de nombreux dégâts du NO au SE de la région.

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gel		■						■					■	■		■			■	■	■
Grêle ou neige							■	■					■				■		■		
Tempête ou vents forts		■															■			■	

Chute de neige exceptionnelle dans le 22 et le 56 en février → nombreuses chutes ou déchirures de branches sur les jeunes peuplements résineux, destructions de cimes sur les peuplements adultes de pins. Dégâts très importants sur certaines régénérations ou plantations récemment dépressées.

Gel de printemps important mi-mai → dégâts conséquents au niveau régional sur les peuplements et les jeunes plantations, surtout dans le 56 et le 22 (destructions de jeunes pousses terminales et de rameaux sur les jeunes plantations et du feuillage sur arbres adultes).

Fin novembre début décembre, chutes de neige localement exceptionnelles → bris de branches autant sur les résineux que sur les feuillus qui avaient gardé tardivement leur feuillage.

Orages de grêle exceptionnels fin juin 2014 dans le 56 et fin décembre 2016 dans le 35 ayant favorisé le développement du sphareopsis du pin dans des peuplements de pin laricio.

En 2014 : **coups de vent à répétition en février** ayant provoqué de nombreux chablis sur sols engorgés (peuplements de sitka, pins et peupliers à enracinement superficiel).

Figure 11 20 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.

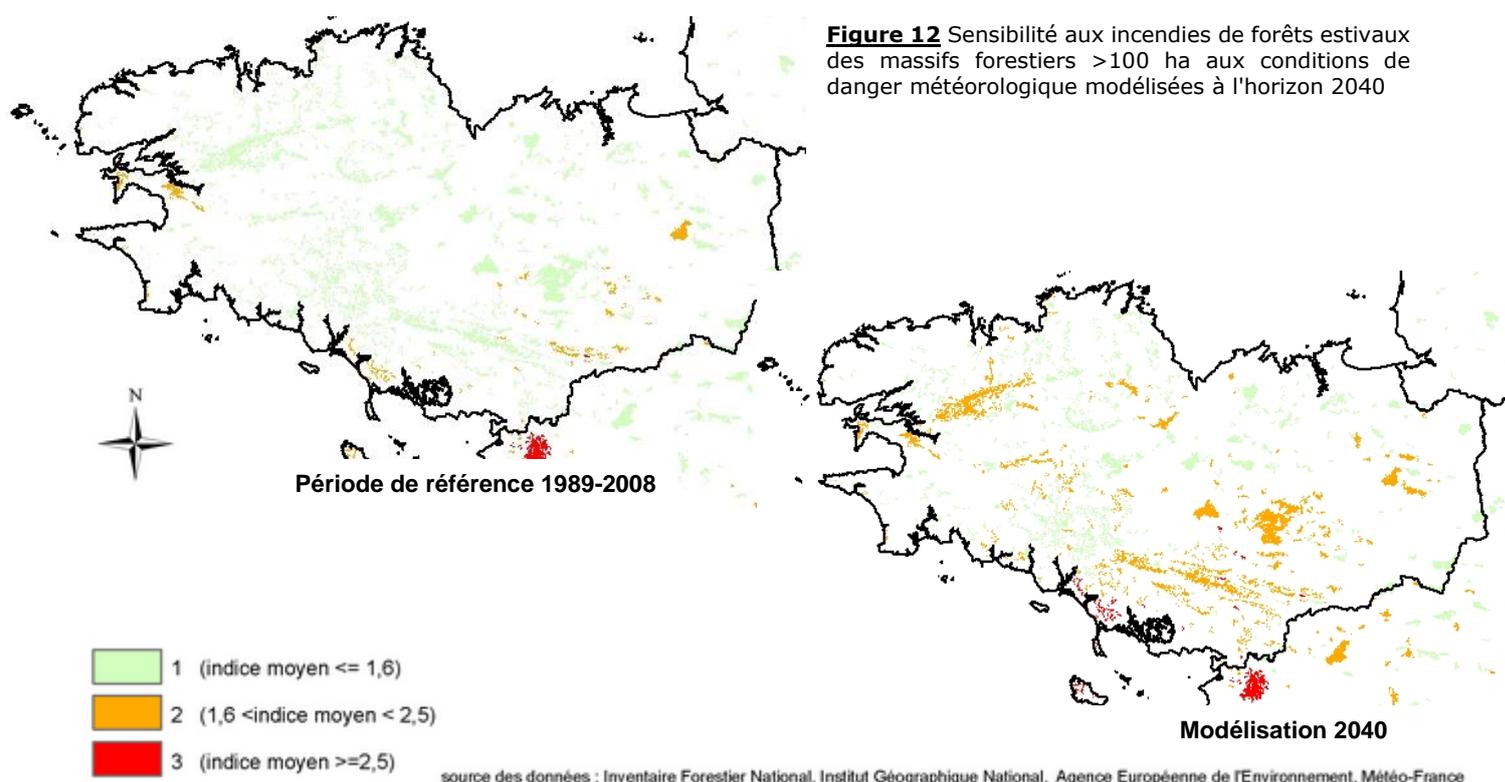
Météo-France a constaté que le risque incendie augmente depuis les années 1960 et devrait encore augmenter au cours du XXI^e siècle. Les zones exposées à ce risque devraient s'étendre vers le Nord-Ouest (Pays-de-la-Loire, Centre-Val-de-Loire et Bretagne).

Le Morbihan et le Sud de l'Ille et Vilaine sont les départements les plus sensibles au risque incendie en Bretagne à cause de leurs températures plus élevées, de la répartition des peuplements forestiers et de leur composition (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 à 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).



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 scénarios 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 elles sont couplées 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 cambioxyphages, 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 ;
 - Sécheresses provoquent affaiblissement des arbres ;
 - 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 pourridés 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 bretonne 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 Bretagne.

Les six problèmes ciblés sont les suivants :

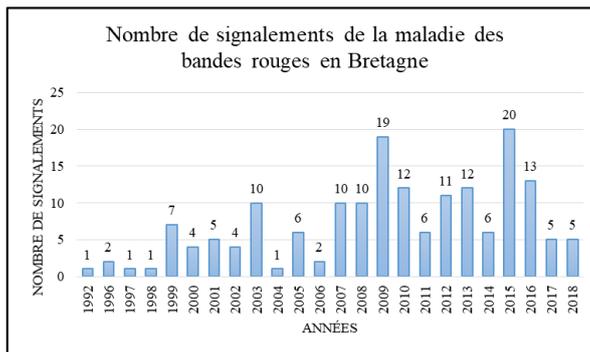
- La maladie des bandes rouges (*Dothistroma septosporum*, *Dothistroma pini*),
- La processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*),
- Le sphaeropsis du pin (*Diplodia pinea*),
- L'oïdium du chêne (*Micropsphaera alphitoïdes*),
- Le bombyx disparate (*Lymantria dispar*),
- La maladie de l'encre (*Phytophthora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

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

La maladie des bandes rouges

Maladie foliaire impactant surtout le pin laricio de Corse. Diffusion favorisée en France depuis les années 60 par le commerce de plants contaminés. 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.

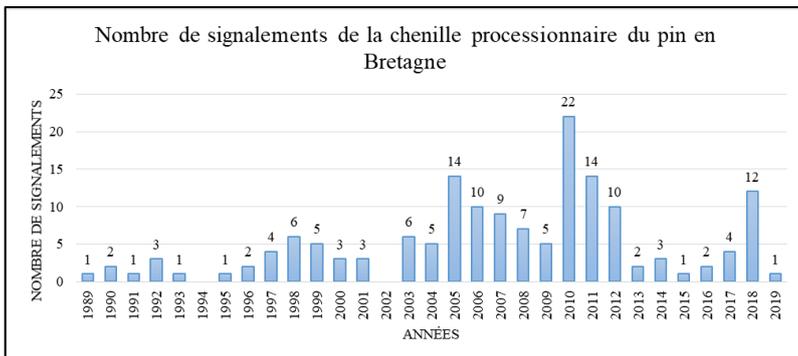
Impact du climat sur le problème : L'humidité est nécessaire au développement du champignon et à la dispersion de ses spores. La durée d'humidité prolongée et la fréquence des précipitations pendant la saison de végétation peuvent entraîner un développement des foyers. Une succession d'années humides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



Evolution en Bretagne : La maladie des bandes rouges est présente aujourd'hui pratiquement dans toutes les plantations de pin laricio et surtout celles installées sur des stations d'origine agricole. Les entretiens avec les correspondants-observateurs ont permis de savoir que seules les zones régulièrement fréquentées et où la sévérité est très importante, donnent suite à une fiche de signalement. La carte des signalements ne fournit donc pas une information complète de la progression spatio-temporelle de la maladie mais plus une information sur l'expression du phénomène plus ou moins importante selon les années. Les correspondants-observateurs supposent que l'augmentation des températures et des étés humides ainsi que les nombreux boisements en monoculture de pin laricio sur terre agricole délaissée, créés avec l'aide du Fonds Forestier National (FFN) et les aides régionales qui sont ensuite venues prendre le relais, ont favorisé le développement de la maladie depuis une vingtaine d'années. Les modèles de changements climatiques annoncés par Météo France ne permettent pas d'être optimiste sur l'avenir du pin laricio à court et moyen terme. Même s'il n'y a pas de gros problème de sévérité dans la zone d'étude (au moins 50% de houppier reste fonctionnel et les rameaux de l'année ne sont pas atteints) la chute de croissance freine le passage en éclaircie. 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

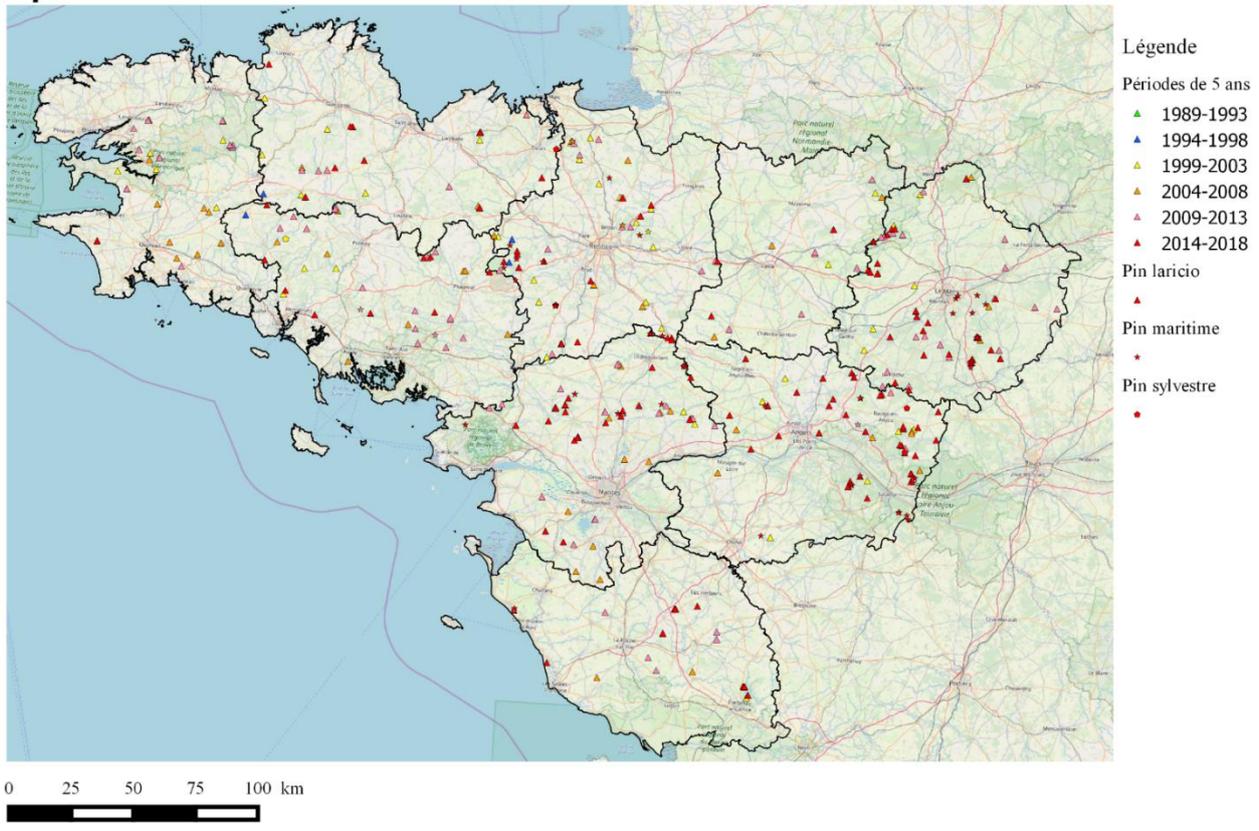
Cette chenille cause des défoliations sur pins laricio et maritime principalement. Cela entraîne une perte de production qui équivaut, au plus à environ une année d'accroissement. Les arbres affaiblis ou susceptibles de subir des défoliations répétées (jeunes plantations) peuvent souffrir plus durablement et devenir moins résistants à des attaques d'ennemis de faiblesse. Les mortalités se produisent à la suite de tels enchaînements mais restent exceptionnels. L'enjeu de la processionnaire reste plutôt en termes d'impact sanitaire sur le public.



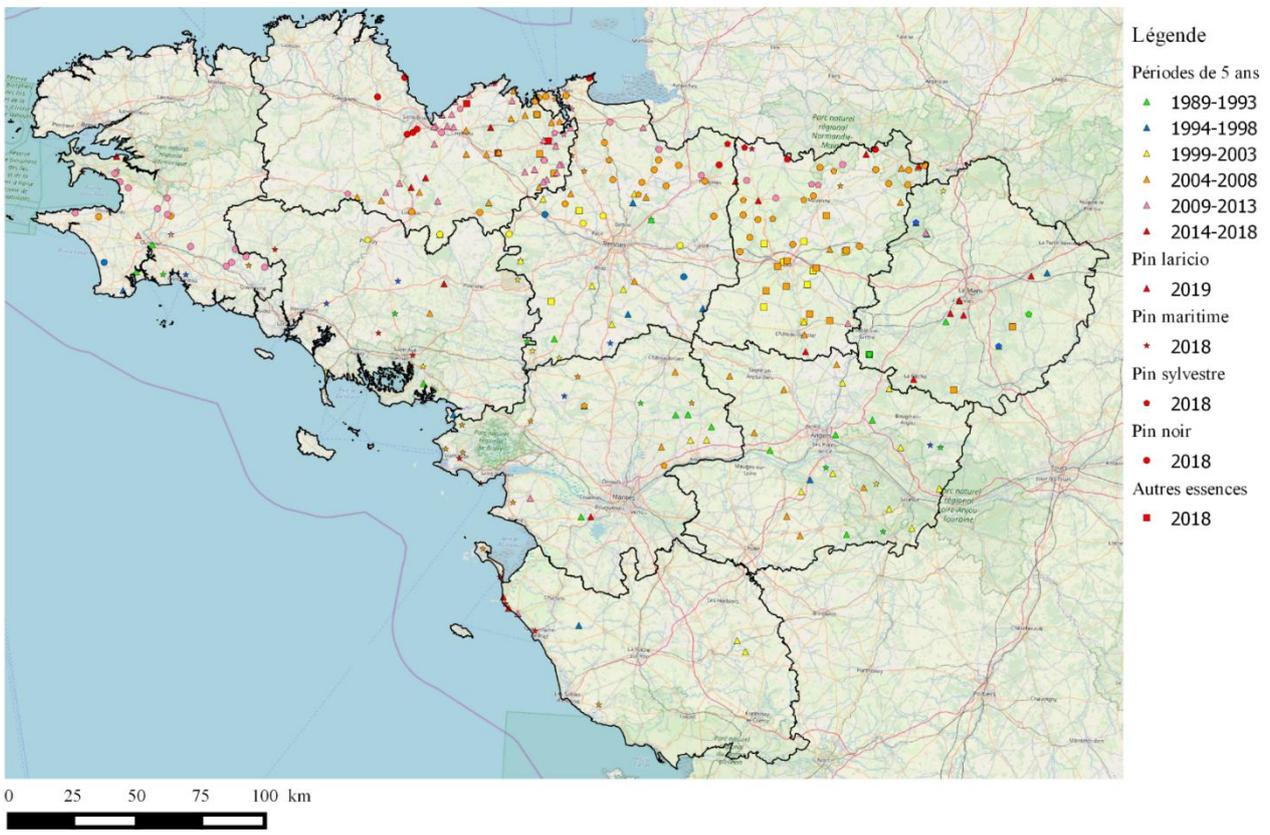
Impact du climat sur le problème : Avec un développement lié aux conditions climatiques chaudes, l'expansion de l'aire de répartition de la processionnaire du pin fait partie des indicateurs du changement climatique retenus par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC). 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 et en altitude dans les massifs montagneux (Gaudry et al, 2018).

Evolution en Bretagne : On constate également que la chenille, apparue en premier dans les Pays de la Loire, a vu son aire s'étendre progressivement en Bretagne. L'automne 2009 a été exceptionnellement chaud (température moyenne supérieure de 1,5°C à la normale), bien ensoleillé et relativement sec. Ces conditions favorables pour la processionnaire du pin ont permis un développement plus rapide et une expansion vers la Bretagne. A ce jour, elle est présente dans tous les départements et continue de s'étendre vers la Normandie. Le nombre de signalements a diminué les années suivant leur pic car les correspondants-observateurs ne relevaient plus les foyers des processionnaires déjà établis. Les récents signalements se concentrent sur le front de colonisation. Cependant, les reliefs bretons ressortent bien de la carte de progression comme limitant la colonisation de la processionnaire (températures hivernales trop froides, plus fortes pluviométries). Le Nord-Ouest du département du Morbihan, l'Ouest des côtes d'Armor et le Nord du Finistère sont trop froids pour la chenille, les côtes plus favorables seront probablement les premières atteintes. 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 cycles de développements peuvent doubler dans l'année et la procession peut débuter en janvier voire novembre. Il est probable que ces anomalies soient dues à l'augmentation des températures depuis 1989. Les tendances futures constatées par Météo France sur l'augmentation des étés chauds et des hivers doux, augmenteraient les conditions favorables de la chenille dans les années futures aux zones jusqu'ici préservées.

Années de signalement du DSF concernant la maladie des bandes rouges depuis 1989 - par périodes de 5 ans

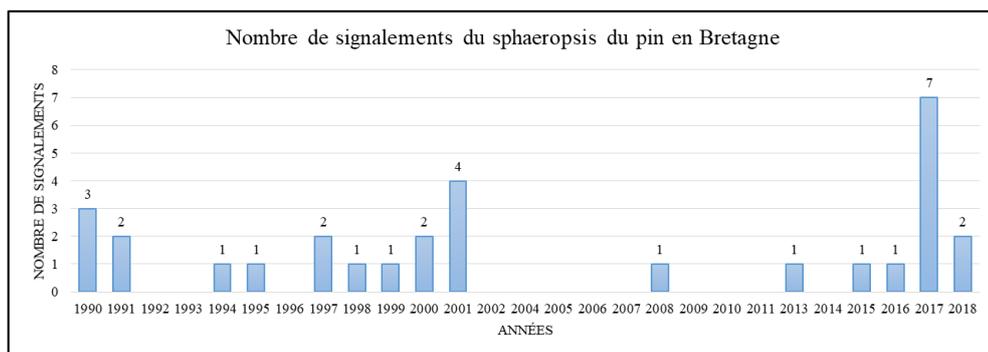


Années de signalement du DSF concernant la chenille processionnaire du pin depuis 1989 - par périodes de 5 ans



Le sphareopsis du pin

Champignon attaquant principalement les pins laricio et sylvestre. En absence de stress, le pathogène peut se maintenir en symbiose dans les branches et les troncs. Si l'équilibre est rompu suite à un stress, le champignon provoque des nécroses sur l'écorce ainsi que le dessèchement des branches ou d'une partie de la cime. Ce pathogène provoque généralement la mort de l'hôte. L'impact de la maladie est moins important sur les jeunes sujets.

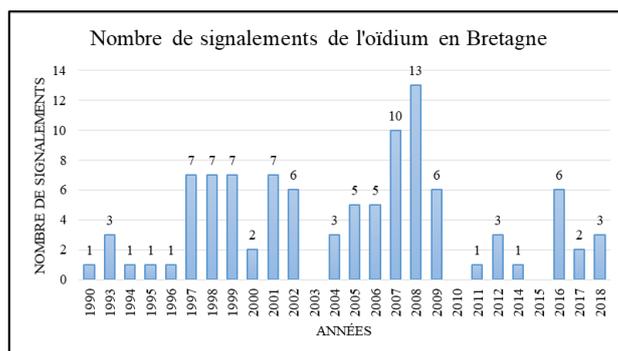


Impact du climat sur le problème : Ce champignon préalablement présent dans les tissus se développe et s'exprime généralement suite à des stress abiotiques : épisodes de stress hydrique prononcé ou orage de grêle. Les températures élevées ont favorisé le développement du pathogène, champignon thermophile. L'optimum de température de germination de ses spores se situe entre 22°C et 32°C (Peterson, 1981).

Evolution en Bretagne : Le sphareopsis est présent dans tous les départements. L'arrivée de l'information au sein du DSF a permis d'y prêter plus attention. C'est certainement un des facteurs expliquant le nombre important de signalements en 2016-2018 sur les graphiques. Des dégâts sont apparus suite à des orages de grêle et des stress hydriques, notamment en 2015, 2016 et 2017 en Bretagne, 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. Dans la zone d'étude, les correspondants-observateurs ont observé une mortalité se concentrant surtout en lisière des peuplements de pins. Si les signalements semblent ponctuels, l'incertitude liée à la bonne identification du pathogène pourrait minimiser l'étendue de son impact. La plus grosse crainte des correspondants-observateurs est l'augmentation d'épisodes de sécheresses qui favoriseraient le sphareopsis des pins. Comme expliqué dans le rapport de Météo France, les températures continueront de croître et le sphareopsis pourrait bénéficier de périodes de stress hydrique plus importantes et plus longues. Son impact devrait continuer à augmenter dans les années futures.

L'oïdium des chênes

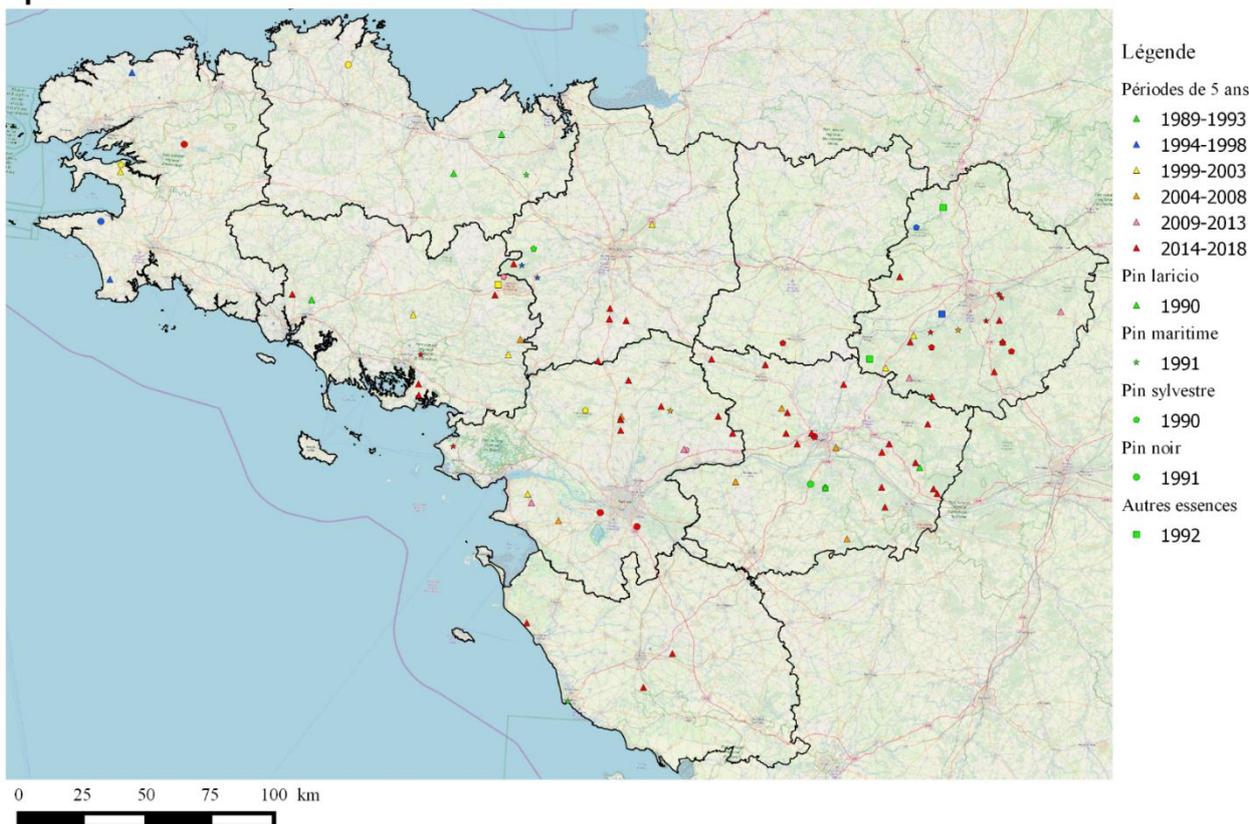
Ce champignon est un parasite des feuilles de chênes. Le chêne pédonculé est plus sensible que le chêne sessile à ses attaques. L'oïdium provoque le dessèchement et le brunissement des feuilles atteintes puis leur chute prématurée. On constate une légère baisse de croissance mais pas de mortalité chez les arbres adultes. Cependant, il peut être particulièrement virulent sur les jeunes plantations et les régénérations naturelles en affaiblissant les plants et parfois en créant des mortalités.



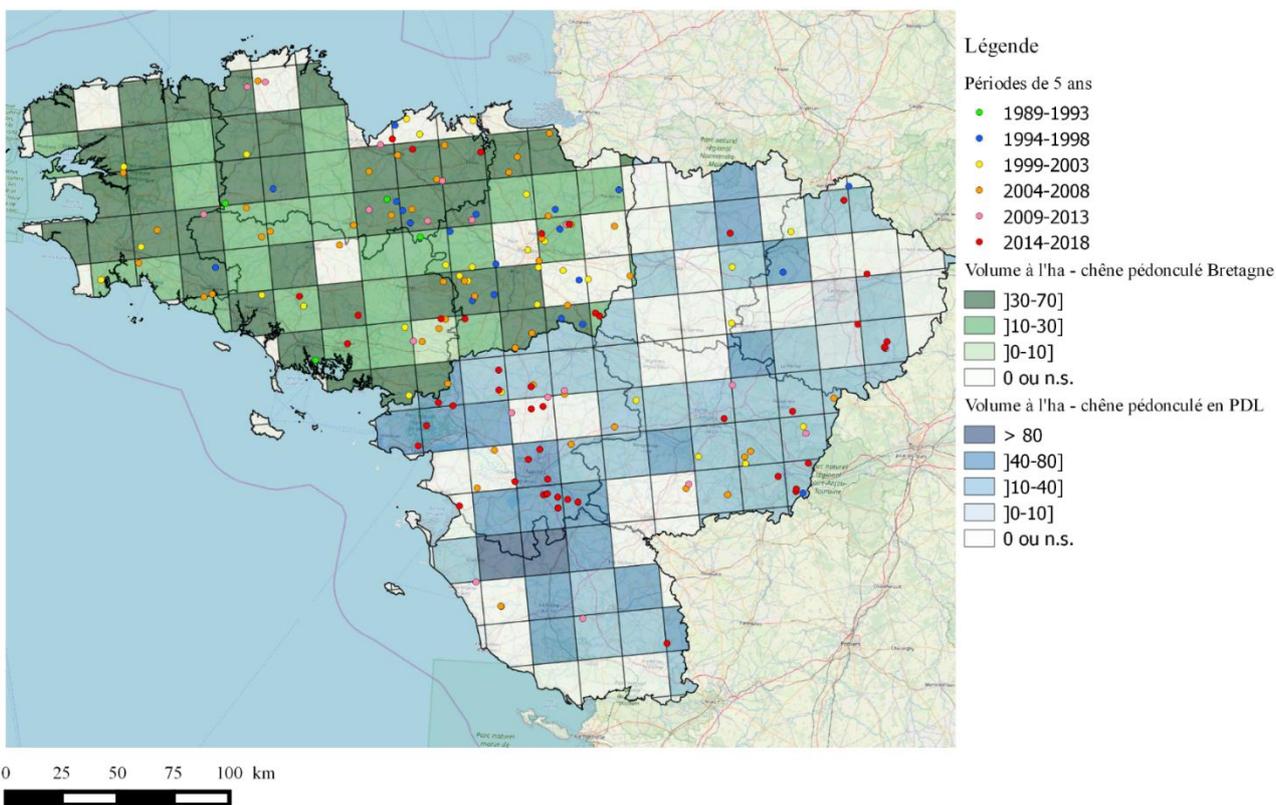
Impact du climat sur le problème : Les stations ensoleillées sont plus fréquemment soumises à la pression du champignon notamment dans les jeunes plantations en période estivale sèche accentuée par des pluies d'orage. Les gelées tardives favorisent également l'action de l'oïdium. Il a été mis en évidence que les pics d'oïdium 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) sur plusieurs années consécutives, provoque une hausse de la sévérité sur les arbres.

Evolution en Bretagne : Les échanges avec les correspondants-observateurs ont permis de préciser que le problème est bien présent globalement dans la région et que généralement ils ne le signalent pas lorsque moins de 10% de la feuille est atteinte. De plus, ils sont très attentifs sur les plantations et priorisent leur signalement car l'enjeu est plus important : le pathogène peut provoquer une mortalité s'il est cumulé à un autre facteur comme le gel. Les plants peuvent présenter environ 30% d'oïdium sur leurs feuilles et leur croissance peut diminuer. Météo France a mis en évidence une hausse des températures hivernales et estivales. Le regard sur les soixante dernières années et les projections futures du climat ne montrent pas de tendance à l'évolution de la pluviométrie. Cette dernière a fluctué depuis 1959 et on peut juste constater une légère augmentation de la pluviométrie moyenne entre les périodes trentenaires 1959-1988 et 1989-2018 pour certains territoires. Si celle-ci venait à augmenter parallèlement à la hausse des températures, cela pourrait favoriser le champignon. Cependant, de fortes sécheresses, sans être couplées à des phases plus humides, auraient un effet inverse.

Années de signalement du DSF concernant le Sphaeropsis du pin depuis 1989 - par périodes de 5 ans

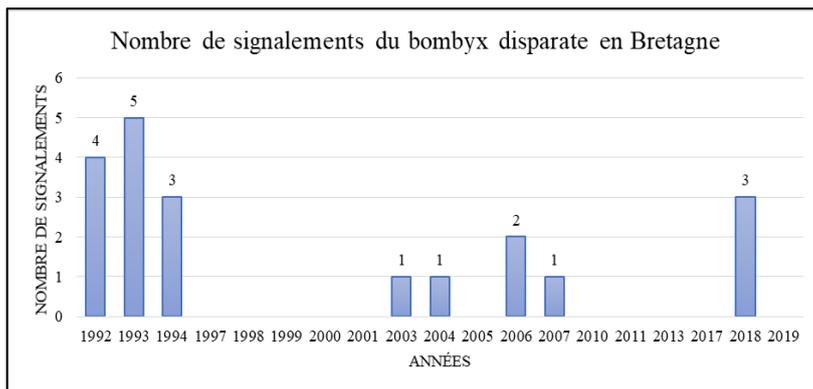


Années de signalement du DSF concernant l'oïdium depuis 1989 - par périodes de 5 ans



Le bombyx disparate

Ces chenilles ont une préférence pour les feuilles de chênes dans des peuplements ouverts et en lisière. Cependant en cas de grosse pullulation, les autres arbres peuvent être consommés. Ils peuvent être totalement défoliés au cours du printemps. Les chenilles affaiblissent les arbres et provoquent un retard de croissance ainsi que la diminution des glandées sans provoquer de mortalité. La refeuilaison est possible sur des tiges suffisamment vigoureuses. Les arbres affaiblis augmentent le risque de colonisation par d'autres ravageurs et pathogènes.

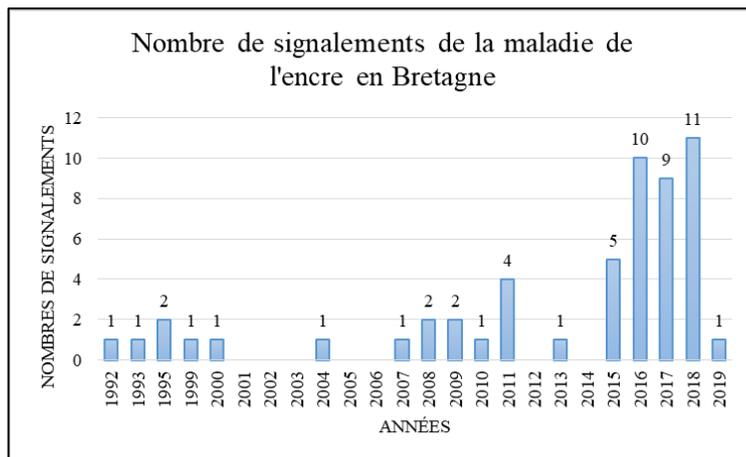


Impact du climat sur le problème : Les attaques de grande ampleur ont commencé dans le Sud puis sont remontées vers le Nord de la France mais il ne s'agit pas d'une règle systématique car les dernières grosses attaques n'ont pas connu de développements septentrionaux. Cependant, le bombyx est un insecte plutôt thermophile qui préfère les climats chauds. Il a tendance à apparaître massivement suite à de fortes sécheresses.

Evolution en Bretagne : Le nombre de chenilles a fortement augmenté les années suivant les sécheresses de 1989 à 1991. Les correspondants-observateurs ont observé une phase de pullulation dans la zone d'étude en 1992, potentiellement à cause des sécheresses, puis une diminution de l'insecte à partir de l'année 1995 dû à la réduction des mois secs. Suite aux étés particulièrement secs de 2015 à 2018 un scénario semblable est à craindre. Tout comme l'indique la carte, le bombyx est très peu présent en Bretagne contrairement aux Pays de la Loire. Il est possible que cette région dispose d'un climat pour l'instant trop froid pour la chenille. D'après Météo France, les étés secs et chauds seront en augmentation dans les années futures. Si la chenille peut réapparaître après de fortes sécheresses, le climat à venir pourrait s'avérer favorable à son évolution en Bretagne.

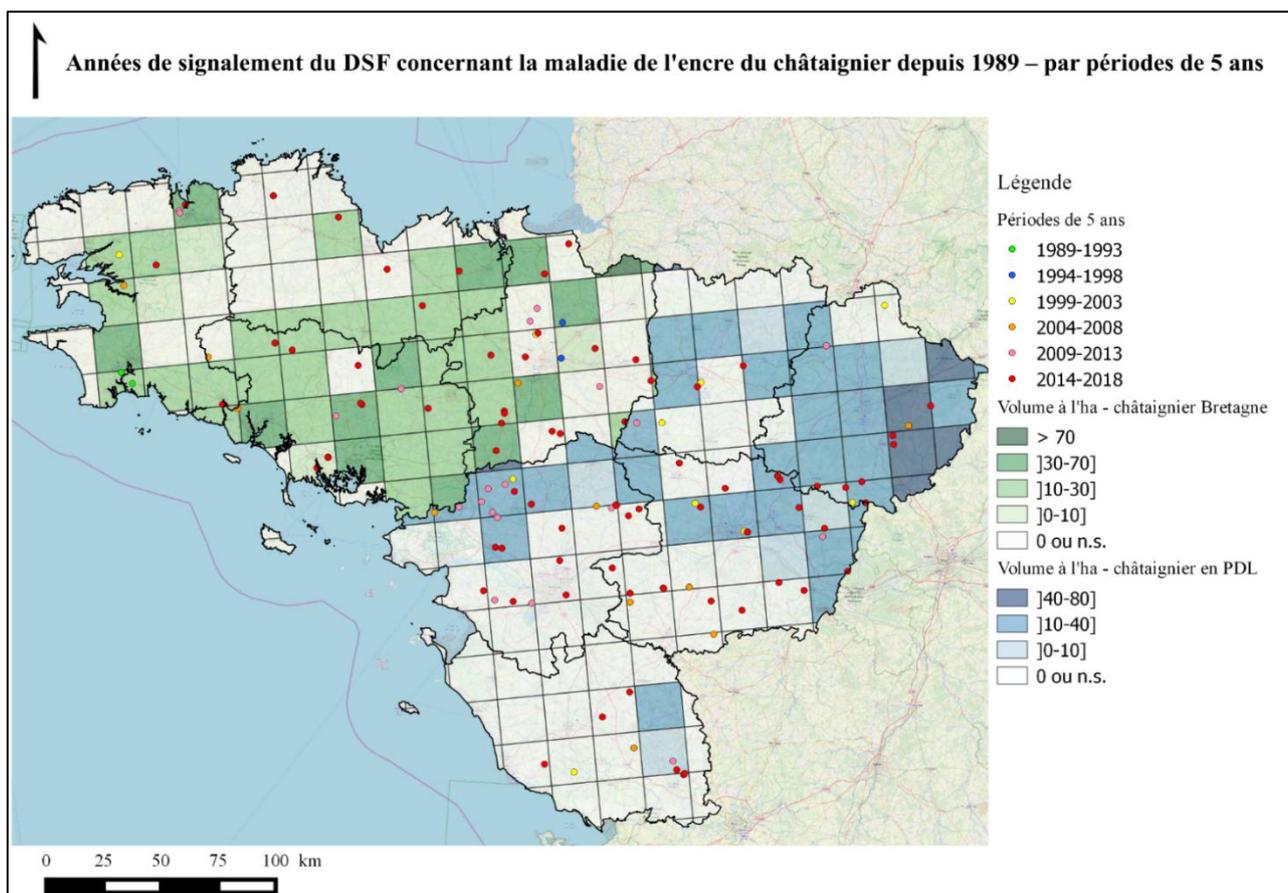
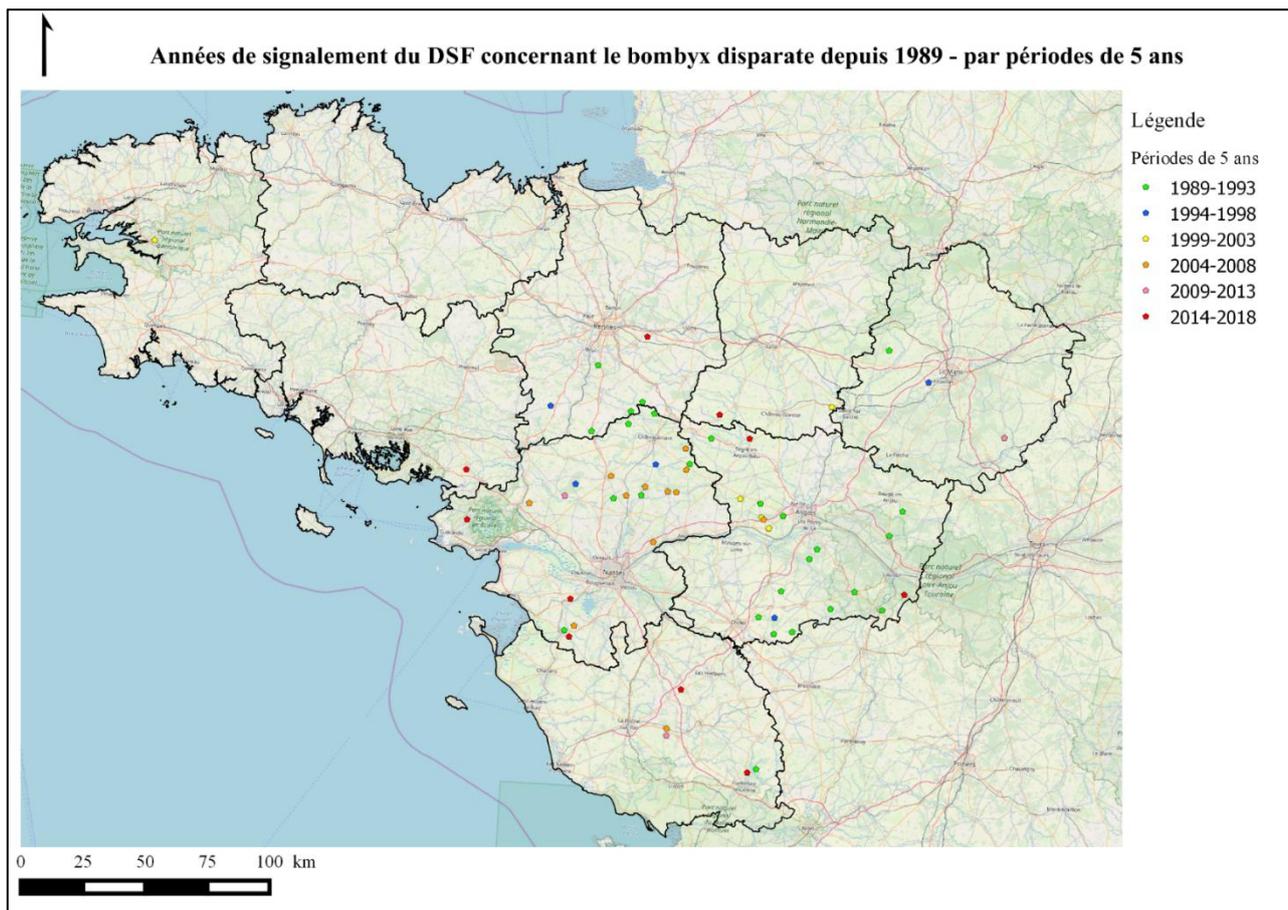
La maladie de l'encre

L'encre du châtaignier est causée par un complexe de deux agents pathogènes fongiques du genre *Phytophthora* (*P. cambivora* et *P. cinamomi*). Leur dispersion à longue distance se fait par le transport de sol ou de plants contaminés. L'encre détruit tout ou une partie du système racinaire de l'arbre en commençant par les plus jeunes racines. Lorsque le pathogène atteint le collet de l'arbre, ce dernier n'est plus en capacité de puiser suffisamment d'eau dans le sol pour subvenir à ses besoins. Tout stress hydrique génère un affaiblissement se traduisant par une réduction de la taille des feuilles, une fructification abondante et des dessèchements de branches pouvant aboutir à la mort de l'arbre. La maladie est favorisée par le tassement des sols limitant la circulation verticale de l'eau.



Impact du climat sur le problème : L'encre du châtaignier est favorisée par des températures chaudes et une pluviométrie abondante. Des hivers doux et des printemps pluvieux favorisent ainsi fortement la propagation du pathogène. De plus, les étés secs achèvent les arbres au système racinaire préalablement très nécrosé par la maladie.

Evolution en Bretagne : Les premiers signalements de l'encre sont apparus en 1992 en Bretagne. 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 également fait fortement progresser la maladie dans les régions soumises au climat océanique. Aujourd'hui, la maladie de l'encre est présente dans tous les départements et continue d'évoluer. On observe un pic de signalement en 2016-2018 sur les histogrammes, 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 réguler comme à l'habitude le pathogène et les printemps humides ont largement favorisé la multiplication et le déplacement du pathogène dans le sol. Enfin, les étés secs ont provoqué une forte mortalité sur les arbres atteints. Les correspondants-observateurs ont révélé que le châtaignier est devenu la première essence à problèmes dans la région. La maladie de l'encre reste très virulente même sur des stations favorables au châtaignier et on retrouve des dépérissements dans quelques peuplements classés. Cependant elle est moins sévère dans les peuplements en pente grâce au drainage naturel. *Phytophthora cinnamomi* est présent également sur le chêne rouge mais il y a eu peu de signalements car les correspondants-observateurs ne le connaissaient pas encore sur cette essence. Les tendances vers plus d'hivers doux et périodes estivales chaudes prévues par Météo France peuvent accroître la sévérité de l'encre et remettre en question l'avenir du châtaignier.



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

D'autres pathogènes ou ravageurs ayant pour l'instant peu d'impact en Bretagne pourraient voir leurs conditions de développement évoluer dans la région ou leur impact devenir plus important :

(1) En ce qui concerne les ravageurs

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 prédisposer à l'attaque de pathogènes ou ravageurs secondaires.

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

Le bupreste du chêne, présent en Pays de la Loire mais peu signalé en Bretagne (2 signalements depuis 1989) 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).

Les conditions climatiques de ces dernières années ont contribué à favoriser le développement rapide du typographe dans une futaie d'épicéa commun au Nord de Rennes en 2018.

(2) En ce qui concerne les pathogènes

La collybie pied en fuseau est un champignon dont les impacts ont été récemment observés en Ille et Vilaine dans des peuplements de chêne rouge d'Amérique et de châtaignier. Ce champignon s'observe au pied des arbres au niveau du collet et est présent sur l'ensemble du territoire. C'est un pathogène primaire qui attaque le système racinaire et peut provoquer la mort d'individus suite à un stress, comme un épisode de sécheresse par exemple. Il convient d'être particulièrement vigilant sur l'adaptation des essences à la station et d'éviter l'utilisation du châtaignier et des chênes rouges sur les stations filtrantes à faible réserve utile en eau.

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.

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 sylvoécotones l'adaptation potentielle des essences en un endroit donné selon les données climatiques modélisées.

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 Bretagne. Deux arboreta (à Pléven et à Priziac) 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'Écosse pour connaître de manière anticipée la réaction des peuplements et des essences au changement climatique.

⁸ Projet Aforce (ONF et CNPF) : production de fiches essences détaillées selon 36 critères pour avoir des références sur un grand nombre d'essences « candidates » 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 Sylvoécotones.

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.

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

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 Saint Sulpice la Forêt (35) :

- Objectif : test de 3 modalités de sylvicultures en forêt mélangée dans le contexte du changement climatique (favoriser le pin ; enrichissement en cèdre, chêne, alisier torminal ; futaie irrégulière de sapin pectiné).

A la Corbière (35)

- Développement d'une nouvelle sylviculture pour atténuer les impacts du changement climatique et maintenir la production de bois de qualité ;
- Peuplement de chêne 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 détourné avec ceux non détournés ;
- 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).

En Bretagne, un référentiel forestier régional (RFR) existe depuis 2001 et consiste au suivi d'environ 150 placettes d'expérimentation forestière selon différentes thématiques. La thématique « changement climatique » doit être développée pour suivre l'adaptation de nouvelles essences/provenances régionalement, l'effet de certaines sylvicultures adaptatives... Cela est nécessaire pour avoir des éléments techniques à vulgariser auprès des propriétaires forestiers et pouvoir les inciter à adapter leurs forêts et/ou méthodes face au changement climatique. Plusieurs essais de cèdre de l'atlas ont été installés lors des dernières années. Un essai d'installation de chêne pubescent dans le Morbihan a été introduit dans le RFF en 2019, un prochain va être installé en Ille et Vilaine.

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.

Bibliographie

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 ? 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 ».

Bouvier, Blanchin, Colombet (2012). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques.

Conseil (2019), Caractérisation et évolution du climat en Pays de la Loire.

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 XXI^e 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

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-la-foret/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>

Département de la Santé des Forêts (2015), Ephytia, 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>