



**HAL**  
open science

# Impact écologique de la tempête et conséquences sur les cycles de l'eau et du carbone

Denis Loustau, Marie Guillot

► **To cite this version:**

Denis Loustau, Marie Guillot. Impact écologique de la tempête et conséquences sur les cycles de l'eau et du carbone. Innovations Agronomiques, 2009, 6, pp.1-6. 10.17180/zy26-5r74 . hal-02665391

**HAL Id: hal-02665391**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02665391v1>**

Submitted on 31 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## **Impact écologique de la tempête et conséquences sur les cycles de l'eau et du carbone.**

D. Loustau, M. Guillot

INRA, UR1263 EPHYSE, Centre de Bordeaux-Aquitaine, 71 avenue Edouard Bourlaux, 33 140 Villenave d'Ornon.

Correspondance : Loustau@pierroton.inra.fr

### **Résumé**

Le milieu physique et le régime sylvicole de la forêt de production de Pin maritime du Sud-Ouest ainsi que l'aménagement et le partage de l'espace rural concerné avec des cultures et les zones urbaines en forte croissance la rendent particulièrement vulnérable aux tempêtes et expliquent en partie l'intensité des dommages observés à la suite des tempêtes récentes. Le cycle de l'eau, l'hydrologie et le cycle du carbone des forêts endommagées par les tempêtes ont été considérablement modifiés par les épisodes Martin et Klaus. Leur évapotranspiration peut être diminuée de moitié, l'engorgement hivernal du sol accru et les écoulements vers les eaux de surface augmentés. Le bilan net de carbone de l'écosystème est inversé, les dommages subis pouvant transformer l'écosystème de puits en source de carbone en réduisant sa capacité de photosynthèse et en augmentant la minéralisation du carbone organique et la quantité de biomasse apportée au sol. Les tempêtes exceptionnelles comme Lothar, Martin, Gudrun, Klaus ou le cyclone Katrina ont ainsi affaibli très sensiblement le bilan net de carbone continental de l'Europe et des Etats-Unis, respectivement. Face à l'incertitude concernant l'aggravation du régime des tempêtes, il est donc prudent d'identifier et d'évaluer les différentes options d'adaptation des forêts du massif des Landes de Gascogne aux tempêtes.

**Mots-clés** : tempête, bilan hydrique, bilan de carbone, pin maritime, sylviculture

### **Abstract**

The physical constraints and the current management of the maritime Pine forest in Southwestern France, together with the land sharing with crops and urban areas make this forest particularly vulnerable to winter windstorms. These conditions explained most of the considerable damages brought about by recent storms in 1999 and 2009. The water and carbon cycles in forests damaged by winter windstorms have been profoundly affected following these major storms ("Martin" and "Klaus"). The stand evapotranspiration may be reduced by a factor of two, the duration of soil flooding in winter increased and runoff into surface network augmented. The net carbon balance of ecosystem can be reverted from a sink into a source due to canopy destruction and photosynthesis suppression, enhancement of soil carbon mineralisation and large surplus of biomass input into the soil. Indeed, the exceptional storms such as Lothar, Martin (1999), Gudrun (2005), Klaus (2009) or Katrina (2005) have weakened significantly the net carbon balance of Europe or US. Facing the uncertainty about the possible shortening of return time of severe storms in the future, it is wise to identify and evaluate the possible options for adapting the Landes de Gascogne forest to winter windstorms.

**Keywords**: water balance, carbon balance, windstorm, maritime pine, forest management

## Introduction

Les cycles du carbone et de l'eau en forêt se distinguent des autres écosystèmes terrestres comme les cultures et les prairies par plusieurs caractéristiques clés. Les stocks de carbone et d'eau retenus par le couvert, le sol, l'humus et, dans le cas du carbone, par la biomasse des arbres sont élevés et présentent des temps de renouvellement longs, faisant des forêts des écosystèmes « régulateurs » de ces cycles. Les propriétés fonctionnelles des écosystèmes forestiers, comme leur albédo, la dynamique annuelle de leur indice foliaire, la capacité d'interception des précipitations, leur rugosité ou le taux d'assimilation maximal du carbone contrastent aussi fortement les écosystèmes forestiers des autres usages des terres. Le terme générique de « forêt » recouvre une grande diversité de situations écologiques et sylvicoles. Notamment, le mode de gestion des forêts exploitées européennes est le principal facteur différenciant leur fonctionnement biogéochimique.

La forêt de Pin maritime du Sud-Ouest est gérée de façon à en optimiser la production en bois. Elle est organisée en peuplements réguliers monospécifiques où les arbres sont semés ou plantés en rang et dont la densité est contrôlée par éclaircies successives. Le développement de la strate herbacée est limité par des débroussaillages réguliers. Les sols sont aménagés par drainage et travail superficiel, ils sont le plus souvent fertilisés en phosphate à l'installation du peuplement. Ce mode d'exploitation produit un paysage forestier fragmenté en classes d'âge et interrompu par les cultures agricoles, les voies de transport et le mitage urbain, qui expose donc un périmètre de lisière forestière considérable. Dans les milieux mal drainés, le sol de texture sableuse et saturé d'eau voire ennoyé par la nappe phréatique en hiver présente à cette saison une résistance mécanique minimale. L'ensemble de ces facteurs entraîne une vulnérabilité importante de la forêt de production de Pin maritime aux tempêtes hivernales et explique les dommages considérables provoqués par les épisodes successifs « Martin » en 1999 et « Klaus » en 2009.

Suivant les cas, les peuplements touchés ont été partiellement ou totalement endommagés, majoritairement par renversement de la souche et un volume variable de sol et d'humus qui lui sont attachés. A ces modifications du couvert et du sol provoquées directement par les chablis, s'ajoutent celles apportées indirectement par les travaux sylvicoles de débardage et restauration, éventuellement de coupe rase et régénération. Les tempêtes affectent donc de façon drastique le cycle de vie de cet écosystème et son fonctionnement. Dans cette revue, nous dressons un état résumé des connaissances concernant leurs impacts sur les cycles du carbone et de l'eau à partir des données disponibles sur la forêt de Pin maritime et de quelques données de la littérature.

## Fonctionnement hydrique et cycle du carbone en forêt de Pin maritime :

L'énergie absorbée par un couvert forestier adulte en forêt des landes représente annuellement environ 2500 MJ m<sup>-2</sup>. Cette énergie est dissipée pour partie par évapotranspiration, le flux d'énergie correspondant s'élevant à 1450 à 1650 MJ m<sup>-2</sup> et pour partie par un flux de chaleur « sensible » qui représente quant à lui 500 à 700 MJ m<sup>-2</sup> annuels (Berbigier et al., 2001). L'évapotranspiration annuelle d'une forêt adulte de Pin maritime du Sud Gironde et des Landes peut être estimée à une valeur située entre 600 et 700 mm. Les précipitations annuelles sont supérieures de 300 à 400 mm par an à l'évapotranspiration et ce surplus est infiltré et drainé vers la nappe phréatique et les exutoires du plateau landais, la rivière Leyre, les petites rivières et lacs côtiers.

Ce bilan moyen est sujet à de fortes variations interannuelles provoquées par les fluctuations interannuelles des précipitations et leur répartition saisonnière. Les années 1989 à 1991, 1996, 1997, 2002, 2003, 2005 et 2006 ont été autant d'années « sèches » à fort déficit hivernal (2002) ou printanier et estival qui ont provoqué une réduction de transpiration des arbres en été (Loustau et al., 1990, Delzon et Loustau, 2005) et une augmentation correspondante de leur flux de chaleur « sensible »,

entraînant un échauffement et un assèchement de la masse d'air qui renforce les effets de sécheresse (« feed back » positif).

Le bilan hydrique de la parcelle varie de façon importante en fonction du type de biotope considéré. La présence de la nappe phréatique dans la frange racinaire du sol durant les mois de printemps et de début d'été atténue ces effets dans les zones les plus mal drainées du massif, la lande « humide » à Molinie, qui présente un sous-étage de végétation herbacée abondante. L'enracinement des arbres, limité précisément par la présence de cette nappe, y est superficiel. Les zones mieux drainées où la nappe est profonde de plusieurs mètres et classées comme lande « sèche » sont plus exposées au déficit hydrique et présentent une productivité plus faible. Les arbres développent un enracinement profond (Achat et al., 2008) qui accroît la réserve utile prospectée, sans toutefois que cet effet soit comparable à l'apport par la nappe observé en lande humide.

Ce fonctionnement énergétique et hydrique des peuplements varie au cours de leur cycle de vie. La quantité totale d'énergie absorbée est environ 50% plus faible et le flux de chaleur plus élevé de 40 à 50% dans une coupe rase et pour un jeune peuplement, l'évapotranspiration étant réduite en proportion (Tableau 1). Le flux de drainage sous une coupe rase ou un jeune peuplement peut donc être pratiquement le double de la valeur atteinte sous une forêt adulte. Il semble aussi qu'un jeune peuplement de moins de 5 ans où la végétation accompagnatrice est très développée, puisse être plus sensible à la sécheresse en raison d'un enracinement plus superficiel (Stella et al., 2009). La transition vers le fonctionnement d'un peuplement adulte s'opère en 8 à 12 années suivant la vitesse de croissance et de reconstitution du couvert. Au cours du vieillissement ultérieur du peuplement, le bilan hydrique global de la parcelle n'est pas modifié sensiblement. Cependant, la répartition de l'évapotranspiration entre les arbres et le sous-bois évolue de façon sensible avec l'âge et la hauteur du peuplement, les arbres réduisant leur transpiration tandis que le sous-étage l'accroît en proportion (Delzon et al., 2004 ; Delzon et Loustau, 2005).

**Tableau 1.** Comparaison des flux nets annuels échangés par une coupe rase post tempête Martin (1999) en 2001 et un peuplement adulte avant et après la tempête Martin (données Berbigier et al. (2001) et Kowalski et al. (2003)).

		Site de Bilos	Site du Bray		(1)
		Coupe rase	Peuplement semé en 1970		
			avant tempête	après tempête	
Bilan net de C -CO <sub>2</sub>	gC.m <sup>-2</sup>	290	-575	-498	
Production primaire brute	gC.m <sup>-2</sup>	727	2255	2025	
Respiration totale	gC.m <sup>-2</sup>	996	1680	1527	
Rayonnement utile incident	mol photons.m <sup>-2</sup>	9227	9296	9308	
Rayonnement net absorbé	MJoules.m <sup>-2</sup>	1956	3006	2746	
Température moyenne	°C	13.2	15.0	13.4	
Evapotranspiration	mm	358	666	624	
Précipitations	mm	875	930	808	
Drainage	mm	517	264	184	

(1) compté positivement en émission, négativement en prélèvement

Nous ne disposons pas encore d'élément comparatif validé pour analyser quantitativement l'impact des tempêtes Martin et Klaus sur ce fonctionnement. Un projet supporté par le Gip-Ecofor, l'université de Bordeaux-1 et l'INRA (unité EPHYSE) vise précisément à comparer le fonctionnement hydrologique de deux sous bassins versants de la Leyre affectés par les deux tempêtes et permettra d'apporter de tels éléments. Les observations disponibles montrent que le fonctionnement hydrique et énergétique global

d'une forêt adulte de lande humide partiellement endommagée par la tempête Martin n'avait pas été modifié de façon détectable (Berbigier, communication personnelle), ce qui peut s'interpréter par l'effet compensateur du sous-bois. Le couvert arborescent se referme d'ailleurs en l'espace de trois à quatre années (Gélin, 2004). Bien que la tempête affecte indifféremment les arbres suivant leur taille, à l'inverse des éclaircies « par le bas » pratiquées dans ce massif, cette absence d'effet notable est assez comparable à une éclaircie sylvicole classique. Il n'en va évidemment pas de même quand le niveau de dommage amène le gestionnaire à couper la totalité des arbres et à régénérer la parcelle. La tempête entraîne alors un effet comparable à celui d'une coupe rase : une diminution de moitié de l'évapotranspiration (Kowalski et al., 2003) et une augmentation corrélative de l'engorgement du sol et du drainage, sous réserve que le réseau de drainage soit à même de fonctionner.

L'effet sur l'hydrologie des bassins versants endommagés est relativement bien documenté dans la littérature. La disparition des arbres adultes par chablis ou coupe entraîne une aggravation des pics de crue aux exutoires des bassins versants endommagés à plus de 30% (Beschta et al., 2000 ; Tremblay et al., 2008). La comparaison de bassins versants forestiers affectés de façon contrastée par le cyclone Lothar en Suisse montre une augmentation de 60% de l'écoulement à l'exutoire l'année suivante (Badoux et al., 2006). Dans le cas de la forêt des landes, un tel accroissement est susceptible de se répercuter sur la morphologie du réseau hydrographique et d'accroître l'érosion régressive.

## Cycle du carbone

L'effet d'un chablis sur une forêt peut se décomposer en deux parties. D'une part, il active le flux de minéralisation du carbone organique : la biomasse apportée au sol (arbres renversés et débris divers) accroît la quantité de carbone disponible pour la décomposition et la respiration et la vitesse de minéralisation du carbone du sol est accrue par les perturbations du microclimat du sol induites par le renversement des souches ou le débardage des grumes, celui-ci étant généralement plus perturbateur pour le sol et l'humus qu'un débardage normal en raison de l'enchevêtrement des arbres abattus. D'autre part, il diminue voire supprime la photosynthèse en détruisant une grande partie du feuillage exposé réduisant l'interception du rayonnement utile et l'assimilation photosynthétique du CO<sub>2</sub>. Quand le niveau de dommage conduit à une coupe totale des arbres de la parcelle, la tempête amène de fait un raccourcissement du cycle de vie du peuplement. L'âge optimal à la coupe finale prévu pour permettre d'optimiser la production moyenne n'est pas atteint. Un régime de perturbations à forte fréquence ne permet donc pas de mettre en œuvre une sylviculture maximisant les potentialités de production d'un biotope donné.

Berbigier (communication personnelle) a cependant montré que dans un peuplement de Pin maritime de 29 ans affecté jusqu'à 23% des tiges par chablis et dont les arbres endommagés ont été extraits de la parcelle, on ne détecte pas d'effet sensible sur les échanges nets globaux de CO<sub>2</sub>. Localement, le microclimat et le fonctionnement de la végétation sous les trouées ouvertes sont certes modifiés mais cet effet est temporaire. Comme pour le fonctionnement hydrique, l'effet du chablis s'apparente dans ce cas à celui d'une éclaircie. Les échanges de CO<sub>2</sub> des arbres disparus sont compensés par les arbres restants et le sous-bois. Lorsque les arbres endommagés sont laissés sur place, leur décomposition ultérieure accroît les émissions de CO<sub>2</sub> de la parcelle jusqu'à leur décomposition et minéralisation totale qui peut s'étaler sur plusieurs dizaines d'années (Knohl et al., 2002).

En revanche, le renversement de la majorité des arbres et la régénération d'un peuplement nouveau provoquent l'inversion des flux de CO<sub>2</sub> (Kowalski et al., 2004 ; Knohl et al., 2002 ; Lindroth 2009). De puits de carbone net, l'écosystème perturbé se transforme en source nette pour une durée très variable suivant la rapidité de la régénération, la vitesse de croissance du peuplement suivant et la quantité de biomasse laissée sur site. Cette durée est estimée à 8 à 12 années dans le cas du Pin maritime mais peut être réduite à une à deux années dans le cas d'un taillis à forte croissance ou au contraire s'étaler

sur plus de 40 ans en forêt boréale (Magnani et al., 2007). Une sylviculture à courte rotation est donc plus résiliente aux tempêtes qu'un mode de gestion à rotation allongée.

La tempête 'Martin' en 1999 a profondément affecté le cycle du carbone du massif forestier de Pin maritime en provoquant une baisse de 16% du stock sur pied équivalente à 20 années d'assimilation nette par la même forêt (Meredieu et al., 2005). Cette réduction a fait passer le bilan de la futaie de Pin maritime en place de puits à source de carbone sur la période 1988-2000<sup>1</sup>. Un tel effet a aussi été observé pour le cyclone Katrina, qui a réduit le puits annuel de carbone de la forêt U.S. dans une fourchette de 50 à 140 % (Chambers et al., 2007), dans le cas de la tempête Lothar, dont Lindroth et al. (2009) ont calculé récemment qu'elle a réduit à elle seule de 30% le puits biosphérique de carbone européen. De même, les 270 000 ha de forêt renversés par la tempête Gudrun ont émis au cours de la seule année 2006 l'équivalent de 6 à 9 années de fixation nette de carbone de cette surface (Lindroth et al., 2009). Ces données démontrent que le régime de perturbation subi par les forêts est un facteur majeur des cycles biogéochimiques et du stockage de carbone par les forêts.

## Perspectives

Les scénarios climatiques disponibles restent incertains sur la fréquence future des tempêtes exceptionnelles comme Lothar, Martin, Gudrun ou Klaus. Outre un réchauffement et l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ils prédisent en Aquitaine une accentuation du contraste saisonnier de précipitations amenant des sécheresses et canicules plus graves et plus fréquentes et le maintien d'un excès de précipitations en hiver. Face à ces tendances annoncées, les modèles de fonctionnement hydrique et du cycle du carbone en forêt de Pin maritime ont apporté des résultats importants en montrant les principales interactions entre les modes de conduites des peuplements forestiers et les effets du climat (Loustau et al., 2005, 2007). A partir de ces premiers résultats, les projets de recherche européens Carbo-Extreme (<http://www.carbo-extreme.eu/>) et l'infrastructure européenne ICOS (<http://icos-infrastructure.ipsl.jussieu.fr/>), déclinés en Aquitaine par la future plate forme ECOSYLVE sont destinés à mieux connaître et observer l'évolution de l'environnement atmosphérique et ses effets sur la forêt landaise afin de mettre au point une sylviculture adaptée à ces évolutions futures. Les voies d'amélioration à explorer sont nombreuses. En priorité, nous préconisons de cibler les facteurs déterminant l'ancrage racinaire en zone humide (optimisation du drainage, sous solage), l'aménagement des lisières et l'organisation du paysage (cf. Brunet, cette conférence), la gestion du sous-étage et le mélange des essences et des classes d'âge. L'accueil à partir de 2009 d'un nouveau programme de recherche sur la physique de l'ancrage racinaire des arbres à l'INRA de Bordeaux contribuera à la réponse à ce questionnement. Le développement dès 2009 d'une plate forme régionale d'évaluation d'itinéraires de conduite sylvicole, ECOSYLVE (INRA- Région Aquitaine) permettra de mettre à la disposition de la profession l'information nécessaire à une adaptation dynamique de la sylviculture face au changement climatique.

## Références bibliographiques

- Achat D., Bakker M., Trichet P., 2008. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. *Journal of Forest Research* 13, 165-175.
- Badoux A., Jeisy M., Kienholz H., Lüscher P., Weingartner R., Witzig J., Hegg C., 2006. Influence of storm damage on the runoff generation in two sub-catchments of the Sperbelgraben, Swiss Emmental. *European Journal of Forest Research* 125, 27-41.

---

<sup>1</sup> Ce bilan exclut le carbone stocké dans les produits exportés hors parcelle.

- Berbigier P., Bonnefond J.M., Mellmann P., 2001. CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology* 108, 183-197.
- Beschta R.L., Pyles M.R., Skaugset A.E., Surfleet C.G., 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology* 233, 102-120.
- Chambers J.Q., Fisher J.I., Zeng H., Chapman E.L., Baker D.B., Hurtt G.C., 2007. Hurricane Katrina's Carbon Footprint on U.S. Gulf Coast Forests. *Science* 318, 1107-1107.
- Delzon S., Sartore M., Burlett R., Dewar R., Loustau D., 2004. Hydraulic responses to height growth in maritime pine trees. *Plant Cell and Environment* 27, 1077-1087.
- Delzon S., Loustau D., 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology* 129, 105-119.
- Gélin M., 2004. Caractérisation et dynamique temporelle de la structure spatiale du peuplement du site atelier du Bray 1989-2002. Rapport de fin d'études d'ingénieur-maître, Institut Egid, Université de Bordeaux-3, 39 p + annexe.
- Knohl A., Kolle O., Minayeva T.Y., Milyukova I.M., Vygodskaya N.N., Foken T., Schulze E.D., 2002. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology* 8, 231-246.
- Kowalski S., Sartore M., Burlett R., Berbigier P., Loustau D., 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Global Change Biology* 9, 1051-1065.
- Kowalski A.S., Loustau D., Berbigier P., Manca G., Tedeschi V., Borghetti M., Valentini R., Kolari P., Berninger F., Rannik U., Hari P., Rayment M., Mencuccini M., Moncrieff J., Grace J., 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10, 1707-1723.
- Lindroth A., Lagergren F., Grelle A., Klemetsson L., Langvall O., Weslien P., Tuulik J., 2009. Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Global Change Biology* 15, 346-355.
- Loustau D., Granier A., El-Hadj-Moussa F., 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de Pins maritimes. *Annales des Sciences Forestières* 47, 599-618.
- Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogée J., Davi H., Francois C., Dufrêne E., Déqué M., Cloppet E., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Pignard G., Hamza N., Granier A., Bréda N., Ciais P., Viovy N., Delage F., 2005. Modelling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology* 25, 813-823.
- Loustau D., Ogée J., Dufrêne E., Déqué M., Dupouey J.L., Badeau V., Viovy N., Ciais P., Desprez-Loustau M.L., Roques A., Chuine I., Mouillot F., 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. In: P.H. Freer-Smith, M.S.J. Broadmeadow, J.M. Lynch (Eds.) *Forestry and climate change*, pp. 143-150.
- Magnani F., Mencuccini M., Borghetti M., Berbigier P., Berninger F., Delzon S., Grelle A., Hari P., Jarvis P.G., Kolari P., Kowalski A.S., Lankreijer H., Law B.E., Lindroth A., Loustau D., Manca G., Moncrieff J.B., Rayment M., Tedeschi V., Valentini R., Grace J., 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447, 848-850.
- 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 Discussions* 6, 2489-2522 [www.biogeosciences-discuss.net/2489/2009/](http://www.biogeosciences-discuss.net/2489/2009/)
- Tremblay Y., Rousseau A.N., Plamondon A.P., Lévesque D., Jutras S., 2008. Rainfall peak flow response to clearcutting 50% of three small watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec. *Journal of Hydrology* 352, 67-76.