

Anne-Sophie Sergent (IDF), Denis Loustau (INRA), Dominique Merzeau (IDF)
et Pierre Alazard (FCBA)

Pin maritime dans les Landes

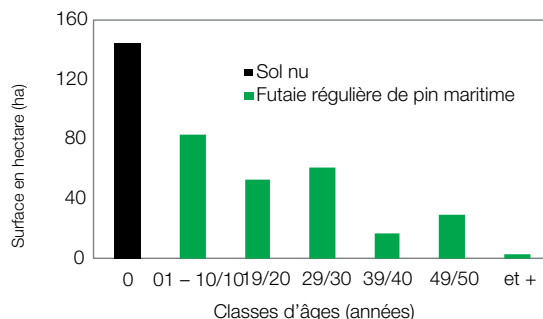
Le cas étudié est une forêt de production composée de futaie régulière de pin maritime. Elle est située au sud de Bordeaux dans la sylvoécocorégion des « Landes de Gascogne ».

1. Diagnostic de l'unité de gestion forestière et de son environnement proche

■ Caractéristiques de l'unité de gestion forestière

Le cas étudié couvre une surface de 390 ha sur laquelle est présent un seul type de peuplement (futaie régulière de pin maritime) à différents stades de développement. Les différentes classes d'âge (figure 1) peuvent être regroupées en trois catégories en fonction des reboisements faisant suite aux tempêtes de 1999 et de 2009.

Figure 1 : Répartition des surfaces par classes d'âge du cas d'étude



Source : Société forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations.

Peuplements en cours de reconstitution (après la tempête de 2009)

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Surface	144 ha	37 % de la surface. Sols nus en cours de reconstitution
Origine des peuplements	Plantation	Plantation à venir
Age des peuplements	0	
Historique de gestion	Anciens peuplements sinistrés par la tempête Klaus et exploités en 2010	
Itinéraire sylvicole envisagé jusqu'à l'exploitation	Vocation bois d'œuvre. Révolution de 35 ans avec deux éclaircies	

Peuplements jeunes (reconstitués à la suite de la tempête de 1999)

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Surface	98 ha	25 % de la surface
Origine des peuplements	Plantation	
Age des peuplements	De 3 à 11 ans	
Historique de gestion	Plantation	
Itinéraire sylvicole envisagé jusqu'à l'exploitation	Vocation bois d'œuvre Révolution de 35 ans avec deux éclaircies Première éclaircie entre 12 et 14 ans	

Peuplements adultes plus ou moins touchés par les tempêtes

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Surface	148 ha	38 % de la surface
Origine des peuplements	Semis	
Age des peuplements	De 11 à 60 ans	
Historique de gestion	Plantations et semis en bandes	
Itinéraire sylvicole envisagé jusqu'à l'exploitation	Récoltes progressives en bois d'œuvre Révolution moyenne comprise entre 35 et 45 ans avec 2 à 3 éclaircies	

Atouts	Révolution courte par rapport à la majorité des autres essences forestières en France Une gestion dynamique et réactive possible
Contraintes	Peu de marges de manœuvre dans l'adaptation des peuplements en place Les choix sylvicoles effectués pour les reconstitutions post-tempêtes conditionnent les stratégies d'adaptation jusqu'en 2050

Source : Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations.

Les deux tempêtes ont fortement modifié la distribution des classes d'âge dans ce massif. En majorité, les peuplements sont, soit très jeunes, soit en cours de reconstitution. Les choix effectués lors des reconstitutions post-tempête conditionneront les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre au cours des 35 prochaines années pour une grande partie de ce massif (62 % de la surface). À l'inverse, 38 % des peuplements seront renouvelés d'ici 2050. Le couplage fort avec la filière en aval peut être, soit un frein, soit un moteur dans les stratégies à mettre en place.

■ Productions et résultats économiques

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Productivité	10 à 14 m ³ /ha/an	Ces indicateurs correspondent à une durée de rotation comprise entre 35 et 45 ans, en fonction de la fertilité de la station avec deux ou trois éclaircies
Prix moyen récolte finale	30 à 35 €/m ³	L'objectif final, en matière de volume sur pied est de 0,9 à 1,2 m ³ /arbre
Bénéfice actualisé en séquence infinie	1976 à 3345 €/ha	Le taux d'actualisation est fixé à 3%
Taux interne de rentabilité	4,27 à 6,88 %	
Atouts	Pas de risque de manque de débouchés Système industriel qui a fait ses preuves La sylviculture du pin maritime est bien maîtrisée	
Faiblesses	Rentabilité qui repose sur la capacité de production d'une seule essence Elle dépend donc du maintien de sa productivité, de son bon état sanitaire et de l'absence d'aléas majeurs	

Source : CRPF Aquitaine et Société forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations (données 2012).

■ Contexte local

Contexte forestier

Le pin maritime, essence principale du massif landais

Cette région forestière est boisée à 74,3 %, ce taux est très largement supérieur à la moyenne nationale (29,4 %) ¹. 96 % des forêts appartiennent à des propriétaires privés. La principale vocation de ces forêts cultivées est la production. Sur les 868 000 ha de cette région forestière, 863 000 ha sont des forêts de production, dont 78 % (676 000 ha) sont des futaies de pin maritime ². La récolte de bois ronds et la production de sciage en pin maritime dans les Landes de Gascogne représentent respectivement 90 % et 76 % de la production nationale pour cette essence ³. La filière bois en Aquitaine est caractérisée par la présence d'industries de première et de deuxième transformation sur le territoire landais, qui représentent près de 32 000 emplois ⁴.

Une ressource ayant subi des dégâts de tempêtes importants au cours des dernières années

En moins de dix ans, le massif landais a été touché par deux tempêtes « centennales », la tempête Martin de décembre 1999 et la tempête Klaus de janvier 2009. Les dégâts de ces deux tempêtes ont été importants. En 1999, les dégâts se sont élevés à 23,7 millions de m³. En 2009, les dégâts ont été supérieurs avec 36,7 millions de m³ affectés sur 593 000 hectares. Ces deux tempêtes ont entraîné une diminution de 46 % du volume sur pied en près de dix ans ⁵. Sur le plan structurel, les pins maritimes de 20 à 40 ans, qui représentent le potentiel du massif à moyen terme, ont été les plus sinistrés. Les dégâts de la tempête Klaus correspondent à environ six ans de récolte régionale ⁶.

Un risque d'émergence de nouveaux problèmes biotiques : l'exemple du nématode

Le nématode du pin est une espèce exotique invasive qui a causé des mortalités importantes dans les zones où il a été introduit (Asie, Portugal et Espagne). Absent actuellement en France mais présent en Espagne, le risque d'infestation en Aquitaine à l'horizon 2030 est proche de 100 %. Bien que l'expression des dégâts soit liée à des contraintes climatiques (température en juillet $\geq 20^\circ\text{C}$), le réchauffement climatique aura cependant des effets négligeables sur le risque d'infestation en comparaison des risques de dispersion provoquée par les hommes et par les capacités d'envol du vecteur (coléoptères longicornes) (Lieutier *et al.*, 2009 ; Piou et Jactel, 2010).

Éléments paysagers et ressource en eau

Cette étude de cas se situe dans le Parc naturel régional des Landes de Gascogne. Ce parc a été créé autour du bassin versant de la Leyre. Il regroupe des lagunes et des cours d'eau d'une grande qualité écologique. Le pin maritime joue un rôle régulateur et protecteur à l'échelle de ce bassin versant. Les forêts diminuent le ruissellement de surface, régulent les phénomènes de crues et permettent d'obtenir une qualité d'eau plus satisfaisante que par les occupations agricoles ou urbaines. Les coupes rases ont un impact sur la ressource en eau (augmentation de l'infiltration, augmentation de l'exportation en éléments minéraux). En conditions normales, les impacts des coupes rases à l'échelle du massif restent faibles. Cependant, ils peuvent être notables localement lorsque les surfaces concernées sont importantes (à la suite des tempêtes, par exemple) (Vernier et Castro, 2010).

■ Caractéristiques stationnelles, pédologiques et climatiques du cas d'étude

Caractéristiques stationnelles

Les peuplements sont situés sur des parcelles présentant peu de pente et drainées en cas de besoin. Trois types de stations représentatives des Landes de Gascogne sont rencontrés :

- les landes sèches à callune et bruyère. Ce sont les terrains les plus pauvres ;
- les landes mésophiles à fougère. Ce sont généralement les meilleurs terrains pour le pin maritime ;
- les landes humides à molinie et bourdaine qui peuvent devenir très productives lorsqu'elles sont suffisamment drainées.

Sols

Les sols landais sont de type podzosols. Ils sont sableux avec une proportion importante de sables grossiers. Ils sont acides (pH moyen = 4,3 en surface et 5,1 en profondeur) et peu saturés en cations. La fertilité minérale est très faible, ces sols sont composés quasi exclusivement de quartz qui ne contient aucun nutriment et ne présente aucune réactivité de surface. La fertilité est donc principalement liée à la fraction organique du sol. La principale contrainte à l'enracinement est la présence de l'alias, grès tendre, où les grains de sables sont cimentés par les acides humiques et des oxydes de fer et d'aluminium. L'alias joue un rôle essentiel dans le fonctionnement hydrique du sol. Sa profondeur d'apparition est liée à la présence d'une nappe phréatique superficielle. Cette nappe phréatique conditionne fortement l'alimentation en eau des peuplements lorsqu'elle est située entre 40 et 120 cm de profondeur (IFN et Vernier et Castro, 2010).

1. Sources : IFN et INRA.

2. Sources : IFN et INRA.

3. Source : enquête annuelle de branche du ministère en charge de l'agriculture de 2005.

4. Source : DRAAF Aquitaine.

5. Sources : IFN et INRA.

6. Source : FIBA, syndicat interprofessionnel des exploitants forestiers et industriels du bois d'Aquitaine.

Caractéristiques des sols des Landes

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Texture	Sableuse	Forte proportion de sable grossier
Fertilité minérale	Faible	Principalement liée à la fraction organique du sol
Contrainte à l'enracinement	Alios	Épaisseur irrégulière, compacité variable
Profondeur	Variables à l'échelle du peuplement	50 cm en moyenne et entre 30 et 100 cm
Réserve utile	60 à 110 mm	~ 100 mm / m de sol

Source : IFN et Vernier et Castro (2010).

Climat moyen période 1971-2000 – Station de Pissos - Landes (40)

Le climat des Landes de Gascogne est de type océanique, marqué par des hivers doux et des températures estivales plutôt chaudes. La pluviométrie est assez élevée et bien répartie dans l'année grâce à des précipitations orageuses fréquentes en été⁷.

Climat moyen période 1971-2000 – Station de Pissos dans les Landes

Indicateurs	Valeurs	Remarques
Pluviométrie annuelle	1065 mm	Pluviométrie relativement élevée, bien répartie dans l'année
Pluviométrie estivale (juin juillet août)	208 mm	Déficit pluviométrique estival peu marqué
Température moyenne annuelle	12,8°C	Température moyenne assez élevée
Nombre de jours de gel	57 jours	Principalement de novembre à avril, certaines années des gelées sont observées en mai et en septembre
Bilan hydrique climatique P-ET0	+ 321 mm	Bilan hydrique climatique positif

Source : Météo-France.

2. Effets du changement climatique sur la forêt

Description du changement climatique

Évolution du climat moyen et des événements climatiques extrêmes (canicule, gels intenses)

Les données suivantes sont issues de simulations climatiques mensuelles réalisées spécifiquement par Météo-France pour cet exercice. Elles concernent trois périodes : une période

7. Source : IFN.

de référence centrée sur 1985 allant de 1971 à 2000 (passé récent), une deuxième période future centrée sur 2035 allant de 2021 à 2050 (futur proche) et une troisième période future centrée sur 2085 allant de 2071 à 2100 (futur lointain). Elles présentent l'évolution future du climat moyen et des événements climatiques extrêmes tels que les canicules et gels intenses.

Évolution du climat moyen pour la station de Pissos dans les Landes

Indicateurs	Valeurs (en évolution)		Remarques
	De PR à FP	De PR à FL	
Température moyenne annuelle	+ 1,7°C	+ 3,7°C	Augmentation des températures importante dans le FL
Pluviométrie annuelle	- 80 mm	- 314 mm	Réduction de 7 % dans le FP et de 30 % dans le FL
Nombre de jours de gel	- 14 jours	- 27 jours	Diminution importante du nombre de jours de gel (- 25 % FP et - 47 % FL)
Déficit hydrique climatique (P-ETP)	- 180 mm	- 600 mm	Bilan hydrique climatique fortement réduit dès 2035 et largement négatif à l'horizon 2060

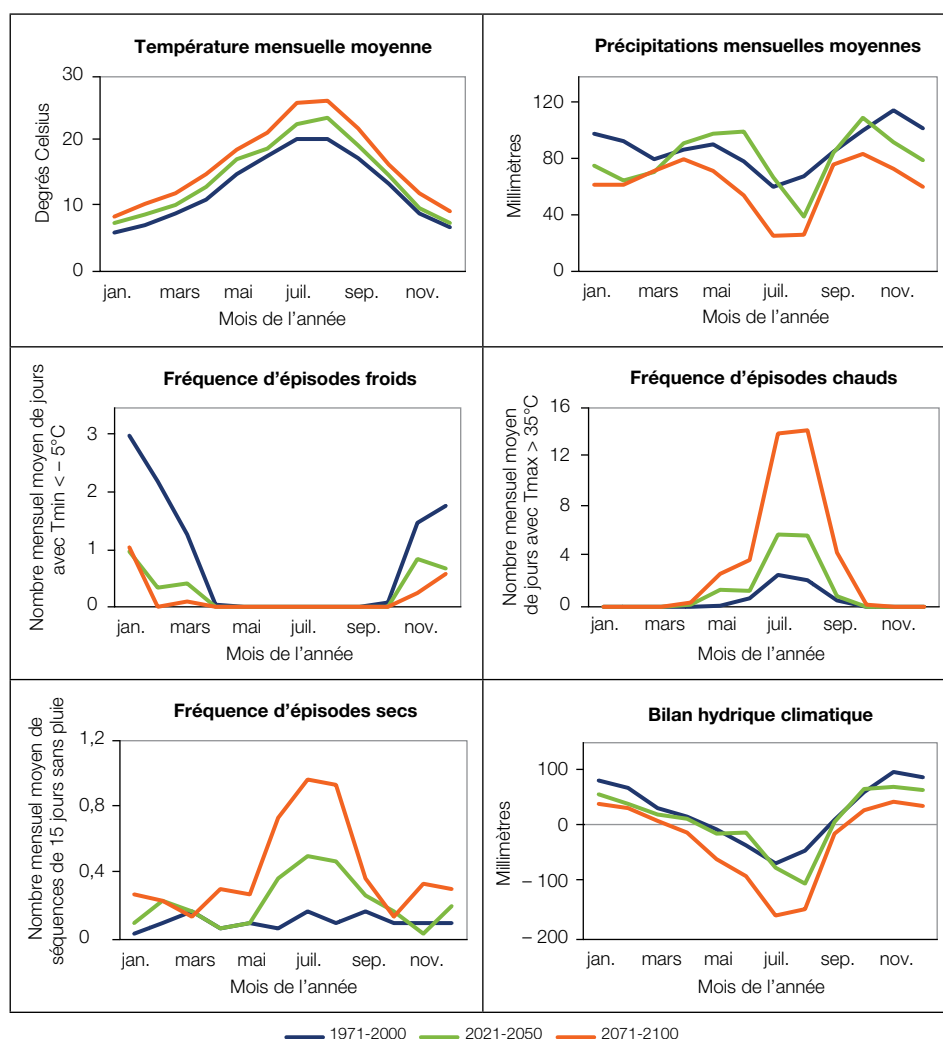
Source : Météo-France.

La comparaison entre les périodes 1971-2000, 2021-2050 et 2071-2100 montre :

- une augmentation des températures moyennes dès le futur proche et qui s'accroît à l'horizon 2085. La différence de température moyenne par rapport à la période de référence (1971-2000) est homogène au cours de l'année ;
- une diminution de nombre de jours de gel et de la fréquence des gels intenses ;
- une augmentation importante du nombre de jours où les températures maximales dépassent les 35°C et un étalement de la période d'occurrence de ce phénomène ;
- une réduction importante des précipitations, avec des écarts à la période de référence, plus marqués au cours des périodes estivales et hivernales ;
- pour le futur proche, une dégradation du bilan hydrique principalement de novembre à février et en août. Pour le futur lointain, une dégradation généralisée sur l'ensemble de l'année, particulièrement marquée de mai à août.

Finalement, l'augmentation des températures va diminuer la contrainte climatique en hiver (réduction du risque de gel). Associée à une nette réduction des précipitations, elle va en revanche augmenter fortement la contrainte hydrique estivale. Cette tendance qui se met en place dès le futur proche sera plus marquée au futur lointain. La contrainte hydrique sera, par ailleurs, étalée sur une plus longue période, mais restant toujours plus marquée les mois d'été.

Figure 2 : Évolution mensuelle des principaux indicateurs météorologiques pour les périodes passé récent (1971-2000), futur proche (2021-2050) et futur lointain (2080-2100)



Évolution de la teneur en eau du sol et de l'intensité des sécheresses édaphiques

Figure 3 : Évolution annuelle de la teneur en eau du sol en moyenne sur une période de 30 ans

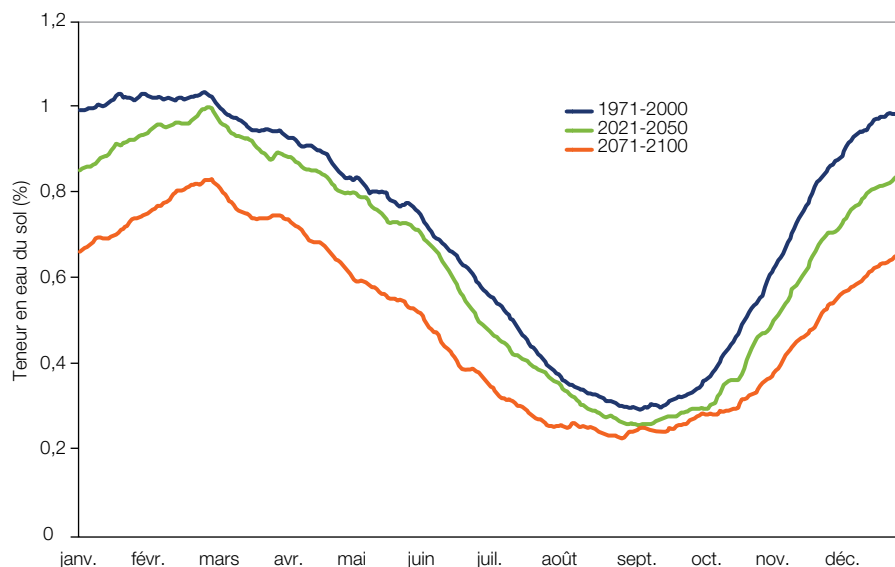
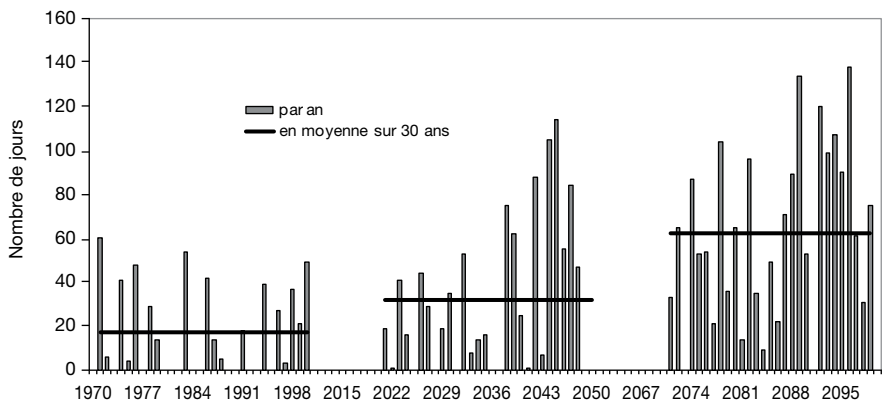


Figure 4 : Évolution annuelle du nombre de jours de sécheresse intense pour les trois périodes étudiées



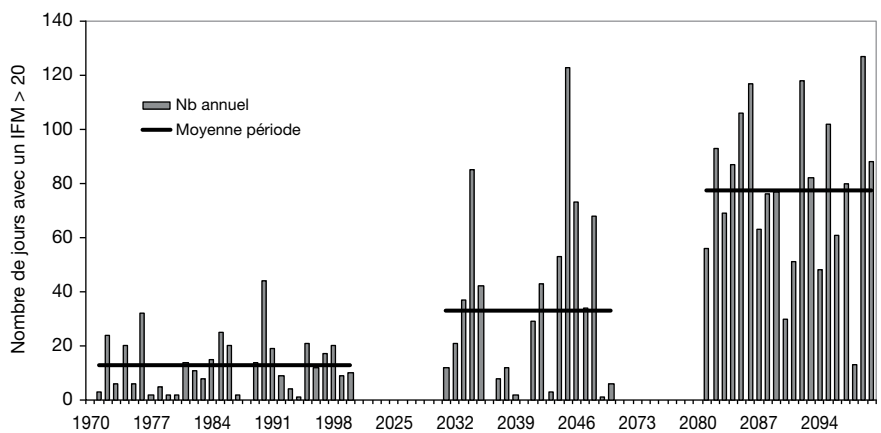
Source : Météo-France, maille SAFRAN, à proximité du cas étudié. Projet CLIMSEC – Modèle ISBA.

La comparaison entre les périodes 1971-2000, 2021-2050 et 2071-2100 montre :

- une augmentation de la durée moyenne de sécheresse (SWI < 0,5) : environ 3 mois pour la période 1971-2000, puis 4 mois pour 2021-2050 et enfin 5 mois pour 2071-2100 ;
- la période de sécheresse estivale à l'horizon 2085 débutera en moyenne un mois plus tôt dans la saison ;
- la recharge complète en eau du sol au cours de l'hiver n'aura plus lieu à l'horizon 2085.

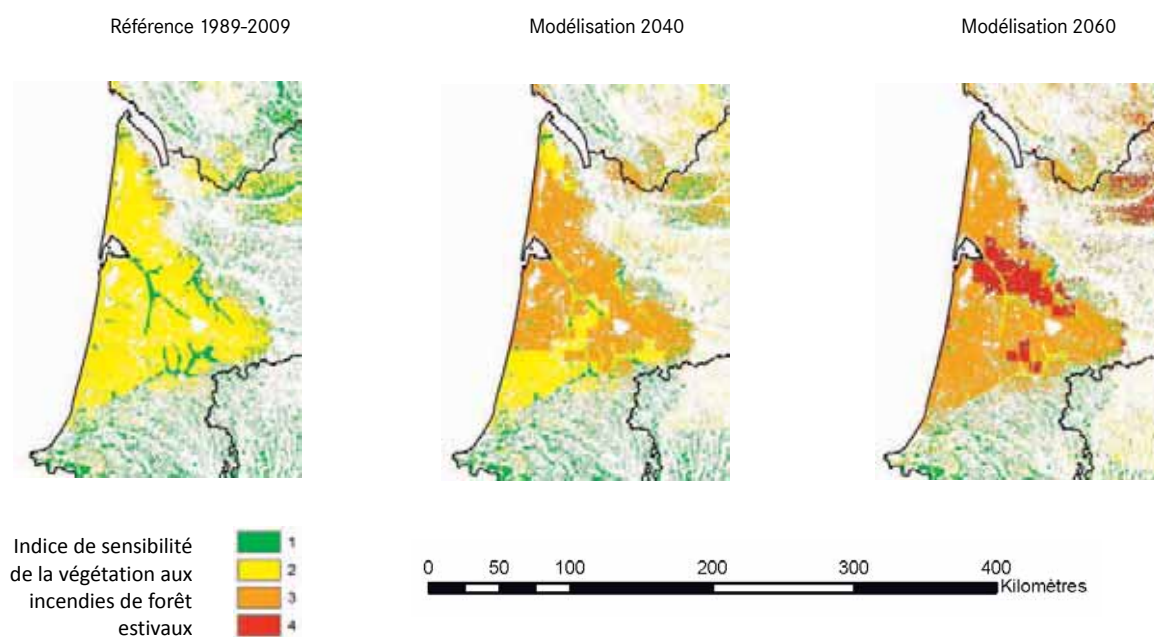
Évolution du risque incendie

Figure 5 : Évolution annuelle de nombre de jours où l'Indice Forêt Météo (IFM) dépasse la valeur seuil de 20, pour les trois périodes étudiées (1971-2000, 2031-2050 et 2081-2100)



Source : Météo-France, maille SAFRAN, à proximité du cas étudié.

Figure 6 : Évolution du risque incendie en fonction de la sensibilité des forêts aux feux estivaux et du danger météorologique dans le massif des Landes



Source : Chatry *et al.* (2010).

La comparaison entre les périodes 1989-2008, 2031-2050 et 2051-2070 montre :

- une augmentation de la fréquence du danger météorologique, se traduisant par une augmentation du risque d'incendie dans l'ensemble du massif dès 2040. Elle s'accroît à l'horizon 2060 et 2090 ;
- le nombre de jours où l'IFM dépasse 20 est multiplié par 2,5 dans le futur proche et par 6 dans le futur lointain ;
- le nombre de jours où l'IFM dépasse 40 est multiplié par 14 dans le futur proche et par 40 dans le futur lointain, avec une fréquence moyenne de 12 jours par an.

■ Effets attendus sur le système étudié

Modification de la phénologie et du risque de gels tardifs

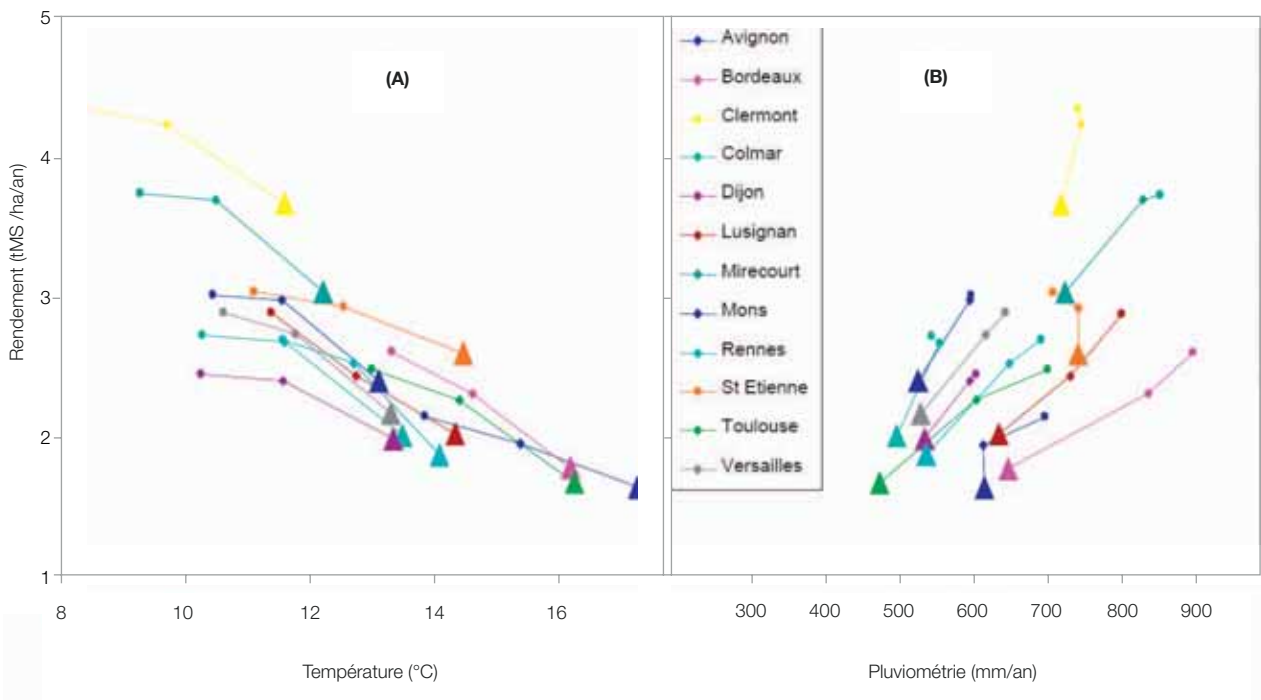
Dans les Landes, le pin maritime est peu concerné par les problèmes de gel, qu'ils soient précoces, tardifs ou hivernaux. Seule la longue période de gels intenses de l'hiver 1985-1986 a entraîné des dégâts importants sur des peuplements d'origine plus méridionale (Espagne et Portugal), les peuplements d'origine locale ont, quant à eux, été peu affectés.

Les simulations réalisées pour l'étude de cas (station météorologique de Pissos, modèle phénologique, d'après Desprez-Loustau et Dupuis, 1994) ont montré pour la période récente (1971-2000) une très faible occurrence de jours de gel après le débourrement, seule une année sur dix présente un ou des jours où la température minimale est inférieure à -2°C et aucune occurrence de jours avec une température minimale inférieure à -4°C . Avec l'augmentation des températures, le débourrement sera avancé de 13 jours à l'horizon 2035 et de 23 jours à l'horizon 2085. La probabilité de gels tardifs deviendra quasiment nulle dès 2035 (0 à 0,03 pour le seuil -2°C , 0 pour le seuil -4°C).

Évolution du rendement et du confort hydrique

Les résultats présentés ci-dessous sont issus des projets de recherche CLIMATOR et CARBOFOR. Ils ont été obtenus à partir du modèle GRAECO (Loustau *et al.*, 2010; Bréda *et al.*, 2010).

Figure 7 : Évolution sur les 12 stations du projet CLIMATOR du rendement du pin maritime géré en futaie à rotation moyenne



Source : Brisson et Levraut (2010).

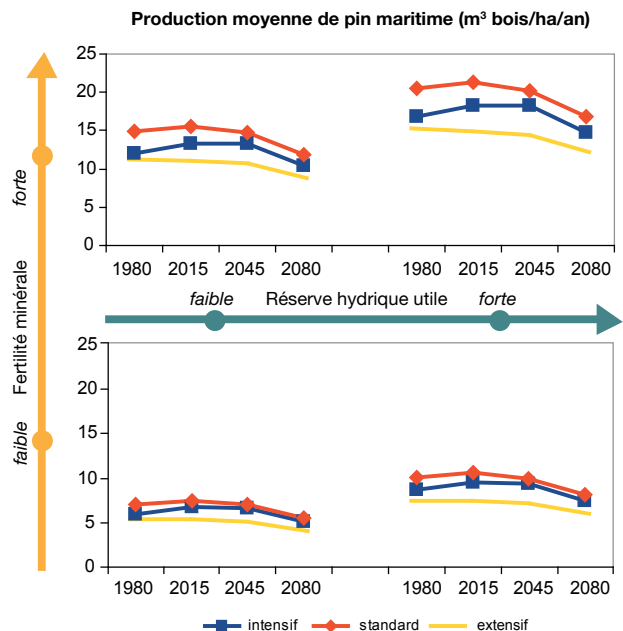
Les évolutions sont présentées en fonction de la température moyenne annuelle (A) et de la pluviométrie annuelle moyenne (B). Pour chaque station, les trois points reliés représentent les trois périodes (1971-2000, 2021-2050 et 2071-2100) où le futur lointain (2071-2100) est représenté par le triangle (scénario A1B, méthode de régionalisation quantile/quantile du CNRM, sol fersialitique à réserve utile de 100 mm).

Ces résultats montrent une diminution du rendement dès 2035 d'environ 10%. Cette diminution pourrait atteindre 40% en 2085. Cependant, ces résultats diffèrent en fonction des modèles de régionalisation utilisés. Le modèle de régionalisation par type de temps conduit à une estimation plus faible de la perte de rendement en 2085, avec une diminution de l'ordre de 7%.

D'autres modélisations du rendement ont été effectuées dans le cadre du projet Carbofor avec des scénarios climatiques plus anciens. Les tendances modélisées sont comparables, avec une diminution modérée jusqu'en 2040 et plus importante à l'horizon 2080. Le projet Carbofor a également montré que les impacts du changement climatique sur le rendement :

- (1) varient fortement à l'échelle subrégionale, avec un changement plus favorable en bordure littorale qu'à l'intérieur des terres;
- (2) résultent de l'interaction entre climat et conditions stationnelles : les stations « riches », fertiles et à réserve hydrique forte donnent des peuplements productifs qui sont plus réactifs au changement (figure 8);
- (3) sont plus marqués en phase de régénération et juvénile, avant la fermeture du couvert, et par conséquent dans les itinéraires sylvicoles les plus intensifs (figure 8).

Figure 8 : Évolution simulée de la production moyenne en bois fort de pin maritime

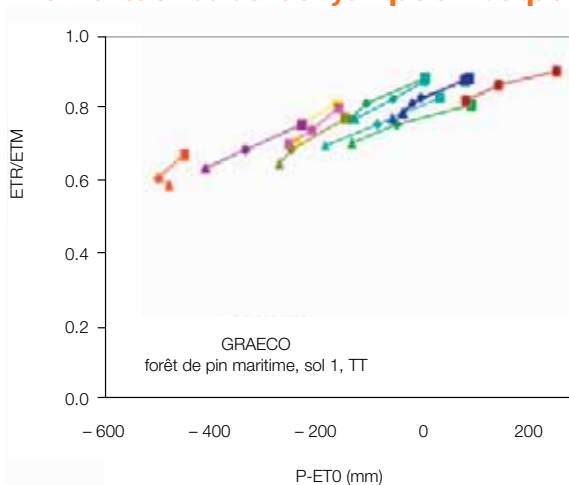


Source : Projet CARBOFOR (GICC-MESR, Gip-Ecofor-MAAP) 2002-2004.

Les simulations ont été réalisées suivant le scénario B2, pour trois itinéraires sylvicoles (intensif, standard et extensif) situés dans des conditions stationnelles différentes (deux niveaux de fertilité minérale et deux niveaux de réserve hydrique utile) (Loustau *et al.*, 2005; Loustau, 2010).

Évolution du confort hydrique

Figure 9 : Évolution dans le temps et sur les 12 sites Climator du confort hydrique en fonction du déficit hydrique climatique



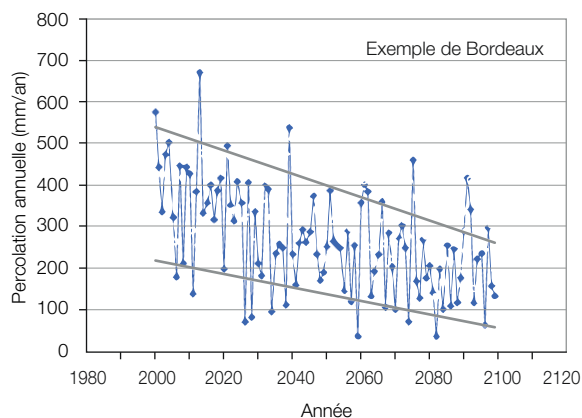
Source : Brisson et Levraut (2010).

Les carrés correspondent au passé récent, les losanges correspondent au futur proche et les triangles correspondent au futur lointain (Brisson et Levraut, 2010).

Les résultats montrent une diminution du confort hydrique avec l'augmentation du déficit hydrique climatique au cours du siècle à venir.

Évolution de la quantité d'eau restituée au milieu

Figure 10 : Évolution de la quantité d'eau annuelle restituée au milieu sur le site de Bordeaux, pour la période 2000-2100



Source : Brisson et Levraut (2010).

Les résultats montrent une diminution de la quantité d'eau restituée au milieu par drainage. La diminution de la transpiration des peuplements en réponse au déficit hydrique édaphique ne permet pas de compenser la diminution des précipitations. Cette diminution de la restitution aura un impact sur la disponibilité de l'eau pour les peuplements, pour les autres usages tels que l'agriculture et sur l'ensemble du bassin versant.

■ Effets attendus du changement climatique sur le pin maritime dans le système étudié

Modifications dues au CC sur ↓	Description des modifications attendues et de leurs effets potentiels sur la productivité, la mortalité et la régénération
Confort hydrique / fréquence et intensité des sécheresses	<p>Les simulations climatiques indiquent que le confort hydrique va diminuer, entraînant une baisse probable du rendement dès 2035. Les peuplements situés aujourd'hui dans des conditions stationnelles favorables (fertiles et à réserve hydrique forte) seront affectés par ces changements climatiques et la réduction de rendement devrait être plus importante. Les effets du climat sont plus marqués en phase de régénération et en phase juvénile. Le raccourcissement des rotations et les itinéraires sylvicoles les plus intensifs produisent des peuplements vulnérables à forte croissance aérienne. Ils pourraient être plus affectés par les effets des sécheresses (Loustau <i>et al.</i>, 2010 ; Bréda <i>et al.</i>, 2010).</p> <p>Le pin maritime est une espèce relativement résistante à la sécheresse. On peut donc supposer que le risque de dépérissement et de mortalité sera faible même si les conditions évoluent de manière progressive. Cependant, des épisodes de dépérissement localisés ont déjà été observés dans le passé, suite à l'abaissement brutal de la nappe phréatique dû à des prélèvements pour l'irrigation agricole et d'autres usages. Le développement de la prospection racinaire étant fortement lié à la profondeur de la nappe, toute modification brutale de cette dernière pourrait avoir des conséquences importantes sur l'alimentation en eau des peuplements.</p>

Modifications dues au CC sur ↓	Description des modifications attendues et de leurs effets potentiels sur la productivité, la mortalité et la régénération
Interactions avec les ravageurs et les pathogènes	Le pin maritime est principalement affecté par des insectes sous-corticaux (scolytes, pyrale), des insectes défoliateurs (chenille processionnaire) et des pathogènes racinaires (armilaire et fomes) (Piou et Jactel, 2010 ; Plan d'urgence sanitaire du massif landais, 2009 ; Piou <i>et al.</i> , 2006).
	Scolytes : les scolytes sont des parasites de faiblesse. La température est un élément clé de leur développement. Une augmentation de la température pourrait entraîner une augmentation du nombre de générations et des capacités d'envol. Une diminution du confort hydrique risque d'affaiblir le pin maritime et par conséquent, d'augmenter sa vulnérabilité aux attaques de scolytes. Actuellement, les dégâts importants sont principalement observés lors de la conjonction de tempêtes et de sécheresses. Des températures chaudes extrêmes comme celles observées en 2003 peuvent affecter négativement la biologie de cet insecte.
	Chenilles processionnaires : dans le contexte actuel, lors des années de pullulation, les chenilles processionnaires affaiblissent les peuplements, entraînant une diminution du rendement. En 2009, 4 % du massif ont été affectés par ces chenilles *. Avec le changement climatique, les températures vont augmenter, le seuil léthal de -16°C sera atteint moins fréquemment et le cycle de développement pourrait être réduit permettant une nymphose à l'automne. Ces modifications pourraient favoriser le développement des populations sans pour autant augmenter la fréquence des pullulations. Des températures élevées comme celles observées en 2003 pourraient, en revanche, être néfastes à son développement.
	Hylobe : le pin maritime est particulièrement sensible à l'hylobe pendant la première année de plantation. Les dégâts observés (hors tempête) sont brutaux (une plantation peut être détruite en quelques jours) mais leur expansion est généralement limitée (1 % environ des plantations). Actuellement, les dégâts sur les jeunes plants ou les semis ont lieu dès que la température avoisine les 20°C dans la journée avec deux vagues principales en mars-avril et août-septembre. Avec le changement climatique, les attaques pourraient être décalées dans la saison et le cycle de développement pourrait être raccourci.
	Armilaire et fomes : le changement climatique aura probablement des effets antagonistes sur les pathogènes racinaires. L'augmentation du déficit hydrique édaphique pourrait être défavorable au développement de ces pathogènes mais aussi affaiblir les arbres et les rendre plus sensibles. Il est donc difficile d'évaluer l'évolution de leurs impacts. Cependant il est important de rappeler que les capacités et la vitesse d'adaptation de ces pathogènes sont supérieures à celles des arbres.

Modifications dues au CC sur ↓	Description des modifications attendues et de leurs effets potentiels sur la productivité, la mortalité et la régénération
Fréquence des incendies	Les projections climatiques prévoient une augmentation importante du risque incendie. Le système DFCI actuellement en place ne serait pas suffisant pour répondre à cette augmentation du risque (Chatry <i>et al.</i> , 2010).
Durée de la saison de végétation et risque de gel tardif	Les simulations réalisées par Météo-France pour le site étudié permettent de supposer que l'avancée de la date de débournement n'entraînera pas une augmentation du risque de gel tardif.
Augmentation de la disponibilité du CO ₂	L'augmentation de la disponibilité en CO ₂ déjà effective, devrait augmenter la productivité de façon provisoire. En effet, après 2035, les effets favorables de cette augmentation ne suffiront plus à compenser les impacts liés à la diminution des précipitations et à l'augmentation des températures (Loustau <i>et al.</i> , 2010 ; Bréda <i>et al.</i> , 2010).

* Source : Direction des services fiscaux.

Synthèse : effet du changement climatique sur le système étudié

Le changement climatique risque d'entraîner à terme une baisse de la productivité. Elle sera limitée à l'horizon 2035 et sera bien plus importante à l'horizon 2085. Le risque de mortalité ou de dépérissement restera faible en dehors de crises sanitaires majeures dont l'intensité pourrait augmenter si elles sont associées à des aléas abiotiques (tempêtes, sécheresse, etc.). L'augmentation des températures diminue le risque de gel et offre une opportunité pour l'introduction de nouvelles essences qui, jusqu'à présent, étaient trop gélives.

3. Options d'adaptation à l'échelle de la propriété et de son territoire

■ Option PM1 : Maintien du pin maritime dans une démarche de prévention des risques

Le propriétaire reste relativement confiant malgré les baisses de rendement annoncées. Il choisit de maintenir l'objectif actuel de production de bois d'œuvre de pin maritime.

Il diversifie légèrement ses itinéraires sylvicoles et fait en sorte qu'ils restent réversibles une grande partie de la durée de vie du peuplement, pour limiter les risques climatiques et biotiques (exemple : récoltes anticipées en cas de crise sanitaire, récoltes différées en cas de tempêtes pour les peuplements non affectés). La durée de renouvellement moyenne est maintenue entre 35 et 50 ans (voire plus, pour compenser la plus faible productivité) pour produire du bois d'œuvre (type "Bois d'œuvre de qualité", norme pin des Landes). Des îlots de vieillissement sont maintenus pour favoriser la biodiversité.

Pour limiter les risques et réduire la vulnérabilité, différentes mesures sont mises en place :

- l'utilisation progressive de variétés améliorées ou de provenances adaptées visant à compenser la baisse de rendements liée au changement climatique (utilisation de variétés hybrides Landes x Corse, Landes x Maroc, Landes x Portugal). Ces variétés sont utilisées en reboisement. Du fait de la surface de la propriété, cette pratique n'est pas exclusive et des régénérations naturelles sont aussi favorisées sur les parcelles affectées par les dégâts de tempêtes ;
- la limitation du déficit hydrique édaphique, élément clé de la productivité, par des mesures sylvicoles : éclaircies régulières et intensives, limitation du sous-étage. Ces pratiques permettent également de limiter le risque incendie ;
- une lutte préventive contre les ravageurs à travers des pratiques sylvicoles qui réduisent les niveaux de population des ravageurs ou pathogènes et qui augmentent la résistance des arbres à ces agents biotiques : reboisements différés de 2 ans après les coupes rases, mise en place de haies de feuillus et de mélange feuillus/pins, régénération naturelle, quand elle est possible (Pio et Jactel, 2010).

Ces adaptations permettront de limiter en partie les impacts du changement climatique en diminuant la vulnérabilité des peuplements et en atténuant les aléas (baisse des niveaux des populations de bio-agresseurs, économie de l'eau, utilisation de variétés améliorées, etc.) mais ne permettront pas de les éviter totalement.

■ Option PM2 : Diversification des essences et diminution de la durée des rotations

Le propriétaire est conscient des changements climatiques à venir et des risques qu'il prend à rester sur un système de monoculture. Il choisit donc de diversifier ses objectifs de production. Au vu de la surface dont il dispose, il met en place deux stratégies :

(a) Pour une partie des sols nus actuellement disponibles pour la plantation et pour les surfaces à régénérer d'ici 2050, il remplace progressivement une partie des peuplements de pin maritime par d'autres essences : résineux (*Pinus taeda*, *Pinus radiata*, *Cupressus macrocarpa*), certains eucalyptus (*Eucalyptus gunnii*, *Eucalyptus dalrympleana*, etc.) et robinier. Les essences résineuses sont conduites soit selon un itinéraire sylvicole standard, de courte révolution, soit en culture semi-dédiée. Les essences feuillues sont réservées à la production de biomasse en révolution de 8 à 12 ans (d'après les itinéraires proposés par Lesgourgues *et al.*, 2009). Cette diversification ne dépasse pas 20% de la surface forestière productive (Moria *et al.*, 2012).

(b) Pour le reste de la surface, les risques climatiques et sanitaires poussent le gestionnaire à réduire considérablement les révolutions de pin maritime en système régulier. La production de bois d'œuvre n'est plus le seul objectif. Des cultures dédiées sont mises en place avec vocation de production de biomasse (itinéraires de 20 à 25 ans, cultures semi-dédiées ou dédiées). La réduction des rotations et l'intensification des itinéraires n'améliorent pas le rendement, ni les revenus (même en prévoyant une augmentation de 20% par rapport à 2008 du prix du bois d'industrie et d'énergie, comme indiqué par la CAFSA, coopérative agricole et forestière Sud-Atlantique), mais permet de réduire les risques en diminuant la durée d'exposition aux aléas biotiques et abiotiques. Ce système risque d'entraîner une perte de biodiversité et nécessite une compensation des exportations minérales par des pratiques de fertilisation dont l'impact sur le milieu naturel sera à prendre en compte.

■ Option PM3 : Modification brutale du paysage forestier

La répétition ou la crainte de répétition des événements climatiques majeurs, remet en cause la production forestière. Le risque d'apparition de parasites invasifs (nématode du pin) accentue cette tendance. Le propriétaire se désengage de l'investissement forestier.

Quelques peuplements sont traités en futaie irrégulière, en profitant de la régénération acquise dans des peuplements déjà irrégularisés (notamment post-tempête et post-crise sanitaire). Certaines parcelles sont laissées à l'abandon. Le risque incendie augmente en conséquence.

La pression sur le foncier forestier augmente. D'autres usages sont envisagés (agriculture, production d'énergie renouvelable, etc.).

Si cette décision individuelle concerne un nombre important de propriétaires, les impacts sur la filière régionale du bois d'œuvre seraient importants, nécessitant une reconversion vers d'autres secteurs (par exemple, la trituration et le bois énergie).