



**Unité de Recherche EPHYSE**

*Ecologie fonctionnelle et*

*Physique de l'Environnement*

[www.bordeaux-aquitaine.inra.fr/ephyse](http://www.bordeaux-aquitaine.inra.fr/ephyse)

[loustau@pierroton.inra.fr](mailto:loustau@pierroton.inra.fr)

**CRITERE C2**  
**SECHERESSE, CANICULE, CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Denis LOUSTAU

Cette expertise a été préparée essentiellement à partir des travaux disponibles et publiés sur le cycle de l'eau et l'impact du stress hydrique sur les forêts des Landes de Gascogne. Ces travaux sont essentiellement des publications scientifiques, mémoires de doctorat et de DEA ou MASTER, rapports scientifiques. Sa disponibilité et le délai imparti au rédacteur n'ont pas permis de livrer une analyse critique approfondie et exhaustive des options de sylviculture et d'aménagement proposées par les groupes de travail. On s'en est tenu à une revue des impacts connus de telles alternatives sylvicoles et d'aménagement sur le cycle de l'eau en forêt, l'occurrence et la sévérité des stress hydrique et leurs répercussions sur la forêt dans le contexte du massif des landes de Gascogne et après la tempête Klaus.

## **1. Sécheresse: définition, notion de stress hydrique, comportement du pin maritime et espèces voisines (cavitation, stomate).**

---

**La notion de sécheresse renvoie à une définition physique correspondant à un déficit du bilan hydrique. Elle peut s'appliquer au niveau d'un végétal, d'un sol, d'un écosystème ou d'une région. Dans le contexte pédologique et climatique du massif forestier des Landes, ce déficit du bilan hydrique intervient de façon moyenne en été pendant plusieurs jours à plusieurs semaines en fonction du déficit hydrique climatique (P-ETP), de la réserve emmagasinée par le sol et de l'apport par la nappe phréatique qui dépend de sa proximité de la zone de sol prospectée par les racines des arbres.**

### 1.1 Approche physique de la sécheresse à l'échelle de la parcelle et de l'arbre

Le bilan hydrique d'une parcelle forestière ou cultivée inclut les termes suivants :

- flux incidents : précipitations (P, 700 à 1100 mm.an<sup>-1</sup>), apports par remontées capillaires ou prélèvements directs de la végétation dans la nappe (C, mal connu, estimé à quelque dizaines de mm.an<sup>-1</sup>) ;
- flux sortants : transpiration végétale incluant toutes les strates végétales (T, 450 à 600 mm.an<sup>-1</sup>), évaporation directe depuis le sol (E, 50 à 300 mm.an<sup>-1</sup>), évaporation de l'eau interceptée par les surfaces végétales (I, 100 à 170 mm.an<sup>-1</sup>), drainage souterrain (D, 150 à 600 mm.an<sup>-1</sup>) et ruissellement de surface (R) ; on connaît parfaitement la physique de l'évaporation d'une surface forestière qui est déterminée par des facteurs météorologiques, le rayonnement, le déficit de pression de vapeur de l'air, la température l'air et la vitesse du vent et des contrôles biologiques, l'indice foliaire, la réflectance du couvert, sa structure et la conductance de surface liée en grande partie au degré d'ouverture des stomates. Annuellement l'évapotranspiration totale d'une parcelle forestière varie de 500 à 800 mm dans les Landes en fonction notamment de l'âge du couvert. Elle est inférieure à la somme des précipitations, l'excès de précipitations étant disponible pour l'écoulement vers la nappe et les eaux de surface soit en moyenne régionale 200 mm par an. Le ruissellement est négligeable dans les Landes de Gascogne.
- variations des stocks d'eau du système que l'on peut éventuellement séparer en distinguant celui du sol ( $\Delta W_s$ ) et de celui de la végétation ( $\Delta W_p$ ) qui lui est inférieur de plusieurs ordres de grandeur et que l'on négligera par la suite ;

Il peut se mettre sous la forme de l'équation de conservation :

$$\Delta W_s = P + C - (T + E + I + D + R) \quad (1)$$

La réserve d'eau du sol,  $W_s$ , exprimée en kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (ou mm) varie entre quatre valeurs caractéristiques, du plus sec à la saturation :

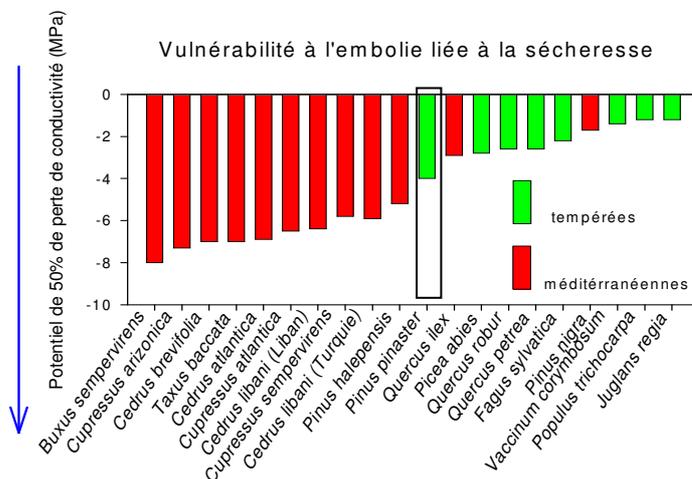
- le point de flétrissement où le sol est vide d'eau extractible pour la végétation,
- le seuil de stress estimé à environ 40% de la réserve utile (Loustau et al. 1990 ; Granier et Loustau, 1994 ; Granier et al. 2000) et qui est le niveau de réserve où la végétation montre des signes de stress (arrêt de croissance, fermeture stomatique) ;
- la capacité au champ, réserve maximale retenue par le sol après écoulement gravitaire ;
- la saturation qui correspond à la quantité d'eau présente dans le sol quand sa porosité totale est totalement occupée par l'eau.

Les valeurs respectives pour un sol forestier des Landes de Gascogne sont comprises dans les fourchettes suivantes : 25-40, 55-80, 90-140 et 300-450 mm. L'écart entre point de flétrissement et capacité au champ représente la réserve utile, RU, soit la quantité d'eau maximale qu'un sol donné peut mettre à la disposition de la végétation après ressuyage. Elle varie pour les sols landais entre 60 et 110 mm (Choisnel et al. 1987, d'après Wilbert et al.) qui

sont des valeurs faibles à très faibles : les sols à texture plus fine ont une RU qui peut dépasser 250 mm. Cette RU représente le volume d'eau « tampon » qu'un sol peut mettre à disposition de la végétation qu'il supporte et qui lui permet de satisfaire ses besoins en eau entre chaque épisode de précipitation.

## 1.2 Impact de la sécheresse sur les arbres

On parle de sécheresse quand la somme des flux sortants excède celle des flux entrants et provoque une diminution du stock d'eau du sol qui affecte en retour le statut hydrique de la végétation (éq. 1). Une plante est en état de sécheresse dès que sa teneur en eau diminue, c'est à dire quand sa transpiration excède le flux de recharge prélevé par les racines. En condition de disponibilité en eau du sol favorable ( $W_s > 0.40 \times RU$ ), cette situation se produit transitoirement chez les arbres en milieu de journée. Quand la réserve en eau du sol diminue sous le seuil de stress ( $W_s < 0.40 \times RU$ ), la végétation ne peut reconstituer l'état de saturation et entre en phase de stress, sa déshydratation s'aggravant de façon continue. En cas de sécheresse extrême, la plante perd son intégrité hydraulique ce qui peut entraîner sa mort. De ce point de vue le Pin maritime est intermédiaire entre essences atlantiques et méditerranéennes (figure 1).



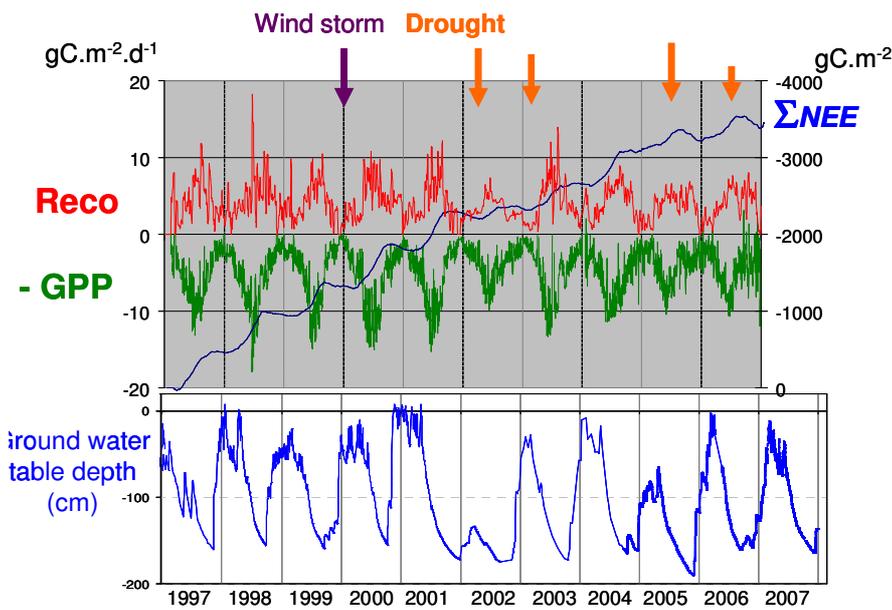
**Figure 1** - Vulnérabilité à l'embolie, mesurée à partir du potentiel hydrique induisant 50% de perte de conductivité dans la tige, chez quelques espèces méditerranéennes (obtenues à l'INRA, Avignon, Ladjal 2001, Froux 2002) et comparée à quelques espèces tempérées (relevées dans Cruziat, Cochard et Améglio 2002)

## 2. Effets des sécheresses et températures élevées sur le Pin maritime dans les Landes

**Le pin maritime des Landes, ici dans la partie septentrionale de son aire géographique est une espèce présentant une forte résistance écologique à la sécheresse en terme de survie. Sa production forestière est cependant amoindrie par la sécheresse comme en témoignent la diminution de croissance et de production primaire nette observée en année sèche, la productivité plus élevée des stations à nappe phréatique proche de la zone racinaire ou de celles présentant la pluviométrie la plus élevée, ainsi que les effets positifs et parfois spectaculaires de l'irrigation estivale de peuplements forestiers. Les périodes de sécheresse sont également réputées amoindrir la résistance des Pins aux ravageurs en affaiblissant les réserves disponibles pour la synthèse de métabolites secondaires.**

## 2.1 Données climatiques statistiques

L'étude climatique la plus complète réalisée demeure le rapport de Choisnel et al. (1986) réalisée pour le programme HAPEX MOBILHY Landes. Elle montre que sur la période 1951-1980 la forêt landaise subit une année sur deux une période de sécheresse ( $R/RU < 40\%$ ) de durée variant de 2 à 4 mois avec une sécheresse très sévère ( $R/RU < 10\%$ ) de durée significative une année sur 5. Le suivi de sites ateliers par l'INRA montre que durant la période 1985-2009, 8 années sur 25 montrées des sécheresses excédant un mois au site expérimental du Bray en Sud Gironde (figure 2 pour les dix dernières années), dont 4 au cours de la période 2002-2007.



**Figure 2.**

Flux de carbone –  $\text{CO}_2$  et fluctuations de la nappe phréatique enregistrés au site du Bray en Sud-Gironde de 1977 à 2007.

On remarque la série d'années « sèches » 2002, 03, 05 et 06 où la nappe phréatique est restée sous la zone de prélèvement racinaire (environ -100 cm) pendant la saison de croissance. (Berbigier et al. 2002 ; Delzon et Loustau, 2005 ; Jarosz et al. 2007 ; Loustau et al. 2008 ; Stella et al. 2009).

$\Sigma\text{NEE}$  : bilan net de  $\text{C-CO}_2$  cumulé ;  
**Reco** : respiration de l'écosystème (sol+végétation) ;  
**GPP** : production primaire brute.  
Les flux ascendants sont comptés positivement.

## 2.2 Mortalité directe

Le Pin maritime présente une série de réponses à la sécheresse successivement une osmorégulation, un arrêt de croissance primaire et secondaire (qui peut être partiellement ou totalement compensé suivant la durée de la sécheresse), la réduction de sa transpiration et de ses échanges gazeux par fermeture stomatique, la perte des aiguilles et des branches les plus âgées. Il n'y a pas à ma connaissance d'évidence directe de mortalité de Pin maritime dans les Landes exclusivement attribuée à une sécheresse, la récolte de sujets dépérissants anticipant celle-ci. De surcroît, l'affaiblissement des réserves des arbres soumis à une sécheresse accroît leur vulnérabilité aux ravageurs qui sont plus souvent directement impliqués dans la mortalité observée. En revanche on attribue empiriquement des dépérissements récurrents de peuplements de Pins à un déficit hydrique (cf. rapports annuels DSF).

## 2.3 Pertes de productivité et croissance.

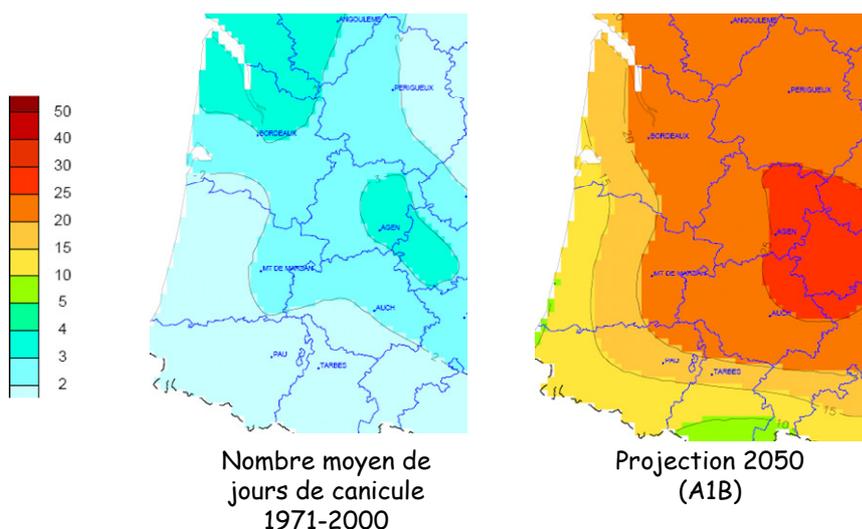
Les expérimentations d'irrigation de peuplements de Pin permettent indirectement d'estimer la perte de croissance imputable au déficit hydrique. Sur le site de l'usine de Tartas, l'irrigation estivale durant deux années consécutives de peuplements de différents âges a induit un gain de croissance atteignant près de 70% (Eining, 1993). Une expérimentation d'irrigation continue d'un

peuplement entre sa 5<sup>e</sup> et sa 8<sup>e</sup> année donne des résultats inférieurs et variables suivant les années entre 0 et 20% mais la proximité de la nappe phréatique a pu ici conduire à sous estimer l'effet de la sécheresse (Trichet et al. 2008, Trichet et al. en préparation). L'observation à long terme des flux de carbone au site du Bray à 30 ans montre une réduction de production primaire brute de 35% entre l'année la plus humide (2000, 2151 g C.m<sup>-2</sup>) et la plus sèche (2002, 1408 gC.m<sup>-2</sup>) de la série (figure 2). A un âge de 20 ans, la diminution d'incrément net annuel en matière sèche entre une année bien arrosée (1992, 559 gC.m<sup>-2</sup>) et une année sèche (1990, 285 gC.m<sup>-2</sup>) atteint 49%. On ne sait cependant pas dans quelle mesure ces différences sont entièrement imputables au seul effet de la sécheresse, d'autres facteurs environnementaux étant corrélés à la pluviométrie et au climat comme les apports azotés par voie humide et le dépôt d'ozone.

## 2.4 Température élevée, Canicules.

La canicule de 2003 a semble t-il été assez bien supportée par le Pin maritime (DSF) des Landes où la vague de chaleur du mois d'août s'est produite sur des sols encore pourvu en eau et contrairement au centre et l'est de la France et de l'Europe où cette vague s'est conjuguée avec une sécheresse édaphique (Ciais et al., 2005). La transpiration des pins a joué un rôle atténuateur et évité que la température de la végétation s'élève fortement au dessus de celle de l'air. L'appareil photosynthétique du Pin maritime (taux maximal de transport d'électrons) montre des signes de dégradation à des températures foliaires dépassant 40 à 45 °C (Medlyn et al. 2002). L'exposition à de tels niveaux de température foliaire durant plusieurs journées consécutives pourrait amener des pertes de production significatives. Elle pourrait également affecter d'autres tissus sensibles de l'arbre comme les bourgeons caulinaires, amenant une perte de croissance de la couronne l'année suivante. De telles températures sont susceptibles de multiplier le taux de métabolisme de base et la respiration végétale et d'épuiser les réserves utilisables pour le métabolisme secondaire (défense) et la croissance.

La probabilité d'épisodes climatiques caniculaires (température de l'air supérieure à 35°C le jour et à 25°C la nuit) passerait selon le modèle ARPEGE – Climat appliqué au scénario SRES A1- B de une à trois journées à plus de 20 à 25 journées annuellement en 2050 (Déqué et Cloppet, 2010, figure 3).



**Figure 3.**

Moyenne annuelle du nombre de jours de canicule simulé par le modèle ARPEGE CLIMAT sous le climat actuel et en 2050 d'après le scénario SRES A1B. Météo-France, tiré de la présentation de M. Delcamp (PNRLG, 2010).

### **3. Impacts potentiels des pratiques sylvicoles sur les sécheresses et leurs effets sur la forêt à l'horizon 2010-2050**

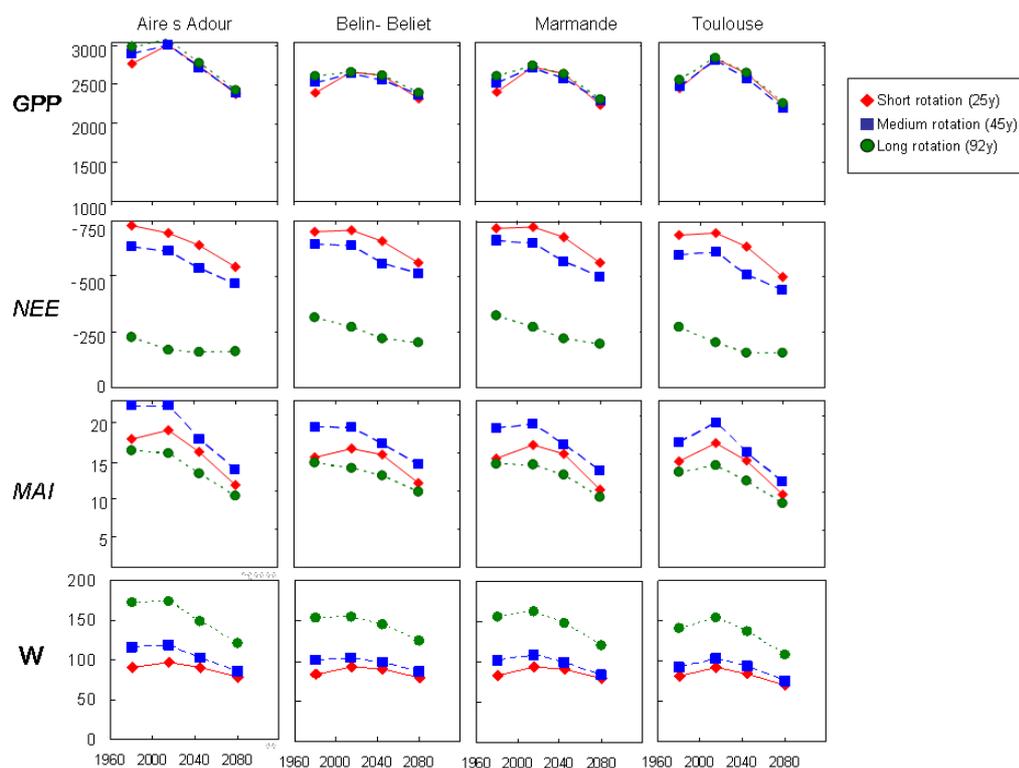
---

**Les pratiques de sylviculture et d'aménagement actuellement, en vogue ou présentées comme autant d'options par les groupes de travail ad hoc affectent toutes de façon directe ou indirecte les termes du bilan hydrique et donc l'importance des sécheresses et de leurs effets. Globalement, l'intensification sylvicole conduit à réduire la surface de sol occupée par des couverts forestiers matures au profit de jeunes peuplements ce qui diminue l'évapotranspiration réelle et augmente la lame d'eau disponible pour l'écoulement et les crues hivernales. Elle produit aussi des couverts à plus fort indice foliaire, consommant plus d'eau en été ce qui les conduit aussi à subir des sécheresses plus importantes. Ces effets doivent être appréciés dans le contexte des scénarios régionaux de changement climatique, qui sans exception prédisent une aggravation plus ou moins rapide et intense des sécheresses. Une telle aggravation est d'ailleurs observée sur l'évolution du climat depuis les cinquante dernières années.**

**La gestion des ressources en eau (surfaces d'eau libre et nappe plio-quadernaire et infra) à l'échelle des unités hydrographiques régionales est une composante essentielle de la productivité et de la santé de la forêt des Landes. Les besoins saisonniers en eau des forêts du massif doivent être pris en compte dans les projets d'aménagements forestier, hydraulique ou d'infrastructure. Il est également essentiel de tenir compte de l'impact réciproque de la forêt sur le climat régional et des effets de la fragmentation du manteau forestier (coupes rases, grandes cultures, urbanisme) sur le microclimat.**

31. Projections climatiques B2 et A2 2010-2050.

Il ressort de toutes les modélisations de scénarios climatiques régionalisés disponibles (CERFACS et ARPEGE-Climat) que les scénarios SRES proposés par le GIEC s'accompagnent d'une aggravation des déséquilibres hydriques saisonniers dans le sud-ouest, avec de fortes disparités locales (Loustau et al. 2005, Ciais et al. 2010, et résultats à venir du projet ANR CLIMATOR). La tendance suivie actuellement (scénario A2) suit une trajectoire conduisant à une diminution de pluviométrie allant de 0 à 30 % en 2050 (Déqué et Cloppet, 2010). Le critère de sécheresse est donc pertinent pour apprécier la durabilité écologique des options de sylviculture et d'aménagement proposées. Les simulations proposées par le projet CARBOFOR montrent que les effets de sécheresse augmentent avec l'intensification (figure 4).



**Figure 4.** Evolution 1960-2080 de la production primaire brute (*GPP*), du bilan net en carbone de l'écosystème (*NEE*,  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ), de l'incrément net annuel en volume (*MAI*,  $\text{m}^3 \text{stemwood}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ) et du stock de biomasse moyen (*W*,  $\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de forêts de Pin maritime conduites suivant trois niveaux d'intensification et à quatre points de grille ARPEGE . Valeurs moyennes calculées pour l'ensemble de la révolution de la plantation à la coupe rase pour des conditions stationnelles favorables (Azote foliaire =  $1.5 \text{ gN}\cdot 100\text{g dm}^{-1}$ ,  $\text{RU} = 150 \text{ mm}$ ) avec le modèle GRAECO. La diminution observée à compter de 2015 est un effet de l'aggravation des sécheresses. Tirée de Ciais et al. (2010).

### 3.2 Interaction des techniques de sylviculture et d'aménagement sur le bilan hydrique

Potentiellement, chacune des opérations courantes de sylviculture ou d'aménagement affecte l'un ou l'autre des termes du bilan hydrique et par voie de conséquence les risques de sécheresse (tableau 1).

**Tableau 1.** Effet de l'intensification sur les composantes du bilan hydrique et l'occurrence des sécheresses. Pour chaque opération considérée, les symboles indiquent l'impact d'une intensification, en noir de façon directe, en gris les effets indirects.

Composantes du bilan hydrique	Drainages agricole et forestier plus efficace	Préparation du sol plus lourde	sous-solage	dégagements et débroussaillage	Fertilisation plus importante	Eclaircies plus dynamiques	coupe finale avancée
T	<b>0</b> -	<b>0</b> +	+	-	++	-	-
I	<b>0</b> -	<b>0</b> +	+	-	+	-	-
E	-		-	+	-	+	+
D	+	+	<b>0</b> -	<b>0</b> +	<b>0</b>	+	+
C	-	?	<b>0</b> -	<b>0</b>	<b>0</b>	-	-
RU	<b>0</b>	+	+	+	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Sécheresse	+	?	-	-	++	<b>0</b> -	?

- La préparation du sol affecte à la fois la composante sol elle-même (albedo, propriétés hydrauliques et thermiques, évaporation du sol, réserve utile et drainage), et la croissance racinaire initiale des arbres, ce qui modifie leur accès à la réserve en eau du sol et à la nappe phréatique le cas échéant. La destruction ou l'enfouissement de la litière et des couches organiques de l'humus susceptibles de jouer un rôle de « mulch » accélèrent les pertes en eau du sol par évaporation directe et les effets des sécheresses dans les jeunes peuplements. Ces effets vont croissant avec l'intensification de cette préparation depuis un travail localisé à la plantation, au labour en ligne et au labour « croisé » en plein. Dans les itinéraires très intensifiés, la perte de matière organique provoquée par des labours et travaux superficiels répétés amène une diminution de la capacité de rétention en eau du sol. A titre d'opinion personnelle, j'observe que les effets réputés bénéfiques du labour pour la préparation du sol demandent encore à être établis sur une base scientifique.
- Le sous solage, en permettant aux racines des arbres d'explorer des horizons profonds du sol autrement inaccessibles, peut constituer une option technique susceptible de réduire les risques et la vulnérabilité des arbres à la sécheresse et aux canicules. Cependant cette technique demande elle aussi à être évaluée en conditions opérationnelles et semble redevable d'adaptations techniques appropriés au contexte de reboisement sur podzol à « alios » (horizon B induré).
- Le débroussaillage, mécanique ou chimique, et dans une moindre mesure le dépressage réduisent drastiquement la transpiration des jeunes peuplements où la végétation accompagnatrice est dominante (thèse V. Moreaux, 2009-2011).
- En peuplement adulte, la destruction de la végétation du sous étage semble aussi bien réduire les pertes transpiratoires en saison estivale (Cf. les données sur la consommation d'eau par le sous bois en forêt de Pin de Loustau et Cochard, 1991, Berbigier et al. 1992, Jarosz et al ; 2008) mais cet effet est transitoire. La suppression de la végétation en sous étage permet toutefois de réduire la compétition pour l'eau au profit des arbres. Réduisant par ailleurs le risque d'incendie et la compétition pour l'azote disponible, elle est à même de permettre un gain de productivité de 10 à 15% à court terme. Le débroussaillage mécanique réduit cependant la biodiversité végétale de façon importante en favorisant les espèces sociales les plus compétitives (Molinie). De plus, l'impact à long terme du débroussaillage sur les pertes par lessivage des éléments nutritifs les plus mobiles comme l'azote est très probablement négatif. La suppression du sous-étage semble aussi constituer un facteur aggravant des dégâts de tempête. En peuplement intensifié, une substitution des espèces de sous-bois sans intérêt économique par des plantes fixatrices d'azote semblerait ici une voie à explorer.
- La fertilisation en accélérant la croissance et l'indice foliaire augmente l'évapotranspiration des arbres tout en pouvant aussi diminuer leur rapport racine sur feuille (Trichet et al. 2008). Elle est contre indiquée dans les stations exposées à des sécheresses (où elle ne semble par ailleurs n'avoir qu'un effet réduit voire nul). La fertilisation en phosphates dont l'effet est continu et s'étale sur plusieurs années ne pose pas de problème particulier. En revanche les apports d'azote minéral ont un effet brutal et à très court terme, pouvant accroître la vulnérabilité des peuplements à la sécheresse et sont à éviter. l'épandage de boues domestiques stabilisées est une alternative intéressante.
- Les coupes d'éclaircies ont peu d'effet sur le bilan hydrique du sol mais elles améliorent le statut hydrique des arbres sélectionnés en augmentant le volume de sol disponible pour leur système racinaire.
- Le raccourcissement des révolutions augmente la proportion de jeunes peuplements et de coupes rases dans le paysage, où l'évaporation est de 30 à 50% plus faible ; il augmente donc le drainage et les écoulements à l'échelle régionale comme l'ont montré plusieurs études hydrologiques comparatives de bassins versants forestiers européens.
- Le choix des essences n'est pas indifférent pour les risques de sécheresse mais il semble que leurs effets sur le bilan hydrique soient surtout liés aux paramètres de structure des peuplements : indice foliaire, hauteur, densité. Les espèces envisagées par les groupes de

travail différent par leur réponse au déficit hydrique. Les espèces « évitantes » comme le pin maritime réduisent précocement leur consommation d'eau ce qui ralentit la déplétion de la réserve du sol et atténue ainsi la sévérité des sécheresses. Les espèces « tolérantes » comme les chênes ou le cèdre maintiennent une consommation d'eau normale même en situation de sécheresse ce qui amène à des niveaux de sécheresse accrus.

De façon synthétique et sans doute trop générale, on peut estimer que relativement à une sylviculture « proche de la nature » l'intensification produit des peuplements à forte croissance aérienne qui sont plus exposés et plus vulnérables aux sécheresses. En réduisant le couvert forestier et en accroissant les surfaces en coupe à blanc et les jeunes peuplements, à couvert non fermé, l'intensification atténue l'impact régulateur du manteau forestier sur l'hydrologie régionale et conduit à des pics de crue hivernaux plus importants, une atmosphère plus sèche et des peuplements adultes plus fragiles.

### 3.3 Aménagement territorial

#### *Impacts hydrologiques*

La répartition géographique au sein du massif des Landes de Gascogne des différents usages des terres : futaies de pins maritime standards, forêts de conservation, cultures forestières intensives (TCR, TCCR), cultures, urbain et infrastructure, évolue rapidement. Ces types d'usage se caractérisent par des propriétés biophysiques, aérodynamiques, écologiques et des besoins en eau et des émissions de polluants très contrastés. Bien que l'on ne dispose pas d'évidence scientifiquement établie sur ce point, les connaissances disponibles incitent à penser que leur distribution dans l'espace influence fortement la topographie et la dynamique de la nappe phréatique plio-quadernaire qui est une composante essentielle du régime hydrique des sols et de la productivité forestière régionale. Cette nappe superficielle constitue en quelque sorte un supplément de réserve utile qui permet aux peuplements forestiers du plateau landais de maintenir leur production en période printanière et estivale. Les prélèvements domestiques, urbains ou d'origine agricole (200 à 250 mm durant la saison de croissance pour le maïs) conduisent inévitablement à une diminution à la fois locale et générale du niveau supérieur de cette nappe. Cet abaissement constitue un risque d'aggravation des sécheresses et conduit à une perte nette de productivité forestière, sans parler de la disparition des zones humides dont l'intérêt écologique et environnemental est bien connu et qui est observée et bien documentée (cf. études et rapports du parc régional naturel des Landes de Gascogne). Signalons aussi qu'à l'inverse, la présence d'une nappe dans la zone racinaire en hiver diminue l'impédance mécanique du sol ce qui aggrave l'impact des tempêtes (chablis). Elle provoque aussi une mortalité racinaire plus ou moins importante à laquelle les jeunes arbres en régénération sont particulièrement vulnérables.

#### *Impacts atmosphériques*

La fragmentation du manteau forestier régional provoquée à la fois par le type de conduite sylvicole en vigueur (peuplements équiens) qui crée une mosaïque de peuplements de différents âges et de parcelles nues et donc une longueur de lisière franche importante, et par l'intercalation de cultures, infrastructures routières et ferroviaires, lotissements, fermes photovoltaïques, affecte le régime d'écoulement atmosphérique et ses échanges avec ces différents types de surface. Cet effet se répercute sur le méso et les microclimats « ressentis » par les arbres, les cultures mais aussi les humains fréquentant cet espace. Entre un modèle d'espace régional recouvert d'un manteau forestier continu et, à l'extrême inverse, un modèle de mosaïque de grandes cultures, de fragments boisés et de tissus urbains de rugosité inférieure et à moindre potentiel régulateur sur le plan hydrologique, la différence de méso climat régional serait significative avec des contrastes saisonniers plus accentués, et un régime de vent au sol moins tamponné. Ce type d'impact fait l'objet de recherches développées à l'INRA de Bordeaux et au CNRM de Toulouse qui permettront d'estimer ce type d'effet de façon quantitative dans les années à venir. En tout état de cause, on

doit rechercher par précaution à diminuer autant que possible la longueur de lisière au km<sup>2</sup> et la fragmentation des écosystèmes forestiers naturels ou cultivés, aussi bien pour le développement d'une forêt plus résistante aux aléas climatiques que pour le confort des humains fréquentant la région.

## Références

---

- Berbigier P., D. Loustau and A. Diawara, 1991. Etude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. *Annales des Sciences Forestières* 22(2): 157-177.
- Berbigier P., J.M. Bonnefond and P. Mellmann, 2001. CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agric For Meteorol* 108(3): 183-197.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A., Friedlingstein P., Grunwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.-M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.-F., Sanz M.-J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437: 529-533, doi:10.1038/nature03972.
- Ciais P., Loustau D., Bosc A., Ogée J., Dufrêne E., François C., Viovy N., Delage F., Piao S. 2010. How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. In « Forest, carbon cycle and climate change », D. Loustau coord., Eds Quae, Versailles, 2010.
- Choisnel E., D. Payen and P. Lamarque, 1987. Climatologie de la Zone du projet HAPEX - MOBILHY, Météorologie Nationale, Paris (FRA), 75 p.
- Delzon S. and D. Loustau, 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agric For Meteorol* 129(3-4): 105-119.
- Déqué M., Cloppet E. 2010. Possible future climates over France. In « Forest, carbon cycle and climate change », D. Loustau coord., Eds Quae, Versailles, 2010.
- Eininger O., 1993. Irrigation de peuplements de pins maritimes avec des eaux usées de papeterie : croissance et comportement hydrique des arbres. Rapport de stage de 3ème année, ENITHP Angers, INRA-Bordeaux pp. 43.
- Granier A. and D. Loustau, 1994. Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agric For Meteorol* 71(1/2): 61-81.
- Granier A., D. Loustau and N. Bréda, 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent of climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science* 57: 755-765.
- Jarosz N., Y. Brunet, E. Lamaud, M. Irvine, J.M. Bonnefond and D. Loustau, 2008. Carbon dioxide and energy flux partitioning between the understorey and the overstorey of a maritime pine forest during a year with reduced soil water availability. *Agric For Meteorol* 148(10): 1508-1523.
- Loustau D., A. Granier and F. El-Hadj-Moussa, 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de Pins maritimes. *Annales des Sciences Forestières* 47(6): 599-618.
- Loustau D. and H. Cochard, 1991. Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia caerulea* (L) Moench). *Annales des Sciences Forestières* 48(1): 29-45.
- Loustau D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogee, H. Davi, C. Francois, E. Dufrene, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C.I. Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage, 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiol* 25(7): 813-823.
- Loustau D., Berbigier P., Guillet B., Disnar J.-R., Balesdent J., Bosc A., Bonnefond J.-M., Lamaud E., Brunet Y., 2008. Carbon balance of a maritime pine forest over a 11-year long period. 10 year anniversary of EUROFLUX project. Hyytiälä, Finland, décembre 2008, communication orale.
- Medlyn B.E., E. Dreyer, D. Ellsworth, M. Forstreuter, P.C. Harley, M.U.F. Kirschbaum, X. Le Roux, P. Montpied, J. Strassmeyer, A. Walcroft, K. Wang and D. Loustau, 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant Cell Environ* 25(9): 1167-1179.
- Medlyn B.E., E. Dreyer, D. Ellsworth, M. Forstreuter, P.C. Harley, M.U.F. Kirschbaum, X.I. Roux, P. Montpied, J. Strassmeyer, A. Walcroft, K. Wang and D. Loustau, 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of Photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell and Env.* 25(9): 1167-1179.
- Stella P., Lamaud E., Brunet Y., Bonnefond J.-M., Loustau D., Irvine M., 2009. Simultaneous measurements of CO<sub>2</sub> and water exchanges over three agroecosystems in South-West France. *Biogeosciences Discuss.*, 6: 2489-2522.
- Trichet P., D. Loustau, C. Lambrot and S. Linder, 2008. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. *Annals of Forest Science* 65(8).