

WALDSTERBEN !

 **DOSSIER**

**réalisé sous la direction de
P. GIOT ET F. MALAISSE.**

**Coordination :
V. DURAN, V. THIERRON**



LA FORÊT SOUS HAUTE SURVEILLANCE

Waldsterben : ce terme ne signifie plus grand chose pour le commun des mortels mais il fit frémir de nombreux scientifiques au début des années 80. C'est à cette époque que des chercheurs allemands, effrayés par la vitesse et l'amplitude du dépérissement des forêts résineuses dans leur pays, ont nommé *Waldsterben* ou «mort de la forêt⁽¹⁾» ce phénomène nouveau et sans précédent quant à son étendue et à l'intensité de ses dégâts. Certains scientifiques n'hésitèrent pas à considérer le *Waldsterben* comme «*l'un des problèmes pathologiques les plus marquants du XX^e siècle⁽²⁾*».

Depuis les années 1970, les forestiers allemands se sont intéressés plus particulièrement au sapin pectiné (*Abies alba*), une espèce qui semblait atteinte, périodiquement, d'une maladie mystérieuse qui touchait le Nord des Alpes⁽²⁾. En 1979 et 1980, ils assistèrent à nouveau à l'apparition de signes de dépérissement, mais cette fois nettement plus intenses et sur une superficie plus large.

A la même époque, des forestiers de Bavière et d'autres régions du Sud

de l'Allemagne observèrent pour la première fois un changement dans l'apparence d'épicéas (*Picea abies*) âgés. Les arbres montraient, à l'est et au sud ou dans les forêts de basse altitude des plaines entourant Munich, des symptômes jamais observés auparavant. Les symptômes progressaient parfois très rapidement, depuis la défoliation partielle de la couronne à la défoliation totale, voire même jusqu'à la mort des arbres. Cette nouvelle «maladie» de l'épicéa, qui présentait de nombreux traits communs avec les symptômes observés précédemment sur les sapins pectinés, attira très vite l'attention des pathologistes et des forestiers de terrain. Entre 1980 et 1984, des symptômes similaires furent observés également dans les pessières de la plupart des pays d'Europe Centrale, du sud de la Scandinavie ou des Balkans, dans le nord de l'Italie, ainsi que (probablement) sur de larges étendues d'Europe de l'Est.⁽²⁾

Peu à peu, la liste des espèces concernées s'allongea. Les feuillus montrèrent également des signes inquiétants et finalement, les princi-

pales essences forestières d'Europe semblèrent être touchées. Les forêts européennes ne furent pas les seules concernées ; simultanément, on observait des symptômes de dépérissement dans l'est des Etats-Unis⁽³⁾ et au Canada.

Certaines caractéristiques communes furent relevées à l'époque et inquiétèrent les experts :

- la simultanéité de l'apparition des symptômes dans différentes parties de l'Europe, et de l'autre côté de l'Atlantique,

- l'augmentation constante de l'intensité des dommages et de leur distribution géographique,

- la grande diversité des essences forestières touchées, tant indigènes qu'exotiques,

- l'hétérogénéité des symptômes d'une région à l'autre, d'un peuplement à l'autre, ou même au sein d'une essence,

- l'apparente indépendance, du moins dans certains cas, vis-à-vis de paramètres climatiques ou topographiques, vis-à-vis de la richesse du sol, de l'altitude, des modes de gestion ou des pratiques sylvicoles, ou

encore vis-à-vis de l'âge des arbres atteints, bien que les plus âgés soient souvent plus touchés.

En Région wallonne, ce sont les membres du service forestier de la région d'Eupen qui tirèrent la sonnette d'alarme lors de l'hiver 1982-1983: on constatait chez l'épicéa des jaunissements et des pertes d'aiguilles, ainsi que de nombreuses nécroses. Des rameaux et des branches dépérissaient, entraînant, dans certains cas, la mort des arbres dans leur entièreté.

Les «pluies acides»

Très vite le problème fut médiatisé et les premières explications scientifiques largement diffusées dans la presse : les nuages, en passant au-dessus des zones industrielles, se chargeraient de polluants chimiques émis par des cheminées d'usines de plus en plus hautes. Lors de pluies ou de chutes de neige, les éléments toxiques se déposeraient sur la surface des feuilles, y pénétreraient et viendraient altérer les fonctions vitales de l'arbre. Des reportages et des photos-chocs ont montré des cen-

taines d'hectares d'épicéas sans aiguilles, tels des fantômes décharnés, en Allemagne de l'Est, en Pologne ou en Tchécoslovaquie, régions où les émissions de dioxyde de soufre étaient énormes à l'époque. De multiples études scientifiques ont démontré les effets toxiques, à concentration élevée, d'un grand nombre de polluants issus des industries et du trafic automobile. Des dommages importants ont ainsi pu être observés à proximité de grands complexes industriels ou dans des régions situées le long des trajets de vents dominants transportant les polluants. Les prédictions de l'époque avaient annoncé la disparition des forêts en dix ans! Cependant, le dépérissement s'est avéré nettement moins spectaculaire et rapide que prévu. Si ce que certains ont appelé le «soufflé politico-médiatique⁽⁶⁾» est retombé, il n'en reste pas moins vrai que les forêts continuent à dépérir, peu ostensiblement, mais de manière continue. Après le vent de panique qui a suivi la prise de conscience des effets nocifs des polluants à fortes concentrations, les inquiétudes ont persisté quant aux effets plus pervers d'une pollution plus diffuse mais chronique. En outre, vu la diversité des espèces et des sites touchés, de nouvelles hypothèses, impliquant d'autres facteurs de stress, ont été envisagées. On s'est rendu compte que l'on avait beaucoup de mal à extrapoler les réactions des écosystèmes forestiers face à des facteurs «perturbateurs», en grande partie par manque de connaissance de leur fonctionnement.

Prise en main par la Commission européenne

C'est dans ce contexte que bon nombre d'études ont démarré, en Belgique et dans l'Europe toute entière. Très vite également, le besoin de pouvoir suivre l'évolution de l'état sanitaire des forêts, à grande échelle, s'est fait sentir. Dans de nombreux pays, des programmes nationaux de surveillance des forêts ont été lancés. Cependant, dans le cadre de la convention internationale sur la pollution atmosphérique transfrontalière signée à Genève en 1979, un groupe de travail sous présidence allemande s'est efforcé d'harmoniser, à partir de 1985, les protocoles nationaux des réseaux d'observation d'une vingtaine de pays du continent européen. C'est sur cette base qu'un protocole communautaire, devant s'appliquer à l'ensemble des forêts de l'Union européenne, a été proposé.

Celui-ci repose sur un réseau sys-

tématique, appelé *de niveau 1*, de placettes de 20 à 30 arbres implantées au nœud d'une grille à mailles carrées de 16 km de côté. Dans certains pays ou régions, un maillage plus dense permet de mieux tenir compte des contextes locaux. Tel est le cas du réseau wallon dont le maillage est de 8 x 8 km.

Un nombre croissant de pays participe à cet inventaire transnational, dans le cadre duquel l'état des couronnes des arbres est évalué chaque année sur les différentes placettes. Ce réseau vise à donner une idée statistiquement représentative des grandes évolutions interannuelles qui affectent la vitalité des forêts européennes, sur base d'un protocole harmonisé, sans préjuger des mécanismes éventuels en cause.

Aujourd'hui ce sont 30 Etats (les 15 membres de l'Union européenne plus 15 pays non communautaires, pour la plupart des pays d'Europe centrale et de l'Est ainsi que la Suisse), qui participent au réseau européen. Pour le réseau transnational (16 x 16 km), 117.035 arbres échantillons ont été observés en 1995.

Si l'on tient compte des inventaires nationaux, c'est 25.170 placettes, représentant 634.993 arbres qui sont sous la loupe.

L'arbre de référence

La définition de l'arbre de référence pose encore un problème. Pour certains, l'estimation doit se faire par rapport à un arbre identique pour tous, il s'agit alors d'un arbre en condition idéale de croissance, sans véritable concurrence, dont la couronne est bien développée dans toutes les directions. Dans ce cas, sauf conditions particulièrement favorables, l'évaluateur aura tendance à sous-estimer l'état sanitaire de son arbre. Pour d'autres, l'arbre de référence doit être choisi en tenant compte des particularités de la région où se trouve la placette, tant en ce qui concerne les conditions climatiques, que les aptitudes stationnelles. Dans ce cas, l'arbre de référence choisi est nettement moins «parfait» car on tient compte des possibilités réelles permises à un peuplement. En travaillant ainsi, on évite bien souvent de surestimer la perte de feuillage. Cependant cette méthode est nettement plus compliquée car elle demande de la part des évaluateurs une connaissance parfaite des potentialités des différentes régions. Dans la majorité des pays, c'est une méthode intermédiaire qui semble avoir été choisie.

L'objectif de comparabilité des données à l'échelle européenne semble particulièrement difficile à atteindre.

En ce qui concerne l'estimation sur le terrain, il semble exister une relativement bonne cohérence dans le temps entre équipes d'un même pays.

Par contre, la sévérité de la notation est parfois très différente d'un pays à l'autre (cf. encart *L'arbre de référence*).

Barthod⁽⁵⁾ souligne particulièrement bien la subjectivité d'une telle étude qui peut toutefois, si elle est réalisée sur une période d'observation suffisamment longue, apporter nombre d'informations quant au rétablissement ou à l'aggravation de l'état de santé de nos forêts.

Il signale encore que «le réseau européen a le mérite d'autoriser un bilan certes grossier dans ses indicateurs et son échelle spatiale mais reposant sur un protocole international, de grandes variations de vitalité des peuplements. Il permet de relativiser de manière relativement fiable, les appréciations subjectives et souvent pessimistes de la santé actuelle des forêts. Avec un recul supplémentaire de quelques années, ce réseau devrait permettre de repérer d'éventuelles évolutions à grande échelle de la vitalité de certaines essences, de certains types de peuplements ou de certains grands massifs, sans pouvoir néanmoins caractériser de façon précise les dysfonctionnements particuliers des écosystèmes forestiers concernés⁽⁵⁾».

Définition du dépérissement

A la lumière des études les plus récentes, la notion de dépérissement forestier a été redéfinie par Delatour «Un dépérissement est un affaiblissement généralisé dont les causes sont a priori mal identifiées, affectant une ou plusieurs espèces et entraînant la mort d'un certain nombre de sujets. Ce terme caractérise un certain nombre d'anomalies, perceptibles à l'œil nu sur le terrain, l'une étant plus particulièrement la mort d'organes pérennes (rameaux, ramilles,...). La notion de dépérissement inclut également une certaine idée d'évolution dans le temps qui traduit le fait que l'issue pour l'arbre dépérissant est jugée grave mais pas obligatoirement fatale⁽⁶⁾».

Dans un premier temps les scientifiques, principalement les physiolo-

gistes, ont cherché à réduire le phénomène de dépérissement au schéma classique de relation de cause à effet mettant en jeu un facteur ou un pathogène principal. On sait aujourd'hui que ces phénomènes sont intrinsèquement complexes⁽⁷⁾.

Selon Sinclair^(8,9), un dépérissement met en jeu un système de 3 échelons successifs de facteurs; les facteurs *prédisposants*, les facteurs *déclenchants* et les facteurs *aggravants*. Un des apports de Manion⁽¹⁰⁾ est d'avoir avancé que les facteurs impliqués dans le dépérissement ne sont pas obligatoirement les mêmes d'un endroit à l'autre (ce qui complique leur analyse) mais sont, en partie au moins, interchangeables. Le dépérissement d'arbres est ainsi un phénomène sensiblement différent de la plupart des autres maladies pour lesquelles une des constantes est l'association entre l'agent causal et l'hôte malade.

Un inventaire des facteurs reconnus comme pouvant intervenir sur le dépérissement des chênes a été effectué par Malaisse *et al.*⁽¹¹⁾ Il a fait l'objet d'une fiche technique remise aux agents de la D.N.F. Il est également repris dans l'Etat de l'Environnement wallon 1995.⁽¹²⁾

Le rôle actuellement attribué à la pollution atmosphérique

Certains auteurs ont suggéré que la pollution atmosphérique pouvait être le dénominateur commun de la plupart des dépérissements. Cette hypothèse apparaît aujourd'hui peu crédible. On s'accorde de plus en plus à considérer que la pollution atmosphérique diffuse explique, au mieux, une (petite) partie des nombreux cas de dépérissements forestiers recensés de par le monde, et qui ne sont en aucun cas limités à l'Europe et à l'Amérique du Nord, où l'on trouve la majorité des sources de polluants⁽⁷⁾.

Classiquement, on distingue les «dépôts secs» et les «dépôts humides». Les *dépôts secs* sont constitués de polluants gazeux primaires (SO₂, NO_x, hydrocarbures) ou secondaires photochimiques (l'ozone) et des particules en suspension dans l'air. Alors que les polluants gazeux primaires se manifestent généralement à une distance proche de la source d'émission (échelle de 10 km), les effets des polluants secondaires peuvent s'étendre à des centaines, voire à des milliers de kilomètres. Les *dépôts humides* sont constitués de polluants transformés, dissous dans l'eau de pluie et les

gouttelettes de brouillards et de nuages. Les effets de ces dépôts peuvent être ressentis à plusieurs centaines de kilomètres.

Les effets de la pollution peuvent en outre être *directs* quand les polluants agissent spécifiquement sur un constituant de l'écosystème, généralement sur le feuillage. Ils peuvent être *indirects*, quand l'action des polluants sur l'un des constituants de l'écosystème (le sol par exemple) entraîne des altérations des autres constituants (les arbres, la microfaune et la microflore du sol). La désaturation des sols, souvent déjà pauvres dans les forêts d'Ardenne suite à l'impact des pluies acides, est une illustration typique d'effets indirects. Cet appauvrissement des sols en cations peut constituer un facteur prédisposant, voire aggravant pour le dépérissement forestier.

Effets directs des polluants atmosphériques sur les arbres (d'après Landmann⁽¹³⁾)

Dioxyde de soufre (SO₂)

De fortes concentrations en SO₂ peuvent entraîner des brunissements et des taches nécrosées sur les aiguilles ou les feuilles⁽¹⁴⁾, mais c'est combiné avec d'autres stress, tel que le gel, que le dioxyde de soufre devient le plus nocif. Des records de concentration en SO₂ (plus de 70 ppb*) ont été observés pendant quelques jours des hivers de 1986 et de 1987 au site du Donon dans les Vosges. Mais depuis 1987, de telles concentrations n'ont plus été mesurées, d'une part parce que les hivers ont été doux (sans vents d'est amenant de l'air pollué d'Europe centrale) et d'autre part à cause de la réduction des émissions. Si l'on se base sur les valeurs critiques déterminées pour les arbres forestiers, il semble que les niveaux actuels de concentration en SO₂ dans l'atmosphère ne devraient pas avoir d'effet significatif sur la santé des forêts.

Ozone (O₃)

Depuis le milieu des années 1980, différentes études ont porté sur les effets de l'O₃ sur les arbres forestiers en Europe et en Amérique du Nord. Selon les premiers travaux⁽¹⁵⁾, des concentrations élevées en O₃ auraient pu augmenter le lessivage des éléments nutritifs des aiguilles menant ainsi au jaunissement du feuillage. Depuis, de nombreuses autres études ont été menées, donnant parfois des résultats contradictoires. Certains auteurs ont noté une aggravation des effets dus à la sécheresse en présence d'O₃, cependant ce-



Dispositif lysimétrique : des plaques ont été enfoncées à différentes profondeurs dans le sol afin de récolter par gravité l'eau du sol issue de ces différentes profondeurs. La composition chimique de cette eau est analysée.

ci dépendrait des espèces et de l'intensité des sécheresses⁽⁷⁾.

Autres polluants

Les oxydes d'azote (NO_x), dont les concentrations semblent augmenter légèrement⁽¹⁶⁾ et le nitrate de peroxyacétyle (PAN), ne semblent pas affecter de manière significative les arbres, au vu des concentrations qui ont été déterminées comme étant nocives.

Le brouillard acide semble entraîner plusieurs types de perturbations :

1.— effets nocifs à la surface d'aiguilles de conifères, mais qui pourraient être surpassés par des facteurs naturels;

2.— augmentation du lessivage foliaire mais sa contribution à la perturbation nutritionnelle est incertaine;

3.— seul ou en interaction avec le gel ou la sécheresse, il causerait des perturbations physiologiques et des dommages visibles;

4.— en interaction avec l'O₃ et des événements climatiques, il pourrait contribuer au dépérissement de conifères en altitude. Malgré le grand nombre d'études qui sont menées sur ce sujet, il semble que des consensus soient difficilement trouvés, d'autant plus lorsque l'on cherche à déterminer l'effet de facteurs combinés.

Effets indirects des polluants atmosphériques sur les arbres⁽¹⁷⁾

De manière naturelle, la nutrition

des plantes entraîne une acidification du sol (libération de H⁺ lors du prélèvement des cations basiques par les racines). Cependant, actuellement un certain nombre de polluants (SO₂, NO_x, NH₄) entraîne une accélération de l'acidification. D'après une étude menée dans les Vosges et dans les Ardennes françaises, les apports atmosphériques de protons (H⁺) se situeraient entre 1 et 1,5 Keq. par hectare et par an⁽¹⁸⁾.

Les apports acides sont normalement tamponnés par l'altération des minéraux primaires et secondaires du sol. Cependant, quand les apports atmosphériques de protons sont très importants, ceux-ci prennent la place des cations basiques et de l'aluminium sur les sites d'échanges des particules du sol. Cette désaturation en cations basiques entraîne leur mise en solution, ce qui les rend susceptibles d'être emportés rapidement par le lessivage du profil. Ainsi le bilan en cations basiques devient négatif, les sorties (lessivage et prélèvement par les plantes) sont supérieures aux entrées (apports atmosphériques et altération lente des roches). On assiste donc à une diminution des cations échangeables du sol (phosphore, potassium, calcium, magnésium) qui constituent une grande part des éléments nutritifs des arbres. En fonction des éléments qui constituent les roches et de la richesse naturelle du sol, des carences en différents éléments peuvent se faire sentir plus ou

moins rapidement. Bien souvent dans nos sols forestiers, c'est la disponibilité en magnésium, en calcium, ou en potassium qui diminue nettement. D'autre part, la mise en solution de l'aluminium entraînerait, soit des problèmes de toxicité pour les racines, soit des difficultés pour le prélèvement de calcium et de magnésium par les plantes⁽¹⁹⁾. De plus, il semble que la transformation chimique des sols notamment sous l'influence des dépôts acides, permettrait le développement d'une microflore fongique qui générerait la nutrition minérale⁽²⁰⁻²¹⁾. Les apports atmosphériques d'azote qui accompagnent souvent les dépôts acides peuvent également sur des sols déjà pauvres, aggraver les déséquilibres nutritionnels existants ou latents (essentiellement en magnésium et calcium)⁽²²⁾.

Symptômes et diagnostic précoce du dépérissement

D'après Landmann⁽⁷⁾ les symptômes de dépérissement les plus souvent cités sont

◆ au niveau de la cime

- modification de la structure du houppier : diminution des niveaux de ramification par perte de rameaux et de ramilles, croissance faible des rameaux d'où, chez les feuillus, apparence de feuilles disposées en rosette;

- microphyllie (feuilles ou aiguilles de petite taille);

- perte d'aiguilles anciennes chez les résineux et pertes de rameaux, surtout chez les feuillus;

- mort de portions de la couronne conférant aux cimes une allure irrégulière;

- descente de cime par développement de bourgeons dormants et surtout par la mort de rameaux et de ramilles de l'année;

- décurtation;

- jaunissements automnaux précoces ou liés à des carences minérales;

Jaunissement et nécrose⁽²³⁾

Le jaunissement des feuilles, associé à un préjudice chronique, est une manifestation de l'altération des chloroplastes et de la chlorophylle. Ce changement de couleur apparaît comme une accélération de la sénescence naturelle. Par contre, la présence de taches de nécrose ou de brunissement indique la mort brutale des cellules, préalablement à l'apparition naturelle de la sénescence et résulterait de l'altération des composants de la structure des cellules.

◆ **au niveau du tronc :**

- apparition de nécroses ou chute d'écorce, ce qui crée une porte d'entrée aux agents pathogènes entraînant la formation de nécroses ;
- chez les feuillus, développement de gourmands en l'absence de lumière.

◆ **au niveau racinaire :**

- dégénérescence fréquente des racines fines et mycorhizes ;
- baisse des réserves d'amidon.

◆ **en ce qui concerne la croissance :**

- réduction de la croissance de quelques années à plusieurs décennies avant l'apparition des symptômes visibles. D'après d'autres auteurs⁽²⁴⁾, cette réduction n'interviendrait qu'au moment où apparaissent les chloroses.

◆ **en ce qui concerne les caractéristiques spatio-temporelles :**

- dispersion au hasard (localement) des individus dépérissants (par opposition à l'action de certains pathogènes, dont l'action s'exerce de proche en proche) et relevant ainsi d'une résistance individuelle variable (dépendant du potentiel génétique, notamment) ;
- persistance, aggravation et parfois régression des symptômes durant plusieurs années.

Tous ces symptômes ne sont pas observés dans tous les cas et certains sont moins systématiques qu'on l'a cru au départ.

Un souci actuel des scientifiques est d'arriver à diagnostiquer le plus tôt possible le dépérissement. Un certain nombre de tests ont été développés et adaptés en ce sens. Garrec *et al.*⁽²⁶⁾ ont fait une synthèse des différents tests existants qu'ils ont repris sous le terme de «tests physiologiques». Le test physiologique y est défini comme une méthode simple qui permet d'évaluer des modifications caractéristiques au niveau d'un



La «fenêtre», l'une des manifestations du dépérissement chez *Picea abies*.

Evolution typique d'un épicéa dépérissant en forêt d'Ardenne

Chez l'épicéa, le schéma d'évolution de la dégradation de la couronne est assez constant. En première phase, qui peut durer 3 à 4 ans, les aiguilles de la région sub-apicale jaunissent. En second lieu, les aiguilles jaunes de plus de 2 ans généralement, tombent en laissant dans l'arbre une «fenêtre» (cf. ci-dessus), transparence intense typique juste en dessous de la zone apicale. Partiellement défoliés, les rameaux et les branches au niveau de la fenêtre meurent progressivement, mais le sommet reste intact. Pendant la phase finale du déclin, la portion apicale de la couronne s'altère rapidement; puis, les rameaux de la partie basse de la couronne meurent. Cette séquence peut se dérouler en 6 à 10 ans⁽²⁴⁾. Cependant, dans certains cas l'état sanitaire des arbres se stabilise ou même s'inverse. Les bourgeons adventifs qui jusque là étaient à l'état de dormance, se développent quand les bourgeons apicaux ont disparu. Si le facteur limitant, par exemple une carence en Mg, est levé, par exemple par un amendement, ces bourgeons peuvent donner naissance à des rameaux sains qui se développeront correctement. Si par contre les conditions de nutrition restent défavorables, très vite les nouveaux rameaux présenteront les mêmes symptômes⁽²⁵⁾.

«paramètre physiologique» de l'arbre, et ceci le plus rapidement possible avant que des symptômes visibles n'apparaissent. Pour pouvoir caractériser les «agresseurs», ces tests doivent être idéalement spécifiques à ceux-ci. Le test le plus intéressant est celui qui s'applique directement sur le terrain, mais la plupart du temps, ils nécessitent des prélèvements sur les arbres qui seront ensuite traités en laboratoire.

Utilisés avec succès dans le passé pour caractériser deux grands agresseurs de la forêt, la pollution atmosphérique et les attaques d'insectes, on tente actuellement de les appliquer dans le cadre plus large du dépérissement forestier. Un grand nombre de ces tests permet simplement d'évaluer l'état de vieillissement de différentes parties de l'arbre. Il s'agit là d'un processus naturel, mais qui dans certains cas semble être accéléré par des facteurs extérieurs généralement inconnus mais parfois identifiés⁽²⁷⁾.

Tous les tests qui sont présentés dans le *tableau 1* ne peuvent pas être utilisés pour diagnostiquer le dépérissement, cependant, ils nous renseignent sur l'état de vitalité des arbres. Compte tenu des faibles niveaux de stress impliqués, il semble que les tests biochimiques soient les plus performants⁽²⁶⁾.

Des études anatomiques récentes sur des aiguilles et des petits rameaux d'épicéa souffrant de carence en magnésium, ont permis d'observer des anomalies au niveau des tissus vasculaires⁽²⁷⁾. Ces anomalies apparaissent sur les jeunes aiguilles (âgées de 2 ans, parfois 1 an), au niveau du phloème. Il y aurait donc des problèmes de translocation d'éléments nutritifs et de substances énergétiques élaborées au niveau foliaire, et qui sont ensuite distribués à l'ensemble de l'arbre.

Ces anomalies ressemblent à ce

TABLEAU 1 :
*Récapitulatif des tests physiologiques les plus souvent utilisés (d'après Garrec et al.⁽²⁶⁾). Une * repère les tests qui ont été appliqués sur des arbres dépérissants*

	Tests morphologiques	Tests physiologiques	Tests biochimiques
foliaires	taille des feuilles* perte de feuilles* perturbation des surfaces foliaires rapport poids sec/poids frais* perturbation des stomates	mesure de l'activité stomatique et de la transpiration mesure de l'activité photosynthétique fluorescence de la chlorophylle tests de Härtel pH et pouvoir tampon des tissus foliaires* conductivité des tissus foliaires* pH de surface* angle de contact des gouttes d'eau* quantité de cires cuticulaires* conductivité des lessivats* mesure de la couleur des feuilles* réflectance des feuilles analyse minérale foliaire*	mesure des pigments foliaires (chlorophylles, phénols) activité peroxydasique mesure des dégagements de gaz par les feuilles (éthylène, terpène) concentration en acide ascorbique
corticaux		pH des écorces* pouvoir tampon des écorces* conductivité des écorces* résistance électrique du cambium*	
racinaires	quantité de fines racines	coloration de l'amidon* degré de mycorhization	dosage de l'amidon*

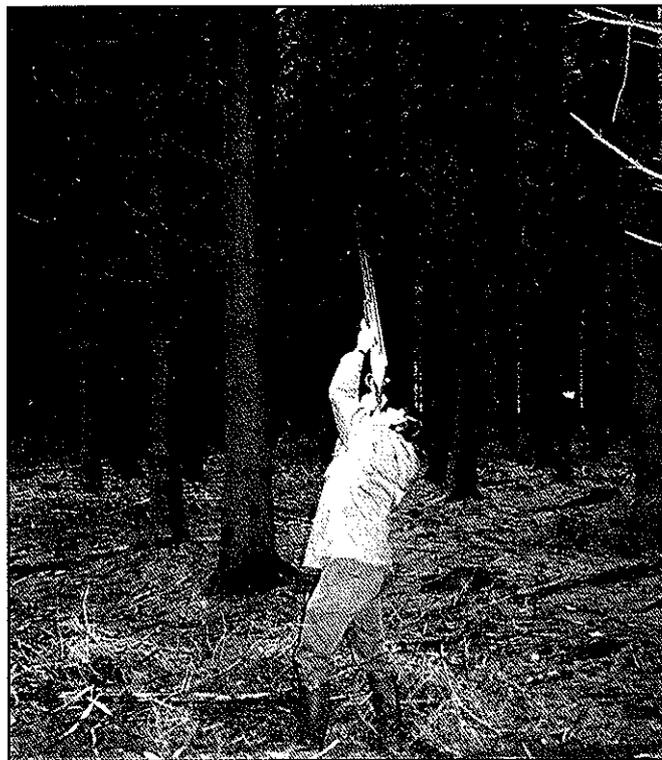
TABEAU 2 :
Classes de défoliation et de décoloration selon la classification de la NU/CEE et de la CE (UNECE)⁽²³⁾

classe de défoliation	% de défoliation	degré de défoliation
0	0 - 10%	nul
1	> 10 - 25%	léger
2	> 25 - 60%	modéré
3	> 60%	fort
4	100%	arbre mort

classe de décoloration	% de coloration anormale	degré de décoloration
0	0 - 10%	nul
1	> 10 - 25%	léger
2	> 25 - 60%	modéré
3	> 60%	fort
4	100%	arbre mort

TABEAU 3 :
Evolution de l'état sanitaire des arbres échantillons communs, entre 1989 et 1995

	Résineux	Feuillus	Total
Stationnaire	69	132	201
Amélioration	50	29	79
Dégradation	49	39	88



Le prélèvement d'échantillons de feuilles ou d'aiguilles se fait par tir au fusil (dans le tiers supérieur de l'arbre).

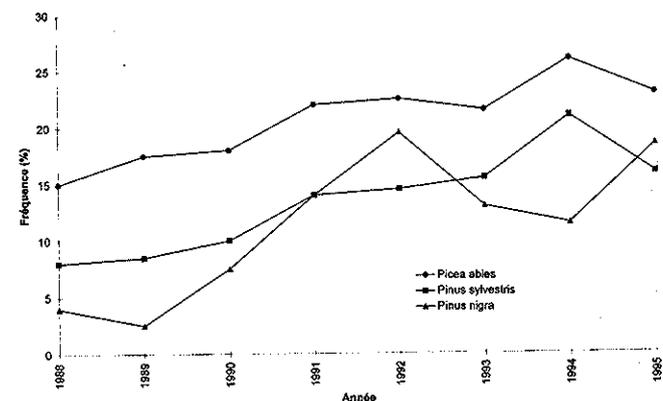


FIGURE 1. Evolution depuis 1988 de la défoliation supérieure à 25% des couronnes de différentes espèces résineuses

qu'on observe habituellement dans les aiguilles plus âgées (4 ans) d'arbres en bonne santé. Ceci suggère que le processus de dépérissement s'apparente, dans ce cas, à un phénomène naturel, le vieillissement des tissus, mais qui serait accéléré et amplifié.

Lorsque le dépérissement est lié à des problèmes nutritionnels, comme c'est souvent le cas dans les forêts ardennaises⁽²⁸⁾, le recours à l'analyse minérale foliaire, ou *diagnostic foliaire*, tel que l'a défini Bonneau⁽²⁹⁾, est une méthode qui donne de bons résultats et qui est encore largement utilisée. Il s'agit de doser les éléments dans les aiguilles ou les feuilles et de comparer ces teneurs avec les seuils de carence et ou les niveaux critiques proposés par différents experts. D'après Bonneau⁽²⁹⁾ la *teneur optimale* correspond à une croissance maximale. Le *niveau critique* est celui au-dessous duquel la croissance est nettement déprimée, c'est-à-dire au-dessous duquel la correction de la malnutrition apportera un gain technique (mais pas forcément économique) significatif. Au-dessous du *seuil de carence*, le végétal manifeste, outre une chute de croissance, des symptômes visibles de carence (coloration anormale, déformations, nécroses, dessèchement de rameaux, etc...).

Les teneurs mesurées dépendent de l'espèce, mais également de l'âge des arbres ou des aiguilles, de la saison durant laquelle les prélèvements sont faits, de la position de la feuille au sein de la couronne ou encore des conditions climatiques qui peuvent changer d'une année à l'autre. En plus de ces paramètres bien connus, il peut y avoir entre peuplements voisins des différences qui peuvent être dues à un grand nombre de facteurs souvent bien moins contrôlés (statut social, variations génétiques, micro-variations de la fertilité du sol ou des

conditions climatiques). Les prélèvements doivent donc se faire selon une procédure qui minimise les différentes sources de variation. En pratique, cela s'obtient en travaillant sur des échantillons prélevés à une position définie dans la couronne, à une période de l'année où l'on a observé une relative stabilité de la composition des feuilles (généralement la fin de l'été pour les feuillus et début de l'hiver pour la plupart des résineux), sur un nombre minimum d'arbres par peuplement et sur des aiguilles séparées par classes d'âge s'il s'agit de résineux.

Dans le cas où des carences nutritionnelles sont clairement mises en cause, le diagnostic foliaire, basé sur la comparaison avec des seuils empiriques, est une méthode simple et rapide pour pointer le ou les éléments déficients dans la plante. Lorsque les carences sont peu marquées ou lorsqu'il y a plutôt un déséquilibre entre les éléments, l'utilisation de rapports entre éléments est beaucoup plus instructive. Linder⁽³⁰⁾ propose d'utiliser le rapport de différents éléments majeurs, le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) ou le magnésium (Mg), sur l'azote (N). D'autres auteurs avancent des seuils pour des rapports d'éléments majeurs, tels que K/Ca, K/Mg ou Ca/Mg.

Bilan du dernier inventaire au niveau de l'Europe (1995)

Selon l'inventaire de 1995, 25,3% des arbres observés présentent une défoliation de plus de 25%. Les espèces feuillues sont autant touchées que les espèces résineuses. Par contre, seuls 10,2% des arbres présentent une décoloration de plus de 10% du feuillage. Les espèces les plus défoliées et décolorées parmi les feuillus sont les chênes *sp.* (30,9% d'entre eux sont endommagés) et parmi les résineux, ce sont les sapins

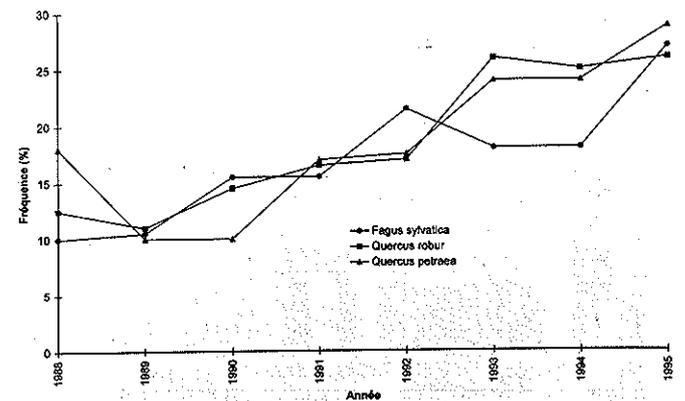


FIGURE 2. Evolution depuis 1988 de la défoliation supérieure à 25% des couronnes de différentes espèces feuillues

sp. qui sont les plus atteints (31,6%). Entre 1994 et 1995, l'état sanitaire des mélèzes s'est fortement altéré au niveau européen. L'intensité de la défoliation augmente avec l'âge des arbres, par contre la décoloration ne semble pas liée à l'âge.

Evolution depuis 1988

Seules les espèces les plus représentées ont été prises en compte pour évaluer l'évolution de 1988 à 1995. Les fréquences de résineux défoliés à plus de 25 %, sont reprises à la figure 1, la figure 2 concernant les feuillus. Si l'on considère les espèces qui nous concernent plus particulièrement en Wallonie, on note une légère amélioration en 1995 pour l'épicéa commun (*Picea abies*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) alors que, depuis 1988, leur état sanitaire se dégradait de manière lente mais continue. Par contre, pour nos 2 chênes indigènes (*Quercus robur* et *Quercus petraea*) et surtout pour le hêtre (*Fagus sylvatica*), la fréquence des arbres fortement défoliés (à plus de 25%) continue à augmenter.

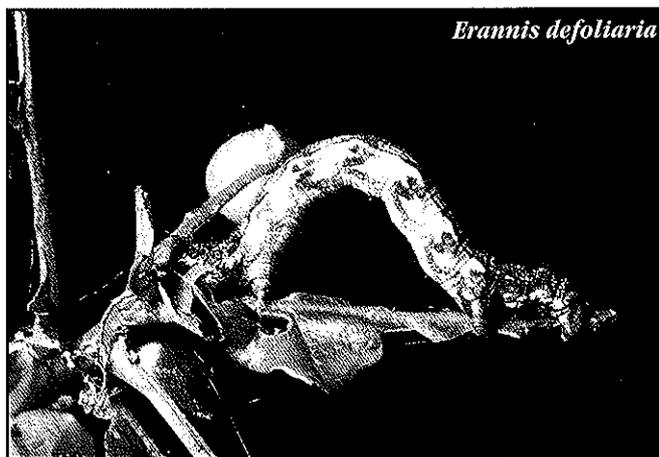
Que nous apprend le réseau européen d'inventaire de niveau I en Région wallonne ?

Chaque année depuis 1988, sur les 86 placettes du réseau transnational (22 placettes du réseau 16 x 16 km et 64 placettes du réseau 8 x 8 km), les agents de la Division de la Nature et des Forêts du Ministère de la Région Wallonne évaluent chacun des arbres, en notant le pourcentage de défoliation et de décoloration par rapport à un arbre de référence local (cfr. tableau 2). Chacune des placettes compte 24 arbres. La présence de causes identifiables de dommages est également notée (attaque d'insectes, dégâts de gibier, proximité d'une source de polluants,...).

Si l'on compare les résultats de 1989 à ceux de 1995⁽³⁾, uniquement pour les arbres qui sont suivis depuis le début de l'existence du réseau, repris de la figure 3, on observe que l'état sanitaire d'une grande majorité des feuillus (environ les deux tiers), est stationnaire depuis 6 ans. Par contre, pour les résineux, le nombre d'arbres dont l'état a évolué, vers l'amélioration ou vers la dégradation, est beaucoup plus important et relativement peu d'arbres sont restés au même stade. Cette évolution à moyen terme masque cependant des variations interannuelles, qui semblent surtout liées aux conséquences des chablis de 1990 et aux fluctuations climatiques, et qui apparaissent dans les pourcentages de la figure 4, basés sur l'ensemble des arbres du réseau (8 x 8 km).

L'état sanitaire des forêts, qui s'était aggravé entre 1989 et 1992, semble stabilisé en 1995, si l'on considère les symptômes observables sur les couronnes; l'effet perturbateur des chablis de 1990 s'est estompé, et les variations semblent actuellement liées aux fluctuations climatiques. On constate pour 1995 que 14,8% des 1553 arbres observés présentaient des symptômes inquiétants de défoliation (plus de 25% de défoliation). Ce pourcentage reste plus important pour les résineux, 18,4% contre 12,2% pour les feuillus, mais les résineux se sont globalement améliorés depuis 1993, contrairement aux feuillus.

Si on confronte cette situation aux analyses foliaires et aux analyses de sols et surtout à de nombreuses observations issues de recherches plus spécifiques, il est permis de conclure à une déstabilisation des écosystèmes forestiers les plus pauvres qui, dans la majorité des cas, s'explique en Wallonie par la conjonction de stress attribuables à différents facteurs tels que :



Erannis defoliaria

A propos des chenilles défoliatrices

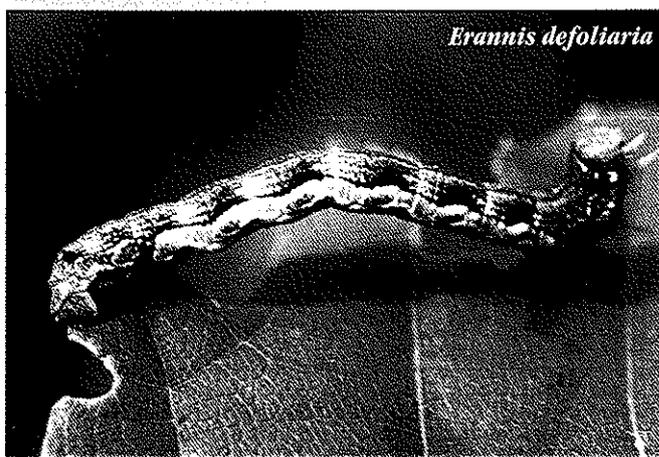
(V. Claes, F.U.S.A.Gx)

On a pu observer ces deux dernières années des attaques conséquentes de chenilles dans nos peuplements et ce au travers de toute la région wallonne. C'est toutefois au cours du printemps 1996 que des dommages nettement plus importants sont apparus. L'ensemble de ces derniers s'observe aisément par la défoliation des cimes entraînant parfois une perte totale du feuillage; de nombreuses chênaies présentaient une allure dépouillée vers les mois d'avril et de mai pour retrouver leur aspect normal avec l'apparition d'un second feuillage. L'intensité des déprédations est directement liée à la synchronisation des phénomènes de débourement et d'éclosion.

La grande majorité des espèces ligneuses ont été touchées (chênes, hêtres, érables, bouleaux, ...). Précisons que les charmes et les coudriers ont été les principaux atteints dans le sous-bois; les deux espèces de chênes l'étant dans l'étage dominant avec une appétence plus grande envers le chêne sessile. A titre anecdotique, signalons que dans les peuplements fortement attaqués, la bourdaine semble boudée par les chenilles. Toutes les classes d'âges sont touchées avec néanmoins une nette préférence pour les jeunes individus à feuillage tendre. C'est pourquoi les régénérations naturelles, les plantations et les pépinières sont les premières à subir de graves préjudices lors d'attaques de défoliateurs. La régénération des peuplements étant dès lors fortement compromise. Les conséquences à long terme dans les peuplements adultes sont moins perceptibles à l'oeil nu mais sont loin d'être inexistantes. La perte du feuillage entraîne inévitablement une perte de croissance et conjuguée à d'autres stress, elle accentue la perte de vitalité de certains arbres.

Chez les feuillus, les principaux agents défoliateurs sont deux chenilles de la famille des Geometridae, *Erannis defoliaria* et *Operophtera brumata*. Ce sont deux chenilles arpeuteuses, la première est brunâtre à face ventrale jaunâtre et la seconde est entièrement vert "pomme". Sa couleur est d'ailleurs souvent à l'origine d'une confusion entre cette espèce et *Tortrix viridina* (tordeuse verte du chêne) qui elle est grisâtre à points noirs et non arpeuteuse et qui, contrairement aux idées répandues, a provoqué moins de dégâts que les précédentes ces deux derniers printemps.

Des traitements sanitaires sont possibles de façon intégrée grâce à *Bacillus thuringiensis*. Ils ne sont à envisager que lors des pullulations principalement dans les plantations, les pépinières et éventuellement les régénérations naturelles.



Erannis defoliaria

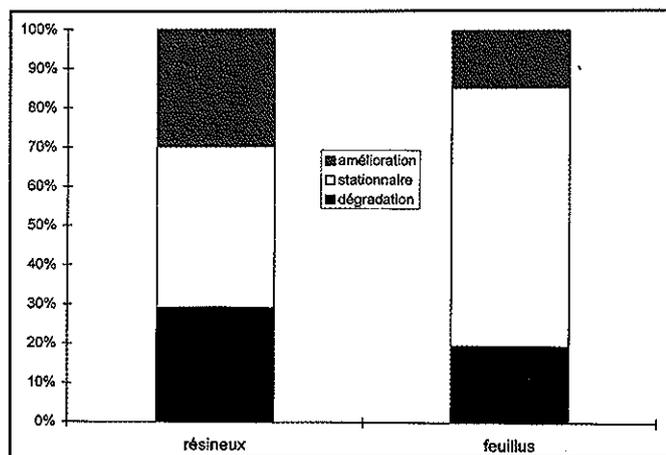


FIGURE 3. Comparaison de l'état sanitaire des arbres entre 1989 et 1995

1. — des problèmes nutritionnels liés à la pauvreté naturelle de nombreux sols forestiers, le plus souvent en magnésium, parfois en calcium; c'est particulièrement le cas en Ardenne et en Famenne;

2. — la pollution atmosphérique qui perturbe le fonctionnement de tels sols, notamment par l'apport continu de dépôts acides ou acidifiants (SO₂, NO_x, NH₄) qui accélèrent leur appauvrissement. D'autre part, les excès d'azote entraînent un déséquilibre nutritionnel par rapport aux autres éléments, surtout si ceux-ci sont déjà en carence. En Wallonie, les dépôts soufrés diminuent en raison de la réduction des émissions des SO₂ (-46% entre 1980 et 1991)⁽⁵²⁾, mais les dépôts azotés augmentent avec la croissance du trafic routier (NO_x) et de l'élevage intensif (NH₄). Les teneurs élevées en ozone peuvent affecter les arbres par des lésions directes sur le feuillage. Cependant l'occurrence très épisodique des pics d'ozone ne permet pas d'en définir la part parmi les autres causes de dépérissement;

3. — des épisodes climatiques défavorables qui peuvent être des périodes prolongées de sécheresse ou de pluviosité excessive, ou des accidents climatiques en cours de saison (gelées tardives ou hivers doux favorisant certains déprédateurs). Il en va ainsi de certains arbres qui ont pu souffrir de manque d'eau pendant les mois d'été de 1994 et 1995, particulièrement chauds et secs en Belgique. Entre 1994 et 1995, l'état sanitaire est resté assez stable. Seule la décoloration s'est très légèrement accentuée;

4. — une mauvaise adéquation entre l'essence et la station, c'est à dire une implantation inadéquate de certaines espèces en des sites qui ne leur conviennent pas, notamment du point de vue de facteurs stationnels tels que la profondeur ou le drainage du sol. Cela s'est notamment vu pour le dépérissement du chêne pédonculé dans la région de Chimay⁽⁵³⁾.

D'après Weissen⁽⁵⁴⁾, la poursuite de l'acidification (apport atmosphérique soutenu d'un excès de protons) devrait se solder par la réduction progressive de la capacité d'accueil des arbres ou des espèces de la microfauve ou microflore du sol les moins acido-tolérantes. Cette acidification entraînerait également l'augmentation des substances organiques acides hydrosolubles à fort pouvoir complexant à l'égard du Fe et de l'Al et donc susceptible d'amorcer un processus de dégradation du sol, éléments qui peuvent devenir toxiques

pour les plantes. Dans de tels cas, la restauration de la fonction nutritive des sols peut être réalisée par des fertilisations et des amendements adéquats. Plusieurs projets se penchent actuellement sur ces solutions, en multipliant soit les régions d'étude, soit les différents types ou les quantités d'amendement. L'association d'essences apparaît également comme une voie prometteuse mais dont il convient encore de définir les actions et les effets réciproques⁽⁵⁴⁾.

Le réseau de niveau II et III : étude des écosystèmes à long terme

Les nombreux projets de recherche entrepris un peu partout en Europe depuis le début des années 1980 en liaison avec le dépérissement des forêts ont permis d'améliorer les connaissances sur les écosystèmes forestiers. Ils ont également montré qu'il fallait prendre en considération un nombre important de facteurs de l'écosystème si l'on envisage d'expliquer un dépérissement.

La plupart des projets, généralement prévus pour une durée de 2 à 4 ans, manque cependant de deux éléments essentiels pour une bonne interprétation du phénomène⁽⁵⁵⁾ :

— le recul dans le temps, c'est-à-dire des connaissances sur l'évolution du phénomène, et notamment avant qu'il ne devienne visible;

— une connaissance sur l'évolution des paramètres qui pourraient être directement ou indirectement à l'origine du dysfonctionnement des arbres.

C'est pourquoi l'Union européenne a prévu en 1990 la création d'un réseau de placettes permanentes pour l'observation des écosystèmes forestiers, le réseau de niveau II et III. En décembre 1990 a eu lieu à Strasbourg la première conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe. La Belgique y signa, avec 30 autres pays européens (Europe au sens large) la résolution S1 prévoyant la création d'un tel réseau de placettes. Quatre objectifs ont été officiellement assignés à ce type de réseau⁽⁵⁾ :

1. — obtenir des informations approfondies sur l'évolution de certains écosystèmes forestiers européens, en prenant en compte la dimension historique de l'évolution et des variations de la vitalité des forêts, des conditions stationnelles et des événements climatiques;

2. — chercher à établir des corrélations entre la variation des facteurs environnementaux et la réaction des

écosystèmes forestiers;

3. — déterminer le niveau de charge critique en polluants susceptible de déstabiliser un type donné d'écosystème forestier;

4. — permettre de mieux interpréter les résultats issus des réseaux systématiques du type du réseau de niveau I européen (16 x 16 km).

une meilleure «comparabilité» des résultats au sein de l'Europe.

D'une manière générale, les mesures suivantes sont prévues dans chaque placette de niveau II ou III :

— collecte des retombées de litière tous les 3 à 4 mois;

— inventaire annuel de l'état des couronnes;



La partie wallonne de ce réseau de placettes permanentes pour le suivi approfondi des écosystèmes forestiers est mise en place progressivement depuis le 1^{er} septembre 1995, et devrait rester sous observation durant 30 ans. La méthodologie de choix des placettes, ainsi que des mesures dendrométriques, sanitaires et chimiques qui sont réalisées sur les placettes wallonnes est calquée sur la méthodologie développée en France dans le cadre du réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers), qui répond aux exigences européennes. En adoptant cette méthodologie, testée et appliquée en France dès 1990 et également adoptée par le Grand-Duché du Luxembourg, l'objectif est d'arriver progressivement à une harmonisation des mesures et donc à

— inventaire bisannuel du statut nutritionnel des arbres (prélèvement et analyse chimique du feuillage);

— mesures dendrométriques quinquennales;

— inventaire décennal de l'état des sols.

Pour les 2 placettes wallonnes de niveau III (l'une près Chimay sous chêne et la seconde près Gedinne sous épicéa), on mesure en outre le taux de dépôts atmosphériques hors couvert et sous couvert afin de préciser l'influence améliorante ou dégradante de ces apports externes sur le cycle des éléments dans le milieu forestier. L'eau de drainage du sol est également prélevée à deux profondeurs (20 et 70 cm), à l'aide de bougies poreuses, afin d'étudier les phénomènes d'appauvrissement du sol par lessivage des éléments.

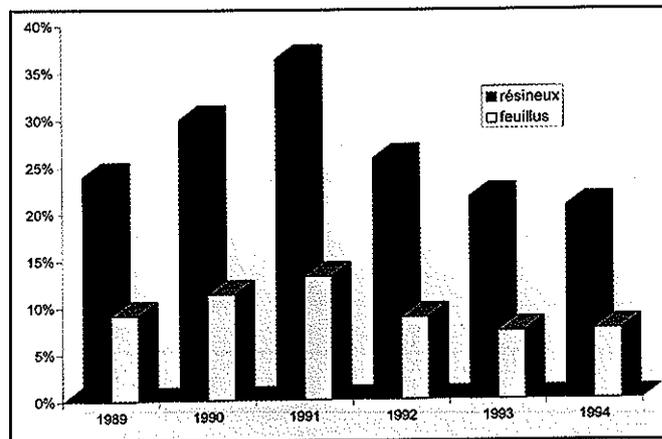


FIGURE 4 : Evolution du pourcentage d'arbres défoltés à plus de 25% entre 1989 et 1995 (réseau 8 x 8 km)

Programmes de recherche en Région wallonne

Depuis les années 1980, diverses études ont été entreprises par plusieurs centres wallons de recherche en matière de dépérissement des forêts. Les essences traitées sont principalement l'épicéa (*Picea abies*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), les chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) et plus essentiellement le douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et les mélèzes (*Larix spp*). Ces travaux de recherche visent essentiellement à mieux comprendre et quantifier les dommages en forêt, à suivre leur évolution ainsi qu'à proposer des solutions.

Historique

Dès le début des années 1970, des jaunissements de feuillage ont été observés sur des épicéas de la Croix Scaille, dans la région de Gedinne. Les études réalisées à l'époque ont clairement montré que le jaunissement d'aiguilles exprimait une carence en magnésium⁽³⁶⁾.

Au début des années 1980, des symptômes de dépérissement ont été constatés par Letocart sur sapin pectiné en Hertogenwald, et par Offergeld au Grand-Bois à Vielsalm. Mais la réelle prise de conscience du problème correspond à la fin de l'hiver 1982-83 quand des pertes brutales d'aiguilles ont été observées sur des épicéas de l'Est du pays⁽³⁷⁾.

Des contacts entre forestiers et chercheurs ont alors été établis et les études sur le dépérissement se sont multipliées.

Dès 1985, des signes de dégradation ont été observés sur le hêtre en province de Luxembourg⁽³⁸⁾. Des dommages ont également été constatés en province de Liège, Namur et Hainaut. Depuis 1988, nos 2 chênes indigènes, ainsi que l'érable, le frêne et le chêne rouge d'Amérique présentent des symptômes de dépérissement⁽³⁹⁾.

Etudes réalisées en Région Wallonne sur le dépérissement des forêts

Depuis l'été 1983, plusieurs recherches ont été entreprises par diverses équipes. Ces études visaient principalement à :

- mettre au point des méthodes d'observation et de quantification des dommages;
- étudier l'écophysiologie des dépérissements forestiers;
- étudier les causes des dépérisse-

ments de différentes essences et dans différentes régions;

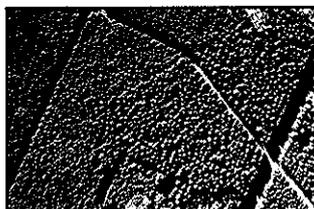
- proposer des mesures de restauration des peuplements affectés par le dépérissement et étudier l'impact de mesures telles que l'amendement du sol forestier, notamment sur une éventuelle contamination des eaux de rivière.

Principaux thèmes de recherche sur les dépérissements en Région wallonne

Essai de quantification des dommages par télédétection

(P. Giot, V. Kientega et Prof. P. André, U.C.L.)

En 1983, l'Unité des Eaux et Forêts de l'U.C.L. a testé les techniques de télédétection (photographies aériennes, scanner multispectral, satellite) pour évaluer qualitativement et quantitativement les dommages aux forêts.



Le satellite (essentiellement Landsat - Thematic Mapper) a permis la création d'une carte forestière de la Région wallonne permettant de distinguer les feuillus des résineux ainsi que certains résineux entre eux. En ce qui concerne la détection des dommages, les données satellitaires existantes, dans les conditions sani-

taires qui sont les nôtres, n'ont pas donné de résultats satisfaisants⁽⁴⁰⁾.

Les photographies aériennes infra-rouge fausses couleurs sont des documents d'archives dont la valeur est irremplaçable. Elles constituent un complément d'informations toujours utiles dans l'inventaire des troubles phytosanitaires en forêt: les principaux facteurs du dépérissement sont identifiables : jaunissement, défoliation, modification de la structure des couronnes ou mortalité⁽⁴¹⁾. A l'échelle du 1/5000, elles permettent une analyse par couronnes individuelles. Cependant, leur coût d'acquisition en limite actuellement l'exploitation.

Les photographies aériennes ont servi de base à l'implantation d'études stationnelles sur le dépérissement⁽⁴²⁻⁴³⁾.

Etude écophysiologique de la réponse de l'épicéa aux changements climatiques globaux

(Dr. E. Laitat, F.U.S.A.Gx.)

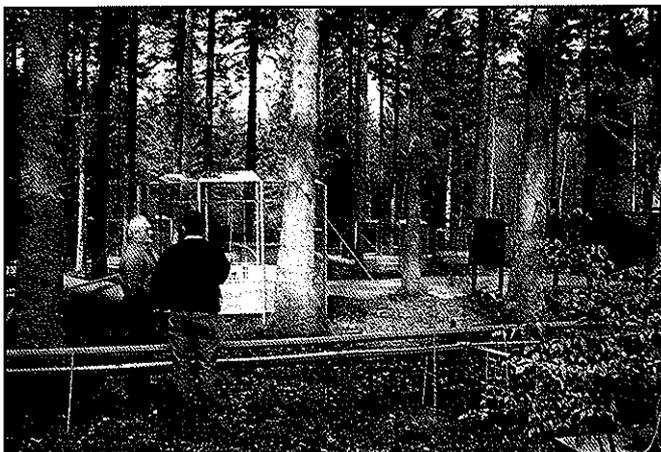
Dans des conditions optimales de température, de nutrition minérale et d'éclairement, la croissance des végétaux est stimulée par l'élévation du CO₂ atmosphérique. Toutefois, les conditions de croissance sont rarement optimales pour nos arbres forestiers. La conservation des vastes territoires boisés et la régulation de la teneur en CO₂ atmosphérique par une politique de stimulation des plantations forestières sur des terres agricoles marginales sont les deux principaux enjeux pratiques de ce programme de recherche.

Les recherches menées à Vielsalm depuis 1987 étudient les effets d'une

élévation du CO₂ et de la température sur la croissance des arbres forestiers. Il s'agit d'analyser la réponse à long terme de l'épicéa (*Picea abies*) dans des chambres de culture à ciel ouvert, c'est-à-dire des enceintes partielles d'approximativement trois mètres de diamètre au sein de l'écosystème forestier. L'atmosphère dans les chambres de culture est portée à quatre concentrations en CO₂ atmosphérique équidistantes comprises entre 350 µmol mol⁻¹ (la concentration atmosphérique actuelle) et 700 µmol mol⁻¹ (la concentration prévue au milieu du siècle prochain). Le but de l'étude est l'examen des effets combinés de concentrations élevées en CO₂ et d'une légère augmentation de la température sur la croissance des épicéas en conditions naturelles.

L'expérience montre que le CO₂ n'est pas un facteur écologique limitant la productivité primaire de nos forêts et que l'élévation progressive du CO₂ interagit avec d'autres facteurs environnementaux : l'éclairement et la nutrition minérale. La réponse physiologique des arbres à l'élévation de CO₂ est surtout limitée par les faibles éclaircissements dans le sous-étage et par les carences en éléments minéraux dans les sols forestiers pauvres. Cette nouvelle hypothèse de travail est actuellement à l'étude. En 1994, le couvert forestier sous lequel était installé le dispositif expérimental, a été coupé, exposant les arbres au plein éclaircissement. En 1995, les principes de nutrition optimale ont été mis en oeuvre. Il est prévu de clôturer cette phase de l'expérimentation fin 1998.

La forêt tempérée ne serait donc



Dispositif de chambres à ciel ouvert de Vielsalm:

De l'air chargé en différentes concentrations de CO₂ est insufflé dans ces "chambres" où des épicéas ont été plantés, afin d'étudier la réaction des arbres aux différentes concentrations en CO₂ atmosphérique.



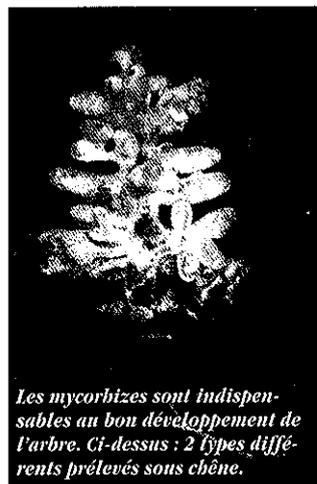
pas capable de limiter la progression de la teneur en CO₂ atmosphérique, en accroissant les prélèvements de CO₂ par la photosynthèse, tout autre facteur écologique restant semblable. De plus, sa réponse n'est pas proportionnelle aux concentrations en CO₂ atmosphérique.

Recherche des causes des dépérissements et propositions de mesures de restauration

● Hypothèses de travail



Les différentes recherches sur le dépérissement des forêts entreprises depuis le début des années 1980 un peu partout en Europe ont conduit à formuler une série d'hypothèses pour tenter d'en déterminer les causes. Il s'agirait principalement: des carences nutritionnelles du sol, la pollution atmosphérique, des événements climatiques exceptionnels (sécheresse, froid,...), une sylviculture mal adaptée, des attaques d'insectes ou de champignons...



Les mycorrhizes sont indispensables au bon développement de l'arbre. Ci-dessus : 2 types différents prélevés sous chêne.

Parmi ces hypothèses, celle des carences nutritionnelles du sol forestier, combinée avec des apports atmosphériques acides et azotés a retenu toute l'attention des chercheurs wallons, surtout dans le cas des dépérissements ardennais.⁽⁴⁴⁻⁴⁵⁻²⁸⁾

Il est bien connu que les sols forestiers ardennais sont généralement pauvres et ont été appauvris au fil des siècles par différentes pratiques comme la surexploitation des forêts ou l'essartage. Ces sols présentent souvent des carences en magnésium,

mais aussi en calcium et parfois en potassium⁽⁴⁶⁾. Des apports faibles mais continus de polluants atmosphériques acides, généralement des acides sulfuriques, nitriques ou de l'ammonium, peuvent donc accentuer la pauvreté des sols au point de créer un déséquilibre de la nutrition minérale des arbres, pouvant se traduire par l'apparition de symptômes de dégradation des couronnes. L'apport de polluants atmosphériques acides induira un lessivage accru des cations échangeables du sol (Ca, Mg, K), qui en fin de parcours se retrouveront dans les rivières, mais dans les sols déjà acides, il induira également la libération d'éléments toxiques pour les plantes (aluminium et métaux lourds) et une baisse du pH⁽⁴⁷⁾.

Ailleurs qu'en Ardenne, en Forêt de Soignes, d'autres hypothèses telles que le rôle de la compaction du sol (équipe de l'U.L.B.) des ectomycorhizes⁽⁴⁸⁾ ou des facteurs climatiques (équipe de la F.U.S.A.Gx) sur le dépérissement du chêne et du hêtre ont été abordées.

● Projets de recherche en bassins versants

Un bassin versant est une entité de surface connue et dans laquelle toutes les eaux de ruissellement sont évacuées en un seul point appelé exutoire du bassin. Il est établi sur base de cartes topographiques. Le bassin hydrogéologique (correspondant au bassin versant) est une surface connue dans laquelle toutes les eaux infiltrées convergent vers le même point, l'exutoire du bassin. Il est établi sur base de cartes géologiques complétées par des prospections géologiques, géophysiques et hydrogéologiques.

Lorsque l'on veut faire des études sur les interférences entre écosystèmes forestiers et les eaux, il est nécessaire que ces deux entités coïncident. Ceci est généralement réalisé lorsque le substrat géologique est imperméable ou peu perméable, ou lorsque les lignes de crête topographiques coïncident avec les lignes de crête hydrogéologiques de partage des eaux souterraines.

Cette approche permet ainsi d'établir les bilans entrée-sortie en éléments minéraux (apports par dépôts secs et humides versus stockage dans le sol et la biomasse, exportation à l'exutoire, activités microbiologiques), et donc d'apprécier l'évolution globale de l'écosystème. L'entité bassin versant est une surface représentative du milieu forestier intégrant les processus majeurs. Ainsi, des observations à «grande échelle»

(étude des flux en éléments), couplées à des études plus ponctuelles (p.ex. analyses de sols, essais en microcosmes, état sanitaire des arbres) permettent aux chercheurs, dans une approche interdisciplinaire, d'évaluer et de comprendre les réponses de la forêt à des changements du milieu provoqués par des causes naturelles ou humaines.⁽⁴⁹⁾ Cette approche constitue également un outil important dans la validation de modèles mathématiques, utilisés pour la compréhension et la prédiction de l'évolution des écosystèmes.

— Les bassins versants de conifères

(M. Carnol et Prof. J. Remacle, Laboratoire d'écologie microbienne, U.Lg.; O. Cajot et Prof. A. Monjoie, Laboratoire de géologie de l'ingénieur, d'hydrologie et de prospection géophysique, U.Lg.; E. Everbecq et J. Smits, Centre Environnement, U.Lg.; V. Duran et Prof. P. André, U.C.L.; Dr. E. Laitat, F.U.S.A.Gx; F. Weissen, coordonnateur).

Quatre bassins versants forestiers sont actuellement étudiés; deux, Robinette (81 ha) et Waroneu (83 ha) sont situés en Haute Ardenne, dans les Hautes Fagnes, les deux autres, Doucette (80 ha) et Burhé haut (85 ha), se trouvent en Ardenne Occidentale, à la Croix-Scaille. Ces quatre bassins versants sont recouverts majoritairement d'épicéas (*Picea abies*), sauf le bassin de Waroneu qui est recouvert à plus de 40% de hêtre (*Fagus sylvatica*). Les recherches sur les bassins versants de l'Hertogenwald, en Haute Ardenne, ont été initiées en 1980 par l'équipe de l'ULg⁽⁵⁰⁻⁵¹⁾ (flux en éléments minéraux) qui a été rejointe par d'autres équipes de l'ULg (hydrogéologie, modélisation), de l'UCL (analyses de sols, état sanitaire), et des F.U.S.A.Gx. (histochimie, photosynthèse) en 1991, dans une étude interdisciplinaire coordonnée par F. Weissen.

Des recherches ont été menées en vue de déterminer les aquifères sou-

terrains présents et leur géométrie, les limites des bassins versants hydrographiques et leur conformité avec les bassins hydrogéologiques, ainsi que les principales caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des sites expérimentaux⁽⁵²⁻⁵³⁾. La connaissance de ces paramètres était nécessaire pour éviter les interférences entre le bassin témoin et le bassin amendé et pour permettre une meilleure interprétation des résultats. De plus, les mesures faites dans les piézomètres de contrôle permettent de suivre les variations des niveaux et des réserves d'eau souterraine et les modifications de leur chimisme en fonction des précipitations d'une part et des amendements d'autre part.

Dans les quatre bassins, des analyses du sol et du feuillage ont mis en évidence des carences en magnésium et en calcium, ce qui pourrait être la cause de déséquilibres nutritionnels induisant le dépérissement observé dans ces sites. Pour rétablir l'équilibre nutritionnel, une formule d'amendement à base de dolomie (3 T/ha de dolomie 55/40 et 200 kg de sulfate de potassium) a été appliquée dans les bassins de Waroneu (1992) et de Burhé (1993). Les deux autres bassins sont également analysés en vue de détecter des modifications qui ne seraient pas dues à l'amendement, mais à d'autres causes.

Quatre années après l'application de l'amendement à Waroneu, l'état sanitaire des arbres amendés semble s'être amélioré par rapport aux arbres témoins; on note notamment une régression des chloroses. L'analyse minérale des aiguilles révèle également une amélioration de la nutrition. L'effet de l'amendement ne se marque jusqu'à présent que dans les couches superficielles du sol. Par contre, le pH reste toujours très stable, ce qui évite une perturbation brutale des conditions chimiques du sol⁽⁵⁴⁾. Dans les bassins de la Croix Scaille, bien que nous manquions de



Epannage d'un amendement à base de dolomie sur un bassin versant.

recul pour quantifier les effets de l'amendement, une évolution favorable semble se dessiner également.

La composition chimique de l'eau dans les principaux compartiments de l'écosystème (pluie à découvert, pluviolissivats, percolats sous les horizons holorganiques, exutoire) a été mesurée dans les quatre bassins versants par l'équipe du Prof. Remacle de l'ULg. Alors que l'amendement a pour but la correction de déséquilibres nutritionnels, il pourrait aussi avoir des effets secondaires négatifs pour l'écosystème. Une augmentation de pH, même au niveau de microsites du sol, pourrait induire une production de nitrate plus élevée. Or, cette production s'accompagne d'une acidification, avec une augmentation du lessivage des cations importants pour la nutrition des arbres et une mobilisation de l'aluminium, toxique pour les racines.

Il pourrait donc y avoir un appauvrissement du sol, mais également une contamination de l'eau des nappes et des rivières. Une augmentation de la nitrification a été effectivement observée dans des sols forestiers amendés. Cependant, on ne connaît pas encore les mécanismes exacts contrôlant ce processus⁽⁶⁵⁾, de sorte qu'il est important de vérifier les effets de l'amendement dans nos sols ardennais. Pour ce faire, les

concentrations en éléments minéraux à l'exutoire sont analysées par la méthode statistique des séries temporelles⁽⁶⁶⁾. Cette approche compare les concentrations avant et après l'amendement, et permet de déterminer si, statistiquement, les concentrations ont évolué de manière significative. La comparaison des quantités importées (pluie) et exportées (exutoire) de l'écosystème permet également d'apprécier le devenir de l'amendement apporté, d'évaluer la stabilité de l'écosystème et de vérifier si les modifications à l'exutoire pourraient être dues à des changements dans les entrées.

Les résultats obtenus jusqu'à présent permettent de penser que l'amendement, tel qu'il a été pratiqué, a peu de conséquences sur la qualité chimique de la solution du sol et des eaux de drainage dans les forêts ardennaises. L'analyse des séries temporelles a montré une augmentation significative (le doublement) de la concentration en magnésium à l'exutoire du bassin amendé des Hautes Fagnes⁽⁶⁷⁾. Cette augmentation a tendance à s'atténuer au cours du temps, et pourrait être due au lessivage superficiel de l'amendement. Aucune modification n'a été observée jusqu'à présent à la Croix Scaille. Il n'y a pas d'augmentation du lessivage du calcium, qui présente une affinité supérieure pour les sites d'échange du sol. Les bilans entrée-sortie des flux en éléments minéraux indiquent que l'amendement reste immobilisé dans les bassins versants. Il semble que la forte acidité d'échange, ainsi que la quantité relativement modérée de l'amendement aient limité la modification du pH et du processus de nitrification, puisque les concentrations en protons et en nitrates se trouvent inchangées à l'exutoire de bassins amendés. Cependant, il n'est pas exclu que le processus de nitrification augmente, même plusieurs années après apport d'un amendement⁽⁶⁸⁾.

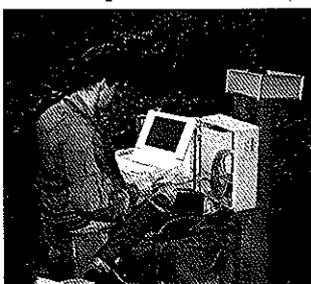
Quelques remarques s'avèrent cependant nécessaires pour l'interprétation de ces résultats. Lors de l'extrapolation de ces conclusions à d'autres sites, il faut tenir compte du type de sol (influençant la capacité de rétention de l'amendement), de la forme de l'amendement et des caractéristiques générales du site considéré, en particulier la disponibilité en d'autres éléments nutritifs. De plus, un autre site pourrait réagir par une augmentation de la nitrification, les contrôles de ce processus n'étant pas encore bien déterminés.

Un modèle des cycles biogéochi-



Ci-dessus : Récolte hebdomadaire de l'eau de rivière au déversoir d'un bassin versant expérimental. Cette eau est analysée pour son contenu en calcium, magnésium, etc., et comparée à un bassin versant témoin.

Ci-dessous : Les données de débit mesurées à l'aide d'un système de flotteurs sont enregistrées automatiquement et on vidange la mémoire du débit-mètre tous les 2 mois à l'aide d'un ordinateur portable.



miques dans un écosystème de type pessière a été développé pour ces bassins versants⁽⁶⁹⁾.

Ce modèle est une représentation fonctionnelle des flux traversant l'écosystème forestier et des processus qui le gouvernent. Il a pour but de simuler l'impact de certains événements tels que l'amendement.

— Les bassins versants de feuillus

(V. Thierron, Y. Gloesener, P. Giot et Prof P. André, U.C.L.)

Suite à l'observation de symptômes de dépérissement sur des chênes dans la région de Chimay en 1988⁽⁶⁰⁾, le laboratoire forestier de l'U.C.L. y a initié en 1991 une étude en bassins versants. Deux bassins versants contigus ont été sélectionnés, l'un de 34 ha et l'autre de 17 ha, principalement recouverts d'une futaie de chêne sessile et pédonculé avec en sous-étage, un taillis de charme.

Ces bassins font partie du bassin versant du Rieu d'Ostenne, — qui a déjà précédemment fait l'objet d'études biogéochimiques et hydrologiques⁽⁶¹⁻⁶²⁾.

L'objectif du projet était de déga-

ger les causes du dépérissement de *Quercus sp.* et de démontrer la capacité d'un amendement à restaurer l'état sanitaire des chênes tout en mesurant les effets de l'amendement sur les caractéristiques des eaux de rivière et sur les microorganismes du sol.

Plusieurs facteurs ont pu être dégagés comme intervenant dans le dépérissement des chênes dans cette région :

1. la non-reconnaissance des deux espèces de chênes, *Q. robur* et *Q. Petraea* et de leurs exigences écologiques spécifiques a parfois engendré une implantation stationnelle inadéquate, surtout pour le chêne pédonculé, se retrouvant régulièrement dans des sols trop superficiels ou mal alimentés en eau. Une étude taxonomique a été réalisée en vue de distinguer précisément les deux espèces⁽⁶³⁾;

2. l'influence de facteurs climatiques — tels que la sécheresse de 1976 ou l'hiver rigoureux de 1985-86 — qui interviennent dans le dépérissement, a été évoqué à travers de l'analyse de tige de quelques chênes⁽⁶⁴⁾;

3. Des analyses foliaires et de sol ont localement mis en évidence des tensions en phosphore et en magnésium, ainsi que des seuils toxiques en manganèse dans les feuilles⁽⁶⁵⁾.

Le dépérissement du chêne à Chimay fait donc partie de ces dépérissements à causes multiples, provoqués par un ensemble de facteurs dont l'interaction est souvent plus qu'additive.

Un amendement à base de dolomie (2 t/ha dolomie 55/40) a été appliqué par soufflerie sur le bassin de 17 ha en mars 1994. Après traitement, les arbres amendés ont montré une certaine stabilisation des symptômes de dépérissement alors que dans le bassin témoin, l'état sanitaire des arbres a continué à se dégrader. La teneur élevée en manganèse a également diminué dans les feuilles des chênes situés dans les placettes amendées⁽⁶⁶⁾.

L'étude des caractéristiques des eaux de rivière drainant le bassin amendé, en comparaison avec le bassin témoin, n'a pas permis de mettre en évidence un quelconque effet de l'application de l'amendement sur une modification des caractéristiques chimiques des eaux de rivière. Cela nous laisse donc penser que, dans les conditions de sol de Chimay et étant données les doses d'amendement appliquées, il n'y a pas lieu de craindre une contamination des cours d'eau par un amende-

Principales équipes engagées dans les recherches sur les dépérissements forestiers

- Division de la Nature et des Forêts du Ministère de la Région wallonne.
Responsable : Ir. E. Gérard.
- Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux :
 - Unité de Biologie végétale.
Responsable : Prof. P. du Jardin
 - Laboratoire d'Ecologie.
Responsable : Prof. F. Malaisse
 - Université Catholique de Louvain -
□ Unité des Eaux et Forêts.
Responsable : Prof. P. André.
 - Université Libre de Bruxelles :
 - Laboratoire de Génétique et Ecologie végétales. Directeur : Prof. Cl. Lefebvre.
 - Université de Liège :
 - Laboratoire d'écologie microbienne.
Responsable : Prof. J. Remacle.
 - Laboratoire de géologie de l'ingénieur, d'hydrologie et de prospection géophysique. Responsable : Prof. A. Monjoie
 - Centre d'étude et de modélisation de Environnement.
Responsables : J. Smits et E. Everbecq.
 - Université de Mons-Hainaut :
 - Faculté des Sciences.
Responsable : Ir. J. F. Duilière
 - Centre de recherche et de promotion forestières - Section pédologie forestière (I.R.S.I.A.). Direction : Profs. P. André et L. Bock. Responsable de programmes : Ir. F. Weissen.

Principales sources de financements

- Ministère de la Région wallonne
- Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement
- Ministère de la Région wallonne pour l'Eau, l'Environnement et la Vie rurale
- Union Européenne (DG VI, DG XII)
- Ministère de la Région Bruxelles-Capitale
- F.N.R.S.
- I.R.S.I.A., puis le Ministère de l'Agriculture et des Petites et Moyennes Entreprises.

ment⁽⁶⁵⁾. Cependant, une vérification à long terme serait intéressante.

Des études ont également été menées concernant l'impact d'un chaulage sur les microorganismes du sol⁽⁶⁶⁾. Il semble que dans les sols relativement eutrophes de la région de Chimay, la quantité et l'activité des microorganismes ne soient pas influencées de manière significative par un apport d'amendement. Des mesures de respiration du sol ont également été effectuées, permettant de séparer la respiration des racines (environ 80 % de la respiration globale du sol) de la respiration microbienne (entre 10 et 20 % de la respiration du sol)⁽⁶⁷⁾.

Enfin, le cycle du calcium dans l'écosystème chênaie-charmaie de Chimay a été adapté en vue de mieux comprendre la dynamique du cycle des éléments dans l'écosystème et de mieux pouvoir gérer ce dernier à l'avenir⁽⁶⁸⁾. Cette modélisation a permis d'avoir une idée de la vitesse d'appauvrissement du sol en calcium.

● Projets de recherche en placettes



– Réseau ardennais d'étude des dommages en forêt et des techniques de restauration

(P. Giot et Prof. P. André, U.C.L.)

Ce programme, lancé en 1988 par l'U.C.L., a deux objectifs : d'une part, il s'agit de tester l'hypothèse selon laquelle le dépérissement est la conséquence d'un déséquilibre de la nutrition minérale. D'autre part, il s'agit de mettre au point des techniques de prévention et de restauration des peuplements face aux risques de dépérissement.

Dans une première phase du projet, 5 peuplements d'épicéa, 5 peuplements de hêtre et 2 peuplements de chêne ont été choisis de manière à représenter le plus largement les conditions écologiques globales de l'Ardenne. Des analyses de sol ont révélé que ces peuplements sont situés sur des sols acides (faible pH_{eau}) et pauvres en calcium et magnésium. Des analyses foliaires ont confirmé l'existence de carences nutritionnelles. Sur base de ces résultats, plu-



sieurs traitements ont été appliqués durant l'hiver 1994-95. A côté des parcelles témoins, un premier traitement vise à lever les déficiences minérales les plus importantes. Un second traitement, plus complet, a pour but de prévenir les risques de carence. Le troisième traitement correspond à une fertilisation standard Ca-Mg, N, P, K de doses constantes.

Dans le cadre de ce projet s'inscrit également le suivi de l'état sanitaire des couronnes (défoliation et décoloration), la réalisation de relevés phytosociologiques, ainsi que des mesures dendrométriques. Etant donné le caractère récent des épandages, aucune différence significative n'est encore apparue entre les traitements.

– Scénarios de dépérissement et du rétablissement chez le hêtre et l'épicéa et risques nouveaux pour la sylviculture du douglas et du mélèze

(F. Weissen, Pédologie forestière).

Les objectifs de ce programme qui a démarré en 1992 visent le maintien des fonctions nutritives du sol pour assurer :

1. – la subsistance d'écosystèmes forestiers naturels en voie de déstabilisation (hêtraie, chênaie sur sols

acides pauvres),

2. – une sylviculture normale et rémunératrice des peuplements de production artificiels menacés de dépérissement.

La nutrition équilibrée des arbres améliore en outre leur résistance aux agressions parasitaires et aux stress climatiques, et des conditions édaphiques satisfaisantes sont requises pour tirer pleinement profit du potentiel de croissance accru des essences, fruit des programmes d'amélioration.

Une première partie du projet concerne le scénario du dépérissement et de la restauration chez l'épicéa et le hêtre dans les dispositifs d'observation-expérimentation de Spa et de Transinne (hêtraie), de la Croix-Scaille et des Hautes Fagnes (pessière), ainsi que sur des chênes (sessiles et accessoirement pédonculés) en relation avec du hêtre dépérissant à Spa, Transinne et Haut-Fays.

Des observations détaillées et périodiques des cimes par photographies au téléobjectif ont montré une dégradation générale de l'état sanitaire, mais à des intensités variables dans le temps, entre individus, stations et essences. Le scénario du dépérissement est actuellement assez bien connu et le risque de dégrada-

tion sanitaire a été précisé par des seuils foliaires et édaphiques. La régression de la nutrition en phosphore chez le hêtre pourrait être la conséquence indirecte de la déficience en Mg. En induisant la dégradation du phloème⁽²⁷⁾, l'approvisionnement réduit en substances énergétiques limiterait l'activité des mycorhizes.

Pour l'épicéa en particulier, il a été montré qu'un rétablissement de l'état sanitaire fait suite à la restauration d'une nutrition magnésienne normale à l'aide d'engrais spécifiques amenés par voie terrestre ou aérienne⁽²⁵⁾. La durabilité de diverses modalités de fumure sur l'état de santé des arbres dépasse la dizaine d'années. Les risques encourus par le sol en cas d'apport de sels magnésiens solubles ont été examinés⁽⁶⁹⁾. Comme pour le hêtre, le risque de dégradation sanitaire a été défini par des seuils foliaires et édaphiques.

Chez le hêtre, l'effet bénéfique indirect et les limites d'un chaulage avec du calcaire ($CaCO_3$) ont été démontrés.

On examine l'intérêt de l'association d'essences telles que chêne sessile/hêtre ou épicéa/douglas comme moyen de stabilisation des écosystèmes fragilisés du point de vue de leur nutrition.



Récolte d'échantillons d'humus forestiers.

Une deuxième partie traite des risques qui pèsent sur la culture du douglas et du mélèze. Chez ces essences, des déformations majeures du tronc sont attribuées à une déficience en cuivre. Chez le douglas, il existe par ailleurs des risques d'intoxication au manganèse qui se manifestent par des écoulements de résine sur le tronc, suivis de la mort de l'arbre, dans des conditions de sol/substrat qui restent à préciser.

– Aspects édaphiques du dépérissement du chêne et du hêtre en Forêt de Soignes

(Prof. J. Herbauts, U.L.B.)

Dans le cadre de deux Conventions de recherche interuniversitaires subventionnées par la Région de

Bruxelles-Capitale**, une étude visant à déterminer le rôle des paramètres édaphiques dans l'apparition de phénomènes apparentés au dépérissement a été entreprise en Forêt de Soignes, de 1992 à 1995. Les relations entre paramètres édaphiques et statut nutritionnel d'arbres sains et dépérissants ont été examinées pour les deux essences dominantes de ce massif forestier périurbain : le hêtre et le chêne pédonculé.



Dispositif de récolte d'eau de ruissellement le long des troncs en hêtraie.

En ce qui concerne le **chêne pédonculé**, la répartition des dommages en Forêt de Soignes est clairement fonction d'une composante stationnelle et d'une composante individuelle : il y a des stations exemptes de dépérissants, des stations globalement saines, des stations où l'état sanitaire est très variable d'un individu à l'autre et des stations où tous les arbres présentent un état sanitaire déficient et homogène. L'échantillonnage des sols et les prélèvements de feuilles pour le diagnostic foliaire ont donc été réalisés au niveau de l'individu. Une méthode d'échantillonnage par couples d'individus d'état sanitaire contrasté a été utilisée⁽⁷⁰⁾. Les analyses de sol et de feuilles ont permis de mettre en évidence :

– 1. que dans ces sols limoneux acides, les teneurs en Ca, Mg et Mn sont significativement plus basses dans les échantillons de sol prélevés (0-10 cm) sous les arbres «dépérissants»;

– 2. qu'il n'y a pas de différences significatives entre les teneurs foliaires en Ca et Mg des arbres sains et dépérissants. En outre, le diagnostic foliaire n'a fait apparaître aucune carence nutritionnelle : quoique faibles, les teneurs en cations sont toujours supérieures aux seuils critiques généralement admis. Des concentrations en N et P significativement plus élevées chez les arbres dépérissants pourraient cependant

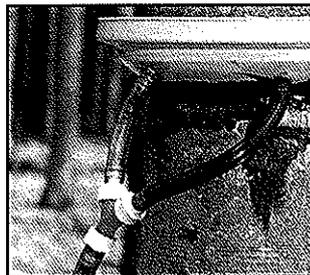
traduire un déséquilibre entre nutrition azotée et cationique ; un tel déséquilibre est une cause de dépérissement souvent évoquée.

Contrairement à ce que l'on observe pour le chêne, il ne semble pas y avoir de composante individuelle dans la détermination de l'état sanitaire du **hêtre** en Forêt de Soignes : celui-ci semble largement lié aux conditions stationnelles et, dans une certaine mesure aussi, à l'âge des

peuplements (les peuplements âgés étant les plus touchés). Il est excessivement rare de trouver côte à côte un hêtre en très bon état et un hêtre déclinant, sans qu'on observe en même temps une variation nette des propriétés physiques du sol (compaction, hydromorphie). L'impact des facteurs édaphiques sur l'état sanitaire du hêtre en Soignes a donc été abordé sur base stationnelle. Par la confrontation des résultats du diagnostic foliaire et l'analyse des sols, il est apparu que la disponibilité en Ca et surtout en P est critique, la teneur foliaire en P étant en-dessous du seuil de déficience pour le hêtre.

Il convient d'ajouter qu'en Forêt de Soignes, des facteurs édaphiques de nature physique, liés à la compaction des sols par les engins d'exploitation forestière, constituent très probablement un facteur aggravant du dépérissement des vieilles futaies équiennes de hêtre (> 150 ans). La dégradation des sols par ornierage en hêtraie sonienne affecte en moyenne 20 % de la superficie parcellaire et se traduit par une augmentation de la densité apparente et une chute de la macroporosité sous le seuil critique de 10 % (6 % dans les 30 cm supérieur du sol)⁽⁷¹⁾. Les effets conjugués de cette perte de porosité et de l'hydromorphie de surface qu'elle engendre, ont des conséquences négatives sur le développement et la vitalité des systèmes racinaires; ils sont donc susceptibles d'accroître les

problèmes d'absorption des éléments nutritifs tout en augmentant la sensibilité des peuplements de hêtre aux stress climatiques et tout particulièrement à de forts déficits hydriques⁽⁷²⁾.



– Etat sanitaire des chênes indigènes en région wallonne : écologie du dépérissement et moyens de lutte

(V. Claes et F. Malaisse, F.U.S.A.Gx)

Un réseau de placettes situées en chênaies incluant certaines placettes des réseaux déjà existants a été mis en place. Un maximum d'observations de terrain ont été collectées, elles reprennent toutes les caractéristiques écosystémiques des stations ainsi que l'état de vitalité des arbres. L'ensemble des données a permis de relever un comportement parfois discordant d'un point de vue dépérissement entre les deux espèces (chêne sessile et chêne pédonculé) face aux facteurs du milieu.

La contribution de chacun des facteurs pris isolément ou non a pu, entre autres, montrer que des paramètres comme l'altitude, la topographie, l'exposition, la nature de la charge caillouteuse, la géologie, le groupe écologique caractéristique d'une station, le mélange des essences et l'âge ont une influence sur l'état de santé des chênes.

– Réseau d'observation et de surveillance du dépérissement forestier (Dr. E. Laitat, F.U.S.A.Gx, A. Deroanne, I.H.E.)

En 1983, une étude a été initiée afin d'évaluer l'incidence des pluies acides dans le dépérissement forestier.

Les buts des recherches menées en parallèle sur le terrain et au laboratoire étaient :

1. – d'observer les éventuels dégâts causés par les polluants atmosphériques acidifiant les pluies;

2. – de recourir à des techniques biologiques et physico-chimiques pour suivre les perturbations de l'écosystème forestier causées par les retombées atmosphériques et leur évolution;

3. – d'étudier les modifications des flux d'échanges d'éléments miné-

raux à l'interface «feuille-atmosphère», maillon du continuum 'sol-plante-atmosphère'.

Les études ont été conduites dans un réseau de 9 stations : Vielsalm, la station de référence, quatre stations de niveau 1, localisées à Eupen, Hestreu, Florenville (les Epioux) et Saint-Vith, ainsi que dans quatre stations de niveau 2 localisées à Chimay, Philippeville, Strainchamps et Tenneville. Chacune des cinq premières stations comportait au minimum une parcelle d'observation en clairière, une sous pessière de moins de 40 ans et une sous pessière plus âgée. Les peuplements forestiers choisis présentaient des états sanitaires distincts, allant des peuplements sains à des peuplements fortement dépérissants.

Les stations de niveau 2 visaient à évaluer la qualité des précipitations en région rurale.

Les mesures et observations en clairière décomposaient les retombées atmosphériques selon les dépôts secs (poussières), les dépôts humides (pluies, neiges, brouillards) et les dépôts gazeux (dioxyde de soufre, oxydes d'azote et ozone). Le passage des retombées atmosphériques au travers d'un couvert forestier provoque le lessivage de certains éléments nutritifs, tels le potassium (K⁺), le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺) et celui des particules retenues sur le feuillage. Les précipitations atmosphériques ruissellent également le long des troncs avant de parvenir au pied de l'arbre et d'influencer la rhizosphère. Enfin, les «sorties» de l'écosystème forestier étaient récoltées par des lysimètres. Plus de 400 échantillons de précipitations atmosphériques ont été récoltés dans le réseau, tous les quinze jours entre 1983 et 1989.

Cette étude a montré une corrélation de l'acidité et de la conductivité électrique des précipitations (charges anionique et cationique) avec l'état sanitaire des peuplements forestiers. Elle a également mis en évidence une perte d'éléments minéraux par pluviollessivage, plus importante chez les arbres dépérissants que chez les arbres sains. Cependant, cette perte d'éléments nutritifs ne permet pas d'envisager le développement de carences minérales foliaires par un pluviollessivage accru. Enfin, des troubles physiologiques ont été associés aux effets de très faibles concentrations de l'air en ozone en milieu sylvestre. Les concentrations d'ozone troposphérique sont toujours analysées en continu à la station de Vielsalm.

Cycles biogéochimiques des écosystèmes forestiers en relation avec les changements globaux et le développement durable

(Prof. R. Lemoine, R.U.G.; Dr. E. Laitat, E.U.S.A.Gx; Prof. P. André, U.C.L.; Prof. J. Remacle, U.Ig; Dr. L. François, U.Ig; Dr. F. Veroustraete, V.I.T.O.; Ir. J. Van Slycken, M.V.G.; Prof. N. Lust, R.U.G.; Prof. R. Ceulemans, U.I.A.)

En janvier 1997, un projet pluridisciplinaire de recherche a été initié par les Services des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles, dans le cadre du plan d'appui scientifique à une politique de développement durable. Le but de ce projet est de généraliser les résultats expérimentaux déjà acquis sur l'effet d'une élévation de CO₂ et de la température sur les arbres forestiers. Cette recherche contribuera à évaluer l'impact probable des changements climatiques à venir sur les écosystèmes forestiers.

L'analyse des cycles de l'eau, des éléments nutritifs et du carbone dans les écosystèmes forestiers belges partira de l'inventaire des mesures et observations déjà faites dans les six sites expérimentaux retenus, correspondant aux principaux types fonctionnels forestiers belges : deux bassins versants, une chênaie à Chimay et une pessière à Waroneu dans l'Hertogenwald, le site expérimental de Vielsalm, en tant que forêt mélangée de hêtre et résineux, Aelmoesenele, une forêt mélangée décidue proche de Gand, de Inslag à Braschaat, une pineraie, et enfin Ganzenhof, une peupleraie proche de Baelgem.

Il s'agit principalement d'exploiter au mieux des données existantes, dans un projet multidisciplinaire. Les sites ont été choisis en tenant compte des connaissances fondamentales disponibles sur le fonctionnement des écosystèmes. Le projet est articulé autour de cinq groupes de travail dont les principales tâches couvrent les analyses des cycles du carbone, de l'eau, et des éléments nutritifs, la constitution d'une base de données et la modélisation des résultats. Les cycles biogéochimiques dans les écosystèmes forestiers seront analysés comme résultant de l'interaction des cycles du carbone, des éléments nutritifs et de l'eau sous un flux unidirectionnel d'énergie. Les données déjà acquises seront minutieusement vérifiées, validées et introduites dans la base de données. Cinq niveaux d'analyse consécutifs seront abordés : la feuille, l'arbre, la

parcelle forestière, le bassin versant et la région. Ils couvrent une séquence «spatio-temporelle» pour laquelle différentes approches de modélisation sont requises.

Les objectifs à atteindre au terme de ce projet de quatre ans sont :

1.— un inventaire exhaustif et une analyse fondamentale des données relatives au cycle du carbone, de l'eau et des éléments minéraux dans les principaux types forestiers fonctionnels;

2.— une validation de la modélisation des stocks et flux pour les conditions climatiques actuelles, y compris une extrapolation au niveau des unités paysagères et des régions ;

3.— la prédiction des modifications des flux et stocks, dans une série de scénarios climatiques, y compris l'énoncé de recommandations concernant diverses pratiques forestières ;



Sur les placettes du réseau intensif, 36 arbres-échantillons sont soumis à des mesures dendrométriques tous les cinq ans.

4.— la constitution d'une base de donnée intégrée sur CD-ROM, comprenant les résultats expérimentaux et les résultats de simulations des cycles biogéochimiques dans les principaux écosystèmes forestiers belges.

V. DURAN
V. THIERRON

- (*) Ppb = part par billion (10⁻¹²)
(**) - Convention d'étude interuniversitaire entre la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux (J. Semal, Laboratoire de Pathologie végétale), l'Université de l'Etat à Mons (P. Piérart, Service de Biologie générale et d'Ecologie), l'Université Libre de Bruxelles (J. Herbauts, Laboratoire de Génétique et d'Ecologie végétale et M. Tanghe, Laboratoire de Botanique systématique et de Phytosociologie) et la Région de Bruxelles-Capitale : 1992-1993.
- Convention d'étude entre l'Université Libre de Bruxelles (J. Herbauts, Laboratoire de Génétique et d'Ecologie végétale et M. Tanghe, Laboratoire de Botanique systématique et de Phytosociologie) et la Région de Bruxelles-Capitale : 1994-1995.

(1) LANDMANN G., 1994 - Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française*, 5: 405-415.
(2) SCHULTZ P. ET COWLING E.B., 1985 - *Waldsterben, A General Decline of Forests in Central Europe - Symptoms, Development and Possible Causes*. Plant Disease, vol. 69, n° 7: 548-558.
(3) MOHINEN V., 1988 - Le danger des pluies acides. *Pour la Science*, n° 132, octobre 1988: 54-63.
(4) LAMOTTE Ph., 1993 - Les glanis mis à nu. *Le Vif L'Express*, 10-12-1993: 32-33.
(5) BARTHOD Ch., 1994 - Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Rev. For. Fr.* n° 5: 564-571.
(6) DELATOUR C., 1990 - Dépérissement des chênes et polluages. *Rev. For. Fr.* XII, 2: 182-185.
(7) LANDMANN G., 1994 - Effects of air pollution on terrestrial and aquatic ecosystems. *OST Project 612 (1994-1996) - Final scientific report*. PFC, Brussels.
(8) SENICAR WA., 1964 - Comparisons of recent declines of white ash, oak and sugar maple in northeastern woodlands. *Cornell Plant. Dis.* 62: 67.
(9) SINCALAR WA., 1967 - Decline of hardwoods: possible causes. *International Short Tree Conference Proceedings*, 42: 17-32.
(10) MANION Ph., 1981 - *Tree disease concepts*. *Ecological Cliffs N.J., Prentice Hall*, 324p.
(11) MALAISSE F., BURGERON D., DEGREEF J., DIEBIS H., VAN DOREN B., 1993 - Le dépérissement des chênes indigènes en Europe occidentale. *Note 1: symptômes de perte de vitalité* - *Hedg. Journ. Bot.* 126(2): 191-205.
(12) MALAISSE F., DULIERE J.-F. et GIBES V., 1996 - Les causes du dépérissement: état des connaissances. In: *Etat de l'Environnement wallon 1995*, vol. 3, *Forêt & Sylviculture*: 47-50.
(13) HARTMANN G., NIENHAUS E. et BULTIN H., 1991 - Les symptômes de dépérissement des arbres forestiers. *Atlas de reconnaissance en couleurs des symptômes de dépérissement des arbres forestiers. Institut pour le développement forestier*, Stuttgart, 256 p.
(14) FRITZ H., KRANE GIMM, STRATMANN H., 1982 - *Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*, Essen, *Bericht* 28, 51 p.
(15) LURICH E., 1991 - The pollution climate (especially in the Vosges). In: *French Research into forest decline. DEFORPA Programme - Forest Decline and Air Pollution. 2nd report*, Nancy: *Revue nationale du Génie rural, des Baux et des Forêts, Landmann G. Ed.*, 39-58.
(16) LANDMANN G., 1995 - *Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains: A Synthesis*. In: *Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains*, Landmann G. and Bouneau M. (eds) Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 407-452.
(17) LANDMANN G., BOUANEU M., RANGER J., MOHAMED AD, AYS C., GRAS F., 1995 - *Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains: A Synthesis*. In: *Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains*, Landmann G. and Bouneau M. (eds) Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 407-452.
(18) LANDMANN G., BOUANEU M., 1994 - Le dépérissement du sapin précoce et de l'épicéa commun dans les montagnes françaises au cours des années 1980. *Rev. For. Fr.* n° 5: 522-537.
(19) INSTMET D., PERRIN R., LE TACON F. et BOUCHARD D., 1990 - Nutritional and microbiological aspects of decline in the Vosges Forest area (France). *Forest Ecology and Management*, 37: 233-248.
(20) DREYER B., GARBATE J., PERRIN R., 1993 - Experimental evidence of a deleterious soil microflora associated with Norway-spruce decline in France and Germany. *Plant and Soil*, 148: 145-153.
(21) BONNEAU M., LANDMANN G. et NYS C., 1990 - Perforation of declining conifer stands in the Vosges and in the French Ardennes. *Water, Air and Soil Pollution*, 54: 577-594.
(22) FRIBER-SMITH P.H. and TAYLOR G., 1988 - Abiotic factors affect air pollution responsible for premature yellowing and necrosis of tree foliage. In: *Scientific basis of forest decline symptomatology (Proceedings)*. Eds. J.N. GARD and P. MATHY. *Commission of European Communities*: 107-125.
(23) VAN DER STEGEN J., DUTILLIEUL P. et WEISSEN F., 1989 - Répétition des symptômes de dépérissement sur la croissance des épicéas. *Silva Belgica*: 17-22.
(24) WEISSEN F. et DELEOURE F., 1994 - Apports d'enseignements en pessières menacées de dépérissement: qualité de l'épandage, effet sur le sol et les peuplements. *Ministère de la Région Wallonne, D.G. Ressources Naturelles et Environnement, Numéro*, 37 p.
(25) GARRIC J., LE MAGU L. et ROSE C., 1990 - Possibilité d'application des tests physiologiques pour le diagnostic précoce du dépérissement forestier. *Annales de Gembloux*, 96: 55-77.
(26) HANNIKKA E., WATERKYN L., WEISSEN F. et VAN PRAAG H., 1993 - Vascular tissue anatomy of Norway spruce needles and buds in relation to magnesium deficiency. *Tree Physiol.* 13: 337-349.
(27) WEISSEN F., VAN PRAAG H., ANDRE P. et MARECHAL P., 1992 - Causes du dépérissement des forêts en Ardenne: observations et expérimentation. *Silva Belgica* 99(1): 9-13.
(28) DONNANU M., 1988 - Le diagnostic foliaire. *Rev. For. Fr.* XI, N° 444: 19-28.
(29) LINDER S., 1995 - Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletin (Copenhagen)*, 44: 178-190.
(30) LAURENT C., 1996 - Rapport récapitulatif sur la surveillance de l'état sanitaire des forêts en Région Wallonne en 1989-1995. *Ministère de la Région Wallonne. Division Nature et Forêts*, 4p.
(31) COLLECTIF, 1993 - Emissions de SO₂. In: *Etat de l'Environnement Wallon*, p. 98.
(32) BPOK, U.C.L., 1996 - Mise au point et application de traitements de restauration. *Rapport final*. Centre de Recherches Forestières de la Fagne. Unité des Baux et Forêts. Faculté des Sciences Agronomiques, U.C.L., 107 pages + annexes.
(33) I.R.S.I.A., 1996 - Rapport préliminaire. Juillet. Scénarios de dépérissement et de rétablissement chez le hêtre et l'épicéa. *Risques nouveaux pour la sylviculture du douglas et des mélèzes. Sciences du sol et de la terre. Section pédologie forestière*, 13 p.
(34) ULRICH E., 1995 - Le réseau RENSOOFOR: objectifs et réalisation. *Rev. For. Fr.* XI, VII 2: 107-124.
(35) I.R.S.I.A., 1997 - Rapport d'activités 1975-1977 du Centre de Recherche et de Promotion Forestière. *Section Pédologie*.
(36) WEISSEN F., LEYDCAERT M. et VAN PRAAG H., 1984 - Rapport préliminaire sur les effets de la pollution atmosphérique sur les forêts de l'Ardenne. *Bull. Soc. Roy. For. de Belgique* 91(12): 60-72.
(37) MARECHAL P. et REGNIER P., 1987 - Inventaire sanitaire de notre forêt: contribution de la télédétection. *Bull. Soc. Roy. For. de Belgique*, 94(3): 113-120.
(38) VAN DOREN B., 1989 - *Communication personnelle*.
(39) PARCY C., MARECHAL P. et FELTEN V., 1990 - Apport de la télédétection au contrôle de l'état sanitaire des forêts. *Rapport final de convention CEE-Walpole Télédeco SA-UCL n° APFF 80/87*, cofinancé par la Région Wallonne n° 88/30020: 70 p.
(40) Commission of the European Communities, 1992 - *Application de la télédétection à l'observation de l'état sanitaire des forêts. Directive Générale pour Agriculture*, chap. 2.
(41) EFOP, U.C.L., 1989 - Détermination de l'incidence des facteurs stationnels sur l'état sanitaire des peuplements forestiers en atmosphère faiblement polluée. *Rapport final de convention CEE (DG VI) n° 86/0101*.
(42) WEISSEN F. et MARECHAL P., 1991 - Le sol, un composant sous-estimé de l'écosystème forestier ardennois. *Pédologie* 5: 69-87.
(43) WEISSEN F., VAN PRAAG H., MARECHAL P., DELEOURE F. et PARCY C., 1988a - Les causes de la dégradation sanitaire des forêts en Wallonie: le point de la situation. *Bull. Soc. Roy. For. de Belgique* 95(2): 57-68.
(44) WEISSEN F., HAMBUCKERS A., VAN PRAAG H. et REMACLE J., 1988b - A decadal control of N-cycle in the Belgian Ardennes forest ecosystems. *Kluwer Academic Publ., Dordrecht*: 59-66.
(45) LAHIBERT J., PARMENTIER M., LEONARD C., WEISSEN F. et REGNIER P., 1989 - Premiers enseignements de l'analyse des sols forestiers en région wallonne. *Silva Belgica* 97(2): 7-12.
(46) WEISSEN F., 1990 - Impact des polluants atmosphériques sur le sol. *Techniques de conservation et de réhabilitation. Etat de l'Environnement Wallon. Rapport final*. Unité des Baux et Forêts, Faculté des Sciences Agronomiques, U.C.L., Louvain-la-Neuve, 52 p.
(47) VAN DRIESCHE P. et PERRIER P., 1995 - Botanycorrhization et état sanitaire du hêtre et du chêne en forêt de Soignes. *Belg. Journ. Bot.* 128(1): 57-70.
(48) HAMBUCKERS A. et REMACLE J., 1993 - The ecosystem analysis of small forested catchments as a tool for global change assessment? In: *Biological Indicators of Global Change*, J.J. Smeets, J. Rammeles, P. Devos, Ch. Verstraeten eds. *Royal Academy of Overseas Sciences, Brussels*: 129-138.
(49) BULDGEN P. et REMACLE J., 1981 - Influence of environmental factors upon the leaching of ions in unmineralized microcosms of beech and spruce litter. *Soil Biol. Biochem.* 13: 86-90.
(50) BULDGEN P., 1984 - *Etude écosystémique de deux bassins versants boisés en haute Ardenne. Thèse de Doctorat*, UCL.
(51) MONJOIE A. et CAJOT O., 1983 - Aspects hydrogéologiques des bassins expérimentaux de la robuette et de Waroneu (les Hautes-Fagnes, Belgique). *Comptes rendus du colloque "Les écosystèmes forestiers en Wallonie"*. Gembloux: 57-69.
(52) MONJOIE A. et CAJOT O., 1986 - Les affluents présents dans le massif des Hautes-Fagnes. *Hautes-Fagnes*, fasc. 179 de la revue de la Société Royale "Les amis de la Fagne".
(53) ANONYME, 1994 - *Restauration des forêts endommagées et suivi des effets*. *Projet pilote Région Wallonne - Union Européenne*, 83p.
(54) CARNOI M., 1991 - *Etude de l'influence des facteurs du milieu sur la nitrification dans l'horizon biologique d'une pessière*. *Mémoire de licence*, UCL.
(55) HAMBUCKERS A. et REMACLE J., 1991 - Time series analysis of the nutrient concentra-