

FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

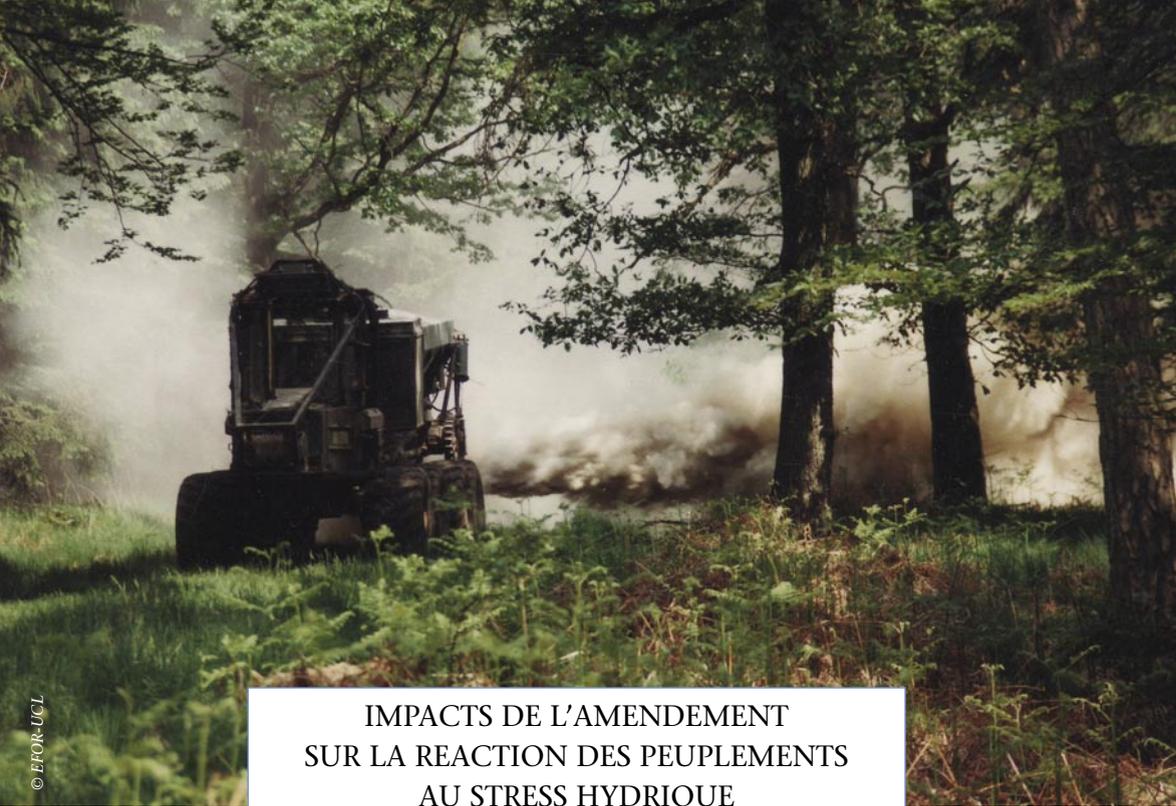
foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



© EFOR-UCL

IMPACTS DE L'AMENDEMENT SUR LA REACTION DES PEUPELEMENTS AU STRESS HYDRIQUE

RAPHAËLE VAN DER PERRE – MATHIEU JONARD
CLAUDE NYS – QUENTIN PONETTE

Quelle est la susceptibilité des essences forestières face aux changements climatiques, et dans quelle mesure des apports d'amendements peuvent-ils affecter celle-ci ? Pour répondre à cette question, une étude est en cours depuis janvier 2008 à l'Unité des eaux et forêts de l'UCL en collaboration avec le Département de la nature et des forêts (DNF) et l'INRA de Nancy.

En Wallonie, les écosystèmes forestiers sont généralement localisés sur des sols pauvres en éléments nutritifs, ne bénéficiant que de peu d'apports minéraux d'origine anthropique. Ces sols sont non seulement originellement acides, mais sont également acidifiés par l'action de l'homme (type de silviculture...) et la pollution. En effet, malgré le peu d'information sur le sujet, les exportations d'éléments minéraux, notamment via les pratiques ancestrales et actuelles, peu-

vent s'avérer importantes par rapport aux réserves du sol. À cela s'ajoute, depuis la révolution industrielle, l'acidification des écosystèmes forestiers par la pollution atmosphérique, entraînant par là une diminution de la fertilité du sol. Cette perte de fertilité peut entraîner un déséquilibre dans l'alimentation de la plante.

Par ailleurs, les changements climatiques et l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes qui les

accompagnent^{17, 28}, soumettent les forêts à des stress de plus en plus réguliers. Certains modèles climatiques montrent une augmentation de la fréquence et de la durée des périodes de sécheresse^{26, 16}, à l'instar de l'année 2003. Celle-ci constitue actuellement une année exceptionnelle à cet égard, mais ce type de climat est susceptible de devenir la norme pour l'Europe d'ici la fin du siècle³.

La pauvreté chimique du sol figure parmi les facteurs prédisposant à l'apparition du dépérissement. Les accidents climatiques – stress de courte durée, comme la sécheresse par exemple – sont quant à eux, des facteurs susceptibles de déclencher un dépérissement chez des individus prédisposés^{6, 18}, diminuant fortement leur vigueur et pouvant engendrer leur mort^{7, 8, 9, 10, 25, 30}.

Dans les Ardennes belge et françaises, sur les substrats les plus acides, des dépérissements sont observés depuis 1980 sur l'épicéa commun, puis, plus tard, sur le hêtre²⁴.

L'amendement, en améliorant les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, restaure la fertilité des sols forestiers dégradés. Au-delà d'un gain de productivité, l'amendement peut améliorer l'état sanitaire des peuplements et leur permettre de surmonter les stress liés, notamment, aux aléas climatiques. Il peut aussi prévenir de possibles dépérissements¹⁰.

La recherche présentée dans cet article permet de préciser dans quelle mesure des apports d'amendement peuvent affecter la susceptibilité d'une essence à la sécheresse. Elle contribue ainsi à la définition de l'aptitude stationnelle dans le contexte

des changements climatiques et, le cas échéant, à l'identification des traitements de restauration ou de prévention les plus appropriés. Ces résultats de recherche sont, entre autres, destinés à alimenter la politique forestière du DNF en matière de prise en compte des risques.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

La fertilisation est le terme employé pour désigner l'apport d'engrais ou d'amendement sur les sols agricoles et forestiers. L'apport d'engrais vise à fournir directement à la plante les éléments assimilables dont elle a besoin. L'amendement a par contre une action indirecte sur la plante : il améliore les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol. L'apport consiste en substances organiques ou basiques, comme du calcaire ou de la dolomie. En forêt, on vise principalement à corriger le pH du sol pour appuyer l'activité biologique et favoriser le cycle des nutriments. L'amendement ayant un effet à long terme sur la plante, il n'est appliqué qu'une fois au court d'un cycle sylvicole¹⁰.

Essence et sites étudiés

Dans cet article, nous nous intéressons à l'épicéa commun (*Picea abies*) sur deux dispositifs expérimentaux. Ils sont caractérisés par un sol brun acide avec un pH eau inférieur à 4,5 dans les dix premiers centimètres²³. Dans chacun de ces dispositifs, différents traitements ont été testés (amendement et amendement plus fertilisation). Chaque traitement a été appliqué sur quatre placettes. Nous avons échantillonné les arbres des quatre placettes amendées et de quatre placettes témoins. L'échantillonnage porte donc sur seize placettes (tableau 1).

	Croix-Scaille (France)	Gouvy (Belgique)
Topographie	Plateau, légère pente S/S-E	Plateau
Sol	Brun acide	Brun acide
Plantation	1937 (70 ans)	1948 à 1950 (60 ans)
Nombre de tiges	266 arbres/ha	509 arbres/ha
Circonférence moyenne	133,2 cm	98,4 cm
Surface terrière	39 m ² /ha	39,2 m ² /ha
Amendement	Hiver 1980-1981	Hiver 1994 -1995
Type d'amendement	2,5 T/ha de calcaire broyé avec plus de 99 % de CaCO ₃	3 T/ha de dolomie avec 55 % de CaCO ₃ et 40 % de MgCO ₃
Nombre de placettes/traitement	4	4
Dimension des placettes	30 x 30 m	45 x 45 m

Tableau 1 – Caractéristiques principales des deux dispositifs lors du dernier inventaire (en 2008 pour la Croix-Scaille et en 2005 pour Gouvy).

Le premier dispositif est français, il a été installé par l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) et est situé en Ardennes, à la Croix-Scaille, dans un peuplement adulte d'épicéa, issu d'une plantation de 1937, à une altitude moyenne de 450 mètres. L'amendement sur ce site a été effectué durant l'hiver '80-'81 et a

consisté en un apport de 2,5 tonnes par hectare de calcaire broyé avec plus de 99 % de carbonate de calcium (CaCO₃). La densité du peuplement était, au moment de l'échantillonnage durant l'hiver 2008-2009, de 266 arbres par hectare pour une circonférence moyenne du tronc de 133,2 cm et une surface terrière de 39 m².



Le deuxième dispositif est belge, il a été installé par l'UCL (Université catholique de Louvain) en collaboration avec le DNF et est situé en Ardenne, à Gouvy, dans un peuplement adulte d'épicéa, issu d'une plantation de 1948-1950, à une altitude moyenne de 510 mètres. L'amendement sur ce site a été effectué durant l'hiver '94-'95, et il a consisté en un apport de 3 tonnes par hectare de dolomie (55 % de CaCO_3 et 40 % de MgCO_3). La densité du peuplement était, au moment de l'échantillonnage durant l'hiver 2008-2009, de 509 arbres par hectare pour une circonférence moyenne du tronc de 98,4 cm et une surface terrière de 39,2 m².

Les deux dispositifs diffèrent par leur âge et par le laps de temps écoulé depuis l'application de l'amendement : environ deux

fois supérieur sur le dispositif de la Croix-Scaille (27 ans) par rapport au dispositif de Gouvy (14 ans).

Données climatiques*

Pour montrer l'impact potentiel de l'amendement sur la réaction des peuplements au stress hydrique, nous avons mis en relation la croissance radiale de l'épicéa avec deux paramètres climatiques. Le premier, de manière directe, via les précipitations et le second, de manière indirecte, via un indice de la disponibilité en eau du sol : « P-ETP » (différence entre les précipitations et l'évapotranspiration) (tableau 2).

* Les données climatiques obtenues ont été fournies par l'IRM (Institut royal météorologique), le Service public de Wallonie et l'ONF (Office national des forêts).

Tableau 2 – Données climatiques (moyenne, maximum et minimum de 1971 à 2007).

Croix-Scaille	Précipitation (mm)	Évapotranspiration ETP (mm)	Différence entre les précipitations et l'évapotranspiration* P-ETP (mm)
Moyenne	1311	616	695
Maximum	1743	793	1168
Minimum	822	492	152
Gouvy			
Moyenne	1014	723	291
Maximum	1414	939	695
Minimum	643	498	-207

* Estimée par la formule de Penman¹¹.

Tableau 3 – Circonférence moyenne des arbres sélectionnés, par traitement, en 2008 (intervalle de confiance, $\alpha = 0,05$).

	Croix-Scaille	Gouvy
Arbres des placettes témoins	135,7 cm ($\pm 6,1$ cm)	116,8 cm ($\pm 3,5$ cm)
Arbres des placettes amendées	143,6 cm ($\pm 6,4$ cm)	118,6 cm ($\pm 3,2$ cm)



© R. Van der Perre

Échantillonnage et mesures

Nous avons échantillonné les arbres susceptibles de constituer le peuplement final. Pour ce type de peuplement et de sylviculture, on estime que le peuplement final se compose approximativement de 250 arbres par hectare. Nous avons donc sélectionné aléatoirement nos arbres dans l'ensemble des 250 plus gros arbres à l'hectare.

Huit arbres ont été identifiés dans chacune des seize placettes à échantillonner, c'est-à-dire 128 arbres au total. Les circonférences moyennes des arbres, en fonction du traitement, sont présentées dans le tableau 3.

Les arbres sélectionnés sont sondés au moyen d'une tarière de Pressler à une hauteur de 1,30 mètre. Deux carottes sont

prélevées par arbre, perpendiculairement à la tangente de chaque cerne, afin d'estimer la croissance radiale. La première carotte est prise dans une direction aléatoire et la deuxième est prise à 90° par rapport à celle-ci.

Après planage des carottes, les largeurs de cernes sont mesurées au centième de millimètre, au moyen d'un dispositif informatisé. Les dendrochronogrammes ainsi établis sont ensuite interdatés afin de s'assurer de l'âge exact de chaque cerne³⁴. L'interdatation est une technique fondamentale dans l'analyse statistique des largeurs de cerne³⁵. Elle se base sur des variations synchronisées de la croissance de tous les individus d'un site donné. Sur base d'années de croissance caractéristiques communes à l'échantillon, il est possible d'identifier correctement l'âge de chaque cerne.



Préparation des échantillons.

Analyse des données

Nous allons donc nous concentrer ici sur la mise en évidence de l'effet des amendements sur la croissance radiale des épicéas (largeur de cernes et surface terrière) et l'interaction du climat sur cet effet.

Les données seront prises en compte à partir de 1971, date à partir de laquelle

l'échantillon du dispositif de Gouvy est complet.

L'indice de « gain de croissance dû à l'amendement » va permettre d'étudier l'effet de l'amendement sur la croissance radiale en fonction des années. Cet indice représente le gain d'accroissement des arbres amendés par rapport aux arbres

LES DONNÉES UTILISÉES

Deux grandes catégories de données servent de base à cette recherche :

- des séries dendrochronologiques des individus « amendés » et d'autres « témoins » en proportion égale. Ces séries dendrochronologiques sont construites par mesure des largeurs de cernes sur des carottes prélevées à la tarière de Pressler ; elles couvrent au minimum toute la période ultérieure à l'application du traitement ainsi qu'une période d'au moins 10 ans précédant celle-ci afin de prendre en compte les éventuelles différences initiales, indépendantes du traitement ;
- des séries de mesures météorologiques, à l'échelle journalière, provenant d'une ou plusieurs stations proches des dispositifs, plus particulièrement les températures, les précipitations et les données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration.

témoins (voir encart « Les équations utilisées »).

La croissance radiale est calculée, pour chaque arbre, avec la moyenne arithmétique des deux carottes prélevées. Pour le calcul de la surface terrière, nous utilisons le rayon quadratique.

Mise en évidence des facteurs influençant le gain

Parmi les facteurs les plus pertinents identifiés dans la littérature susceptibles d'in-

fluencer le gain de croissance, nous avons testé les suivants :

- la somme des bilans journaliers « P-ETP » durant la période de végétation (avril à septembre) moins la moyenne de ces bilans entre 1971 et 2007. Cette quantité a été calculée pour l'année en cours (Bilan α) et pour les deux années précédant l'année de croissance (Bilan $\alpha-1$ et Bilan $\alpha-2$). Non significatif, l'effet du facteur « Bilan $\alpha-2$ » n'a pas été retenu. Ces indices climatiques permettent de tester l'in-

LES ÉQUATIONS UTILISÉES

Équation 1 : « gain de croissance dû à l'amendement » (G%)

$$G(\%) = \frac{Aa}{At} \frac{At}{At} 100$$

At = moyenne des accroissements radiaux (mm) des arbres des placettes « témoins ».

Aa = moyenne des accroissement radiaux (mm) des arbres des placettes « amendées ».

La croissance radiale est calculée, pour chaque arbre, avec la moyenne arithmétique des deux carottes prélevées. Pour le calcul de la surface terrière, nous utilisons le rayon quadratique.

Équation 2 : mise en évidence des facteurs influençant le gain

$$\text{Gain} = S_i + B \cdot \text{Bilan } \alpha + B' \cdot \text{Bilan } \alpha-1 + D \cdot \text{Durée} + \varepsilon \quad (0, \sigma^2)$$

Gain = l'indice de « gain de croissance dû à l'amendement » en %, c'est la variable à expliquer.

S_i = permet de tester les effets du site (i indiquant le dispositif).

Bilan α = permet de tester les effets du Bilan (en mm).

Bilan $\alpha-1$ = permet de tester les effets du Bilan1 (en mm).

Durée = permet de tester les effets de la durée depuis que le traitement a été appliqué (en nombre d'années).

B, B' et D = les coefficients associés aux variables Bilan a, Bilan a-1 et Durée.

ε = représente les résidus du modèle.

L'autocorrélation temporelle des résidus a été prise en compte à l'aide de la fonction REPEATED de la procédure MIXED du programme SAS, ce qui a permis de structurer la matrice de variance-covariance des résidus sur base d'un modèle autorégressif de premier ordre (AR1).

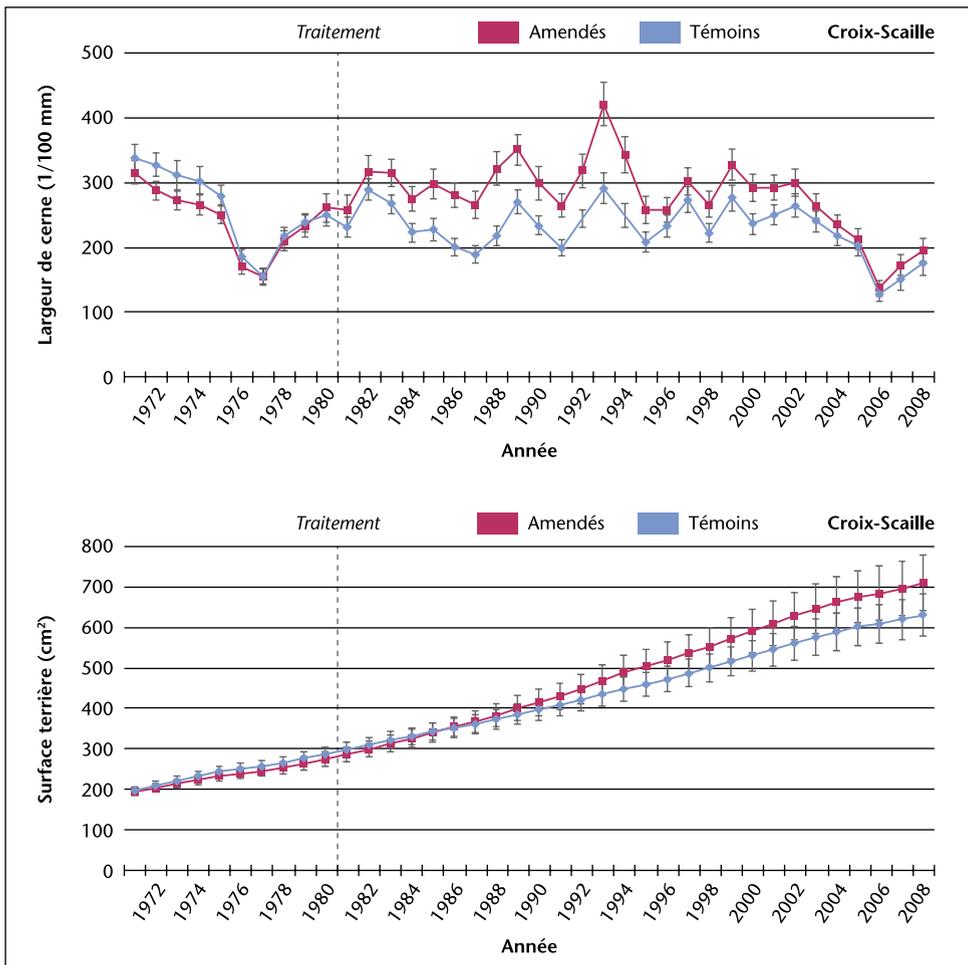


Figure 1 – Moyennes des cernes annuels mesurés en centième de millimètre (dessus) et moyenne des surface terrières cumulées en centimètre carré (dessous) des arbres amendés et des témoins sur le dispositif de la Croix-Scaille. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à la moyenne et la ligne en pointillé représente la date de l'application de l'amendement.

teraction entre le climat et l'amendement ;

- l'effet du site (dispositif) ;
- l'effet du temps écoulé depuis l'application du traitement.

Sur cette base, un modèle linéaire a été retenu (voir encart « Les équations utilisées »).

PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS

Comparaison des dendrochronogrammes des peuplements amendés et témoins

Les données de croissance des arbres « amendés » et des arbres « témoins »,

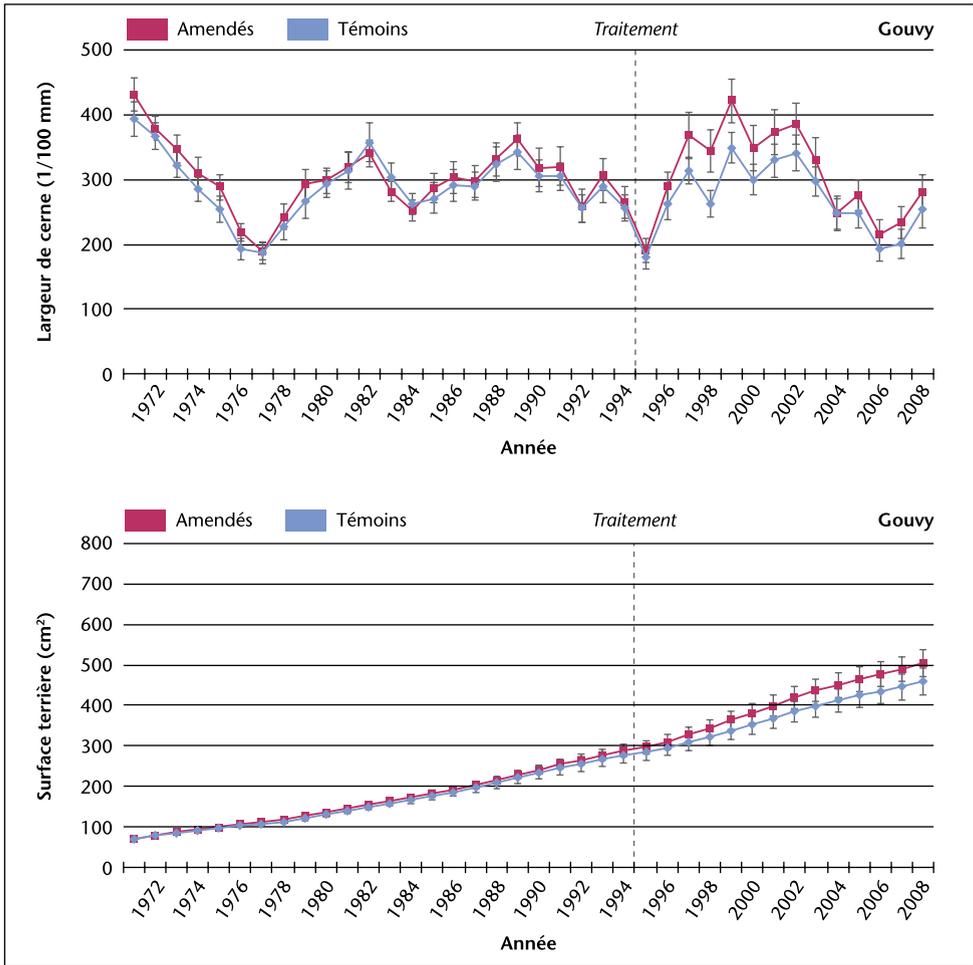


Figure 2 – Moyennes des cernes annuels mesurés en centième de millimètre (dessus) et moyenne des surface terrières cumulées en centimètre carré (dessous) des arbres amendés et des témoins sur le dispositif de Gouvy. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à la moyenne et la ligne en pointillé représente la date de l'application de l'amendement.

sur les deux dispositifs, sont présentées dans les figures 1 et 2 (largueur de cernes et surface terrière pour la Croix-Scaille et Gouvy).

Indépendamment de l'amendement, on note que la croissance radiale des arbres évolue de manière similaire sous l'effet d'une combinaison de facteurs tels que les

dépôts acidifiants et eutrophisants, l'acidification des sols, les attaques de parasites, la défoliation, les coupes d'amélioration ou encore les fructifications.

Avant l'apport d'amendement, les croisances radiales sont relativement proches entre les parcelles témoins et amendées, et ce, pour chaque dispositif. Néanmoins, les

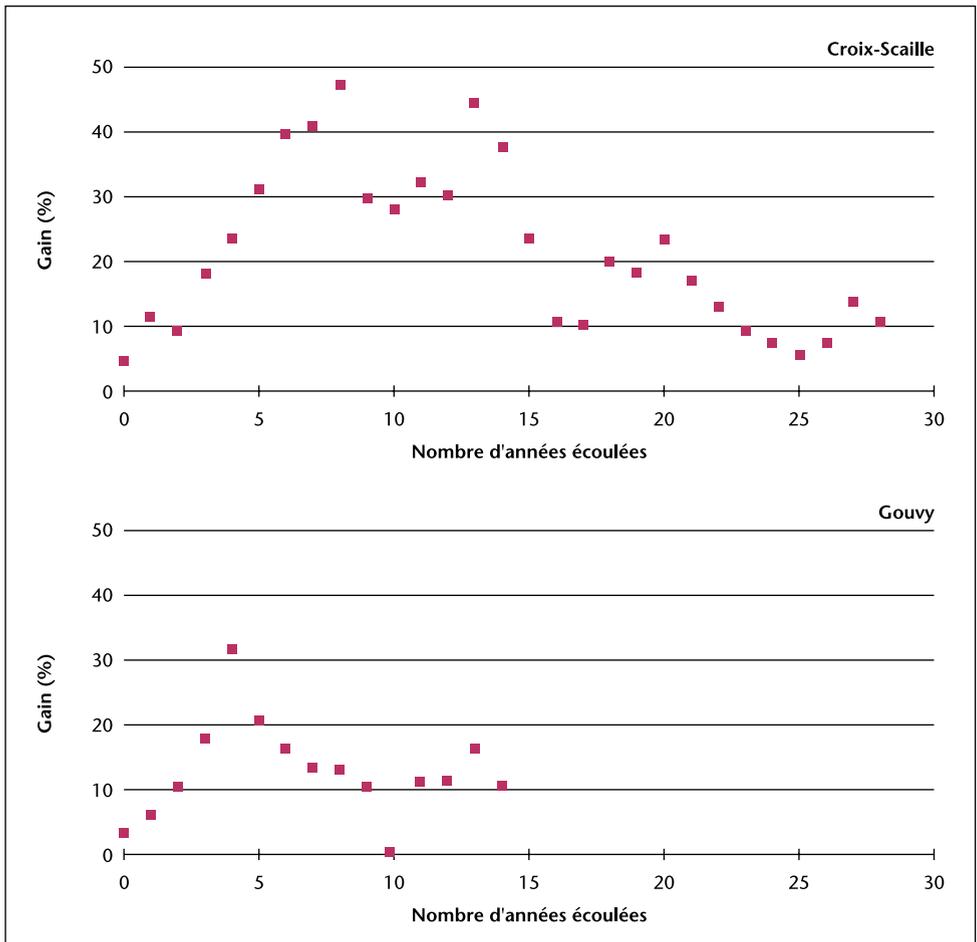
tests statistiques (*paired-test*) réalisés sur les années avant amendement, montrent, pour le dispositif de la Croix-Scaille, un accroissement plus élevé sur les placettes témoins, et l'inverse pour le dispositif de Gouvy.

Après l'application de l'amendement, les courbes de croissance radiale se différencient plus ou moins fortement selon

l'année (figures 1 et 2). La différence d'accroissement entre les arbres des parcelles amendées et témoins devient significative 2 ans après le traitement à la Croix-Scaille et 1 an après à Gouvy.

L'écart de croissance entre les deux traitements semble maximal lors des années à plus forte croissance et minimal lors des années à faible croissance.

Figure 3 – Représentation graphique de l'indice de « gain de croissance dû à l'amendement », pour le dispositif de la Croix-Scaille (dessus) et de Gouvy (dessous), en fonction du nombre d'années écoulées depuis l'application du traitement.



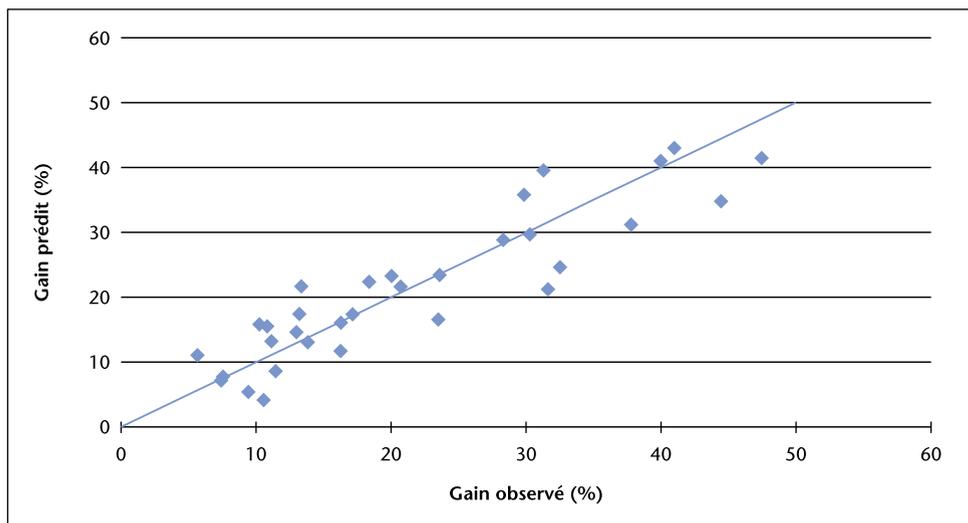


Figure 4 – Comparaison des « Gains de croissance » observés (Équation 1) et des « Gains de croissance » prédits sur base du modèle (Équation 2), la droite représente un rapport de 1 : 1.

Effet relatif de l'amendement sur la croissance radiale et indices climatiques en fonction des laps de temps écoulé

L'indice de « gain de croissance dû à l'amendement » a été calculé pour mettre en évidence l'effet de l'amendement sur la croissance. Les valeurs calculées sont présentées dans la figure 3.

Bien que la durée totale depuis l'application du traitement soit double à la Croix-Scaille, on observe une évolution identique de l'indice en fonction des années écoulées depuis le traitement sur les deux dispositifs (figure 3). Cette réponse à l'amendement se divise en deux phases :

- une augmentation croissante du gain, durant les 4 à 5 premières années jusqu'à atteindre un maximum (phase 1) ;
- ensuite, une diminution de l'effet de l'amendement avec le temps (phase 2).

Effet du climat sur la deuxième phase de la réponse à l'amendement

Pour étudier l'interaction du climat et de l'amendement, nous avons tenté d'expliquer l'indice de « gain de croissance dû à l'amendement » à l'aide du modèle², qui intègre notamment les effets climatiques. On ne considère ici, que l'évolution après les premières années d'accroissement du gain (respectivement 4 et 3 années après l'apport à la Croix-Scaille et à Gouvy), c'est-à-dire la deuxième phase de la réponse à l'amendement. On observe que les valeurs prédites du gain sont proches des valeurs réelles mesurées (figure 4).

Les paramètres du modèle expliquent 82 % de la variabilité des gains mesurés avec les données de terrain. Par ailleurs, l'ajustement du modèle révèle que :

- l'effet du laps de temps écoulé est hautement significatif. Ce facteur a donc un effet négatif sur le gain ;

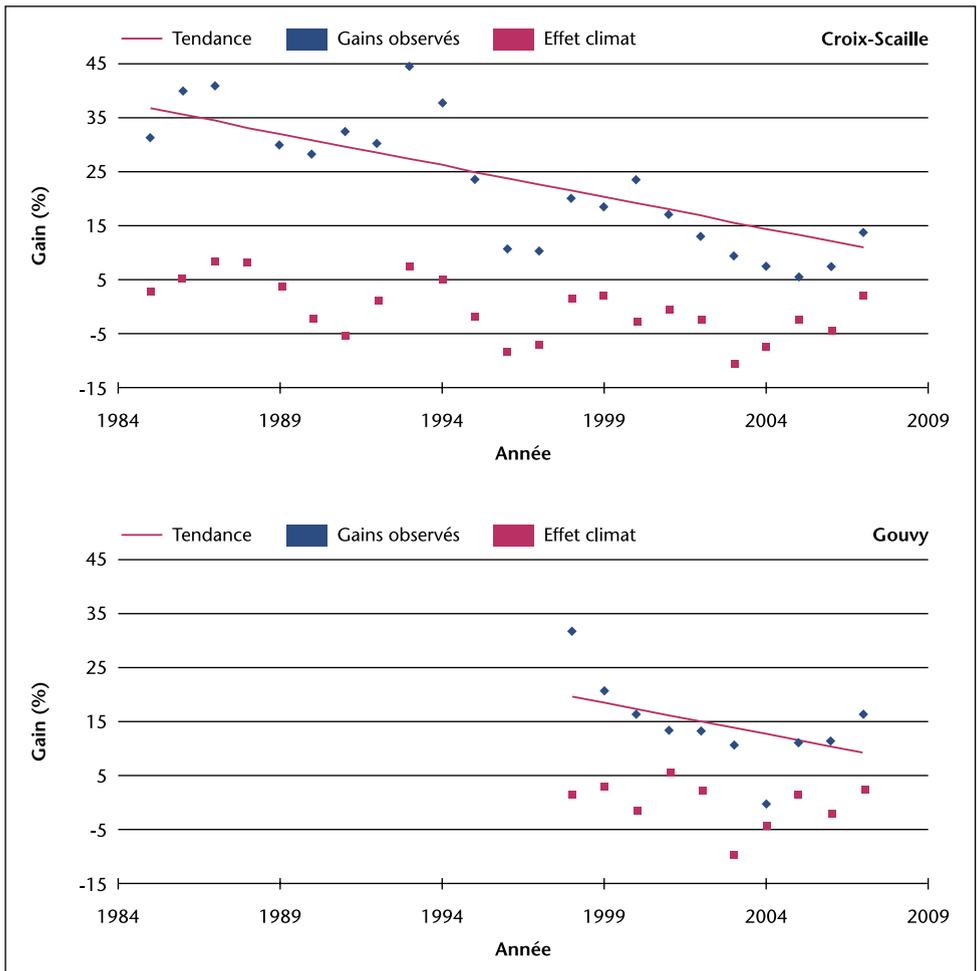


Figure 5 – Importance des facteurs climatiques dans la variabilité temporelle du gain autour de sa tendance. La ligne rose représente la tendance, prédite par le modèle, due à l'effet du dispositif et à l'effet du temps écoulé depuis l'amendement. Les losanges bleus foncés représentent les observations. Les carrés roses représentent l'effet du climat prédit par le modèle.

- l'effet du dispositif est significatif, c'est-à-dire que le gain sur le dispositif de la Croix-Scaille est significativement plus important que sur le dispositif de Gouvy ;
- l'effet du « Bilan $\alpha-1$ » et l'effet du « Bilan α » sont hautement significatifs pour expliquer le gain de croissance dû

à l'amendement. Ces deux facteurs ont donc un effet positif sur le gain.

Mise en évidence de l'effet du climat sur le gain de croissance dû à l'amendement

On observe à la figure 5 l'importance des effets climatiques sur le gain.

Nous avons vu que l'effet du dispositif était significatif. Le gain sur le dispositif de la Croix-Scaille est significativement plus important que sur le dispositif de Gouvvy. Cela est peut-être dû aux conditions climatiques plus pluvieuses sur le dispositif français. Les périodes de sécheresse seraient alors moins marquées. Cela pourrait aussi être dû à un sol initialement plus pauvre à la Croix-Scaille, ce qui pourrait augmenter le gain dû à l'amendement, ou encore à une différence d'état sanitaire entre les dispositifs au moment de l'amendement. La surface terrière des deux peuplements étant très proche lors du dernier inventaire (tableau 1), celle-ci ne semble pas être la cause de cette différence de gain.

Nous avons également vu que le gain d'accroissement dû à l'amendement est positif sur les deux sites. De nombreuses études ont déjà montré un effet bénéfique des amendements sur l'état nutritionnel et la vigueur de peuplements forestiers^{4, 5, 6, 7, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 32, 33}.

La plupart de ces recherches ont étudié l'effet de la fertilisation et de l'amendement sur la vigueur des arbres par le biais de mesures d'accroissements, qui constituent un bon indicateur de la vitalité des individus¹². Toutefois, dans la majorité de ces travaux, l'accroissement était déterminé sur base de comparaison d'inventaires de circonférences, effectués à intervalles de temps de plusieurs années, ce qui rend difficile la détermination précise du moment où les effets des traitements sont significatifs. Notre analyse des cerne d'accroissement permet

par contre de comparer la dynamique de croissance entre les différents traitements. De plus, une analyse dendrochronologique est assez précise pour mettre en évidence et analyser les interactions susceptibles d'apparaître entre les effets traitements et ceux des paramètres climatiques.

Les essais d'amendement mis en place au cours des dernières décennies en Wallonie et en France constituent une belle opportunité pour étudier, au moyen de méthodes dendrochronologiques, les effets à court, moyen et long termes des apports minéraux sur la vitalité de différentes essences, ainsi que la capacité de ces traitements à influencer la réponse des arbres aux stress associés à l'évolution du climat. De plus, les données obtenues sur ces dispositifs peuvent également être couplées aux données sanitaires qui y ont été mesurées.

Les premiers résultats obtenus ici, montrent que l'écart de croissance entre les deux traitements semble maximal lors des années à plus forte croissance et minimal lors des années à plus faible croissance. Il semblerait donc qu'à certains moments de crise, d'autres facteurs interagissent avec la disponibilité en nutriments.

On observe après l'application de l'amendement que l'effet de la durée sur le gain est hautement significatif. Après avoir atteint son maximum, l'effet de l'amendement diminue avec le temps. Cette tendance à long terme, identique pour les deux dispositifs, semble être indépendante du peuplement et du site. Cet effet paraît également indépendant des conditions climatiques, l'apport ayant eu lieu à des moments différents.

La variabilité du gain de croissance dû à l'amendement autour de cette tendance semble être expliquée principalement par les facteurs climatiques. L'effet du « Bilan $\alpha-1$ » et l'effet du « Bilan α » sont hautement significatifs pour expliquer le gain. Ces deux facteurs ont un effet positif sur le gain. Chez l'épicéa, la croissance printanière du cerne participe pour la plus grande partie à la croissance annuelle puisque le bois d'été est relativement plus mince que le bois de printemps²⁹. La croissance des tissus au printemps nécessite une quantité importante d'hydrate de carbone. Cette quantité ne peut pas toujours être fournie par les aiguilles des années précédentes. Les matières de réserve sont alors nécessaires. La quantité des matières de réserve dépend de l'accumulation qui a pu se faire lors des années précédentes, en fonction des conditions environnementales qui ont prévalu¹. On peut comprendre qu'une bonne alimentation en eau couplée à une amélioration des caractéristiques chimiques du sol puisse optimiser les conditions de formation de la masse foliaire et de la réserve, propices à la croissance radiale du cerne formé l'année suivante. Cela expliquerait l'effet positif du « Bilan $\alpha-1$ ».

L'importance de la disponibilité en eau de l'année sur le gain est moins évidente à expliquer. Cependant, les caractéristiques écophysologiques de l'épicéa dans notre région sont dominées par une forte sensibilité aux disponibilités hydriques pendant la saison de végétation. L'enracinement superficiel implique une prospection limitée des horizons profonds du sol. La régulation stomatique n'est pas toujours optimale sur cette espèce¹⁹. Cela pourrait expliquer pourquoi des conditions climatiques défavorables de l'année de crois-

sance du cerne peuvent limiter le gain de croissance possible dans de meilleures conditions.

Ces premiers résultats semblent décrire, pour l'épicéa sur sols bruns acides, une diminution de l'effet positif annuel de l'amendement avec le temps écoulé ainsi qu'avec de mauvaises conditions climatiques encourues durant l'année précédente et celle en cours. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le gain d'accroissement en surface terrière reste toujours plus élevé pour les arbres amendés qui ont, plusieurs années après l'application, obtenu un diamètre plus important.

La disponibilité en eau du sol semble agir ici en tant que facteur limitant le gain de croissance radiale dû à l'amendement. D'une manière générale, l'alimentation en eau n'est pas limitante en Ardennes, la principale limitation à la croissance étant l'alimentation en éléments minéraux. Toutefois, durant les années plus sèches, les difficultés d'alimentation minérale sont aggravées.

L'affinement du traitement des données pour la mise en évidence de l'interaction entre l'amendement et le climat, ainsi que pour l'étude de la résilience de l'essence après une forte sécheresse, est en cours. Des données pédologiques, pour une bonne estimation de la réserve en eau utile du sol, doivent être apportées à cette étude pour améliorer l'interprétation des résultats.

Il faut néanmoins faire remarquer qu'une des limites de cette étude est la faible répétition d'incidents climatiques lors de la période de mesure, et donc la difficulté de validation de nos interprétations. Une

autre limite vient du fait que nous n'avons pas pris en compte les arbres morts. Cela pourrait être un biais important pour étudier la vitalité des peuplements forestiers dans un contexte de dépérissement⁹.

CONCLUSION

L'amendement peut être utilisé à des fins curatives, pour corriger un appauvrissement des sols et remédier au dépérissement de peuplements fragilisés par un tel appauvrissement. Il peut également être utilisé à des fins préventives sur des sols acides et pauvres¹⁰.

Le caractère acide des sols forestiers wallons, échantillonnés dans le cadre de la réalisation de l'Inventaire permanent des ressources ligneuses de Wallonie, est bien marqué : 75 % des échantillons présentent un pH eau inférieur à 4,5¹⁵. La majorité des sols forestiers analysés présentent un risque de carence en éléments nutritifs¹⁵. Mais il faut être prudent, tous les sols forestiers ne sont pas à mettre sur le même pied. Certains sols ne justifient aucunement d'être amendés en raison soit de leur richesse minérale initiale soit de contraintes particulières, comme les sols engorgés en permanence. Cette démarche doit-être parfaitement raisonnée en ce qui concerne les sols à traiter et les milieux eux-mêmes car certaines stations très acides correspondent à des habitats particuliers qui doivent être conservés dans leur état naturel, les tourbières en sont un exemple¹⁰.

Dans un écosystème donné, chaque essence présente une sensibilité particulière face aux aléas climatiques¹⁵. Étudier et quantifier cette sensibilité ainsi que

la résilience des essences forestières, en y intégrant l'impact de l'amendement, peut nous permettre de mieux comprendre comment les peuplements peuvent se retrouver en déséquilibre par rapport à l'évolution des conditions écologiques dans lesquelles elles se trouvent. Une amélioration des connaissances sur ce sujet pourra nous aider à établir des recommandations pour une gestion forestière réfléchie, permettant d'atténuer les effets de l'intensité des sécheresses et d'anticiper les mortalités des individus les moins résistants.

Outre l'application de l'amendement en forêt, il faut également tirer profit de la large gamme de tolérances offertes par les diverses essences forestières et donc assurer une bonne adaptation de l'essence aux potentialités naturelles du milieu. Au niveau des pratiques sylvicoles, il faudrait veiller à favoriser le recyclage des éléments nutritifs issus de la décomposition des litières et à limiter les exportations, par une gestion adéquate des résidus de récolte. ■

BIBLIOGRAPHIE

- 1 AUSSÉNAC G., PARDÉ J. [1985]. Forêts, climat et météores. *Revue Forestière Française* 37 (numéro spécial) : 83-104.
- 2 BECKER M., LÉVY G., LEFÈVRE Y. [1996]. Radial growth of mature pedunculate and sessile oaks in response to drainage, fertilization and weeding on acid pseudogley soils. *Annals of Forest Science* 53 : 585-594.
- 3 BENISTON M., DIAZ H.F. [2004]. The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate ? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change* 44 : 73-81.

- ⁴ BENSON M.L., MYERS B.J., RAISON R.J. [1992]. Dynamics of stem growth of *Pinus radiata* as affected by water and nitrogen supply. *Forest Ecology and Management* **52** : 117-137.
- ⁵ BONNEAU M. [1970]. Résultats après 9 ans de l'essai de fertilisation de Moulière (Vienne). *Annals of Forest Science* **27** : 111-125.
- ⁶ BONNEAU M. [1972]. Quelques résultats d'essai de fertilisation sur épicéa dans le massif central. *Revue Forestière Française* **24** : 355-363.
- ⁷ BONNEAU M., GELPE J., ILLY G. [1972]. Résultats de deux essais de fertilisation sur Pin maritime adulte dans les Landes. *Annals of Forest Science* **29** : 353-367.
- ⁸ BONNEAU M. [1996]. Sessile oak seedling fertilization and leaf mineral composition in western France. *Annals of Forest Science* **53** : 605-613.
- ⁹ BRÉDA N., BADEAU V. [2008]. Forest tree responses to extreme drought and some biotic event : towards a selection according to hazard tolerance. *C.R. Geoscience* **340** : 651-662.
- ¹⁰ BRÊTHES A. [2007]. Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés. *Rendez-Vous Techniques de l'ONF* **18** : 58-72.
- ¹¹ CHOISNEL E., DE VILLELE O., LACROZE F. [1992]. *Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté européenne*. Commission des Communautés européennes, Direction générale télécommunications, industrie de l'information et innovation, Luxembourg, 176 p.
- ¹² DOBBERTIN M. [2005]. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress : a review. *European Journal of Forest Research* **124** : 319-333.
- ¹³ GARBAYE J., LEROY P., OSWALD H. [1974]. Premiers résultats de cinq années de fertilisation sur jeunes peuplements de chêne en forêt de Bercé. *Revue Forestière Française* **26** : 51-58.
- ¹⁴ GELPE J., GUINAUDEAU J. [1974]. Essai de fertilisation minérale sur pins maritimes à Mizizan (Landes). Résultats après la 16^{ème} année. *Revue Forestière Française* **26** : 459-463.
- ¹⁵ GENOT V., COLINET G., BRAHY V., BOCK L. [2007]. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en Région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « L'État de l'Environnement wallon 2006-2007 »). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **13**(1) : 121-138.
- ¹⁶ HANSON P.J., WELTZIN J.F. [2000]. Drought disturbance from climate change : response of United States forests. *The Science of the Total Environment* **262** : 205-220.
- ¹⁷ KLEIN TANK A.M.G., KÖNNEN G.P. [2003]. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate* **16** : 3665-3680.
- ¹⁸ MANION P.D. [1981]. *Tree disease concepts*. Englewood Cliffs N.J., Prentice Hall.
- ¹⁹ MISSON L. [2000]. *Approche dendroécologique de l'influence du climat et de l'intensité d'éclaircie sur la croissance radiale de l'épicéa commun*. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, Louvain-la-Neuve, Belgique, 170 p.
- ²⁰ NYS C. [1981]. Réponse d'un peuplement adulte d'épicéa commun (*Picea abies* KARST.) à la fertilisation dans le Limousin. *Revue Forestière Française* **33** : 217-227.
- ²¹ NYS C. [1984]. Fertilisation de peuplements adultes d'épicéa commun dans le Massif Central. *Revue Forestière Française* **36** : 313-318.
- ²² NYS C. [1989]. Fertilisation, dépérissement et production de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans les Ardennes. *Revue Forestière Française* **41** : 336-346.
- ²³ NYS C. [1991]. Intérêt des amendements pour la production et la santé de l'épicéa commun en condition de sol acide. *La Forêt Privée* **201** : 30-38.
- ²⁴ NYS C. [2006]. Les remèdes existants : La restauration des sols acides par l'amende-

- ment calco-magnésien : une technique au point, mal relayée par les organismes professionnels et trop peu répandue. *La Forêt Privée* 289 : 33-40.
- ²⁵ OGLE K., WHITHAM T.G., COBB N.S. [2000]. Tree-ring variation in pinyon predicts likelihood of death following severe drought. *Ecology* 81 : 3237-3243.
- ²⁶ OVERPECK J.T., RIND D., GOLDBERG R. [1990]. Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation. *Nature* 343 : 51-53.
- ²⁷ PICARD J.F., BECKER M., NYS C., DUPOUEY J.L. [1999]. Évolution à moyen terme de la croissance radiale de l'épicéa et du hêtre en relation avec la fertilisation/amendement : analyse dendroécologique. *Revue Forestière Française* 51 : 197-218.
- ²⁸ SCHÄR C., VIDALE P.L., LÜTHI D., FREI C., HÄBERLI C., LINIGER M.A., APPENZELLER C. [2004]. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427 : 332-336.
- ²⁹ SCHWEINGRUBER F.H. [1988]. *Climatic information for the past hundred year in width and density of conifer growth rings*. In : WANNER H. *Long and short term variability of climate*. U. Siegenthaler. Springer-Verlag, Berlin : 35-55.
- ³⁰ SIWECKI R., UFNALSKI K. [1998]. Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology* 28 : 99-112.
- ³¹ STOKES M.A., SMILEY T.L. [1968]. *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press, Tucson.
- ³² SNOWDON P., BENSON M. L. [1992]. Effects of combinations of irrigation and fertilisation on the growth and above-ground biomass production of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 52 : 87-116.
- ³³ SPIECKER H. [1991]. Growth variation and environmental stresses : long-term observations on permanent research plots in southwestern Germany. *Water, Air and Soil Pollution* 54 : 247-256.
- ³⁴ THOMAS F.M., BLANK R., HARTMANN G. [2002]. Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32 : 277-307.
- ³⁵ YAMAGUCHI D.K. [1990]. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21 : 414-416.

RAPHAÈLE VAN DER PERRE

raphaele.vanderperre@uclouvain.be

MATHIEU JONARD

mathieu.jonard@uclouvain.be

QUENTIN PONETTE

quentin.ponette@uclouvain.be

Earth and Life Institute,
Université catholique de Louvain
Place Croix du Sud, 2 bte 9
B-1348 Louvain-la-Neuve

CLAUDE NYS

nys@nancy.inra.fr

Biogéochimie des écosystèmes forestiers,
INRA Nancy
F-54280 Champenoux