



# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SES IMPACTS SUR LES FORÊTS WALLONNES

Recommandations aux décideurs,  
propriétaires et gestionnaires

Une première version de ce document coordonnée par Christian LAURENT (DNF) et Dominique PERRIN (FUSAGx) a été réalisée en 2009 par :

BEMELMANS Daniel (UCL – Unité des Eaux et Forêts), CARNOL Monique (ULg – Ecologie végétale et microbienne), CLAESSENS Hugues (FUSAGx – Gestion des ressources forestières et milieux naturels), DE CANNIERE Charles (ULB – Lutte biologique et Ecologie spatiale), FRANCOIS Louis (ULg – Institut d'astrophysique et de géophysique), GERARD Etienne (DNF – Direction des Ressources Forestières), GREGOIRE Jean-Claude (ULB – Lutte biologique et Ecologie spatiale), HERMAN Marc (DNF – Direction des Ressources Forestières), LAURENT Christian (DNF – Direction des Ressources Forestières), MARBAIX Philippe (UCL – Institut d'astronomie et de géophysique Georges Lemaître), PEREMANS Vincent (Cabinet du Ministre Lutgen), PERRIN Dominique (FUSAGx – Chargé de cours suppléant 'global changes'), PONETTE Quentin (UCL – Earth and Life Institute), QUEVY Brieuc (Cabinet du Ministre Lutgen), RONDEUX Jacques (FUSAGx – Gestion des ressources forestières et milieux naturels), SERUSIAUX Emmanuël (ULg – Taxonomie Végétale et Biologie de la Conservation), VAN YPERSELE Jean-Pascal (UCL – Institut d'astronomie et de géophysique Georges Lemaître), VINCKE Caroline (UCL – Earth and Life Institute)

La présente version a été mise à jour en 2017 sous la coordination de Sophie HIMPENS (DNF), Christian LAURENT (DNF) et Didier MARCHAL (DNF) par les personnes suivantes :

CLAESSENS Hugues (ULg Gembloux ABT – Gestion des ressources forestières), GREGOIRE Jean-Claude (ULB – Lutte biologique et Ecologie spatiale), GUNS André (AWAC – Agence wallonne de l'air et du climat), HIMPENS Sophie (DNF – Direction des Ressources forestières), HOYAUX Julien (AWAC – Agence wallonne de l'air et du climat), LAURENT Christian (DNF – Direction des Ressources forestières), MARBAIX Philippe (UCL – Earth and Life Institute, et participant à la plateforme wallonne pour le GIEC), MARCHAL Didier (DNF - Direction des Ressources forestières), MERTENS Patrick (DEMNA – Direction du Milieu forestier), PONETTE Quentin (UCL – Earth and Life Institute), SERVAIS Alain (DNF – Comptoir Forestier) , VANCAYEMBERG Frank (DEMNA – Direction du Milieu forestier), VINCKE Caroline (UCL – Earth and Life Institute).

# SOMMAIRE

Introduction.....	5	Cas particulier des filières des produits du bois...	39
Le changement climatique en Wallonie.....	7	Analyse du cycle de vie de la biomasse et critères de durabilités.....	40
Impacts attendus sur les forêts.....	17	Comptabilisation des forêts dans le cadre du protocole de Kyoto et du paquet climat-énergie européen.....	43
Impacts sur les écosystèmes forestiers.....	18	Recommandations aux gestionnaires forestiers..	47
- Physiologie.....	18	- Introduction.....	47
- Phénologie foliaire.....	23	- Axes d'amélioration.....	53
- Distribution des espèces.....	25	Conclusions.....	67
- Adaptation.....	27	Bibliographie.....	71
- Processus biogéochimiques.....	30	Annexe.....	79
- Interactions.....	31		
La fonction "Puits de carbone".....	33		
- Cycle global du carbone.....	33		
- Biomes et piégeage du carbone.....	35		
- Forêt wallonne et stockage du carbone.....	38		





# INTRODUCTION

Il est maintenant admis que des changements climatiques, dus aux émissions massives de gaz à effet de serre (GES), sont en cours et que les impacts de ces changements sur l'environnement et les sociétés humaines seront considérables (IPCC, 2014). Depuis les années 1950, de nombreux changements ont déjà été observés tels que le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan, la diminution de la couverture de neige et de glace, l'élévation du niveau des mers et l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre. Et les émissions mondiales en 2010 dépassaient de 31 % les niveaux

de 1990 (IPCC, 2014). Phénomène mondial, les changements climatiques ont et auront des conséquences majeures sur les écosystèmes et la biodiversité, ainsi que sur les activités humaines (par exemple l'agriculture, l'urbanisme et l'économie), et nos besoins de base : l'accès à l'eau et la sécurité alimentaire. Les écosystèmes forestiers et les biens et services qu'ils fournissent occupent à cet égard une place particulière, en raison du long terme qui caractérise le cycle forestier et du rôle de la forêt dans les grands flux d'énergie et de matière (carbone, eau, éléments).

Ce document, dont la première édition a été établie à la demande du Ministre wallon compétent pour les forêts, a pour objectifs :

- de dresser une synthèse sur les évolutions prévisibles – dans l'état actuel des connaissances – des paramètres climatiques dans notre région, et de leurs conséquences sur nos forêts, sur le secteur forestier ou d'autres activités qui en dépendent ;
- d'analyser les politiques et les actions à recommander ou à proscrire, pour la prévention des effets du changement sur les forêts (adaptation), tout en tenant compte du rôle de la forêt et du secteur forestier sur le cycle du



carbone (potentiel d'atténuation du changement) : parmi ces actions, certaines sont déjà en place, d'autres sont à développer ; les lacunes, en termes de connaissances et d'actions seront identifiées ;

- de préparer l'élaboration, à l'usage des propriétaires et gestionnaires, de recommandations pour leurs choix de gestion.

Ce document a pour vocation principale de proposer des actions concrètes à l'échelle du gestionnaire forestier. Il sera pris en compte dans l'élaboration plus générale d'une stratégie en matière de développement durable de la forêt wallonne (Programme Forestier Régional) en cours d'élaboration.

Les auteurs insistent également sur le caractère évolutif de ce document. Cette deuxième édition en constitue une mise à jour. Il s'agit d'une synthèse opérationnelle sur les éléments les plus récents de la

littérature scientifique. Les liens entre changements climatiques et écosystèmes terrestres sous leurs différentes facettes (préservation de la biodiversité, production de matière, impact sur le cycle du carbone, etc.) font l'objet de nombreux programmes de recherche, qui contribueront à amender cet état des lieux.



# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN WALLONIE

Dans ce paragraphe, nous résumons les principaux impacts attendus, extraits du cinquième rapport d'évaluation du GIEC, adopté en 2014<sup>1</sup> et d'autres sources de données (NASA, NOAA, ...). Nous complétons les informations du GIEC par quelques informations obtenues à l'échelle régionale (AWAC, 2011).

La Wallonie subit des influences maritimes à l'ouest de la région et une influence mixte, selon le moment, entre influences continentales et maritimes au centre et à l'est de la région. Plus de deux

tiers (68 %) des massifs forestiers de Wallonie et particulièrement les plus anciens se situent à l'ouest de la Wallonie, sous une forte influence maritime. Un quart des massifs subissent une influence mixte et 11 % des massifs subissent une forte influence continentale. Ce contexte géographique est significatif dans l'analyse des conséquences du changement climatique sur les forêts wallonnes. Sous les conditions continentales, les changements sont moins compensés par des masses d'air humide.

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) ou IPCC en Anglais (Intergovernmental Panel on Climate Change) est une organisation qui a été mise en place en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et par le Programme pour l'Environnement des Nations Unies. Son rôle est « d'évaluer l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique d'origine humaine ». Parmi les tâches du GIEC figure l'établissement de rapports faisant l'état des lieux en matière de changement climatique, depuis les causes jusqu'aux politiques et mesures pour l'atténuer et s'y adapter.

---

<sup>1</sup> Ce rapport est disponible sur le site [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

## TEMPÉRATURE

Le premier paramètre concerné est la température. Selon le GIEC, la température moyenne à la surface de la terre en 2012 a augmenté en moyenne de 0,85 °C par rapport à 1880. Depuis 2001 nous avons rencontré 16 des 17 années les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1850<sup>2</sup>. 2016 fut l'année la plus chaude jamais enregistrée, battant le record précédent de 2015. La tendance se poursuit en 2017 avec des températures élevées pour les 3 premiers mois de l'année<sup>3</sup>.

Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1400 ans (IPCC, 2014). Au cours du dernier million d'années,

un réchauffement aussi rapide et à l'échelle planétaire n'a pu être que très atypique, et n'a peut-être jamais eu d'équivalent, bien que certains réchauffements régionaux rapides aient eu lieu. Les prévisions de l'évolution de la température établies à partir de modèles prévoient, selon différents scénarios socio-économiques des émissions des gaz à effet de serre, une augmentation de la température en moyenne mondiale comprise entre 0,3 °C et 4,8 °C au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période 1986-2005 (ces valeurs prennent en compte une marge d'incertitude relative à la modélisation du climat, voir détails dans IPCC (2014) ; pour les mêmes scénarios économiques, la moyenne

des modèles climatiques donne une gamme de 1 à 3,7 °C).

Cette augmentation de la température ne sera cependant pas uniforme à l'échelle du globe. En effet, elle sera plus marquée aux plus hautes latitudes, ainsi que le montrent les cartes de la Figure 1. D'ici 2035, nous pourrions connaître une augmentation des températures comprise entre 0,6 et 0,9 °C par rapport à 1986-2005. Il est de plus très probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur augmenteront (IPCC, 2014).

En Belgique, nous disposons de statistiques climatiques issues des mesures de la station d'Uccle. La

<sup>2</sup> <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015>

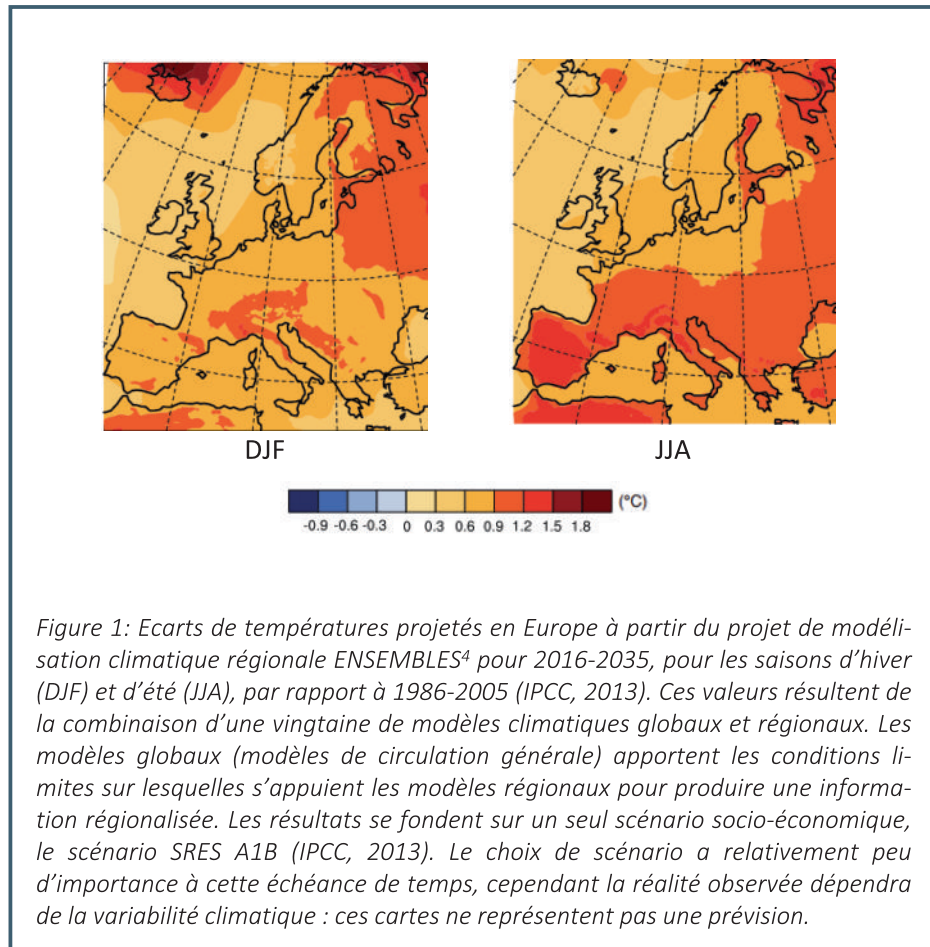
<sup>3</sup> <https://climate.nasa.gov/news/2575/march-2017-was-second-warmest-march-on-record/>

<sup>4</sup> Le projet ENSEMBLES constitue une base de données complète et récente pour traiter des changements climatiques à l'échelle régionale en Europe. Ce projet, qui a duré 5 ans (2004-2009), s'est notamment appuyé sur les précédents travaux de recherche européens que sont PRUDENCE, STARDEX, MICE ou encore DEMETER ([http://www.awac.be/pdf/media/d45dc9\\_97c534cbdfdafc54dcee21feea9f51c.pdf](http://www.awac.be/pdf/media/d45dc9_97c534cbdfdafc54dcee21feea9f51c.pdf))



Figure 2 reprend l'évolution des anomalies de la température moyenne annuelle depuis 1833. L'augmentation de la température moyenne annuelle à Uccle (+ 1,5 °C à + 2,0 °C) est supérieure à celle de la moyenne mondiale, ce qui est cohérent avec la relation entre la latitude et les variations de température, un réchauffement plus rapide sur les continents et une contribution locale potentiellement liée à l'urbanisation.

Au niveau global, au cours des deux prochaines décennies, un réchauffement moyen de l'ordre de 0,2 °C par décennie est prévu, pour une large gamme de scénarios d'émissions de GES, en absence de mesures d'atténuation (IPCC, 2007). Cette valeur est du même ordre de grandeur que le taux de réchauffement observé actuellement. Même dans l'hypothèse, purement théorique, d'une stabilisation des concentrations de GES au niveau



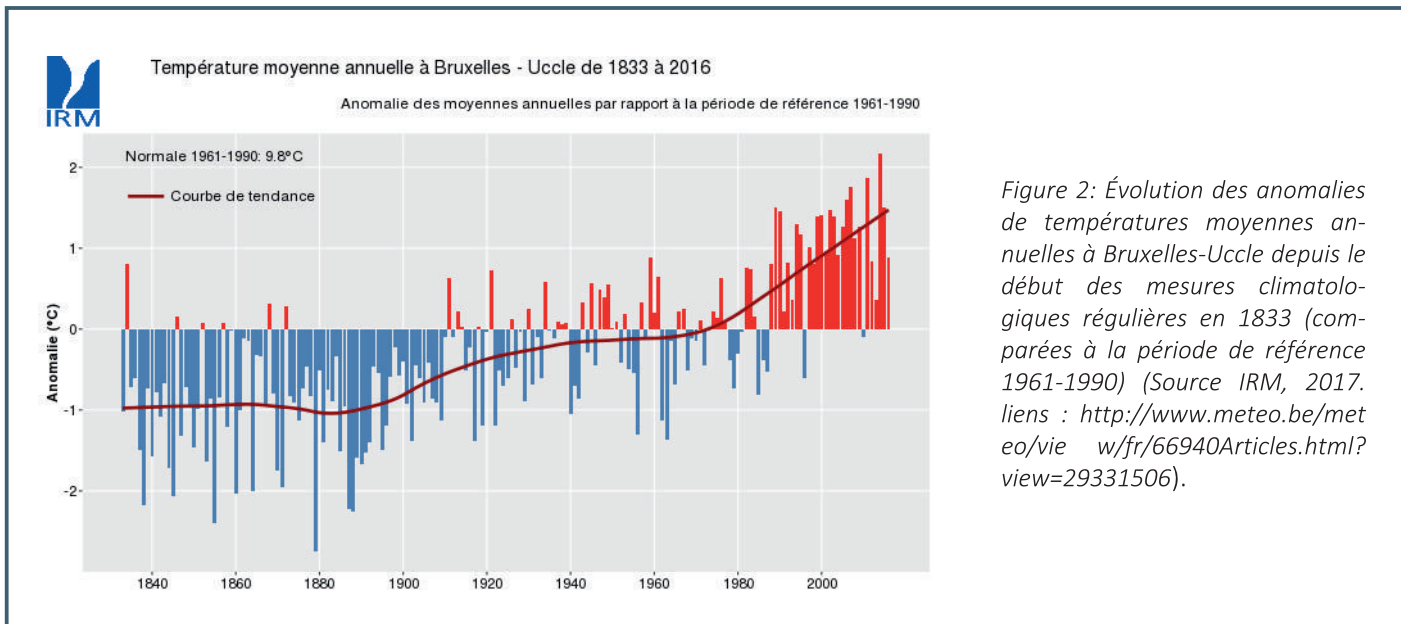



Figure 2: Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles à Bruxelles-Uccle depuis le début des mesures climatologiques régulières en 1833 (comparées à la période de référence 1961-1990) (Source IRM, 2017. liens : [http://www.meteo.be/meteo/vie\\_w/fr/66940Articles.html?view=29331506](http://www.meteo.be/meteo/vie_w/fr/66940Articles.html?view=29331506)).

de 2000, un réchauffement de l'ordre de quelques dixièmes de degrés serait inévitable.

L'évolution future du climat, en particulier celle des températures, dépendra en partie de la saison et de

la localisation précise en Wallonie, notamment en fonction du relief. Par exemple, l'étude MIRA (2015) suggère un réchauffement en hiver et en été au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, en moyenne sur un ensemble de simulations relatives à différents scénarios,

qui atteint un maximum d'environ 0,5 °C de plus au sud et à l'est de la Wallonie par rapport au centre du pays. La variabilité climatique ou des changements locaux (urbanisation ou autre changement d'occupation du sol) pourraient



induire des changements ou fluctuations plus importantes au niveau d'une station spécifique. D'autres simulations ont été réalisées plus récemment mais n'ont pas été disponibles à temps pour inclusion dans le présent rapport.

En ce qui concerne l'avenir climatique de la Wallonie, les tendances générales recensées au vu des projections de différents modèles, en l'absence de politiques de réductions d'émissions importantes au niveau planétaire, sont reprises dans le Tableau 1.

La Haute-Ardenne pourrait par exemple connaître en 2100 des températures similaires aux températures actuelles du nord du sillon Sambre-et-Meuse, avec cependant des mois d'hiver un peu plus froids : plus aucun mois ne présenterait de températures moyennes négatives et la période de végétation pourrait être en outre allongée de 3 à 4 semaines.

Ce réchauffement est manifeste tant en été qu'en hiver. Nous devons dès lors nous préparer à une diminution progressive des hivers froids et de la couverture neigeuse associée, tout au moins en l'absence de maîtrise rapide des émissions mondiales. Si le réchauffement reste très modéré, il ne sera néanmoins pas sans conséquences, mais ne devrait pas faire disparaître toute période « froide » car la variabilité naturelle du temps est importante.

D'une façon plus générale, si une partie substantielle du réchauffement est quasiment inéluctable, il reste difficile d'imaginer maintenant à quel point ce réchauffement pourrait bouleverser complètement nos conditions climatiques. Une difficulté de la gestion adaptative est donc de préparer la forêt à des changements mal définis, mais potentiellement importants, qui pourraient se produire à moyen et long terme, alors qu'on espère

pourtant qu'ils n'auront pas lieu. Au niveau planétaire, il serait en effet irresponsable de ne pas poursuivre et intensifier les efforts visant à limiter fortement les émissions.

## PRÉCIPITATIONS

La diminution des périodes d'enneigement est à mettre en parallèle avec les modifications projetées du régime des précipitations, qui affecteraient l'Europe de façon très contrastée selon les régions et les saisons, ainsi que le montrent les cartes de la Figure 3.

Selon le GIEC, nous pouvons nous attendre en Belgique à une augmentation moyenne de 5 à 10 % de précipitations en hiver et une diminution des précipitations estivales comprise entre 0 et 10 % d'ici 2035. A cette échelle de temps, il faut cependant être attentif à la variabilité naturelle du climat, qui s'ajoute au

*Tableau 1 : Avenirs climatiques de la Wallonie par rapport à la période de référence 1961-1990 (AWAC, 2011). Ces résultats sont basés sur des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre correspondant typiquement à une poursuite des tendances actuelles, et ne correspondent donc pas à ce que l'on peut attendre dans le cadre d'une réduction importante des émissions<sup>5</sup>.*

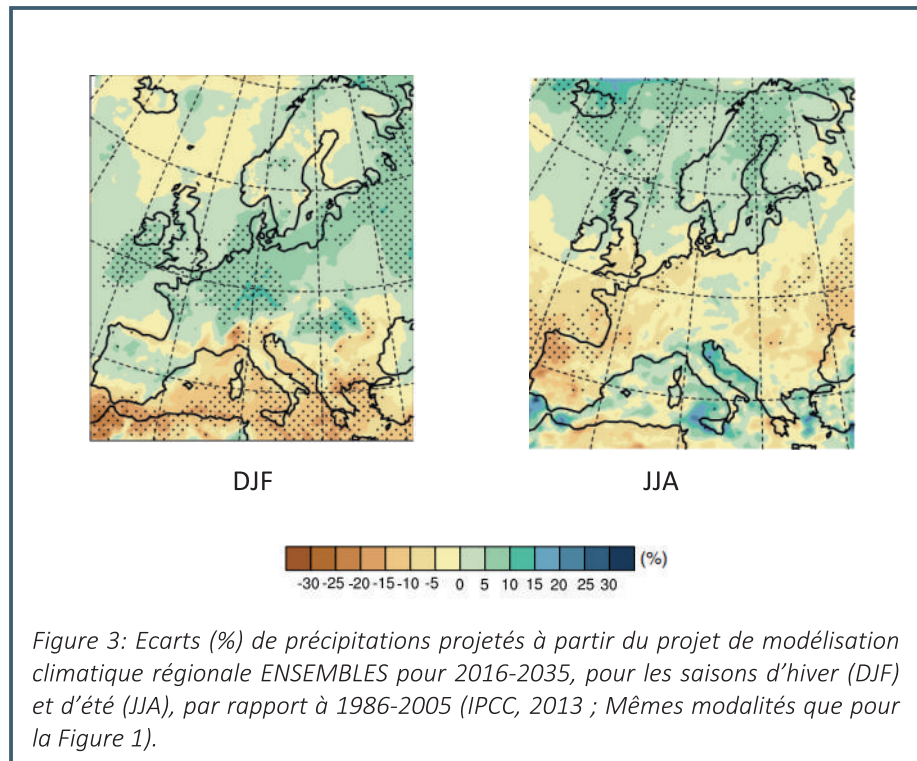
## LES TENDANCES GÉNÉRALES

Un climat plus chaud	Élévation généralisée des températures moyennes : entre + 1,5 °C et 2,8 °C en 2050, entre + 2 °C et + 4 °C en 2085.
Des hivers moins froids et plus pluvieux	Augmentation progressive et forte des précipitations hivernales selon les projections moyennes avec respectivement + 7 %, + 13,4 % et + 21,5 % pour les horizons 2030, 2050 et 2085. Toutes les projections s'accordent sur une augmentation généralisée des températures en hiver : entre + 0,7 et 2,2 °C en 2030, + 1,5 et + 2,6 °C en 2050, + 2,7 et 3,3 °C en 2085.
Des étés plus chauds et secs	Baisse généralisée des précipitations estivales : diminution progressive des volumes de précipitations selon les projections moyennes : - 3,2 %, - 8,4 % et - 16,9 % pour les horizons 2030, 2050 et 2085. Toutes les projections indiquent une élévation des températures estivales : entre + 0,1 et 2,3 °C en 2030, + 1,8 et + 3,2 °C en 2050, + 1,3 et 4,6 °C en 2085.
Des saisons intermédiaires plus douces	Augmentation généralisée des températures au printemps et en automne. Les projections s'accordent à partir de 2085 sur une augmentation du volume de précipitations en automne entre + 2,7 % et + 8,4 %.
Vers plus d'épisodes de pluies intenses, notamment en hiver	Tendance à l'augmentation du nombre de jours annuels de très fortes précipitations : entre + 10 et + 40 % d'augmentation à l'horizon 2085 suivant les projections.
Des canicules estivales plus fréquentes	Les projections s'accordent à partir de 2050 sur une augmentation du nombre de jours de canicules estivales : entre 0,41 et 18 jours supplémentaires suivant les projections.

changement climatique et influencera aussi le climat que nous connaissons. D'ici la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle, nous devons nous préparer à une hausse de 3 à 30 % des précipitations hivernales et une évolution des précipitations estivales comprise entre un statu quo et une baisse pouvant atteindre environ 50 %. De nouveau, ces estimations concernent des scénarios où les émissions continuent d'augmenter fortement, sans politique climatique, et les changements les plus larges pourraient être évités si des efforts substantiels sont réalisés au niveau mondial.

A l'échelle de la Wallonie, le plus remarquable pourrait être la disparition du pic estival de précipitations : les précipitations diminueraient en moyenne de 15 % au cours de la période de végétation.

Par ailleurs, les différents phénomènes météorologiques extrêmes



<sup>5</sup> En particulier, ces projections ne correspondent donc pas à ce qui peut être attendu dans le cadre de la mise en œuvre de l'accord de Paris conclu au sein de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, c'est-à-dire de limiter le réchauffement global bien en-dessous de 2 °C au-dessus de la valeur préindustrielle et de poursuivre les efforts pour rester sous 1,5 °C.





enregistrés ces dernières années (précipitations intenses suivies d'inondations, sécheresses, canicules), considérés de façon isolée, peuvent difficilement être attribués de façon irréfutable au changement climatique. Cependant, selon l'évaluation présentée dans le cinquième rapport du GIEC, d'ici 2100, la fréquence de ce type d'événements extrêmes devrait très probablement augmenter (GIEC, 2014), ce qui affecterait fortement la vulnérabilité des écosystèmes forestiers (Allen *et al.*, 2010 ; Trumbore *et al.*, 2015).

## EN GUISE DE SYNTHÈSE

Durant le XXI<sup>ème</sup> siècle, quel que soit le scénario, les températures devraient augmenter. L'ampleur de cette augmentation dépend toutefois de l'efficacité des politiques d'atténuation mises en œuvre. D'après le GIEC (2014), sans effort d'atténuation supplé-

mentaire, on aurait une augmentation de la température moyenne à la surface du globe en 2100 d'environ 3,7 à 4,8 °C par rapport à la moyenne pour la période 1850-1900. Simultanément, le régime des précipitations s'orientera probablement vers des précipitations hivernales plus importantes et des déficits hydriques estivaux plus sévères, interrompus par des pluies intenses.

Les forêts européennes vont donc être affectées par la sécheresse, soit à travers une tendance à long terme d'augmentation de l'aridité (telle que celle observée en Méditerranée), soit durant des événements climatiques extrêmes (exemples de l'été 2003, du printemps 2011 et de l'année 2015). Par ailleurs, outre ces manifestations directes des changements climatiques, il faudra également tenir compte de leurs interactions avec d'autres facteurs


tels que les dépôts azotés et les polluants par exemple.

En ce qui concerne l'avenir climatique de la Wallonie, les tendances générales attendues au vu des projections de différents modèles sont (AWAC, 2011) :

- un climat plus chaud mais pas forcément moins pluvieux en moyenne ;
- des hivers moins froids et plus pluvieux ;
- des étés plus chauds et plus secs ;
- des saisons intermédiaires plus douces.

Ainsi, la Wallonie devrait aussi subir une élévation graduelle des températures au fil du XXI<sup>ème</sup> siècle, selon les projections moyennes. Si le signe du changement est fortement incertain en termes de volume de précipitations annuelles, il est clair que la saisonnalité des précipitations devrait être plus marquée : accrois-





sement des pluies pendant la période hivernale, diminution pendant la période estivale. Une nette tendance à l'augmentation des pluies intenses se dégage également, tout comme l'accroissement des épisodes caniculaires (AWAC, 2011).



# IMPACTS ATTENDUS SUR LES FORÊTS

On s'attend à ce que le changement climatique affecte considérablement la distribution, la composition et le fonctionnement des écosystèmes forestiers dans le monde en raison de la capacité de migration et d'adaptation limitée des arbres. La constitution de forêts résistantes et résilientes représente donc un enjeu majeur pour la gestion forestière<sup>6</sup>.

En première ligne face aux aléas climatiques, les secteurs agricole et forestier vont être confrontés à un double défi dans les années à venir. D'une part, il leur faudra adapter en profondeur leurs pratiques pour faire face aux impacts du réchauf-

fement, d'autre part, ils devront répondre aux attentes de plus en plus pressantes de la société.

La vitesse du changement climatique en cours et prévu pour le siècle prochain est plus grande que les changements historiques. Les adaptations que les forêts ont opérées dans le passé pourraient ne plus être possibles aujourd'hui. De plus, l'urbanisation et l'action d'autres stress (pollution, exploitation intensive, surdensité de grand

gibier...) peuvent limiter les capacités d'adaptation, de résistance et de résilience des écosystèmes forestiers. Dans le cadre de la gestion forestière, il importe par conséquent de tenir compte des facteurs contribuant à la résilience et à la résistance de l'écosystème<sup>7</sup>.

Par ailleurs, nous sommes dans un contexte de changement climatique où, inévitablement, l'énergie fossile est appelée à devenir de plus en plus rare et chère, ce qui aura notam-

---

<sup>6</sup> FORBIO Climate, potentiel d'adaptation de forêts diversifiées face au changement climatique, [https://www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/FORBIO\\_fr.pdf](https://www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/FORBIO_fr.pdf)

<sup>7</sup> Résilience : capacité d'un écosystème à retrouver son équilibre initial après des perturbations naturelles ou anthropiques ; Résistance : capacité de l'écosystème à résister à des perturbations naturelles ou anthropiques.



ment des conséquences sur tous les modes de transports. Dans le futur, il faudra donc être en mesure de produire en partie localement trois ressources indispensables au fonctionnement de nos sociétés : notre nourriture, notre énergie et nos matériaux de construction. Tout l'enjeu sera donc de maintenir un équilibre adéquat entre ces trois types de production.

Dans le cadre d'une gestion durable, un équilibre devra également être trouvé entre la fonction de production et les autres fonctions des écosystèmes forestiers (protection des sols et des eaux, conservation de la biodiversité, fonctions sociales).

Il existe deux stratégies globales et complémentaires pour répondre au changement climatique : l'adaptation et l'atténuation.

L'adaptation est un processus d'ajustement au climat actuel ou fu-

tur et aux effets des changements climatiques. Elle vise à prendre les mesures nécessaires pour réduire la vulnérabilité des systèmes humains et naturels aux conséquences de ces changements.

L'atténuation cherche à agir sur les causes du changement climatique. Pour y parvenir, il faut prendre des mesures qui préviennent ou retardent l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère en limitant les sources d'émission actuelles et futures et en renforçant les puits potentiels de GES. Les recommandations essayent de tenir compte de ces deux réponses face au changement climatique.

Il conviendra également, dans les recommandations proposées, de bien différencier celles qui s'adressent à toutes les formations boisées, celles qui sont à limiter aux

plantations de production et celles qui s'imposent pour les formations plus naturelles.


Dans ce chapitre, nous aborderons successivement les impacts attendus du réchauffement sur les forêts, le rôle de puits de carbone et le cas particulier des produits du bois.

## **IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS**

Les impacts potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes peuvent se manifester principalement à cinq niveaux : physiologie, phénologie, distribution des espèces, adaptation et processus biogéochimiques.

### ***Physiologie***

A court terme, les augmentations combinées d'une part de la température et de la durée de la période de végétation qui en dé-



coule, et d'autre part, des concentrations en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourraient avoir des conséquences positives sur la quantité de biomasse produite. A moyen terme, selon la majorité des études, des facteurs limitants vont freiner cette tendance, au même titre que les événements météorologiques extrêmes qui vont considérablement perturber les cycles normaux de la végétation, comme par exemple, les épisodes de sécheresse prolongée qui vont affecter les rendements. Les hivers seront plus humides et les étés plus secs : il est clair que toutes les cultures ne résisteront pas à ces phénomènes de la même manière.

En ce qui concerne les écosystèmes forestiers, diverses études scientifiques ont montré que l'enrichissement en CO<sub>2</sub> a stimulé la croissance des arbres, dans un premier temps du moins. Cependant, à moyen terme, cette augmentation de croissance sera limitée,

d'une part par la fertilité chimique du sol et, d'autre part, par la sécheresse relative induite par l'augmentation des températures et la modification du régime des précipitations. Cette évolution en deux temps se montre clairement dans les cernes de croissance du hêtre en Wallonie (Latte *et al.*, 2015). Celle-ci a progressivement augmenté au cours du XX<sup>ème</sup> siècle parallèlement à l'augmentation de la température moyenne, mais est fortement affectée depuis trois décennies sous l'effet de la répétition de saisons de végétation exceptionnellement chaudes et/ou sèches (Figure 4). En outre, les interactions entre les changements de températures, de précipitations, des dépôts azotés et de la concentration en CO<sub>2</sub> rendent difficiles certaines extrapolations.

Actuellement, la productivité en Wallonie est souvent limitée par la teneur minérale des sols ou des

problèmes d'alimentation en eau (excessive ou insuffisante selon les périodes). Ces limites devraient être accentuées par les changements de teneur en CO<sub>2</sub> et de températures (carences induites et accentuation de l'engorgement hivernal et de la dessiccation estivale dans les sols à régime hydrique alternatif).

Les évolutions des températures et des précipitations décrites plus haut, notamment en période de végétation, laissent présager une augmentation significative des risques de stress hydrique.

Sur base de données de l'IRM spatialisées sur une maille de 500 mètres (Van der Perre *et al.*, 2015), et s'étalant de janvier 1986 à décembre 2005 inclus, le bilan hydrique climatique estival (P-ETP), un indicateur de stress hydrique climatique, a été calculé pour la Wallonie (Figure 5).

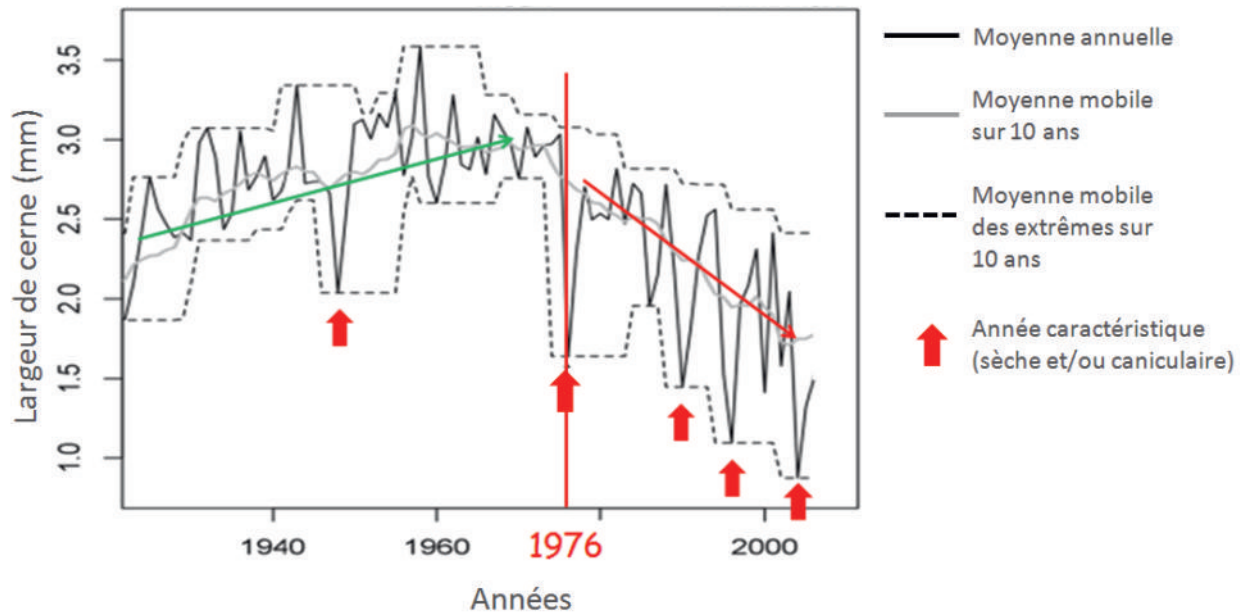


Figure 4 : Variation interannuelle de la largeur de cerne du hêtre sous l'effet du climat (Latte et al., 2016). Le graphique montre l'augmentation de croissance du hêtre en partie due à l'augmentation de la température et de la saison de végétation et des teneurs en  $\text{CO}_2$  (droite de tendance verte), puis la diminution et l'instabilité de la croissance sous l'effet de conditions climatiques difficiles (années caractéristiques) et de plus en plus fréquentes (droite de tendance rouge).

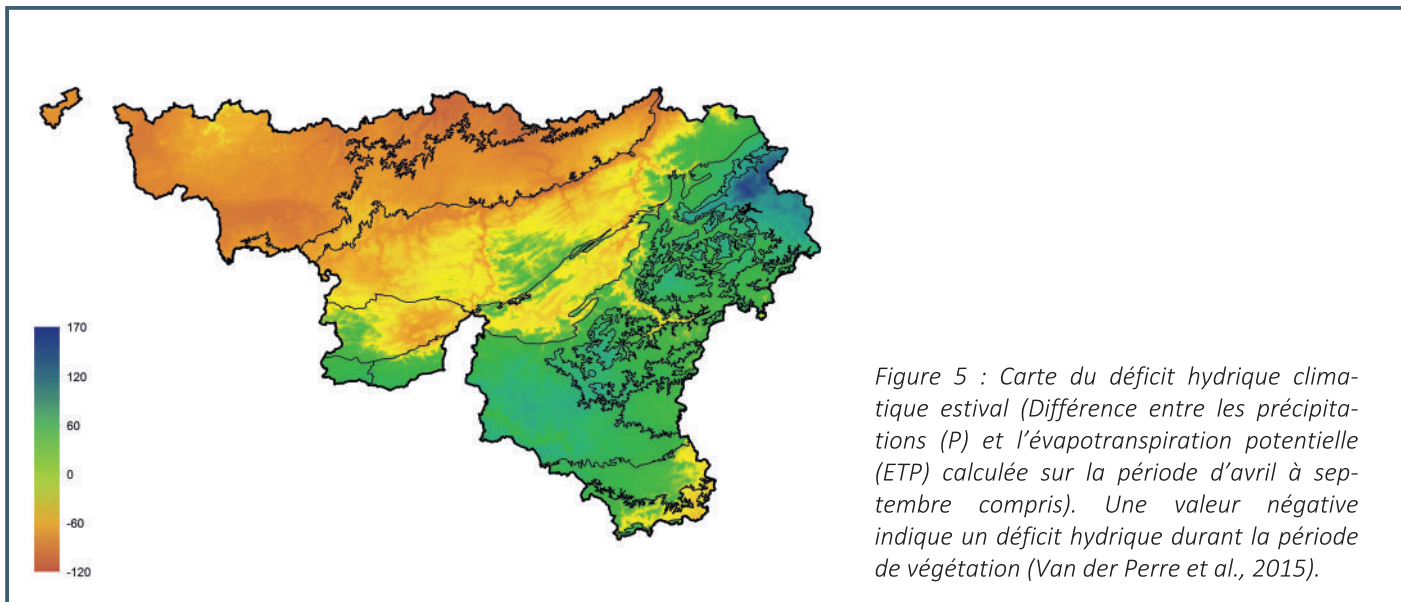


A noter que, selon l'IRM, la variabilité interannuelle des précipitations mensuelles est d'environ 40 à 50 % selon les mois, ce qui signifie que l'on ne doit s'attendre que 2 années sur 3 à des quantités de précipitations mensuelles comprises entre 50 et 150 % des valeurs nor-

males. Selon le rapport PRUDENCE (Christensen *et al.*, 2007), cette variabilité des précipitations est cependant susceptible de s'accroître à l'avenir.

Selon Van der Perre *et al.* (2015), le bilan d'eau (la différence entre la

pluviosité et l'évapotranspiration de la forêt feuillue), au cours de la période de végétation, se traduisait comme un déficit de l'ordre de 70 mm au nord du Sillon Sambre et Meuse, de 30 mm sur les plateaux mosans et par un excédent de 30 à 90 mm en Ardenne selon l'altitude



(valeurs pour la période 1986-2005, Figure 5). Au vu du Tableau 2, de nombreux sols auraient donc des difficultés à pallier ce déficit.

En effet, l'alimentation en eau des arbres dépend d'une part des stocks d'eau utile disponibles dans le sol en début de saison, et d'autre

part des caractéristiques d'enracinement des différentes espèces (Tableau 2), et ce, d'autant plus que le bilan hydrique est négatif.


La profondeur d'enracinement détermine la profondeur maximale de prélèvement de l'eau et des éléments nutritifs dans le profil de

sol. Elle dépend de facteurs liés au sol (par exemple, texture, compaction, obstacles physiques, présence ou non de nappe de surface) et des types d'enracinements spécifiques à chaque espèce. Les chênes (à racine pivot), par exemple, présentent des profondeurs d'enracinement en général

*Tableau 2 : Stocks d'eau utile disponibles dans le sol en début de saison de végétation, estimés en moyenne pour quelques types de sol caractéristiques et représentatifs, et selon la profondeur théorique d'enracinement (Modélisation d'après Ridremont et al., 2011) (1 mm correspond à 1 l/m<sup>2</sup> de précipitation).*

Grands types de sols*	Région naturelle	Profondeur d'enracinement (mm)		
		40 cm	80 cm	200 cm
Limons éoliens (type Aba)	Région limoneuse	-	130	320
Sols bruns caillouteux (type Gbbr, avec 25 % de cailloux)	Ardenne	50	100	250
Sols bruns très caillouteux (type Gbbr, avec 50 % de cailloux)	Ardenne	33	66	300
Limons sableux (type Sba)	Lorraine	-	90	215
Sols argileux lourds (type Udb)	Famenne	50	100	250
Sols bruns caillouteux calcaires (type Gbbk avec 25 % de cailloux)	Calestienne	50	100	-

\*Types de sols selon la codification de la Carte Numérique des sols de Wallonie (CNSW)



proches de 2 m (Köstler *et al.*, 1968 ; Bréda, 1993). Le hêtre, par contre, a un enracinement plus superficiel. Notons que les enracinements peuvent tout de même dépasser 2 m (valeur maximale indiquée dans le Tableau 2) : les systèmes racinaires des espèces décidues en sols profonds peuvent atteindre plusieurs mètres dans des conditions favorables.

Les risques de déficit seront donc probablement élevés dans de nombreuses situations, surtout mais pas uniquement pour les essences à faible profondeur d'enracinement. Des études dendrochronologiques effectuées en Wallonie ont effectivement montré que le hêtre, surtout, et le chêne pédonculé présentent une sensibilité accrue aux événements climatiques, et ce depuis le milieu des années 1980 (Manise et Vincke, 2014 ; Latte *et al.*, 2015). Le rôle très important de la réserve en eau du sol sur la sensi-

bilité au climat a été montré pour ces deux feuillus mais également pour l'épicéa et le douglas (Manise et Vincke, 2014).

Un stress hydrique prolongé ou un épisode de canicule influencent également la résistance des arbres aux ravageurs et pathogènes. Chez les insectes xylophages, on observe un développement accru suite à un déficit hydrique important ; les phyllophages par contre semblent bénéficier de l'augmentation de l'azote dans les tissus de l'hôte lorsque le déficit est modéré (Rouault *et al.*, 2006). Il convient cependant de signaler que les arbres réagissent au stress hydrique par la mise en place d'une série de mécanismes d'évitement et de tolérance. Ces mécanismes comprennent des modifications morphologiques et physiologiques susceptibles d'interagir de façon complexe avec les relations arbres/ravageurs.

Une étude trans-européenne récente (Marini *et al.*, 2016) portant sur trois décennies et 17 séries temporelles différentes issues de huit pays (dont une constituée de données wallonnes) relatives aux dégâts d'*Ips typographus* a montré que ceux-ci ont significativement augmenté lors d'étés chauds et/ou marqués par un déficit pluviométrique.

### **Phénologie foliaire**

La phénologie des arbres est sous contrôle environnemental fort et la température est un facteur clé. De nombreuses études ont documenté une précocité accrue, particulièrement ces quatre dernières décennies, dans le débourrement (reprise de croissance des bourgeons, élongation des rameaux et sortie des feuilles au printemps) pour les arbres des régions tempérées. De même, la décoloration et la chute des feuilles semblent aussi être retardées (Vitasse *et al.*, 2009). Et ces




tendances ont été attribuées sans équivoque à l'augmentation des températures (Jeong *et al.*, 2011). Cela laisse présager des saisons de végétation potentiellement plus longues pour certaines espèces dans le futur. Mais on observe aussi une grande variabilité entre espèces et entre écotypes, selon leurs besoins respectifs en termes de photopériode et de froid. Certains stress, comme les sécheresses, l'engorgement en eau du sol et les déficiences minérales pourraient aussi accélérer la sénescence des feuilles et la mise en place des bourgeons (Delpierre *et al.*, 2016).

Selon Menzel *et al.*, (2006) et Morin and Chuine (2007), pour les feuillus tels que le hêtre, le frêne, le chêne sessile et le chêne pédonculé, le débourrement simulé par modélisation est avancé de 6 à 10 jours. En ce qui concerne le pin sylvestre et l'épicéa, espèces ayant

des besoins en froid conséquents préalables à la reprise de la végétation, la modélisation suggère un débourrement retardé en plaine mais une avancée sur les reliefs. Pour toutes les espèces, le modèle prédit une baisse du risque de gels tardifs après le débournement, ce dernier se produisant à des températures toujours plus élevées. La sénescence montre quant à elle un recul de la date de coloration des feuilles de 0,7 jour par décennie (entre 1951 et 1996). Il faut néanmoins nuancer ce résultat, qui se base de manière dominante sur le CO<sub>2</sub> et la température. Cette tendance générale peut être remise en cause en fonction des conditions climatiques locales, de la fertilité des sols et d'autres effets biotiques ou abiotiques. Par exemple, des observations à long terme (1950-2000) réalisées par l'IRM sur 6 espèces ligneuses à Blamont montrent un effet significatif sur la chute des feuilles, de

plus en plus précoce pour le chêne pédonculé, le frêne et le bouleau (Demarée et Chuine, 2006 ; Campioli *et al.*, 2012).

Ces modifications de la phénologie pourraient également modifier certaines relations hôtes/parasites. Par exemple, un décalage croissant entre l'émergence précoce de certains scolytes xylophages (*Trypodendron* spp.) et le débournement des essences qu'ils colonisent pourrait accroître la vulnérabilité de ces dernières et expliquer des attaques sur arbres vivants au Canada alors que ces insectes n'attaquaient jusqu'ici que des arbres morts (Kühnholz *et al.*, 2001). Par ailleurs, la phénologie des insectes eux-mêmes est liée au climat, de même que leur nombre de générations par an, ce qui a une lourde incidence sur la dynamique des populations. Lange *et al.* (2006) établissent un modèle de croissance pour *Ips typogra-*



*phus* basé sur différents scénarios climatiques, qui suggère que le scolyte qui n'a généralement qu'une génération par an en Norvège, y passerait à deux générations en 2071-2100. Ces conclusions sont généralisées par Jönsson *et al.* (2011). En Belgique, *Ips typographus* présente en général deux générations, mais on peut légitimement s'attendre à un passage généralisé à trois générations par an, fait actuellement encore exceptionnel.

### ***Distribution des espèces***

La biodiversité des écosystèmes naturels ou semi-naturels est également vulnérable aux changements climatiques. En raison de la migration des espèces animales et végétales vers le Nord, le nombre d'espèces méridionales recensées par région est en hausse (ce qui a déjà été observé dans certains cas en Belgique), tandis que le nombre d'espèces nécessitant un climat plus

froid aura tendance à diminuer. L'arrivée d'espèces adaptées à un climat plus chaud sera une source de concurrence avec les espèces locales préexistantes. Le changement climatique entraîne par ailleurs des perturbations complexes de l'équilibre des écosystèmes, en raison par exemple de la rupture de certaines chaînes alimentaires à la suite d'évolutions au sein des espèces. Des efforts ont été entrepris afin d'établir une classification (encore partielle à l'heure actuelle) des espèces répertoriées en Belgique, en fonction de leurs "exigences climatiques". Une certaine protection des espèces les plus menacées est envisageable sous la forme d'une réduction des contraintes d'ordre non climatique sur les écosystèmes, par exemple via la création de réserves naturelles et de couloirs de migration. Ce processus a cependant ses limites.

A titre d'exemple, une étude réalisée par l'INRA et l'IFN dans le cadre

du projet CARBOFOR (Badeau *et al.*, 2004) a permis de montrer que les changements climatiques au cours des cent prochaines années risquent d'avoir un effet marqué sur la répartition et l'extension des principales essences forestières sur le territoire français. L'aire potentielle de distribution de la hêtraie, en particulier, tendrait à régresser fortement tandis que celle de la chênaie méditerranéenne s'étendrait vers le Nord (Figure 6). Il convient toutefois de modérer ce type de résultat par la capacité d'adaptation des essences. Même si ces scénarios sont sans valeur prédictive, ils montrent qu'il est urgent d'engager une réflexion approfondie sur les enjeux pour la foresterie (Badeau *et al.*, 2007).

Il est important cependant de préciser qu'à l'échelle locale, la dynamique des populations en réponse au changement climatique est inconnue. La migration pour-



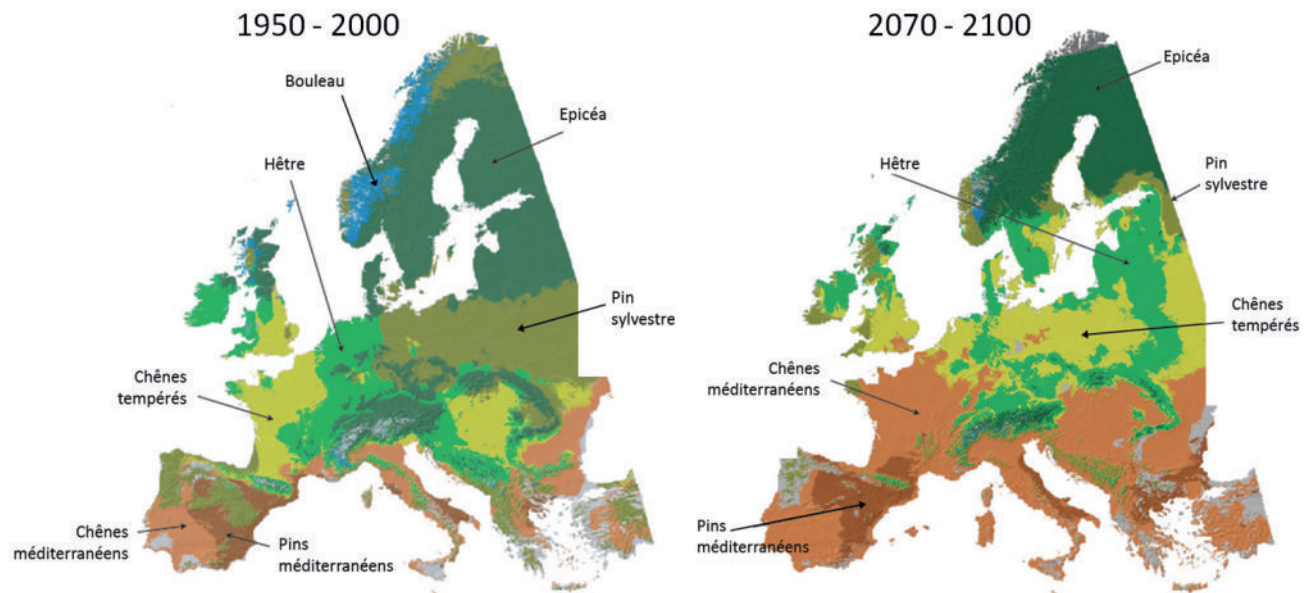


Figure 6 : Changements des aires potentielles des principales espèces forestières climaciques d'Europe selon les prévisions de modifications climatiques (scénario A1B) selon Hanewinkel et al., 2012.



rait être entravée par des contraintes locales telles que la fragmentation des paysages (Morin et Chuine, 2007). Cependant, la composition dendrologique des forêts sera sans doute le résultat d'une combinaison des contraintes climatiques et des orientations de gestion, notamment en termes de choix d'essences lors de plantations (Claessens, 2016).

Par ailleurs, le changement climatique pourrait favoriser une extension de l'aire de répartition des agents nuisibles vers le Nord, qu'il s'agisse d'insectes (Ungerer *et al.*, 1999 ; Williams et Liebhold, 2002 ; Battisti *et al.*, 2005) ou de champignons, favorisant donc de nouvelles invasions biologiques. On observe également dans ces conditions des changements dans la distribution altitudinale de certains insectes (Battisti *et al.*, 2006). Ces dernières années, certains épisodes

climatiques exceptionnels, tels que des tempêtes ou de longues périodes de sécheresse, ont aussi lourdement affecté les massifs forestiers. Les conséquences de tels événements ponctuels sont d'autant plus marquées que les peuplements sont affaiblis.

### **Adaptation**

Les écosystèmes possèdent également une capacité d'adaptation, définie comme « le degré d'ajustement d'un système à des changements climatiques (y compris la variabilité climatique et les extrêmes) afin d'atténuer les dommages potentiels, de tirer parti des opportunités et/ou de faire face aux conséquences » (IPCC, 2007).


Les espèces peuvent quant à elles répondre au changement climatique par des adaptations aux niveaux morphologique, reproductif, physiologique et génétique. On distingue deux types d'adaptation :

- des adaptations morphologiques, anatomiques ou physiologiques qui peuvent se développer à relativement court terme sur des individus (= adaptations phénotypiques sans modification du génome) ;
- une adaptation évolutive de génération en génération au gré des mutations/sélections.

Certaines essences peuvent ainsi se développer sous une gamme relativement large de conditions climatiques en raison de leur capacité d'adaptation phénotypique (« plasticité phénotypique ») et à la diversité génétique intraspécifique. Cependant, on considère que cette plasticité ne permet pas aux arbres forestiers de s'adapter assez rapidement aux nouvelles conditions climatiques (Thuiller *et al.*, 2008). Et de surcroît, en raison de leur temps de génération long, les arbres ont une faible capacité à répondre aux nouvelles pressions

	Elévation de la température	Canicule	Sécheresse climatique	Déficit hydrique (sol)	Engorgement du sol	Stabilité au vent	
Robinier	●	○	○	○	●	○	Favorisées
Tilleul à petites feuilles	●	○	○	○	○	○	
Chêne sessile	○	○	○	○	○	○	Indifférentes
Charme	○	○	○	○	○	○	
Douglas	○	○	○	○	●	○	
Chêne pédonculé	○	○	○	●	○	○	Attention aux réserves hydriques
Merisier	●	○	●	●	●	○	
Frêne	○	○	●	●	○	○	Sensibles
Erable sycomore	○	●	●	●	○	○	
Hêtre	○	●	●	●	●	●	Fragilisées
Epicéa	●	●	●	●	●	●	

Tableau 3 : Sensibilités aux changements climatiques prévus dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle pour les principales essences forestières wallonnes (évaluations extraites des travaux de révision du fichier écologique des essences).



sélectives (Rosenheim et Tabashnik, 1991 dans Thuiller *et al.*, 2008). Hedrick (2001, dans Thuiller *et al.*, 2008) considère que la détermination du potentiel d'adaptation d'une population dans un environnement changeant reste le plus souvent une question ouverte car on ne dispose que de peu de données pour quantifier la vitesse d'évolution face au changement climatique.

Un essai de classification de la vulnérabilité des essences face au changement climatique a été réalisé dans le cadre de la révision du fichier écologique des essences (Tableau 3 ; Claessens *et al.*, 2014 ). Il concerne les principales essences forestières de production de la forêt wallonne (11 essences représentant 90 % du matériel sur pied en forêt wallonne).

Le Tableau 3 ne constitue qu'une première base de travail qui devra

être améliorée et complétée au fil des futures constatations et analyses. Il est clair qu'il est difficile de décomposer l'impact des changements globaux selon différents facteurs régionaux et locaux, tant ceux-ci sont liés (ex : température, xéricité, régime hydrique du sol), mais le tableau tente d'apporter une meilleure compréhension du phénomène.

N'y sont pas repris les impacts généraux comme par exemple celui, jugé généralement favorable, de l'allongement de la période de végétation.

Enfin, une grande part d'inconnu existe encore, notamment concernant les modifications des relations hôte/parasites et maladies et les capacités d'adaptation liées à la génétique des populations.

Le Tableau 3 issu de la nouvelle version du fichier écologique des es-

sences permet d'observer la sensibilité de différentes essences face à certains facteurs de stress. Nous voyons ici par exemple que le robinier et le tilleul à petites feuilles semblent être des essences d'avenir en terme de stabilité face au changement climatique. Par contre, le hêtre et l'épicéa sont très peu résistants face aux différents stress. Des études récentes ont en effet montré que le hêtre est particulièrement sensible à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules estivales et sécheresses printanières (Latte N., 2017) et que le douglas présente un accroissement toujours supérieur à celui de l'épicéa ou du mélèze du Japon et qu'il est aussi moins sensible aux variations climatiques (Latte *et al.*, 2012).

Le pin sylvestre, le chêne rouge d'Amérique et le bouleau, pas repris ici, font parties des essences « indifférentes » aux changements climatiques selon le nouveau fichier



écologique des essences, au même titre que le chêne sessile, le charme et le douglas.

### **Processus biogéochimiques**

Les cycles biogéochimiques décrivent la circulation des éléments minéraux, de l'eau et du carbone entre les compartiments de l'écosystème, c'est-à-dire les végétaux et les horizons du sol prospectés par les racines. On y distingue des entrées (apports atmosphériques et altération des minéraux), des processus de transformation de la matière et des pertes (drainage, pertes gazeuses). Cependant, dans l'écosystème forestier, seule une petite partie des éléments minéraux présents dans le sol est disponible pour l'élaboration de la biomasse, de telle sorte que la disponibilité en éléments nutritifs dépend essentiellement de la minéralisation de la matière organique morte accumulée au sein de l'humus. En ce qui concerne l'eau, la structure du cou-

vert, les espèces présentes et le type de sol peuvent modifier considérablement la quantité de pluie qui parvient effectivement au sol. En forêt, le changement climatique risque d'influencer ces processus biogéochimiques de manière directe et/ou indirecte.

Les effets directs incluent l'influence de la température sur le processus de décomposition de la matière organique. Une accélération de ce processus mène à une minéralisation plus rapide de la litière, augmentant la quantité d'éléments nutritifs disponibles pour les plantes, mais pouvant aussi induire une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> à partir des sols, ce qui constitue une incertitude majeure dans l'étude du changement climatique et du cycle carbone. Une augmentation de la concentration en carbone organique dissous (DOC) dans les eaux de percolation peut également

s'ensuire (Evans *et al.*, 2005), en relation directe également avec la dynamique des précipitations et du drainage des sols (Kalbitz *et al.* 2000), avec des conséquences pour la qualité des eaux potables et pour les communautés d'eaux douces. On suppose généralement que l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique n'aurait pas d'impact direct sur les processus du sol, étant donné que la concentration en CO<sub>2</sub> du sol est nettement plus élevée que dans l'atmosphère. Cependant, Carnol *et al.* (2002) ont démontré une influence directe de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur le processus de nitrification.

Des processus indirects influenceraient les processus biogéochimiques via la disponibilité en carbone et la composition des litières, ce qui induirait l'augmentation de l'émission de CO<sub>2</sub> par les sols et le lessivage de DOC (Kang *et al.*, 2001).

Globalement, les effets du changement climatique sur les processus biogéochimiques sont encore mal connus et ils ont été moins étudiés que les impacts sur la production végétale par exemple. Il est également important de noter que ces impacts dépendront de l'interaction avec d'autres perturbations, comme notamment la pollution atmosphérique, la substitution d'essences et d'autres actions de gestion forestière (Carnol *et al.*, 2002 ; Kang *et al.*, 2001 ; Evans *et al.*, 2005).

### **Interactions**

Le rôle des facteurs abiotiques (ex. la sécheresse) et biotiques (ex. attaques d'insectes défoliateurs plusieurs années consécutives) et de leurs interactions dans les dépérissements forestiers n'est plus à démontrer. Dans le cas d'arbres et de peuplements prédisposés au stress par des conditions de croissance défavorables, un site perturbé ou

une sylviculture inadaptée, des reprises de dépérissements voire des mortalités sont à craindre, en particulier après des événements climatiques extrêmes (Bréda *et al.*, 2006). Par exemple, les sécheresses sévères et récurrentes ont été identifiées comme un facteur contribuant majeur dans les accélérations récentes des dépérissements et de la mortalité forestière aussi bien en Europe qu'en Amérique du Nord (Allen *et al.*, 2010). La compréhension actuelle des mécanismes impliqués dans les mortalités forestières induites par des sécheresses suggère que les arbres meurent soit de privation de carbone soit de rupture hydraulique<sup>8</sup> (MacDowell, 2011 ; Sala *et al.*, 2012), ou des deux simultanément (Sevanto *et al.*, 2014), selon

l'intensité et la durée de la sécheresse. Ces désordres physiologiques augmentent la vulnérabilité des arbres à des stress secondaires tels qu'attaques d'insectes, gel, nouvelle sécheresse (Bréda et Peiffer, 2014 ; Haavik *et al.*, 2015). De tels processus cumulés provoquent des réponses à long terme (plusieurs années) qui mènent soit à une reprise de la croissance, soit à un dépérissement ou à une mort éventuelle. Ces effets différés sont particulièrement observables chez le chêne pédonculé (Andersson *et al.*, 2011).

En guise de synthèse, le Tableau 4 résume les principaux impacts attendus du changement climatique sur les écosystèmes forestiers en Wallonie.

---

<sup>8</sup> Rupture hydraulique (embolie) : Les variations de la disponibilité de l'eau dans le sol peuvent induire une augmentation des tensions sur les colonnes d'eau dans les tissus conducteurs des arbres, notamment en cas de sécheresse. Au-delà d'un certain seuil, ces tensions provoquent une rupture des colonnes d'eau suite à l'apparition de bulles d'air, ce qui conduit à un blocage irréversible de la circulation appelé embolie (INRA, 2013).

CHANGEMENT CLIMATIQUE	IMPACTS
Augmentation de température et de la concentration en CO <sub>2</sub> combinés avec un allongement de la période de végétation	Augmentation des carences induites dans les stations « limites » et problèmes sanitaires
Augmentation de la xéricité en période de végétation (air et sol)	Augmentation des stress hydriques ==> dépérissements
Augmentation de la pluviosité en période hivernale	Engorgement du sol et hypoxie racinaire
Augmentation de la fréquence d'évènements climatiques extrêmes	Dégâts sur des peuplements exposés (chablis, dégâts de gelées hors saison, ...)
Modification des relations hôtes/parasites et nouveaux parasites	Problèmes sanitaires
Ensemble des facteurs cités ci-dessus	Perturbation de la biodiversité d'où l'intérêt de maintenir des surfaces dévolues à sa protection et des mesures plus générales favorisant la biodiversité (en dehors des zones protégées aussi)

*Tableau 4 : Résumé des principaux impacts attendus du changement climatique sur les écosystèmes forestiers en Wallonie.*



## LA FONCTION « PUIITS DE CARBONE »

La fonction « puits de carbone » s’inscrit dans le cadre de la gestion multifonctionnelle établie par le Code forestier. Il convient donc de ne l’envisager que dans la mesure où elle n’est pas en contradiction avec les autres fonctions. A titre d’exemple, l’accumulation de matériel sur pied, et donc du stock de carbone, peut être préjudiciable à la stabilité des peuplements, à la biodiversité du sous-bois et au fonctionnement optimal du sol, par manque d’eau et de lumière au niveau du sol.

### *Cycle global du carbone*

L’étude du cycle planétaire du carbone connaît ces dernières années un essor important face au changement climatique. Après la vapeur d’eau dont la concentration atmosphérique dépend essentiellement de la température, le dioxyde de

carbone (CO<sub>2</sub>) constitue le GES qui est responsable de la plus grande partie de l’effet de serre. Si on le compare aux autres GES dont l’accumulation est liée principalement aux activités anthropiques (méthane, protoxyde d’azote et gaz fluorés), le CO<sub>2</sub> est largement le plus important, tant au niveau des émissions annuelles que de l’effet climatique de la quantité actuellement présente dans l’atmosphère (IPCC, 2013).

La part prise dans ce cycle par les flux de CO<sub>2</sub> produits dans les sols est importante. Cette émission par les sols est causée principalement par les changements d’affectation des terres, dominés par la déforestation massive et rapide des forêts tropicales, due à des conversions pour l’agriculture, l’élevage, ou l’établissement d’infrastructures, aux besoins en bois

des populations locales et dans certaines régions à une surexploitation du bois.

Ces émissions sont estimées à 0,9 ± 0,8 GtC.an<sup>-1</sup> (IPCC, 2013), soit près de 10 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>.<sup>9</sup> Ce CO<sub>2</sub> provient essentiellement de la minéralisation accélérée de la matière organique du sol, sous l’effet de la perte du couvert forestier et de la décomposition des matières végétales mortes après exploitation.

D’autre part, le piégeage annuel du carbone par les océans est de 2,3 ± 0,7 GtC.an<sup>-1</sup>. Celui des écosystèmes terrestres est estimé à 2,6 ± 1,2 GtC.an<sup>-1</sup>. Cette séquestration est égale à la différence entre les quantités de C assimilé par la photosynthèse (productivité primaire brute ou GPP), et le carbone

---

<sup>9</sup> GtC = un Gigatonne de carbone, soit un milliard de tonnes ; on parle également de Pg, soit pétagramme ou 1015 grammes.


Biomes	Surfaces (10 <sup>9</sup> ha)	Stocks de carbone (GtC)			% du total
		Végétation	Sols	Total	
Forêts :	4,16 soit 29 %				48 %
Forêts tropicales	1,75 (± 0,01)	276 (± 64)	214 (± 1)	490	20 %
Forêts tempérées	1,04 (± 0,00)	99 (± 40)	126 (± 26)	225	9 %
Forêts boréales	1,37 (± 0,00)	73 (± 16)	404 (± 66)	477	19 %
Autres biomes :	10,26 soit 71 %				52 %
Savanes, prairies tropicales	2,50 (± 0,25)	73 (± 7)	255 (± 8)	328	13 %
Prairies tempérées	1,52 (± 0,27)	16 (± 7)	235 (± 59)	251	10 %
Déserts et semi-déserts	3,66 (± 0,89)	9 (± 1)	175 (± 16)	184	7 %
Toundra	0,76 (± 0,19)	4 (± 2)	118 (± 3)	122	5 %
Terres de cultures	1,47 (± 0,13)	4 (± 1)	146 (± 18)	150	6 %
Terres humides	0,35 (± 0,00)	15 (± 0)	225 (± 0)	240	10 %
<b>TOTAL</b>	<b>14,42 (± 1,21)</b>	<b>560 (± 94)</b>	<b>1901 (± 200)</b>	<b>2461</b>	<b>100 %</b>

Tableau 5 : Estimation des surfaces et des stocks de carbone par biome (période 1990 – 1999) (IPCC 2000)

émis par la respiration des organismes vivants. A l'échelle mondiale, la GPP représente environ 120 GtC.an<sup>-1</sup>. La respiration des êtres vivants peut être désagrégée entre deux origines : les organismes autotrophes (capables de

capturer le carbone, essentiellement les végétaux) et hétérotrophes dont la survie dépend de l'ingestion de ressources carbonées organiques. La seule composante hétérotrophe « dégradation de la matière organique par les micro-or-

ganismes » représente de 50 à 75 GtC.an<sup>-1</sup>, soit près de 8 fois la production de carbone issue de la consommation des combustibles fossiles par l'homme (9,5 GtC.an<sup>-1</sup>). In fine, la résultante de 2,3 GtC.an<sup>-1</sup> résulte de la différence entre deux



énormes flux (GPP et respiration). La GPP et la respiration ne réagissant pas de la même manière aux variations du milieu, une des craintes est de voir diminuer ou s'inverser les flux de carbone dans les écosystèmes terrestres. Par ailleurs, il est important de noter que ce « piégeage » est la conséquence de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, laquelle résulte des activités humaines passées : comme le piégeage résulte de ce déséquilibre, la quantité piégée annuellement va diminuer avec le temps si la concentration dans l'atmosphère cesse d'augmenter.

### **Biomes et piégeage du carbone**

Parmi l'ensemble des écosystèmes terrestres, les forêts jouent un rôle central dans le cycle mondial du carbone. Pour l'illustrer, le Tableau 5 reprend les surfaces des principaux biomes et leurs stocks de carbone respectifs.

On constate que les biomes forestiers représentent 48 % des stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres alors qu'ils ne représentent que 29 % de la surface des terres émergées. Ce sont les forêts tropicales et boréales qui ont le plus de carbone stocké. Celui-ci se trouve de manière dominante dans le sol pour les forêts boréales et dans la biomasse pour les forêts tropicales. Le carbone stocké dans le reste des terres émergées se trouve principalement dans les prairies et savanes (23 %). Ce carbone se trouve essentiellement dans la matière organique du sol.

Face au réchauffement climatique, le bilan net de carbone des écosystèmes forestiers risque d'être modifié. Ainsi, améliorer la compréhension de la transformation de la matière organique du sol face au changement climatique est capital. En particulier, les sols des régions boréales et, dans une moindre mesure, des forêts

tempérées, contiennent des quantités énormes de carbone organique qui pourrait être émis sous forme de CO<sub>2</sub> suite à l'augmentation de température et aux changements attendus du régime des précipitations.

Pour l'avenir, les modèles prédisent une diminution des quantités de carbone annuellement séquestrées par les écosystèmes. Une cause du ralentissement attendu de la séquestration du carbone par les végétaux serait la saturation de la croissance liée à la limitation de la disponibilité en éléments nutritifs et en eau dans le sol. En forêt tempérée, cet optimum de croissance serait observé entre 450 et 550  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Il existe néanmoins un mécanisme de régularisation potentiel de cette carence en éléments nutritifs. En effet, l'augmentation de la production de biomasse conduit à une augmentation de l'apport en matière organique



au sol. Pour autant que cet apport additionnel de litière présente des caractéristiques optimales pour sa minéralisation, cela conduit à une libération d'éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium par exemple) qui fertilisent et influencent directement la croissance de la végétation. Il ne s'agit donc pas de variables indépendantes. L'augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  et de la température moyenne aurait aussi pour effet potentiel de prolonger la période de végétation.

Outre la diminution de la séquestration du carbone par les écosystèmes, on craint une accélération du changement climatique suite à la libération du carbone stocké dans les sols forestiers. Cette augmentation de la vitesse de dégradation de la matière organique des sols et de l'activité racinaire serait due aux effets conjugués de l'augmentation des températures et de la concentration

atmosphérique en  $\text{CO}_2$ . Dans un scénario extrême, la décomposition de la matière organique et la respiration pourraient devenir plus importantes que la productivité suite à l'accroissement de la température. Selon certains résultats expérimentaux en forêt d'Europe occidentale (dont Vielsalm en Belgique), la respiration du sol est stimulée en atmosphère enrichie en  $\text{CO}_2$ . Il reste néanmoins de grandes incertitudes sur la connaissance de la dynamique de respiration des écosystèmes. Les études en atmosphère enrichie en  $\text{CO}_2$  et sous température plus élevée devraient se développer pour pallier ces incertitudes.

L'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes a également des conséquences sur la fonction « puits de carbone ».

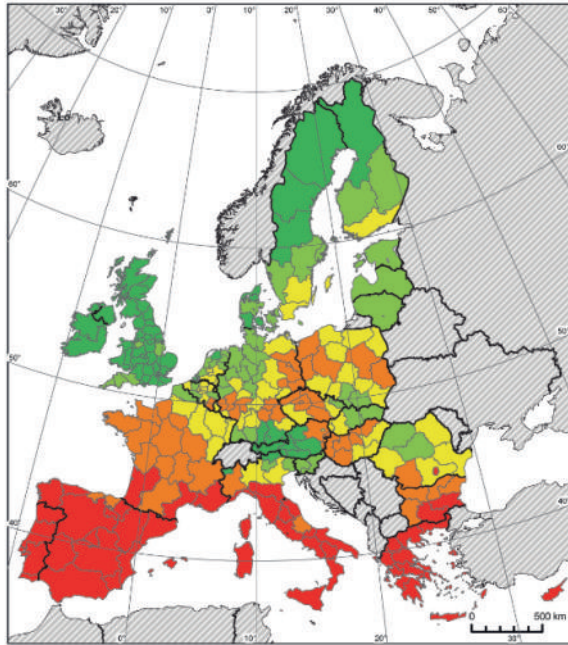
Deux types d'événements sont susceptibles de modifier brutalement les stocks en forêt :

- les tempêtes qui pourraient devenir plus fréquentes et violentes ;
- les sécheresses susceptibles d'augmenter les risques d'incendies de forêts dans les milieux sensibles (forêts méditerranéennes et boréales principalement). L'augmentation des risques d'incendie doit donc être prise en compte, d'où la nécessité de « plans de crises incendies » visant à la fois la prévention et les capacités de réactions lors d'incendies. La Figure 7 présente l'évolution des risques à l'horizon 2041-2070.

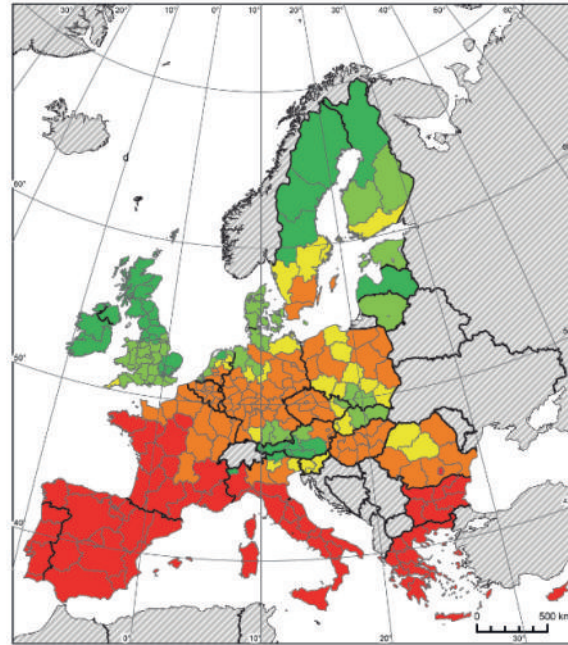
En outre, les facteurs climatiques extrêmes peuvent contribuer à modifier durablement la structure du sol et permettre à certaines fractions de matière organique actuellement stables de se minéraliser. Un cas particulier est celui des tourbières, dont l'assèchement est susceptible de dégager des quantités importantes de carbone. Dans le cas des



(a) Baseline climate (1961–1990)




(b) climate scenario 2041–2070 (A1B emission scenario)



Forest fire risk    ■ Very high    ■ High    ■ Medium    ■ Low    ■ Very low    ■ Not assessed

Figure 7 : Evolution des risques d'incendie à l'horizon 2041-2070 (IPCC, 2014).



tourbières sur pergélisol, le carbone émis serait libéré sous forme de méthane, dont le pouvoir réchauffant est 22 fois supérieur au CO<sub>2</sub>.

Ces événements extrêmes sensibilisent de plus les peuplements aux déprédateurs. Les dégâts de ces derniers peuvent alors à leur tour influencer la fonction « puits de carbone » : une étude récente (Kurz *et al.*, 2008) suggère que ce phénomène est en cours en Colombie britannique, où le scolyte *Dendroctonus ponderosae* a actuellement tué la majorité des *Pinus ponderosae* sur plus de 8 millions d'hectares. Ce phénomène, qui semble lui-même lié au changement climatique (notamment par une remontée altitudinale de l'aire de distribution), entraîne en 2000–2020, d'après le modèle développé par Kurz *et al.* (2008), un impact cumulé de 270 mégatonnes de carbone sur 374.000 km<sup>2</sup> de forêt. A cause de cet impact, la forêt cesse d'être un petit puits de carbone pour

devenir une source, ceci pendant la pullulation et immédiatement après. Des modèles plus récents explorant divers scénarios aboutissent à la conclusion que, dans la majorité des hypothèses, les forêts de Colombie britannique redeviendraient des puits nets aux environs de 2040.

#### **Forêt wallonne et stockage du carbone**

Le stock total de carbone organique dans les 552.000 hectares de forêts wallonnes a été estimé en 2013 à 86,2 millions de tonnes (Latte *et al.*, 2013), qui se répartissent pour une moitié environ dans la biomasse vivante et pour l'autre moitié dans le sol et les végétaux morts (litière et bois morts) (Tableau 6).

On constate que le stock est plus important en forêt feuillue (23,82 MtC) qu'en résineux (16,71 MtC), mais que les flux sont plus élevés en résineux, dont la

productivité est généralement plus élevée. Cette tendance devrait cependant être nuancée, espèce par espèce. Le suivi sur 20 ans d'une parcelle de hêtre et de douglas à Vielsalm montre qu'à l'échelle annuelle, la forêt se comporte encore comme un puits de carbone, malgré une variabilité interannuelle importante ( $\pm 150 \text{ gCm}^{-2} \text{ an}^{-1}$  ; Aubinet *et al.*, 2016).

L'évolution des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers wallons est estimée dans le cadre du rapportage officiel à l'Europe et aux Nations-Unies, suivant le protocole de Kyoto et le Paquet Climat-Energie. Ces inventaires sont réalisés sur base des méthodologies développées par le GIEC<sup>10</sup>. En Wallonie, le stockage moyen annuel en 2015 est estimé à 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui représente 8 % des émissions de gaz à effet de serre de la Wallonie en 2015<sup>11</sup> (35,9 millions de tonnes CO<sub>2</sub> éq).

Tableau 6 : Stock de carbone estimé pour les forêts de Wallonie (Latte et al., 2013).

(Sous) compartiment	MtC	Tonnes C/ha	% Compartiment	% du total
Biomasse vivante	40,53	87,12	100	47,0
dont aérienne	33,52	72,03	83	38,9
dont souterraine	7,02	15,08	17	8,1
Biomasse morte	0,90	1,94	100	1,0
Litière	3,85	8,26		4,5
Sols 20 cm	40,91	87,93		47,5
Stock C Total	86,19	185,25		100,0

### CAS PARTICULIER DES FILIÈRES DES PRODUITS DU BOIS

Sur le plan environnemental, notamment en matière de lutte contre le changement climatique, produire du bois et le récolter pour le transformer dans le domaine de

la construction ou d'autres usages de longue durée présente de nombreux avantages :

1. Le bois est le seul matériau capable de stocker le CO<sub>2</sub> atmosphérique : 1 m<sup>3</sup> de bois matériau correspond en moyenne

au stockage de 1000 kg de CO<sub>2</sub>, ce stockage dépendant de l'essence et de l'infradensité du bois ;

2. Le bois est un matériau renouvelable et recyclable.

3. Le recours au bois en tant que matière première pour la construction est moins polluant que le recours aux autres matériaux de construction. En terme d'énergie consommée pour la production

<sup>10</sup> Le Rapport National d'Inventaire (NIR) décrit les méthodologies appliquées : [http://unfccc.int/files/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/application/zip/bel-2017-nir-13apr17.zip](http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/bel-2017-nir-13apr17.zip)

<sup>11</sup><http://awac.be/index.php/thematiques/changement-climatique/les-actions-chgmt-clim/emission-ges>





d'une tonne de matière, le béton en demande 4 fois plus que le bois, la brique 6 fois plus, le verre 24 fois plus, l'acier 60 fois plus, l'aluminium 250 fois plus. A côté des effets directs sur le stockage du CO<sub>2</sub> dans le bois, il y a donc tout l'impact provenant de la substitution d'autres matériaux très coûteux en énergie lorsque la solution bois est choisie (voir chapitre suivant).

4. Le bois nécessite en outre un faible apport d'énergie pour sa mise en œuvre.

5. Utilisé dans la construction, le bois permet de réaliser des économies d'énergie car il est performant du point de vue de l'isolation thermique et possède en outre de bonnes capacités hygrométriques et d'excellentes qualités de rayonnement.

Depuis 2013, les produits ligneux récoltés (HWP-Harvested Wood

Products) sont comptabilisés dans le cadre du Protocole de Kyoto (voir page 43).

### **ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA BIOMASSE ET CRITÈRES DE DURABILITÉ**


L'utilisation de la biomasse forestière pour fabriquer des produits semble a priori répondre aux nouvelles exigences de réduction de la consommation d'énergie, de l'émission de gaz à effet de serre et d'autres critères environnementaux. Pour autant, il convient de valider cette opinion et d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement de chacune des filières végétales à travers notamment les études d'analyse de cycle de vie (ACV). L'ACV est un outil d'aide à la décision qui permet d'avoir une perception d'ensemble des impacts environnementaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise, d'un procédé ou d'une zone géogra-

phique. C'est le seul outil normalisé (norme ISO 14 040) qui peut à ce jour donner une information sur l'ensemble du cycle de vie du produit ou du service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets.

L'ACV prend en compte des dommages aussi divers que :

- la consommation de ressources ;
- les émissions de gaz à effet de serre ;
- l'impact sur la santé humaine ;
- et les dommages aux écosystèmes.

De manière globale, les filières de production de matériau de construction ou d'énergie (sauf biocarburants) à partir de la biomasse forestière sont systématiquement plus favorables que les filières équivalentes qui requièrent de l'énergie fossile. Des nuances doivent être apportées lorsque l'on doit transformer la biomasse fo-



restière pour en faire un produit plus élaboré de type biocarburants ou produits issus du bioraffinage. Dans ces situations, chaque cas doit être examiné en détail (ACV comparées entre elles).<sup>12</sup>

Plus largement, les études sur base d'ACV n'intègrent que des aspects environnementaux directs. Il peut y avoir des effets indirects liés par exemple aux déplacements induits des peuplements : une décision de convertir un peuplement donné équienne vers une forêt mélangée pourrait entraîner une conversion inverse ailleurs. Il y a donc lieu d'envisager les réponses aux carences mises en évidence par les ACV dans un contexte global.

Plus largement, le choix entre des filières de la culture à l'utilisation a aussi des impacts socio-économiques potentiels qu'il faut également prendre en compte. Pour tenter d'intégrer cette compo-

sante, des travaux sont menés pour établir des critères de durabilité de la biomasse. Ils sont pour l'instant focalisés sur l'important problème des biocarburants, mais pourraient, à moyen terme, se généraliser à l'ensemble de la biomasse. Ainsi, toute filière de transformation de la biomasse devrait respecter des critères environnementaux (réduction minimale des émissions de gaz à effet de serre basé sur une ACV, innocuité pour la biodiversité, ...) et socio-économiques (respect du droit des travailleurs, impacts négatifs faibles sur les prix des denrées alimentaires, ...).

L'agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie a effectué des analyses de cycle de vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France (2010). Cette étude montre que, sans tenir compte des effets de changements d'affectation des sols, les biocarburants produits en

France (biodiesel et bioéthanol) montrent des bilans énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre plus favorables que ceux des carburants fossiles de référence (diesel et essence). Cependant, il faut nuancer ces résultats lorsque l'on prend en compte l'impact des changements d'affectation des sols. En effet, lorsque le développement de cultures énergétiques entraîne, directement ou indirectement, la disparition de prairies, de zones humides ou de forêts primaires, le bilan de gaz à effet de serre des biocarburants peut être négatif (ADEME, 2010).

---

<sup>12</sup> Voir par exemple "bilan environnemental des filières végétales" ADEME, 2004 disponible sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



# COMPTABILISATION DES FORÊTS DANS LE CADRE DU PROTOCOLE DE KYOTO ET DU PAQUET CLIMAT-ENERGIE EUROPÉEN

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, le secteur LULUCF<sup>13</sup> couvre les émissions et séquestrations liées à la gestion ou au changement d'affectation des terres du secteur forestier, mais aussi les émissions ou séquestrations de carbone des sols de culture et de prairies, non abordés dans le présent document.

Toutes les émissions ou séquestrations de carbone du secteur LULUCF sont rapportées annuellement à la Convention Cadre des Nations Unies


sur le Changement Climatique (CC-NUCC ou UNFCCC en anglais). Par contre, seule une partie de ces émissions/séquestrations est comptabilisée par rapport aux engagements, le principe étant de ne comptabiliser que les émissions et séquestrations anthropiques, directement liées à une intervention humaine.

Plusieurs règles de comptabilisation<sup>14</sup> ont été adoptées en ce sens. Les articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto définissent deux catégories :

- Art. 3.3, boisement/déboisement : ces activités étant par définition anthropiques, les émissions ou séquestrations sont intégralement comptabilisées.
- Art. 3.4, gestion forestière : la comptabilisation de la gestion forestière selon l'article 3.4 est obligatoire pour la 2<sup>ème</sup> période d'engagement et effectuée par rapport au niveau de référence. Pour les Etats-membres, le niveau de référence représente le puits de carbone projeté pour 2013-2020. Pour le secteur forestier, une période d'engagement représente un instantané

<sup>13</sup> Land-Use, Land-Use Change and Forestry – ou UTACF en français : Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie

<sup>14</sup> [http://unfccc.int/land\\_use\\_and\\_climate\\_change/lulucf/items/4129.php](http://unfccc.int/land_use_and_climate_change/lulucf/items/4129.php)



pris au sein d'un cycle long de l'ordre de 60-70 ans, ce qui le distingue fortement des autres secteurs, où des modifications plus rapides ou plus radicales sont potentiellement envisageables. Les projections permettent ici de refléter l'impact de la structure de classe d'âge actuelle – héritée de situations historiques et/ou de gestion forestière passée – sur les puits futurs. Selon les cas (forêt jeune en croissance ou forêt mature nécessitant des récoltes), le niveau de référence pourra donc prévoir une augmentation ou une diminution du puits.

Les débits ou crédits (émissions ou séquestrations) sont comptabilisés par rapport à ce niveau de référence. Seule la partie du puits dépassant le niveau de référence est comptabilisée, avec un plafond fixé à 3,5 % des émissions de l'année de référence 1990. Si le puits cor-


respond aux projections, aucune séquestration ne pourra être comptabilisée. Si le puits est inférieur aux projections (ex : récoltes accrues), des émissions nettes devront par contre être comptabilisées. A politique constante, la gestion forestière ne devrait donc amener ni débits ni crédits.

Des clauses spécifiques concernent les perturbations naturelles et les produits ligneux récoltés :

- Les perturbations naturelles (incendies, chablis consécutifs aux tempêtes, sécheresses, ravageurs, ...), dont l'occurrence ou la sévérité sont au-delà du contrôle du pays, peuvent être exclues du système de comptabilisation. Le seuil d'exclusion est déterminé selon une approche statistique en vue de définir un niveau de fond (background level). Les années où les émissions dépassent ce niveau de plus de deux fois son

écart-type sont « éligibles », les émissions dépassant le niveau pouvant alors être exclues. La Belgique a postulé pour cette provision concernant les feux de forêt, mais pas pour les tempêtes, dans la mesure où dans ce cas, la majorité du bois fait l'objet de récolte de sauvegarde (salvage logging) et peut en pratique être comptabilisée comme une récolte.

- Produits ligneux récoltés (HWP-Harvested Wood Products) : Le carbone séquestré dans le bois utilisé est comptabilisé comme un puits, en considérant des demi-vies respectives de 2 ans pour le papier, 25 ans pour les panneaux et 35 ans pour le bois d'œuvre. Les émissions liées à la disparition progressive du stock sont comptabilisées en tenant compte de ces demi-vies. Les pays comptabilisent également les émissions liées à la dégrada-



tion du stock existant de produits du bois et les émissions liées à la dégradation des bois indigènes exportés, les bois importés étant comptabilisés par le pays exportateur afin d'éviter les doubles comptages.

Ces dispositions reflètent le fait que la réduction des émissions de gaz à effet de serre est plus importante dans le cas d'une utilisation du bois en tant que matériau que dans le cadre d'une valorisation énergétique, pour laquelle les émissions sont comptabilisées de façon directe au niveau du secteur.

On a donc intérêt à produire du bois, en particulier du bois apte à des usages à long terme plutôt qu'à des fins énergétiques, car l'effet de substitution est supérieur au contenu en carbone des

produits. La valorisation énergétique reste néanmoins une option intéressante pour la production d'énergie dans certaines situations locales (pas de possibilité d'approvisionnement, opportunités d'un système de chauffage collectif au bois, valorisation de bois qui n'ont pas d'autres débouchés, etc.), surtout dans la perspective de l'amélioration des rendements des systèmes de combustion et de la production mixte de chaleur et d'électricité (cogénération). Une des options serait de dédier des surfaces agricoles à la production de plantes énergétiques (taillis à très courte rotation, etc.). Le développement de la filière « énergie » ne doit pas entraver ni le rôle de production de bois en tant que matériau, ni les autres fonctions de la forêt.

Au niveau européen, le secteur LU-LUCF n'est actuellement pas inclus dans les objectifs du Paquet Climat-Energie 2020, mais sera inclus dans le Paquet Climat-Energie 2030, pour lequel la Commission a publié ses propositions le 20/07/2016. Les dispositions sont inspirées de celles en vigueur sous le Protocole de Kyoto<sup>15</sup>. Ces propositions sont en cours de négociation.

---

<sup>15</sup> [http://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf/documentation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf/documentation_en.htm)







# RECOMMANDATIONS AUX GESTIONNAIRES FORESTIERS

Les recommandations aux gestionnaires sont reliées aux principaux objectifs d'adaptation de la gestion forestière face aux changements climatiques (voir Figure 8). Il est important de bien comprendre que ces différents objectifs sont interconnectés.

## ***Maintenir et améliorer la biodiversité et la capacité d'adaptation des écosystèmes***

Cet objectif est fondamental : non seulement la protection et le développement de la biodiversité sont des objectifs en soi, auxquels la Wallonie a pleinement souscrit sur la scène internationale, mais de plus, c'est la biodiversité à tous ses


niveaux (gènes, espèces, communautés et interactions) qui est la garante de la meilleure adaptabilité des écosystèmes.

Le développement des niches écologiques dans les espaces forestiers implique tout particulièrement le maintien de la qualité des sols et de la diversité des situations locales, en particulier des microhabitats et des lisières. La dynamique forestière et tout spécialement les stades âgés et sénescents sont indispensables pour tenir cet objectif de durabilité et d'adaptabilité des forêts. Dans ce cadre, il faut constater que les derniers stades de la dynamique forestière ont été négligés.

## ***Limiter les risques prévisibles***

Au niveau de l'arbre, il convient d'éviter les stress additionnels qui diminuent la vitalité et le prédisposent à une plus grande vulnérabilité aux stress induits par le changement climatique :

- optimiser l'adéquation essence/station, grâce à des outils d'application du nouveau fichier écologique des essences ;
- adapter le traitement à l'essence (soins cultureux, éclaircie, mode de régénération) ;
- assurer une bonne structure du sol par des techniques d'exploitation adaptées ;
- limiter strictement les abrouissements et les écorcements par les



grands gibiers, et donc les populations excédentaires, en tenant compte de l'ensemble des espèces.

Au niveau de l'écosystème, il convient d'augmenter la résilience de la forêt en :

- favorisant les structures forestières complexes, en ce compris les stades âgés et sénescents ;
- maintenant ou favorisant la diversité d'essences et de provenances ;
- contrôlant strictement les densités de gibier qui influencent souvent fortement la diversité ligneuse et la densité de la régénération naturelle, mais également la diversité dans son ensemble, grâce à des plans de gestion cynégétique adaptés ;
- veillant au maintien de la fertilité des sols en favorisant le cycle interne des éléments minéraux (mélanges d'essences et éclaircies) et en limitant les exportations (gestion des rémanents, maintien du couvert...);

- gérant au mieux les ressources en eau qui sont considérées comme un élément-clé de l'impact des changements climatiques en agissant de deux manières : (1) en favorisant la recharge du sol et des nappes par le maintien d'une bonne structure du sol (exploitations soignées, diversité des enracinements, ...), et en limitant le drainage artificiel et les écoulements superficiels dans les peuplements et leurs abords ; (2) en limitant la consommation en eau de l'écosystème (choix des essences et sylviculture à couvert continu, en évitant des densités excessives des peuplements).

Au niveau économique, il convient :

- de valoriser les situations en relation au potentiel des stations (sol-topographie-climat) en priorisant les fonctions en biens et en services attendues de la forêt (voir Code forestier). La gestion des zones les plus productives doit

être orientée prioritairement en ce sens. Les zones aux contraintes écologiques restrictives pour la production de bois de qualité et aux fonctions environnementales marquées (pentes fortes, zones humides, sources, ...) peuvent contribuer plus prioritairement aux fonctions moins productives de bois ;

- de favoriser la régénération naturelle, adapter les densités de plantation, développer le concept de la sylviculture à couvert continu, comme par exemple Pro silva, de manière à optimiser les coûts de la sylviculture ;
- de limiter la durée d'exposition aux risques, dans les peuplements de production (en particulier en résineux), par une sylviculture dynamique qui raccourcit les révolutions et contribue à l'état de santé des arbres.

### **Prévoir les risques et les gérer**

- Augmenter les connaissances, développer les outils de prévision (en soutenant la recherche forestière) et former les gestionnaires à l'analyse de risques.
- Surveiller la santé des forêts (contrôler les impacts du changement climatique sur la forêt, surveiller les parasites et pathogènes indigènes et introduits et leur relation avec l'hôte, etc.).
- Sensibiliser et former les propriétaires et gestionnaires forestiers.
- Établir ou actualiser des plans de crise (chablis, scolytes, invasions biologiques, incendies, ...).

### **Favoriser**

#### **la séquestration du carbone**

- Favoriser la production de bois et le développement de la biomasse vivante dans différents étages, dans la limite des potentialités stationnelles.
- Favoriser les produits à longue durée de vie (menuiserie, construc-

tion), ce qui implique d'identifier et, pour la filière bois, de maîtriser les cycles de vie des produits.

La Figure 8 représente une synthèse des grands objectifs et des exemples d'actions ou d'outils qui peuvent être mis en place afin d'adapter les forêts aux changements climatiques.

Souvent, une recommandation relève de plusieurs objectifs. Par exemple, maintenir une biodiversité élevée permet de maintenir l'adaptabilité de la forêt au changement climatique à long terme mais permet aussi une bonne résilience aux accidents ponctuels.

Selon le type de gestion forestière, ces recommandations générales peuvent se concrétiser très différemment.

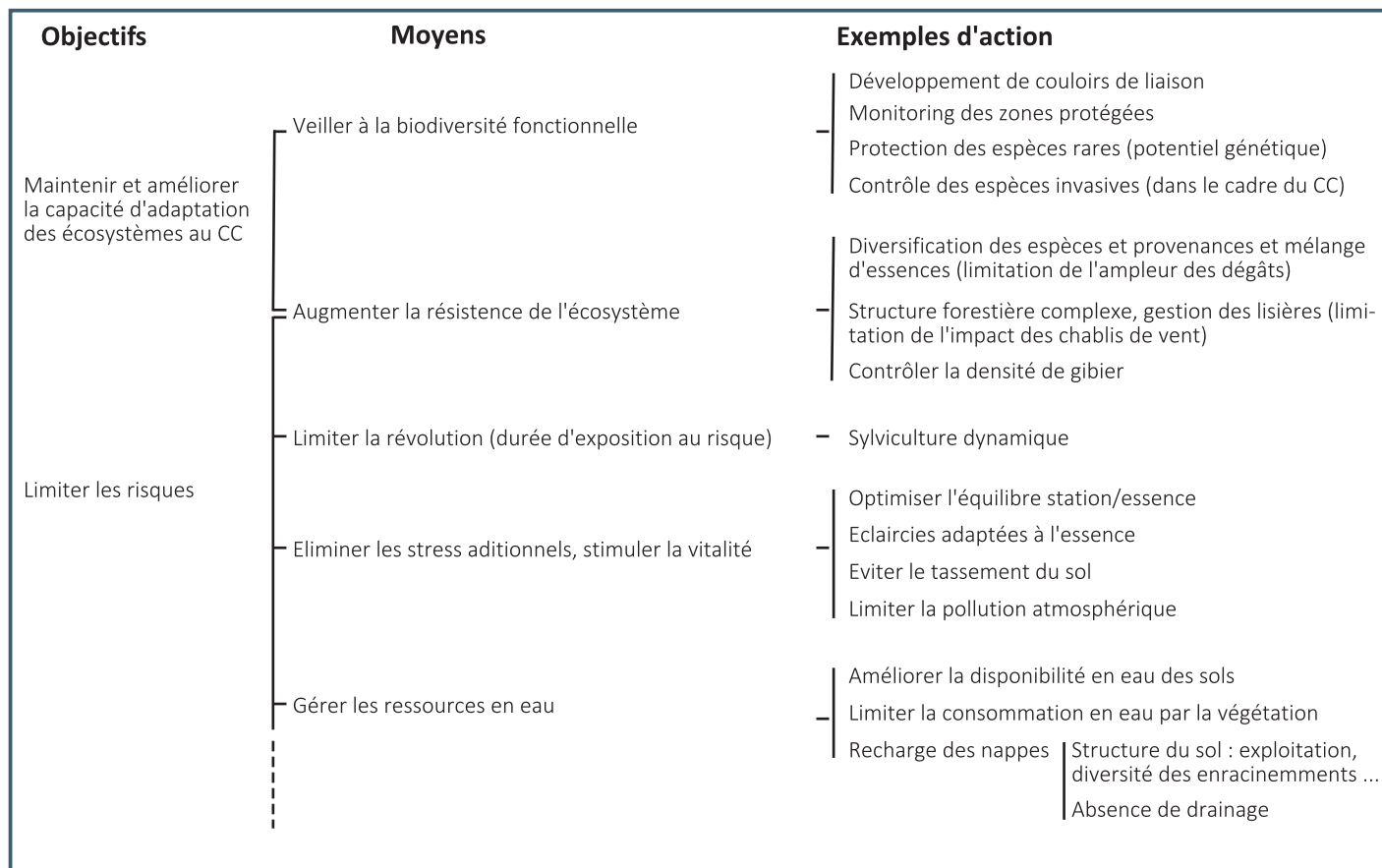
Dans les zones de gestion multifonctionnelle<sup>16</sup>, selon les espèces en place, les prescriptions pourront être nuancées :

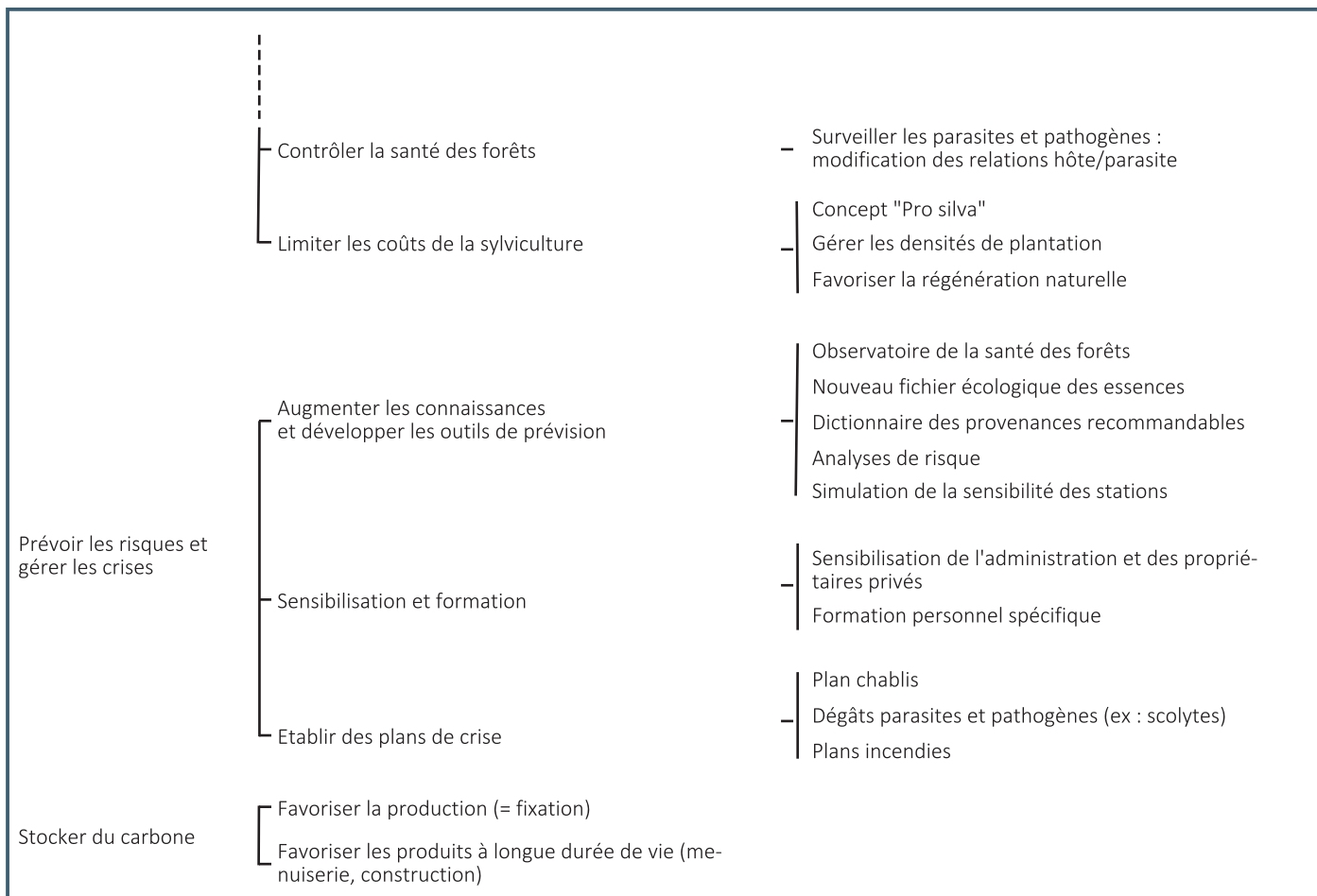
- dans les peuplements purs et équiennes d'espèces acclimatées, la question de la résilience de l'écosystème est moins importante alors que la limitation de l'exposition au risque et la vitalité des individus seront plus fondamentales : favoriser une sylviculture dynamique. Le choix de l'essence pourra changer en fin de révolution, y compris avec des espèces exotiques à tester dans le climat changeant ; les mélanges seront alors de toute manière favorisés ;
- de manière générale, on favorisera dans tous les peuplements de cette zone la diversité génétique (y compris par apport de nouvelles provenances à tester)

---


<sup>16</sup> Les zones évoquées dans ce paragraphe et les suivants sont celles décrites dans « Normes de gestion pour favoriser la biodiversité dans les bois soumis au régime forestier » DNF 2005.

Figure 8 : Organigramme « Forêts et changements climatiques » (objectifs, moyens et exemples d'actions)









et spécifique, par l'apport ou le maintien d'essences compagnes et d'un sous-bois ; la diversité de structures sera également favorisée, par régénération sous le couvert.

Dans les zones de développement de la biodiversité, le maintien et le développement de cette biodiversité et de la dynamique forestière seront prioritaires, ce qui favorisera la résilience de l'écosystème et l'adaptabilité de la forêt ; la production sera également un objectif important, et sera assurée par des essences indigènes dont la diversité génétique et interspécifique sera recherchée.

Enfin, dans les zones centrales de conservation, la dynamique forestière naturelle des espèces indigènes sera la base de la gestion, soit que les pratiques sylvicoles seront abandonnées, soit qu'on interviendra activement, mais tout en

laissant se dérouler le cycle sylvicole complet.

Plus techniquement, la matrice de recommandations de la FAO complétée pour la Wallonie est présentée en annexe. Cette matrice décrit d'une part toutes les mesures sylvicoles à envisager, aux différents stades de développement des peuplements (régénération, éducation des peuplements, exploitation).

Elle présente d'autre part les mesures générales de politique forestière à modifier ou à envisager, dans les domaines de la protection des forêts, de la planification et de l'administration, ainsi qu'en matière d'éducation et de sensibilisation.

En regard de chaque mesure proposée, nous noterons les mesures déjà appliquées ou en projet en Wallonie, ainsi que des commentaires spécifiques.


Cette méthode permettra d'identifier les lacunes éventuelles à corriger ainsi que des axes d'amélioration.

Il va de soi que dans ce document, les recommandations sont générales et doivent être appliquées avec discernement selon les cas.

## **AXES D'AMÉLIORATION**

L'examen du tableau et la synthèse en quelques grands objectifs donnent un éventail complet des mesures envisageables.

Les conséquences locales du réchauffement planétaire et la réaction des essences indigènes restent difficiles à évaluer. Ainsi, face aux nombreuses incertitudes, l'attitude la plus prudente consistera à répartir les risques en créant le plus d'alternatives possibles.



Nous pouvons cependant mettre en évidence quelques axes d'amélioration prioritaires.

### ***En matière de politique générale***

En matière de lutte contre le changement climatique, la priorité doit être donnée à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et plus généralement de la pollution atmosphérique.

Il ne faut cependant pas perdre de vue le rôle complémentaire et transitoire du secteur forêt-bois en matière d'atténuation du changement climatique.

Comme cela a été précédemment développé dans le document, le rôle du secteur dans le stockage du carbone et dans la réduction des émissions peut surtout être assuré par le maintien des surfaces boisées et par la promotion de l'utilisation du bois dans les usages à longue durée de vie.

Il faut assurer une gestion durable des forêts. Cet objectif est déjà présent dans le code forestier et, pour les forêts bénéficiant du régime forestier, il est traduit dans des mesures concrètes au sein des aménagements (via la circulaire « aménagement » et son complément relatif à la biodiversité). Par ailleurs, la certification PEFC garantit le respect des critères de gestion forestière durable définis lors des conférences ministérielles pour la protection des forêts en Europe (Forest Europe).

En Wallonie, en 2017, environ 96 % des forêts publiques (271.433 ha) sont certifiées PEFC tandis qu'en forêt privée la surface forestière certifiée n'atteindrait qu'environ 12 %. Il faut donc sensibiliser davantage les propriétaires privés à la certification.


Au niveau des politiques, les impacts intersectoriels du changement

climatique et des mesures d'adaptation ou d'atténuation doivent être mieux mis en évidence et pris en compte.

La recherche forestière doit envisager la problématique du changement climatique en tête de ses préoccupations, quels que soient les sujets abordés.

La sensibilisation de tous les décideurs, et en particulier les propriétaires forestiers et les gestionnaires, doit être accentuée, compte-tenu de l'impact à long terme de leurs choix actuels.

Cette sensibilisation est actuellement effectuée essentiellement par Forêt Wallonne A.S.B.L. pour les propriétaires publics, et par la Société royale forestière de Belgique et la Cellule d'appui à la petite forêt privée de l'Office économique wallon du bois (OEWB) pour les propriétaires privés. La Cellule d'appui



à la petite forêt privée a été créée pour aider les petits propriétaires privés à améliorer la valorisation économique de leurs ressources forestières.

La démarche de « formation aux calamités » et aux « plans de crise » implique en outre une capacité rapide de réaction en cas de calamités : cette capacité implique des ressources suffisantes en personnel qualifié, alors que paradoxalement la tendance générale est à la réduction des effectifs dans les structures publiques traitant de la forêt.

Un plan chablis permettant de guider les gestionnaires suite à une tempête a été mis en place en 2011. Ce plan prend la forme d'un classeur distribué aux décideurs et aux gestionnaires. Il contient la procédure générale à suivre et les différentes mesures à prendre à chaque phase de la crise.

Des exercices permettant de tester le bon fonctionnement et l'adéquation des plans de crise et du personnel devant les mettre en œuvre pourraient être envisagés, à l'instar de ce qui se fait au niveau des cellules de crise des communes et des provinces.

Il est en outre plus que jamais nécessaire d'assurer la formation scientifique et la capacité opérationnelle des ingénieurs forestiers et des biologistes, capables d'appréhender tous ces enjeux dans leur complexité et de les traduire en options de gestion. A ce titre, le maintien d'une formation forestière prenant en compte les aspects économiques, écologiques et sociaux ne peut être qu'encouragé.


Enfin, il semble important de souligner que le changement climatique doit être davantage intégré dans les démarches de gestion des aires protégées : la modification des ha-

bitats sous l'effet du changement climatique devrait être mieux étudiée.

### ***En matière de surveillance et de protection***

Un mécanisme de veille et d'alerte en matière de santé des forêts est particulièrement nécessaire, en complément à l'inventaire permanent des ressources forestières existant. Son rôle est d'assurer une veille intégrée de l'état sanitaire et de proposer des réactions rapides en cas de problème sanitaire ou de calamités, ainsi que d'extension de parasites ou pathogènes, ou de tout autre problème détecté.

L'observatoire wallon de la santé des forêts (OWSF) a été inauguré en 2011 afin de jouer ce rôle d'évaluation et de surveillance phytosanitaire des forêts wallonnes. Il centralise les données et les connaissances relatives à la santé des forêts. Des informations en ma-



tière de santé des forêts, mais aussi du suivi du climat en forêt wallonne sont régulièrement diffusées via leur site Web. L'OWSF est en contact avec les milieux scientifiques, y compris dans les pays voisins. Des synergies avec les services équivalents dans les régions voisines existent (France) et pourraient encore être développées dans le cadre de la « Grande région ». De nouvelles méthodes de contrôle de la santé des forêts sont en cours d'étude : il s'agit de l'étude de l'utilisation de la télédétection pour l'évaluation de phénomènes sanitaires ainsi que l'utilisation de drones (OWSF, 2017).

Outre les aspects « classiques » de prise en compte des agents pathogènes et des déprédateurs, ce mécanisme de veille devrait prendre en compte les risques liés aux populations de mammifères, particulièrement des rongeurs et du grand gibier, dont la démographie

et le comportement pourraient être fortement modifiés.

Suite aux risques accrus de sécheresses, il s'agira d'être plus vigilant vis à vis des incendies, par le renforcement des plans de prévention et des moyens de lutte.

Un plan d'action national (incendies des sites naturels) a été mis en place en juillet 2011. Il existe également un plan interne d'urgence de lutte contre les incendies dans les espaces naturels gérés par le Département de la Nature et des Forêts et qui a été mis à jour en 2016. Enfin, il existe un plan particulier d'urgence et d'intervention qui concerne plus particulièrement les Hautes Fagnes et qui date de 2013.

L'évolution des écosystèmes forestiers doit être suivie afin d'identifier les modifications en cours et d'anticiper les réactions futures (ex : modification des habitats, de l'ap-

titude des essences sur une station,...). Cette surveillance permettrait également de diagnostiquer les zones de sensibilité accrue au changement climatique.

A cet égard, l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW) se révèle un outil essentiel permettant d'évaluer à tout moment l'état de la forêt wallonne et son évolution. Couplé à de la modélisation, il permet d'envisager la forêt future selon différents scénarios.

### ***En matière de biodiversité et de diversification des essences et provenances***

Les propositions suivantes visent à augmenter la résilience des forêts à travers l'augmentation de la diversité des essences et la valorisation d'espèces connues comme tolérantes à la sécheresse ; les espèces indigènes seront privilégiées dès lors qu'elles rencontrent ces objectifs.



Actuellement, que ce soit pour les essences en place ou les nouvelles provenances et/ou espèces envisagées (indigènes ou non), la connaissance de la sensibilité et de la réaction au déficit hydrique est très variable. D'autant que les conditions climatiques futures, en particulier en termes de sécheresse et de canicules, restent incertaines. Dans le cadre de la révision du Fichier écologique des essences et du guide de boisement (2017), ces aspects ont mobilisé une attention particulière et ont notamment fait l'objet d'études dendroécologiques particulières pour les essences principales de la forêt wallonne (Latte *et al.*, 2016, Manise et Vincke, 2014). Dans le contexte actuel du changement climatique, il faut être particulièrement vigilant au diagnostic de la station et éviter d'installer des essences qui sont déjà en conditions « limites ». L'idéal est d'installer plusieurs essences en station dont certaines

sont plus résistantes aux aléas climatiques (Becquey, 2013).


La révision du Fichier écologique des essences intègre un nouveau découpage du territoire wallon en dix zones bioclimatiques. Ce découpage est basé sur des données climatiques actualisées et sur les dernières connaissances en autécologie des essences. Les données climatiques de températures et de précipitations utilisées ont été collectées dans un grand nombre de stations météorologiques de l'IRM sur une période de 20 ans (1986-2005 ; Claessens *et al.*, 2014). Le croisement de ces données avec les sensibilités écologiques des essences a permis d'aboutir à un nouveau découpage du territoire en dix zones bioclimatiques. Ces zones permettent aussi de proposer des cartes de zones à risques pour les différentes essences en fonction de paramètres climatiques spécifiques et selon les quatre niveaux d'apti-

tude définis pour le nouveau Fichier écologique des essences (optimum, tolérance, tolérance élargie et exclusion). Ces catégories sont définies de la manière suivante (Claessens *et al.*, 2014) :

- Optimum : l'essence est en optimum écologique et sylvicole.
- Tolérance : l'essence se développe bien malgré certains facteurs limitants qui affectent sa stabilité ou sa productivité.
- Tolérance élargie : l'essence peut survivre mais elle est de mauvaise forme ou sa production est dérisoire. Usage uniquement en accompagnement.
- Exclusion : l'essence ne se développe pas à long terme (dépérissement, maladies, gelées, chablis, etc.).

Pour permettre une efficacité optimale de l'outil, ce dernier est aujourd'hui sous forme numérique. Il est dès lors possible de connaître les paramètres écologiques en tout





point du territoire et de manipuler ces informations au sein d'un SIG pour produire de manière automatisée les niveaux hydrique et trophique des stations et produire ainsi, via les écogrammes du Fichier écologique, des cartes d'aptitude des essences sur un territoire donné (Claessens *et al.*, 2014). Ces évolutions vont élargir ainsi l'échelle d'utilisation du Fichier écologique et du Guide de boisement (Claessens *et al.*, 2014).

Les efforts importants réalisés en matière de diversification des provenances et des essences doivent être amplifiés. Des recherches en génétique forestière doivent être menées dans le contexte européen.

En 2006, à Paris, un colloque organisé par l'IUFRO et Bioversity a été consacré aux implications du changement climatique sur la gestion durable des forêts en Europe. Dans ses conclusions, un large panel d'experts

et de scientifiques forestiers de 25 pays européens considèrent que la diversité génétique des arbres forestiers joue un rôle clé dans le maintien de la résilience des forêts face aux menaces qui y sont liées (Koskela *et al.*, 2007).

La diversité génétique est donc une composante essentielle à prendre en compte dans les actions de renouvellement de la forêt que ce soit lors de la régénération naturelle ou de la plantation. Déjà en 1995, le DNF avait perçu la nécessité de valoriser cette diversité par la création du Comptoir forestier de Marche-en-Famenne.

Dans la mise en œuvre quotidienne de ses missions de récoltes, de traitement, de conservation et de commercialisation des graines, le Comptoir forestier a toujours intégré ce moyen d'action. Et surtout, il continue à le développer en fonction des moyens attribués et du dé-

veloppement des connaissances (Servais, 2016).

En matière de diversification des provenances, un outil est à la disposition des propriétaires et des gestionnaires pour guider leur choix : il s'agit du dictionnaire des provenances recommandables. Il est disponible sur le site web du Comptoir forestier et du DNF. Il liste toutes les provenances qui sont jugées actuellement recommandables d'un point de vue génétique par le Département de la Nature et des Forêts.

Ce dictionnaire est évolutif en fonction des connaissances, des expérimentations et il restera un des outils de référence pour le forestier face au changement climatique. En effet, de par ce caractère évolutif, de nouvelles espèces, provenances et recommandations devraient y être insérées. Des provenances actuellement non recommandables au ca-





ractère plus méridional pourraient éventuellement s'avérer à l'avenir plus performantes que des provenances actuelles, y compris locales. Ce seront l'expérimentation scientifique (notamment les tests de comparaison de provenances tant au plan national qu'europpéen) et les retours d'expérience des forestiers de terrain qui devront guider ces modifications.

Au niveau wallon, la diversification des provenances s'appuie sur un grand nombre de peuplements à graines et sur la valorisation de 14 vergers à graines à large base génétique. Ces derniers concernent actuellement une surface globale de 40 hectares pour 9 espèces concernées : l'épicéa, le douglas, l'aulne glutineux, le merisier, le mélèze hybride, le thuya géant, l'érable sycomore, le robinier et le chêne rouge.

Une amplification de la recherche appliquée en génétique forestière

et en sylviculture est également nécessaire à travers des coopérations européennes (par exemple, avec le réseau français RMT Aforce, avec la poursuite du programme Forbio,...). De même, l'intégration de la Wallonie dans des réseaux de recherche européens est nécessaire. Son adhésion en 2017 au réseau EUFORGEN et à l'EFI lui permettra d'élaborer des synergies et d'en tirer profit ; cette problématique climatique doit être envisagée globalement et elle concerne aussi tous nos pays voisins.


Une stratégie de gestion des ressources génétiques forestières à long terme doit être développée sur 3 axes :

- Le premier est la mise à disposition effective, pour les propriétaires, des meilleures provenances d'arbres et d'arbustes adaptées à la station et au climat (rôle essentiel du Comptoir).

- Le deuxième est le monitoring de ces provenances en fonction de l'évolution du climat (recherche en génétique à développer).
- Le troisième est la mise en place d'un réseau de parcelles de conservation génétique (in situ et ex situ), avec monitoring à long terme, notamment pour les espèces indigènes.

En parallèle, une prospection large dans les arboreta et dans les essais réalisés par les propriétaires, pourrait être effectuée afin de rassembler une information pertinente sur des espèces moins fréquentes. Cette étape est en cours au travers d'un projet de valorisation des arboreta wallons (Scholzen *et al.*, 2016).

Il y aurait lieu par exemple de réhabiliter certaines espèces indigènes délaissées telles que les tilleuls, les bouleaux, et les fruitiers qui semblent posséder de nombreux atouts tant en termes



d'adaptation climatique que d'opportunités sylvicoles. A ce titre, des études sur les bouleaux (Dubois *et al.*, 2016) et le tilleul à petites feuilles (De Jaegere *et al.*, 2016) financées par l'Accord-Cadre de Recherche et Vulgarisation forestières (DNF-SPW) sont en cours.

Par ailleurs, d'autres espèces bien identifiées comme essences robustes (pin sylvestre, pin noir, châtaignier, robinier...) pourraient au cas par cas offrir une solution.

Cette réhabilitation doit porter non seulement sur la sylviculture, mais également sur la filière de transformation.

Parallèlement à la diversité des essences, qui permet de limiter les risques, de proposer plus de solutions d'adaptation et d'augmenter la résilience de la forêt, une attention particulière doit être apportée à la biodiversité afin de favoriser

tous ses compartiments : sol (pédofaune et pédoflore), arbres et microhabitats associés, strates herbacée et arbustive, faune forestière, etc. En effet, la résilience de la forêt dépend largement de cette diversité et surtout des interactions qui lient les différents organismes entre eux. De nombreux exemples d'effets bénéfiques de cette biodiversité fonctionnelle sont relatés dans la littérature, comme le contrôle des ravageurs par les prédateurs, les antagonismes et équilibres entre pathogènes, l'effet des mycorhizes, l'effet des mélanges sur l'impact des bioagresseurs et bien d'autres, de manière à ce qu'elle assure le bon fonctionnement de l'écosystème forêt.

De nombreuses mesures de gestion doivent être prises pour maintenir et développer cette biodiversité fonctionnelle. À cet égard, la circulaire « biodiversité » est un point de départ qu'il convient de mettre en

application de manière plus généralisée. Les fondements de ses recommandations se retrouvent par ailleurs dans les recommandations du PEFC et dans les outils de monitoring de Natura 2000 et de l'IPRFW, ce qui permet d'évaluer et d'améliorer la prise en compte de la biodiversité en gestion forestière.

### ***En matière de méthodes sylvicoles***

La tendance actuelle à diversifier les structures (régulière, irrégulière, jardinée, maintien de taillis-sous-futaie et de taillis) et les traitements sylvicoles quand la station le permet doit être amplifiée, même si cette mesure n'est pas dénuée de difficultés techniques. Les peuplements mélangés sont supposés plus résistants car ils profitent alors des tempéraments contrastés des différentes essences, ce qui garantit de conserver un couvert forestier même partiel en cas de problème.



Les différentes méthodes assurant un couvert forestier continu devraient être privilégiées, qu'il s'agisse de méthodes jardinatoires ou de méthodes de régénération de la futaie régulière sous le couvert (coupes de régénération ou d'abri). La sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature en est un exemple. Elle s'appuie sur les processus naturels afin de produire du bois de qualité tout en réduisant les intrants, en limitant au maximum les interventions et en respectant ainsi l'écosystème selon les concepts promus par l'association européenne de sylviculteurs « Pro Silva », sans en faire une méthode exclusive.

Un réseau de compartiments pilotes « Pro Silva » a été mis en place en forêt publique pour servir de base à la création de scénarios et d'itinéraires sylvicoles illustratifs.

Il faut également favoriser la régénération naturelle quand l'essence

présente est bien adaptée à la station. Elle permet à la variabilité intra-spécifique et à la sélection naturelle de s'opérer au profit d'une adaptation progressive des peuplements à leurs nouvelles conditions de croissance (Sousa-Silva, 2017).


Pour permettre à la régénération naturelle de s'installer et de se diversifier, il faut établir un bon équilibre forêt-gibier.

Nous avons à disposition les plans de tir depuis 1989 qui sont établis par l'administration. Les conseils cynégétiques coordonnent la gestion cynégétique depuis 1996. Chaque cerf tiré à la chasse ou retrouvé mort fait l'objet d'un constat de tir/mortalité rédigé par un agent du DNF afin de contrôler l'application du plan de tir par les conseils cynégétiques. Différentes méthodes (Indice nocturne d'abondance, inventaire des dégâts frais d'écorcement, enclos-exclos)

existent actuellement pour estimer le nombre d'individus présent en forêt afin d'établir des plans de tir adaptés.

Un certain nombre de mesures peuvent encore être prises pour améliorer cet équilibre forêt-gibier :

- Proposer une démarche permettant d'évaluer la perte financière engendrée par des dégâts anormaux dus au grand gibier.
- Revoir le cahier des charges pour la location du droit de chasse en forêt domaniale afin de faciliter les prélèvements de grands gibiers par le locataire et élaborer un cahier des charges spécifique pour la location du droit de chasse dans les zones périurbaines et les réserves naturelles.
- Dans le cadre de la révision de la Circulaire relative aux aménagements dans les bois bénéficiant du régime forestier, prévoir des



mesures d'aménagement et de traitement des peuplements favorables au développement des ressources alimentaires pour le grand gibier et au tir de ces animaux (cloisonnements sylvicoles, éclaircies dynamiques, maintien du taillis, création de lisières étagées, etc.).

- Supprimer tout nourrissage du sanglier autre que supplétif.
- Privilégier le système de chasses à licence à privilégier.
- Améliorer la communication avec les chasseurs et les sensibiliser à une gestion globale associant les aspects cynégétiques et sylvicoles.


La recherche des peuplements hors-station ou en conditions limites doit être accentuée : la transformation de ces peuplements peut intervenir selon différentes techniques, de manière progressive via le développement de mélanges transitoires par l'introduction de

sous-étage dans les peuplements à risque ou plus radicalement par la replantation sur mise à blanc.

Il faut favoriser une sylviculture dynamique (éclaircies fortes et fréquentes, densités plus faibles) qui permettra d'allouer à chaque individu un maximum de ressources pour le maintenir en pleine vitalité, de réduire la révolution et de favoriser le bilan hydrique et le recyclage des éléments minéraux. La mise au point de sylvicultures économes en eau devient en effet cruciale. En évitant les surdensités, on réduit la quantité de feuilles qui interceptent les pluies et/ou qui consomment de l'eau pour la transpiration. Mais la mise en œuvre pratique de ce type de sylviculture se heurte encore à l'absence de niveaux seuils de densité (ou d'indice foliaire) et à la question de la gestion de la végétation concurrente. Des travaux sont réalisés afin de combler ces lacunes (Gobin *et al.*, 2015).

Afin d'améliorer la disponibilité en eau des sols, il est nécessaire de les protéger. En effet, l'utilisation croissante d'engins d'exploitation entraîne une compaction importante des sols. Celle-ci modifie leurs propriétés : diminue la porosité nécessaire à la circulation de l'eau et des gaz. Elle a un impact également sur l'activité biologique de la faune et de la biomasse microbienne et perturbe le développement du système racinaire ce qui limitera la régénération naturelle et la productivité des peuplements (Destain, 2013).

Il est donc recommandé de mettre en place des cloisonnements d'exploitation, d'éviter les mises à blanc et de prévoir des cahiers des charges de qualité qui permettent de contrôler au maximum l'exploitation (travailler en conditions d'humidité favorables du sol, réduire la charge à l'essieu, utiliser des débardeurs à câbles, utiliser des



éléments de roulement avec une grande surface de contact avec le sol : pneus de grande taille, pneus larges, chenilles ; Destain, 2013).

***En matière de compréhension de fonctionnement de l'écosystème forestier***

La synthèse des connaissances actuelles présentée dans ce document a montré que l'écosystème forestier devra faire face à des risques majeurs dans les décennies à venir bien que de nombreuses incertitudes existent encore sur les conséquences du changement climatique sur cet écosystème. Ce contexte invite d'une part à évaluer les changements climatiques observés en Wallonie et d'autre part à maintenir un niveau systématique d'analyse de l'évolution des principaux types de peuplements forestiers, en tenant compte également de l'aptitude stationnelle. Par ailleurs, bien que des pistes d'adaptation aient pu être

dégagées, l'impact de certaines options de gestion sur le fonctionnement de la forêt n'est pas connu. Par conséquent, les recherches doivent viser à assurer une compréhension fine des processus liés au fonctionnement de l'arbre et de l'écosystème, ainsi que de leurs interactions avec la biodiversité, la structure et la dynamique des peuplements.

À titre d'exemple, les thèmes de recherche pour la période 2014-2019 du quatrième Accord-Cadre se présentent de la manière suivante :

- Evaluation des risques et gestion des forêts dans le cadre des changements globaux.
- Outils d'analyse prospective pour la forêt wallonne.
- Conception de systèmes sylvicoles innovants pour la forêt wallonne.
- Équilibre forêt-grande faune.
- Vulgarisation et formation forestières.

De plus, l'article 7 du code forestier prévoit que le Gouvernement adopte un plan quinquennal de recherches forestières qui définit les lignes directrices des recherches, à réaliser ou à faire réaliser par lui, pour assurer ou promouvoir les objectifs visés à l'article 1<sup>er</sup> à savoir assurer l'acquisition des connaissances scientifiques nécessaires à la gestion durable et multifonctionnelle de la forêt, adaptée aux changements climatiques et capable d'en atténuer certains effets. L'accord-cadre s'inscrit dans ce plan, ainsi que diverses conventions de recherche.

L'adaptation de la gestion forestière aux changements climatiques et le maintien d'une couverture forestière fonctionnelle ne peuvent se concevoir qu'à partir d'un suivi continu des écosystèmes forestiers sur le long terme, de façon à enregistrer les tendances évolutives (dynamique des peuplements, cycle de l'eau et



des éléments nutritifs, protection des sols, biodiversité, état phytosanitaire et phénologie des arbres, aires de distribution des espèces...). Ceci est déjà en cours pour certains objectifs spécifiques au sein des placettes de ICP forest, du réseau ICOS (Integrated Carbon Observation System), du LTER (Long Term Ecological Research Network), des placettes de suivi de l'OWSF, etc. Mais ces efforts doivent être maintenus dans le temps et, parallèlement à cette démarche, il faut également pouvoir mettre sur pied des dispositifs temporaires d'observation des forêts lorsque des crises sanitaires se produisent (dégâts de sécheresse, de canicule, de tempête, dépérissement massif, etc.) comme ce fut le cas du hêtre (Claessens *et al.*, 2017) ou plus récemment du chêne (Delahaye *et al.*, 2016).

Partant de ce principe, 4 axes de recherche prioritaires peuvent être identifiés.

### **Axe 1. Amélioration des connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes : cycles biogéochimiques majeurs (carbone, eau, éléments nutritifs) et flux d'énergie face au changement climatique et aux stratégies d'adaptation**

Le fonctionnement des écosystèmes va sans nul doute être modifié par le changement climatique, tant en matière de biodiversité que de cycles biogéochimiques. Par ailleurs, les stratégies d'adaptation (mélange d'essences, modifications de structure, etc.) risquent d'induire des modifications du fonctionnement de l'écosystème forestier dont il conviendra d'appréhender la portée.

- En matière de Cycles biogéochimiques et flux d'énergie, il est nécessaire de mieux comprendre les interactions entre le type de peuplement forestier (composition, structure, âge, densité, etc.) et les flux impliquant les res-

sources primaires, notamment en matière de bilan carboné, d'émission de composés organiques volatils, de disponibilité des ressources, etc., en fonction de la structure et de la composition des peuplements.

- Dans le domaine de la Biodiversité fonctionnelle, il faut approfondir les connaissances quant aux rôles de la biodiversité (génétique, spécifique, écosystémique et relationnelle) dans la résilience des écosystèmes forestiers.

### **Axe 2. Croissance et vulnérabilité des arbres et des peuplements en fonction de l'intensité des contraintes (sécheresse, excès d'eau, températures élevées, agents biotiques) et suivi des impacts**

L'étude du déterminisme de la croissance et du développement des essences, de leur état sanitaire, de leur mortalité et de leur régénération doit





être approfondie. Mieux comprendre ce qui caractérise la vulnérabilité d'un arbre et/ou d'un peuplement et mieux identifier les symptômes d'un déséquilibre permettra d'ajuster la gestion (composition, structure, densité, etc.).

Les recherches devraient notamment porter sur :

- l'écophysiologie des essences ;
- les effets différés et/ou combinés d'un stress et des mécanismes de compensation ;
- le suivi de l'évolution de la qualité du bois en fonction des nouvelles options de gestion (densités plus faibles, raccourcissement des révolutions, ...) préconisées pour atténuer les impacts du changement climatique.

### Axe 3. Anticipation des risques induits par le changement climatique

Pour anticiper les risques induits par le changement climatique, le forestier

est amené à revisiter ses acquis et à actualiser ses outils. A cette fin, il est nécessaire d'approfondir les connaissances relatives à certaines composantes de l'écosystème forestier, qui peuvent être influencées par le changement climatique. En voici quelques éléments :

- Approfondir la compréhension des sols forestiers pour minimiser les impacts des sécheresses et des excès d'eau : il devient impératif de mieux comprendre l'économie en eau des sols forestiers et l'impact des différentes techniques d'exploitation sur les propriétés physiques et mécaniques du sol.
- Approfondir la caractérisation des stations forestières, dont la définition est intimement liée au complexe « sol/climat » et la relation autécologique avec les essences forestières.
- Définir les risques phytosanitaires en étudiant par exemple l'évolution des aires potentielles des ra-

vageurs (en ce compris les exotiques) et de leurs cycles biologiques, en particulier en lien avec les autres sources de stress (sécheresse, gel, etc.).

- Préciser les risques de dégâts d'ongulés sur la dynamique de l'écosystème forêt : étudier les relations entre les populations d'ongulés et les dégâts potentiels en termes de renouvellement des peuplements, de maintien du sous-bois et de protection des sols.
- Caractériser les risques de réduction de la biodiversité : il s'agira entre autres d'étudier les facteurs et les modalités de l'adaptation, de l'évolution et de la migration des espèces et des communautés, y compris en matière de génétique et d'espèces invasives. La fonctionnalité de la biodiversité, notamment les mycorhizes, et son impact sur la résilience des forêts devra être ré-envisagée dans ce nouveau cadre.

#### Axe 4. Construction et/ou adaptation des outils de modélisation sur le fonctionnement des écosystèmes

Les modèles sont des outils permettant de simuler les processus à différentes échelles, de réaliser des transferts d'échelle, de tester des scénarios climatiques ou de gestion, de tester les données acquises. Une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers passe par la modélisation et la simulation pour produire des recommandations de gestion. Ceux-ci permettent par exemple de modéliser la croissance de peuplements forestiers contrastés (essences, structure...), sous l'effet conjugué de facteurs climatiques, sylvicoles et/ou biotiques. Ils peuvent ensuite être utilisés pour simuler l'impact de ces facteurs sur l'évolution du « paysage forestier » au sens large et sur l'accomplissement des fonctions de base de la forêt (écologiques, économiques et sociales).

Voici quelques exemples de modèles qui existent ou qui sont en cours d'étude :

- Le logiciel informatique du plan chablis qui permet de modéliser le déroulement au cours du temps des différentes opérations de mobilisation des chablis (vente, exploitation, transport, stockage, transformation) et par là même de comparer plusieurs scénarios afin d'en déduire la meilleure stratégie opérationnelle (Riguelle *et al.*, 2009).
- Le développement d'un modèle de fonctionnement des écosystèmes forestiers (HETEROFOR) et l'évaluation de scénarios (changements environnementaux, gestion) est en cours via l'Accord cadre de recherche et de vulgarisation forestières 2014-2019.
- Des modèles éco-physiologiques et biogéochimiques ont été développés afin de prédire la réponse des écosystèmes forestiers aux changements glo-

baux (action 3.3 de l'Accord Cadre 2014-2019).

- Le développement d'un système global d'analyse prospective de la forêt wallonne, permettant de simuler l'effet de différentes décisions de gestion sur l'évolution des peuplements et des massifs forestiers (action 3.4 de l'accord-cadre).





## CONCLUSIONS

Les écosystèmes forestiers et donc toutes celles et ceux qui participent à leur gestion sont particulièrement concernés par le changement climatique. Durant le XXI<sup>ème</sup> siècle, les effets attendus de ce changement auront un impact significatif, qui sera plus important si les activités humaines continuent de générer des émissions de gaz à effet de serre et des changements de l'environnement dans lequel les massifs forestiers se développent. Parmi ces impacts, la Wallonie est particulièrement concernée par l'augmentation de la période de végétation, en lien avec l'accroissement de la température moyenne, combinée

avec des hivers de plus en plus doux. En outre, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des stress hydriques et des événements climatiques extrêmes auront des impacts sur les peuplements les plus exposés. L'exposition et la sensibilité aux impacts des changements climatiques sur les forêts belges, et wallonnes en particulier, sont similaires aux prévisions attendues pour toute la zone d'Europe tempérée océanique (Lindner *et al.*, 2010).

Ainsi, le changement climatique doit faire désormais partie intégrante des critères de choix des pratiques forestières en Wallonie.

Les réponses des gestionnaires forestiers doivent être multiples et appliquées avec flexibilité, tant pour atténuer les changements climatiques que pour adapter les peuplements au contexte changeant.

Nous devons maintenir le cap pour favoriser les peuplements d'essences indigènes ou acclimatées, variés dans leur composition (espèces et provenances), leur structure et leur biodiversité afin d'augmenter leur résilience face aux accidents climatiques.

Nous devons développer une stratégie de gestion des ressources



génétiques forestières basée sur l'utilisation de la diversité génétique comme moyen d'action dans l'atténuation des effets du changement climatique.

Nous devons continuer à améliorer les stratégies de surveillance des forêts et de réaction face aux problèmes sanitaires qui ne manqueront pas de se manifester.

Nous devons maintenir l'effort de recherche scientifique pour approfondir notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes dans la dynamique des changements, et d'en déduire des recommandations de gestion adaptées.

Par ailleurs, le forestier, par ses pratiques, peut également contribuer à atténuer les impacts du changement climatique. Une des fonctions potentielles de la forêt dans ce contexte est le piégeage du CO<sub>2</sub> atmosphérique. A ce titre, la

forêt wallonne est un puits de carbone et il est important qu'elle le reste, ce qui implique que le cycle de vie des matériaux produits par la forêt y contribue. De plus, la forêt wallonne produit en quantité importante un matériau renouvelable, le bois, dont l'utilisation permet d'économiser les combustibles fossiles, source principale d'émission de gaz à effet de serre. Ce rôle est particulièrement important lorsque l'on utilise le bois en tant que matériau de construction, en substitution à d'autres matériaux plus énergivores. Le bilan « carbone » du bois matériau est plus favorable que la valorisation énergétique de la biomasse. Optimiser son utilisation contribue aussi, dans une certaine mesure, à éviter l'importation de bois obtenus par une gestion non durable et une déforestation massive.


Dans ce document sont détaillées diverses pistes de solutions pra-

tiques destinées aux forestiers, dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

### **Perspectives**

Ces contingences seront à prendre en compte prioritairement dans l'élaboration prochaine d'un « Programme Forestier Régional », document stratégique qui consistera à :

- définir une « vision » à long terme de la forêt wallonne : comment va-t-elle évoluer, notamment en fonction des objectifs et des contraintes environnementales, comment ses différentes fonctions doivent-elles être organisées, quel sera le rôle des propriétaires et des autres acteurs de la filière forêt-bois ;
- étendre la consultation aux autres secteurs concernés par la forêt : énergie, tourisme, agriculture, transports, aménagement du territoire, etc. Cette

- 
- concertation étendue pourrait aboutir, d'une part à fixer des priorités entre les différentes fonctions et objectifs et définir les moyens et acteurs à mobiliser, et d'autre part à éviter des incohérences entre les différentes politiques ;
- officialiser ce programme par une décision du Gouvernement wallon.





# BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2010. Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France. 36 pages.

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell n., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., 2010. A Global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259 : 660-684.

Andersson M., Milberg P., Bergman K-O., 2011. Low pre-death growth rates of oak (*Quercus robur* L.) : Is oak death a longterm process induced by dry years ? *Annals of Forest Science* 68 : 159-168.

Aubinet M., Vincke C., Heinesch B., Hurdebise Q., Manise T., 2016. Vingt ans de mesures des échanges de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau à l'Observatoire Terrestre de Vielsam. In : *Forêt Nature*, no. 139, p.17-28.

AWAC, 2011. L'adaptation au changement climatique en région wallonne. Rapport final. Région wallonne et Agence wallonne de l'air et du climat, Groupement Ecores-Tec, 170 pp.

Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., & Larsson S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6), 2084-2096.

Battisti A., Stastny M., Buffo E., & Larsson S., 2006. A rapid altitudinal

range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12(4), 662-671.

Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final du projet CARBOFOR - Tâche D1.

Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., 2007. Aires potentielles des essences forestières d'ici 2100. Rendez-vous technique de l'ONF. Hors série 3, pp. 62-66.

Becquey J., 2013. Le choix des essences: quelles possibilités offertes par la station? *Forêt-entreprise* n°209, pp. 23-26.

Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A., 1993. Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*) : seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.* 23 (6), 1136-1143.

Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci* 63: 625-644.

Bréda N. and Peiffer M., 2014. Vulnerability to forest decline in a context of climate changes : new prospects about an old question in forest ecology. *Ann. For. Sci.*, 71, pp. 627-631.

Campioli M., Leblans N., Michelsen A., 2012. Twenty-two years of Warming, Fertilisation and shading of Subarctic heath shrubs promote secondary growth and plasticity but not primary growth. Bente Jessen Graae, Norwegian University of Science and Technology.

Carnol M., Hogenboom L., Jach M.E., Remacle J., and Ceulemans R., 2002. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in open top chambers increases net nitrification

and potential denitrification. *Global Change Biology*, 8: 590-598.

Christensen J. H., et Christensen O. B., 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81, no. Supplement 1. pp.7-30.

Claessens H., 2016. Quelques considerations pour adapter nos forêts aux changements climatiques. *Silva Belgica*, Janvier-février 2016, pp: 20-29.

Claessens H, Bifulchi E., Bythell S., Cordier S., De Bont A., Desjonquères A., Iboukassene S., Ridremont F., Van Der Perre R., Vincke C., Ponette Q., 2014. Le nouveau Fichier Ecologique des Essences. Pourquoi et comment? *Forêt wallonne* 129, pp. 60-70.

Claessens H., Claessens L., Longrée C., Nivelles L., Tahir B., Lisein J., Lecomte H., 2017. Près de 20 ans après sa grave crise sanitaire, où en est la hêtraie ardennaise? *Forêt.Nature* 142, pp. 30-36.

Commission des Communautés européennes, 2006. Communication de la commission au conseil et au

parlement européen concernant un plan d'action de l'Union Européenne en faveur des forêts. Bruxelles : CCE. 14p.

CEI-Bois, 2006. Tackle Climate Change : Use Wood. 85p. Édition française, 2007.

Delahaye L., Claessens H., Losseau J., Cordier S., Herman M., Lisein J., Chandelier A., Vincke C., 2016. Entre valorisation, conservation et dépérissement : la gestion de nos chênaies à la croisée des chemins. *Forêt Nature*, 140 : 59-68.

De Jaegere T., Hein S., Claessens H., 2016. A review of the characteristics of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and their implications for silviculture in a Changing Climate. *Forests* 2016, 7,56.

Delpierre N., Vitasse Y., Chuine I., Guillemot J., Bazot S., Rutishauser T., Rathgeber C., 2016. Temperate and boreal forest tree phenology : from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Ann. For. Sci.*, 73 : 5-25.

Demarée G.R. and Chuine I., 2006. A concise history of the phenological observations at the Royal

Meteorological institute of Belgium. In : Actes du ESF exploratory workshop : phenology and agroclimatology, Volos, Greece, 21-23 sept 2006.

Destain M.-F., 2013. La compaction des sols forestiers en Wallonie. Guide de bonnes pratiques pour éviter la compaction des sols forestiers wallons. Service Public de Wallonie, Université de Liège (Gembloux Agro-Bio Tech), 53 pages.

DNF, 2005. Normes de gestion pour favoriser la biodiversité dans les bois soumis au régime forestier. (complément à la circulaire n°2619 du 22 septembre 1997 relative aux aménagements dans les bois soumis au régime forestier).

Dubois H., Latte N., Lecomte H., Claessens H., 2016. Le bouleau, une essence qui s'impose. Description de la ressource dans son aire de distribution. Forêt.Nature 140, pp.44-58.

European Climate Change Programme, 2007. Building National Adaptation Strategies Sectoral Report of the Working Group II Impacts and Adaptation. 10p.

European Climate Change Programme, 2007. Agriculture and Forestry Sectoral

Report of the Working Group II Impacts and Adaptation. 17p.

Evans C.D., Monteith D.T., Cooper D.M., 2005. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon : Observations, possible causes and environmental impacts. ENVIRONMENTAL POLLUTION Volume: 137 Issue: 1 Pages: 55-7.

FAO, 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries : Perspective, framework and priorities. Groupe interdépartemental sur le changement climatique. 32 p.

Gobin R., Korboulewsky N., Dumas Y., Balandier P., 2015. Transpiration of four common understorey plant species according to drought intensity in temperate forests. Ann. For. Sci., 72, 8, 1053-1064.

Haavik L.J., Billings S.A., Guldin J.M., Stephen F.M., 2015. Emergent insects, pathogens and drought shape changing patterns in oak decline in North America and Europe. Forest Ecology and Management 354, 190-205.

Hanewinkel M, Cullmann D, Schelhaas M-J, Nabuurs G-J, Zimmermann N., 2012. Climate change may cause

severe loss in the economic value of European forest land, Nature Climate Change doi:10.1038/nclimate1687.

IPCC, 2000. Emissions scenarios. Cambridge University Press, UK., pp. 570.

IPCC. 2007a. Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. 996p.. <http://www.ipcc.ch/>

IPCC, 2007b. Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. 976p.. <http://www.ipcc.ch/> (accédé décembre 20, 2007).

IPCC, 2007c. Climate Change 2007, the Physical Science basis, Contribution of Working Group I. to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. 851p. <http://www.ipcc.ch/> (accédé décembre 20, 2007).

IPCC, 2007d: Résumé à l'intention des décideurs. In: Solomon, S. et al. ed. Bilan

2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. 158p.

IPCC, 2013. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014. Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1435 pp.

Jeong S.-J., Chang-Hoi Ho., Hyeon-Ju Gim., Brown, Molly E, 2011. Phenology shifts at start vs. End of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global change Biol.*, 17, 2385-2399.

Jönsson A. M., Harding S., Krokene P., Lange H., Lindelöw Å., Økland B., Schroeder L. M., 2011. Modelling the potential impact of global warming on Ips typographus voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change*, 109(3-4), 695–718.

Kalbitz K., Solinger S., Park J.-H., Michalzik B., Matzner E., 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils : a review. *Soil Science*, Vol 165 (4), avril 2000, pp 277-304.

Kang H., Freeman C., Ashendonbet T.W., 2001, *Science of the Total Environment*, 279:45.

Koskela J., Buck A. and Tessier du Cros E (editors), 2007. *Climate change and forest genetic diversity. Implications for sustainable forest management in Europe.* BioersivityInternational, Rome, Italy. 111p.

Köstler J.N., Brückner E., Bibelriether H., 1968. *Die Wurseln der Waldbäume.* Paul Parey, Hamburg, 284 pp.

Kühnholz S., Borden J.H. and Uzunovic A., 2001. Secondary ambrosia beetles in apparently healthy trees : adaptations, potential causes and suggested research. *Integrated Pest Management Reviews*, 6: 209-219.

Kurz W.A., Dymond C.C., Stinson G., Rampley G.J., Neilson E.T., Carroll A.L., Ebata T. & Safranyik L., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, pp. 987-990.

Lange H., Økland B. & Krokene P., 2006. Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. *Interjournal for Complex Systems* 1648.

Latte N., Colinet G, Fayolle A., Lejeune P., Hebert J., Claessens H. Bauwens S., 2013. Description of a new procedure to estimate the carbon stocks of all forest pools and impact assessment of methodological choices on the estimates. *Eur. J. Forest. Res.*

Latte N., Lebourgeois F., Claessens H., 2015. Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia*, 33, pp 67-77.

Latte N., Lebourgeois F., Claessens H., 2016a. Growth partitioning within beech trees (*Fagus sylvatica* L.) varies in response to summer heat waves and related droughts. *Trees Structure and Function* 30, pp. 189-201.

Latte N., Perin J., Kint V., Lebourgeois F., Claessens H., 2016b. Major changes in growth rate and growth variability of beech (*Fagus sylvatica* L.) related to soil alteration and climate change in Belgium. *Forests* 7, p.174.

Laurent C., 2003. Gestion forestière et changement climatique en Wallonie, Belgique. *Unasylva* 54, no. 214-215. pp.64-67.

Letten S., Van Orshoven J., Van Wesemael B., Muys B. et Perrin D., 2005. « Evolution of soil organic carbon content of landscape units in Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990 », *Global Change Biology*. Volume 11 (12), 2128-2140.

Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolstrom M., Lexer MJ, Marchetti M., 2010. Climate change impacts, adaptative, capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259 : 698-709.

MacDowell N., 2011. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism and vegetation mortality. *Plant physiology*. March 2011 Vol. 155, pp. 1051-1059.

Manise T. et Vincke C., 2014. Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du Douglas en Wallonie. *Forêt Wallonne*, 129 pp 49-57.

Marini L., Økland B., Jönsson A. M., Bentz B., Carroll A., Forster B., Grégoire J.-C., Hurling R., Nageleisen L.-M., Netherer S., Ravn H. P., Weed A., Schroeder M., 2016. Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*. doi: 10.1111/ecog.02769.

Menzel A., Sparks T.H., et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12, 1969-1976.

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 2006 a. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. 148p.

MIRA, Nicole van Lipzig en Patrick Willems, avec la collaboration de Jochem Beullens, Sam Vanden Broucke, Hossein Tabari, Meron Teferi Taye, Rozemien De Troch en Piet Termonia, 2015. Actualisatie en verfijning klimaatscenario's tot 2100 voor Vlaanderen. KU Leuven et Institut Royal

Météorologique de Belgique, <http://www.kuleuven.be/hydr/ci/reports/MIRA-Klimaattrapport2015-Hoofdrapport.pdf>

Morin X., Chuine I., 2007. Réponse des essences ligneuses au changement climatique. *Rendez-vous techniques ONF hors-série 3 « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques »* : 15-20.

Ridremont F., Lejeune P., Claessens H., 2011. Méthodologie pragmatique d'évaluation de la réserve en eau des stations forestières et cartographie à l'échelle régionale (Wallonie, Belgique), *BASE*, 15, pp.727-741.

Riguelle S., Hébert J., Jourez B., 2009. Un outil d'aide à la décision pour la gestion des chablis en Région wallonne. *Innovations Agronomiques* 6, pp. 113-123.

Servais A., 2016. The integration of genetic diversity in forest seed management is a necessity to mitigate global changes (Practical situation in Wallonia). *Colloque Sweden – icisk*.

Sousa-Silva R., 2017. L'adaptation de la gestion forestière au changement climatique, est-ce un mythe ou une



réalité ? *Silva Belgica*, janvier-février 2017, pp. 30.

Rouault G., Candau J.-N., Lieutier F., Nageleisen L.-M., Martin J.-C., and Warzée N. 2006. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science* 63 (6): 613-624.

Sala A., Woodruff D.R., Meinzer F.C., 2012. Carbon dynamics in trees : feast or famine? *Tree Physiology* 32, 764-775.

Scholzen E., Lhoir P., Vincke C., Ponette Q., 2016. Bilan et valorisation des arboretums de Wallonie. In : *Silva Belgica*, Vol 123, no. 3, p. 36-38.

Sevanto S., McDowell NG., Dickman LT., Pangle R., Pockman WT., 2014. How do trees die? A test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, 37 : 153-161.

Thuiller W., Albert C., Araujo M.B., et al., 2008. Predicting global change impacts on plant species distributions : Future challenges. *Perspectives in plant ecology evolution and systematics*, 9(3-4): 137-152.

Trumbore S., Brando P., Hartmann H., 2015. Forest health and global change. *Science*, 349 (6250); 814-818.

Ungerer M.J., Ayres M.P., Lombardero M.J., 1999. Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biogeography*, 26, 1133-1145.

Van der Perre R., Bythell S., Bogaert P., Claessens H., Ridremont F., Tricot Ch., Vincke C., Ponette Q., 2015. La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. Actualisation et spatialisation des données climatiques et réalisation de la carte bioclimatique dans le cadre de la révision du Fichier écologique des essences et du Guide de boisement. *Forêt nature* 135, pp 47-58.

Vitasse Y., Delzon S., Dufrene E., Pontailier J.-Y., Louvet J.-M., Krener A., Michalet R., 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees : do within species populations exhibit similar responses ? *Agric. Forest. Meteorol.*, 149, pp.735-744.

Williams D.W., Liebhold A., 2002. Climate change and the outbreak

range of two North American bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 4: 87-99.

### ***Quelques documents de vulgarisation sur la gestion forestière face au changement climatique***

AFORCE, un réseau pour l'adaptation des forêts au changement climatique, <http://www.reseau-aforce.fr/>

Allegrini Ch., 2008. Attentes des sylviculteurs privés en prévision d'un changement climatique. Synthèse IDF-CNPF. Société Forestière de Franche-Comté, 447, pp45 – 56.

De Paul M-A., Bailly M., Heyninck C., 2008. Le cloisonnement d'exploitation, document informatif. Asbl Forêt Wallonne, 50 pages.

Destain M-F, 2013. Guide de bonnes pratiques pour éviter la compaction des sols forestiers wallons – La compaction des sols forestiers en Wallonie. Service Public de Wallonie, 53 pages.

Nouveau fichier écologique des essences : <https://fichierecologique.be>

Gauquelin X., 2010. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire, Office

National des Forêts, Institut pour le développement forestier, 96 pages.

Landmann G., Bréda N., Houllier F., Dreyer E., Flot J.L., 2003. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? Rev. For. Fr. 55 (4), pp 299-308.

Legay M., et Mortier F., 2006. La forêt face au changement climatique, adapter la gestion forestière, Synthèse de l'atelier ONF/INRA du 20 octobre 2005. Paris: Office National des Forêts. 39p.

Misson L., Rasse D.P., Vincke C., Aubinet M., Francois L., 2002. Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century, Agric. Forest Meteorol. 111, 265-282.

Numéro spécial 2000 de la Revue Forestière Française : Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture, LII. 174p.

Picard O., Mai 2006 - Dossier Crédits carbone : que fait la forêt ? Forêt-entreprise n°168, 40p.

Rendez-vous techniques de l'ONF - Hors-série n°3 (Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques).

Rendez-vous techniques de l'ONF - n°11 (Expertise sécheresse et canicule 2003)  
Rendez-vous techniques de l'ONF - n°16 (Biodiversité et gestion forestière)

Rendez-vous techniques de l'ONF - n°20 (La forêt et la lutte contre le changement climatique).

Riou-Nivert P., éd. 2005. Dossier : la forêt face aux changements climatiques. Forêt-Entreprise 2, no. 162. pp.11-53.

Riou-Nivert P., éd. 2007. Dossier Réchauffement climatique, la forêt privée s'organise. Forêts de France, no. 509. pp.17-27.

Riou-Nivert Ph., Mai 2008 - Dossier Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs. Forêt-entreprise, n°180, 34p.

Riou-Niver, Ph., Septembre 2008 - Dossier Changement climatique : préparer l'avenir. Forêt-entreprise, n°182, 31p.

Roman-Amat B., décembre 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique – Rapport aux Ministres de l'Agriculture Environnement et de l'Ecologie. 125 p.

Sanchez C., 2013. La sylviculture Pro Silva en Wallonie, mesures et recommandations du DNF. Forêt Wallonne asbl, 64 pages.

Van Ypersele J.P. et Marbaix P., 2004. Impacts des changements climatiques en Belgique. Green-peace Bruxelles, 44 p.



# ANNEXE

## OPTIONS TECHNIQUES D'ADAPTATION EN MATIÈRE DE GESTION FORESTIÈRE (INSPIRÉ PAR UN DOCUMENT FAO)

### PHASE DE RÉGÉNÉRATION

Mesures proposées	Mesures RW existantes ou en projet	Commentaires
Modifier les systèmes sylvicoles et/ou les techniques de régénération	Promotion d'une sylviculture dynamique. Promotion de la régénération sous le couvert et de la régénération naturelle (notamment le concept « Pro Silva »). Favorisation d'une sylviculture à couvert continu.	Ne pas se limiter à un seul système sylvicole (diversité en structures). Tenir compte de conditions écologiques et des fonctions multiples attendues des massifs forestiers
Préférer les peuplements mélangés	Mélanges d'essences favorisés, notamment par la certification forestière PEFC. Mise en œuvre de la circulaire « biodiversité ».	Insister sur la diversité des provenances (dans l'espace et dans le temps) et des espèces. Redévelopper la diversité d'essences indigènes (tilleuls, bouleaux, fruitiers,...)
Adapter les espèces et provenances aux conditions présentes et futures	Nouveau Fichier écologique des essences : ( <a href="https://fichierecologique.be">https://fichierecologique.be</a> ). Dictionnaire des provenances recommandables. Intégration au code forestier de l'obligation d'adéquation essence-station, sauf sur des surfaces limitées.	Réfléchir à l'intérêt d'étendre l'éventail des tests de provenances.
Tester l'introduction d'espèces susceptibles de résister aux changements futurs	Nouveau Fichier écologique : prise en compte d'espèces telles que bouleau, tilleul, caryer, noyers, tulipier...Étude sur le robinier.	Faire la synthèse de données au départ des arborescences et de tests existants à localiser. Réhabiliter des espèces indigènes « délaissées » telles que les fruitiers, tilleuls... et des espèces connues pour leur robustesse telles que les Pins sylvestre, noirs, chêne rouge,...



Adapter la régénération naturelle aux modifications des modes de reproduction et de compétition.		Mettre à profit la tendance observée de fructifications + fréquentes pour favoriser la régénération naturelle (via coupes de régénération et/ou coupes en lisières).
Réhabiliter les peuplements dégradés et éliminer les peuplements hors station.	Suppression des résineux en fonds de vallée. Plans de régénération en forêts soumises, avec diversification. Plans de réhabilitation des sols les plus pauvres en fonction des analyses des sols dans l'inventaire régional : propositions d'amendements et/ou de techniques sylvicoles plus extensives.	Les dispositifs expérimentaux ont montré une meilleure résistance des peuplements amendés à des stress passagers (été 2003).
Considérer les essences d'accompagnement.	Le maintien des essences d'accompagnement entre dans la pratique (dégagements localisés, essences de bourrage).	A vulgariser, notamment dans le cadre de la circulaire biodiversité.
Modifier les densités de plantation.	Une diminution des densités est progressivement en cours.	Voir « Guide technique pour des travaux forestiers de qualité ».
Surveiller la végétation concurrente.	Les techniques sylvicoles intègrent un contrôle équilibré de la végétation concurrente : dégagements localisés, dosage de la lumière par éclaircies, etc.	Principe : « Tout ce qui n'est pas nuisible est utile ».
Amender en prévision des carences probables.	Circulaire relative aux amendements. Plans de réhabilitation des sols les plus pauvres en fonction des analyses des sols dans l'inventaire régional.	A limiter explicitement à la forêt de production intensive. Vulgarisation à renouveler, en intégrant l'évolution des risques.
Préparer au vent dès l'installation.	Déjà pris en compte à la plantation (adaptation des densités). Développement de lisières structurées. Favoriser les structures irrégulières.	Gros problème : coupes intempestives dans les massifs à propriété morcelée.
Contrôler les effets des populations de rongeurs et du gibier.	Des recensements existent pour le grand gibier. L'Observatoire de la santé des forêts devrait prendre aussi en compte les risques liés aux populations de petits mammifères.	Problème récurrent du grand gibier à prendre prioritairement en compte.

## PHASE D'EDUCATION DES PEUPEMENTS

<b>Mesures proposées</b>	<b>Mesures RW existantes ou en projet</b>	<b>Commentaires</b>
Adapter l'intensité et la fréquence des éclaircies	Normes de traitement. Scénarios de rattrapage dans peuplements en surdensité.	Surface terrière à atteindre après coupe. A développer pour plusieurs essences.
Adapter la structure et la composition des peuplements	Voir circulaire biodiversité. Le maintien des essences compagnes entre dans la pratique, de même qu'une diversification de la structure horizontale.	Voir concept « pro silva » et plus généralement la sylviculture à couvert continu.
Transformer les peuplements hors-station	Scénarios d'exploitation précoce (cas des sols hydromorphes, par exemple). Projets Life. Les aménagements prévoient les changements d'essences non adaptées à la station. Obligation d'adéquation : respect du Code forestier	Possibilité d'appliquer la même démarche que pour l'épicéa pour identifier les peuplements concernés. Attention aux surfaces de chêne pédonculé !

## PHASE DE RÉCOLTE/EXPLOITATION

<b>Mesures proposées</b>	<b>Mesures RW existantes ou en projet</b>	<b>Commentaires</b>
Éviter les grandes mises à blanc, les effets de bordure, la fragmentation	Circulaire sur la protection des sols et de l'eau. Circulaire sur la taille des mises à blanc. Certification. Limite de taille des coupes à blanc : respect du Code forestier	Gros problème : coupes intempestives dans les massifs à propriété morcelée. Il faut améliorer la coordination entre propriétaires, notamment via les groupements forestiers.
Adapter les méthodes et le matériel de récolte, éviter les tassements	Cahiers des charges d'exploitation. Guide technique pour des travaux forestiers de qualité. Installer des cloisonnements d'exploitation.	
Transformer en peuplements inéquiennes	Promotion des méthodes « proches de la nature » et de la régénération naturelle.	A doser en fonction des propriétaires et gestionnaires.



## PROTECTION DES FORETS

<b>Mesures proposées</b>	<b>Mesures RW existantes ou en projet</b>	<b>Commentaires</b>
Améliorer la surveillance des pathogènes et insectes. Renforcer le monitoring des risques et des dégâts.	Monitoring européen. Inventaire forestier permanent, inventaires sanitaires + inventaires spécifiques scolytés. Mécanisme de veille et d'alerte en matière de santé des forêts (Observatoire Wallon de la Santé des Forêts).	Contacts avec l'Afsca pour les organismes de quarantaine. Attention particulière aux parasites et pathogènes en expansion dans le cadre du Changement Climatique. Envisager la surveillance sanitaire par télédétection ou par drone (archivage spatio-temporel) : en cours à l'OWSF. Plan de crise à mettre en place.
Éliminer les stress additionnels (retombées, gibier). Adapter la gestion des risques d'incendie.	Plan wallon de l'air et du climat. Plan de tir adapté Plans incendie.	Problème récurrent : surpopulations de grands ongulés.
Protéger les habitats et espèces rares, et le stock génétique .	Plans d'aménagements forestiers: vocation de conservation, y compris génétique. Mise en place de réserves intégrales au sein des propriétés forestières publiques, représentatives de l'ensemble des écosystèmes forestiers wallons, à vocation de maintien des dynamiques naturelles. Natura 2000 : Arrêtés de désignation des sites.	

## PLANIFICATION, EDUCATION, ADMINISTRATION

<b>Mesures proposées</b>	<b>Mesures RW existantes ou en projet</b>	<b>Commentaires</b>
Sensibiliser et informer le personnel et les propriétaires	Forêt wallonne asbl (Forêts publiques). Société Royale Forestière de Belgique (Forêts privées).	Articles de vulgarisation.
Revoir les instructions de sylviculture et de gestion	Préciser les recommandations.	Objectif du document révisé.
Mettre à jour la classification des stations et leur cartographie	Nouveau Fichier écologique des essences (août 2017).	Développer à terme les moyens de simulation de l'effet des Changements Climatiques (cartes prévisionnelles,...).
Assurer des ressources adéquates en personnel : la quantité de travail devrait en effet s'accroître.	Restructuration en cours des administrations régionales : le problème du changement climatique ne sous-tend pas la réflexion, sauf pour la création d'une agence wallonne de l'air et du climat.	La tendance dans les pays européens est généralement inverse : pourtant, la fréquence croissante de situations de crises devrait inciter à la prudence !
Planifier et former aux calamités, plans de crises, ventes	Plan Chablis et Plans Incendies.	Plan de crise sanitaire à mettre en place.
Prise en compte du changement climatique dans les plans d'aménagement	Voir supra (choix d'espèces et de traitement.)	
Revoir les révolutions et les possibilités de coupe	Plans de régénération.Circulaires sur les dimensions d'exploitabilité des principales essences. Réduire les révolutions.	Une sylviculture plus dynamique permet de réduire significativement les révolutions et d'augmenter la rentabilité.
Revoir les choix d'espèces et d'espèces introduites	A définir une fois la révision du fichier écologique et du guide de boisement terminée.	Tester de nouvelles provenances/espèces. Faire la synthèse de données au départ des arborea et de tests existants à localiser.
Mettre à jour les tables de production	Modèles de croissance « arbres » en cours d'élaboration pour certaines espèces.	Modélisation de la conduite des peuplements via différentes tables de production (selon objectifs).



Effectuer des analyses de risques aux niveaux national et local.

Plan chablis. Nouveau Fichier écologique des essences.

Objectif du document.

---

Donner priorité aux « no regret » options.

Démarches en cours de sylviculture à moindre coût, mettant à profit les processus naturels, notamment la régénération naturelle (Pro Silva).

---

Surveiller les impacts du CC sur les aires protégées.

Monitoring des zones protégées, notamment en Natura 2000.

---



Il est maintenant admis que des changements climatiques, dus aux émissions massives de gaz à effet de serre (GES), sont en cours et que les impacts de ces changements sur l'environnement (écosystèmes et biodiversité) et les sociétés humaines seront considérables. Les écosystèmes forestiers et les biens et services qu'ils fournissent occupent à cet égard une place particulière, en raison du long terme qui caractérise le cycle forestier et du rôle de la forêt dans les grands flux d'énergie et de matière (carbone, eau, éléments).

Ce rapport a pour but de dresser une synthèse sur les évolutions prévisibles des paramètres climatiques dans notre région, et de leurs conséquences sur nos forêts, sur le secteur forestier ou d'autres activités qui en dépendent.

Sur base de cette analyse, ce document propose ensuite diverses pistes de solutions pratiques destinées aux forestiers dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

Editeur responsable : Briec Quévy  
Avenue Prince de Liège 15 - 5100 Jambes

D/2017/11802/65  
ISBN 978-2-8056-0242-9

Publication gratuite, disponible sur demande

N° vert : 1718 - [www.wallonie.be](http://www.wallonie.be)