

Fertilisation sur résineux adultes (*Picea abies* Karst et *Abies alba* Mill) dans les Vosges : composition foliaire en relation avec la défoliation et le jaunissement

M Bonneau

INRA, centre de Nancy, Champenoux, 54280 Seichamps, France

(Reçu le 22 juin 1992; accepté le 23 novembre 1992)

Résumé — Des essais de fertilisation ont été installés dans 8 peuplements plus ou moins dépérissants d'épicéa (*Picea abies* Karst) ou de sapin (*Abies alba* Mill) dans les Vosges en 1985 (tableau I). Cinq traitements, témoin, Ca, CaMg, NPKCaMg, KMg ont été appliqués. Le jaunissement et la perte d'aiguilles ont été suivis de 1986 à 1990 en même temps que la composition minérale des aiguilles. La défoliation et le jaunissement ont diminué spontanément dans les placeaux témoins (tableaux II et III) tandis que les teneurs en calcium et en magnésium des aiguilles augmentaient (tableaux VI, VII, VIII). Ces améliorations ont été renforcées par les fertilisations Ca, CaMg et NPKCaMg (tableaux II et IV). On peut penser que les fortes pertes d'aiguilles et le fort jaunissement de 1985/1986 étaient les conséquences des conditions climatiques de 1983 et 1984 : printemps très pluvieux suivis d'étés chauds et secs. Les corrélations entre la teneur des aiguilles en Ca et Mg et la défoliation ou le jaunissement étaient meilleures en période de crise en 1985/1986 que plus tard en 1989/1990 (tableau IX, figs 1 et 2). Des corrélations entre la teneur en calcium et magnésium des aiguilles en 1989 et la défoliation ou le jaunissement en 1986 pourraient être utilisées pour déterminer quels peuplements on doit fertiliser si l'on veut éviter un dépérissement sévère en cas de nouvelle crise climatique (figs 3–5). Par exemple, des peuplements contenant moins de 0,47% de Ca dans les aiguilles de l'année courante ou moins de 0,08% de Mg dans les aiguilles de quatrième année devraient être fertilisés si l'on veut éviter une défoliation moyenne le plus de 20% et un nombre d'arbres jaunissants de plus de 15% en cas de crise.

sapin (*Abies alba* Mill) / épicéa (*Picea abies* Karst) / dépérissement / fertilisation / analyse foliaire / Vosges

Summary — Fertilization of adult coniferous stands in the Vosges: mineral composition of needles in relationship to needle loss and yellowing. Fertilizer experiments were set up in 8 more or less declining stands of spruce (*Picea abies* Karst) or fir (*Abies alba* Mill) in the Vosges mountains in 1985 (table I). Five treatments, ie a control, Ca, CaMg, NPKCaMg, and KMg were applied. Needle yellowing and needle loss were recorded from 1986–1990 as well as needle mineral composition. Needle loss and yellowing decreased spontaneously from 1986–1990 in the control plots (tables II, III) while the Ca and Mg contents of the needles increased (tables VI, VII, VIII).

These improvements were reinforced by Ca, CaMg or NPKCaMg fertilizers (tables II and IV). The strong defoliation and yellowing in 1985–1986 were probably due to the climatic conditions: very wet springs and hot and dry summers in 1983 and 1984. Correlations between Ca and Mg concentrations in the needles and needle loss or yellowing were higher during the climatic crisis period in 1985–1986 than later in 1989–1990 (table IX, figs 1, 2). Correlations between Ca and Mg concentrations in the needles in 1989 and needle loss or yellowing in 1986 might be used to determine which stands it is advisable to fertilize if one intends to avoid severe decline in the case of another climatic crisis (figs 3–5). For instance, stands with < 0.47% Ca in current-year needles and < 0.08% Mg in the 4th yr needles in 1989 should be fertilized to avoid, in the event of a future crisis, an average needle loss and a percentage of yellowing trees of > 20% and > 15% respectively.

white fir (*Abies alba* Mill) / Norway spruce (*Picea abies* Karst) / forest decline / fertilization / foliar analysis / Vosges

INTRODUCTION

Le dépérissement des forêts dans les Vosges est souvent plus accusé sur les sols pauvres, eux-mêmes généralement localisés sur des roches-mères mal pourvues en minéraux calciques ou magnésiens, comme l'a montré une cartographie exhaustive du dépérissement sur 6 000 ha à partir de photographies aériennes (Institut géographique national) et sa comparaison avec la carte géologique au 1/25 000 (Bonneau et Fichter, 1991). Cela est particulièrement vrai pour le jaunissement des aiguilles qui est lié à une carence magnésienne et/ou calcique (Landmann *et al*, 1987), comme d'ailleurs en Forêt Noire (Zöttl et Mies, 1983; Liu et Huettl, 1991), tandis que des défoliations sans jaunissement peuvent exister sur des sols de richesse moyenne (Becker, 1987) et sont alors directement liées à des arrière-effets de périodes sèches (Becker, 1987; Levy et Becker, 1987).

Des essais sur peuplements adultes et sur jeunes plantations de sapin (*Abies alba* Mill) et d'épicéa (*Picea abies* Karst) ont été effectués à partir de 1985 et ont montré que des amendements calciques ou calco-magnésiens favorisaient le retour à une masse foliaire plus abondante et le

reverdissement du feuillage (Bonneau *et al*, 1991; Bonneau *et al*, 1992a). Dans les essais sur arbres adultes, on a suivi régulièrement non seulement l'évolution de la couleur et de la quantité d'aiguilles, mais aussi leur composition de 1985 à 1989. Après un rapide rappel des résultats sur la défoliation, le jaunissement et la croissance, cet article sera consacré exclusivement à la composition minérale des aiguilles en calcium et magnésium dans les peuplements adultes, à ses relations avec l'état du feuillage, à son évolution dans le temps en liaison avec l'amélioration de l'état de santé, afin de mieux comprendre les causes du dépérissement et de répondre à une question pratique : la teneur actuelle en calcium et magnésium des aiguilles peut-elle permettre de choisir objectivement les peuplements qu'il serait utile de fertiliser ?

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description des essais

Sept essais ont été effectués au printemps 1985 et un huitième à l'automne de la même année, sur des peuplements de 80 à 100 ans environ. La liste des essais est donnée dans le tableau I,

avec les données initiales de défoliation et de jaunissement et les principales caractéristiques chimiques du sol. Il s'agit de peuplements plus ou moins fortement dépérissants correspondant dans l'ensemble à des fertilités faibles (Rouffach excepté).

La défoliation est notée en pourcentage de pertes d'aiguilles, par classes de 5 en 5% et le jaunissement caractérisé par 5 notes :

0 : pas de jaunissement;

1 : 1 à 9% d'aiguilles jaunes;

2 : 10 à 24% d'aiguilles jaunes;

3 : 25 à 59% d'aiguilles jaunes;

4 : plus de 60% d'aiguilles jaunes.

Cinq traitements ont été systématiquement appliqués dans tous les essais:

- témoin;

- traitement Ca : 2 500 kg de calcaire broyé et 400 kg de chaux vive par ha, soit 1 520 kg de CaO;

- traitement CaMg : 2 500 kg d'un mélange de calcaire broyé et de chaux magnésienne, soit 1 590 kg de CaO et 450 kg de MgO;

- traitement NPKCaMg : aux apports du traitement CaMg on a ajouté 200 kg/ha d'azote (ammonitrate à 34,5%), 200 kg d'acide phosphorique (superphosphate triple) et 150 kg de K₂O (sulfate de potassium);

- traitement KMg : 500 kg de kalimagnésia (Patentkali), sulfate double de K et Mg, soit 100 kg de K₂O et 50 kg de MgO.

Ces engrais ont été épandus en surface, sans enfouissement. Chaque essai comporte, suivant les possibilités qu'offrait le peuplement choisi, une (Rouffach, Louchbach), 2 ou 3 (Remiremont) répétitions en blocs.

Tableau I. Liste des essais, roches-mères, pourcentage moyen de défoliation D dans l'ensemble de chaque essai et note moyenne de jaunissement au début de l'expérience en 1986. Teneurs du sol en Ca, Mg et Al échangeables dans l'horizon A1 et à 30 cm de profondeur en milli-équivalents par kg de sol sec, pH H₂O.

Nom de l'essai Roche-mère		D		pH		Ca		Mg		Al	
				Al	-30	A1	-30	A1	-30	A1	-30
Rouffach Sapin	Granite à biotite de Wintzenheim	16	0,10	4,5	4,6	34	5,0	4,0	0,7	3	52
Vologne Sapin	Grès permien	37	0,34	4,0	4,4	1,8	0,9	0,9	0,3	58	38
Remiremont Sapin	Grès vosgien mélangé de limon	21	0,37	3,7	4,5	1,5	1,2	1,3	0,3	85	39
Mortagne Sapin	Grès intermédiaire et grès vosgien	25	0,28	3,9	4,3	1,0	0,7	0,7	0,2	48	43
Russ Sapin	Granite acide de Kagenfels	20	0,25	3,9	4,3	1,0	1,0	2,1	0,5	56	37
Grendelbruch Sapin	Granite acide de Kagenfels	23	0,37	3,6	4,4	6,0	1,0	1,6	0,4	70	55
Grossmann Epicéa	Grès vosgien	21	0,68	3,7	3,8	2,0	1,0	0,7	0,3	18	25
Louchbach Epicéa	Granite acide du Valtin	26	2,00	3,2	4,0	11,0	0,7	4,4	0,9	101	99

Suivi des essais

Une première notation sommaire a eu lieu à l'automne 1985; la notation plus fine décrite ci-dessus a été réalisée en 1986, donc 1 an après l'application des engrais, sur 25 arbres individualisés de chaque placeau, situés dans une zone interne de 30 x 30 m, les placeaux ayant une surface totale de 50 x 50 m. On peut cependant considérer cette notation comme notation initiale, car la faible durée de l'action de l'engrais n'a pas pu faire évoluer sensiblement les caractéristiques du peuplement. D'ailleurs, une seconde notation en 1988 mortrait dans les placeaux fertilisés une amélioration encore faible par rapport aux témoins. Une troisième notation a été réalisée en 1990 et c'est uniquement celle-ci qui sera prise en considération. En même temps qu'était effectuée la notation, la circonférence des 25 arbres était mesurée au millimètre près.

Sur 4 essais, ceux de Vologne, Mortagne, Russ et Grendelbruch, des carottages ont été effectués pendant l'été 1990 et l'évolution de la largeur des cerne a été étudiée (Lebourgeois, 1991) suivant la méthode mise au point par Becker (1987). Cette dernière prend en compte non la largeur absolue des cerne, mais sa valeur relative par rapport à la moyenne d'un ensemble de sapins vosgiens, représentatifs de l'ensemble du massif, et de même âge que le peuplement considéré.

Parallèlement à ce suivi de l'aspect de la partie aérienne et de la croissance, la composition des aiguilles a été déterminée à l'automne 1985, 1987 et 1989. Sur 10 arbres par essai et par traitement lorsque les répétitions étaient bien groupées, ou 10 arbres par traitement et par répétition lorsqu'elles étaient distantes de quelques centaines de mètres, de petites branches ont été prélevées par tir au fusil dans la partie supérieure de la cime et les aiguilles de l'année en cours, celles de 2^e année, et mêmes celles de 4^e année en 1989, ont été analysées. On a déterminé leur teneur en éléments majeurs totaux suivant les procédés usuels : minéralisation Kjeldahl et distillation d'ammoniac pour l'azote; minéralisation sèche, reprise acide, puis détermination des éléments par colorimétrie (P) ou spectrométrie d'absorption (K, Ca, Mg).

L'évolution de la garniture ionique du complexe absorbant a été étudiée en 1990 dans les

essais de Mortagne, Remiremont, Grossmann et Louchbach. Dans l'essai du Louchbach, un suivi mensuel de la composition des solutions du sol à diverses profondeurs a été réalisé depuis 1988 (Mohamed *et al*, 1992).

RÉSULTATS

Masse foliaire, couleur, croissance

Les résultats concernant l'évolution de la masse foliaire et de la couleur du feuillage, ainsi que ceux concernant l'évolution de la saturation du sol en cations et la composition des eaux du sol dans l'essai de Louchbach, sont exposés par Bonneau *et al* (1992a) et Mohamed *et al* (1992). Les résultats sur la croissance dans quatre essais sont détaillés par Lebourgeois (1991). L'essentiel de ces résultats est rappelé ci-après.

Masse foliaire

Le pourcentage de défoliation a nettement diminué en 1990, par rapport au témoin, dans la plupart des traitements sans toutefois que les traitements comportant un apport de calcium (Ca, CaMg, NPKCaMg) se distinguent entre eux (tableau II). Pour l'ensemble des essais, le pourcentage d'arbres dont la défoliation a diminué de plus de 20% entre 1986 et 1990 s'établit à 29% pour les témoins, 51% pour le traitement Ca, 46% pour le traitement CaMg, 50% dans le traitement NPKCaMg et 40% seulement dans le traitement KMg.

Le pourcentage moyen de défoliation est passé de 25% à 16% dans les témoins, à 9% dans les traitements Ca, CaMg et NPKCaMg, à 12% dans le traitement KMg. La différence avec le témoin est significative à 5% pour les traitements Ca, CaMg, NPKCaMg mais non pour le traitement KMg. Il est remarquable que la masse foliaire des témoins se soit amélio-

Tableau II. Effet des traitements sur le niveau de défoliation : pourcentage du nombre d'arbres dont la défoliation a diminué d'au moins 20% (ND20) entre 1986 et 1990, pourcentages moyens de défoliation en 1986 (D86) et 1990 (D90). Effet des traitements sur l'intensité du jaunissement : pourcentage du nombre d'arbres dont la note de jaunissement a diminué d'au moins 1 (NJ₁), notes moyennes de jaunissement en 1986 (J86) et 1990 (J90).

Traitements	Défoliation			Jaunissement		
	ND20	D86	D90	NJ ₁	J86	J90
Témoin	29	25	16	71	0,55	0,36
Ca	51 +++	24	9 --	96 +++	0,30	0,04 NS
CaMg	46 +++	25	9 --	97 +++	0,44	0,02 NS
NPKCaMg	50 +++	25	9 --	99 +++	0,37	0,01 NS
KMg	40 ++	25	12 NS	57 -	0,54	0,27 NS

Le degré de signification des différences par rapport au témoin est indiqué par + ou - (5%), ++ ou -- (1%), +++ ou --- (1%), suivant que les différences sont positives ou négatives.

Tableau III. Perte moyenne de feuillage, en pourcentage NJ₁86, dans les témoins en 1986 (D86) et en 1990 (D90). Pourcentage du nombre d'arbres dont la note de jaunissement est égale ou supérieure à 1 en 1986 (NJ₁86) et en 1990 (NJ₁90) dans les témoins.

	D86	D90	NJ ₁ 86	NJ ₁ 90
Rouffach	16	8	12	1
Vologne	37	30	16	11
Remiremont	21	18	26	21
Mortagne	24	13	10	2
Russ	18	7	22	2
Grendelbruch	26	11	35	24
Grossman	24	11	40	12
Louchbach	38	30	99	100

rée spontanément (tableau III). Cette amélioration spontanée et l'effet des traitements sont loin d'être uniformes dans l'ensemble des essais. L'effet est nul à Rouffach où le sol est assez riche, ainsi qu'à Russ; seul le traitement Ca est significatif (à 5%) dans les essais de Mortagne et de Grendelbruch. Dans l'essai du Louchbach, pénalisé par l'existence d'une seule répétition (le test χ^2 employé ne porte donc que sur un faible nombre d'arbres), seul l'effet de NPKCaMg est significatif malgré une proportion d'arbres améliorés nettement plus forte dans les traitements Ca et CaMg (73 et 80%) que dans le témoin (41%).

Couleur du feuillage

Dans l'ensemble des essais, les traitements ont un effet positif (tableau II) : les proportions d'arbres dont la note de jaunissement a diminué d'au moins 1 est significative à 1% par rapport au témoin dans tous les traitements sauf KMg. La note moyenne de jaunissement passe, de 1986 à 1990, de 0,55 à 0,36 dans les témoins et de 0,37–0,40 à 0,04–0,01 dans les traitements Ca, CaMg, NPKCaMg, sans toutefois que cette variation de la note moyenne soit significative.

On note un reverdissement spontané du feuillage dans certains essais (Rouffach, Vologne, Mortagne, Russ, Grossmann), mais, dans les autres, le jaunissement se maintient au même niveau (Remiremont, Louchbach) ou à un niveau peu inférieur (Grendelbruch) (tableau III). Le tableau IV donne l'effet des traitements dans l'essai du Louchbach où le jaunissement était très sévère.

Croissance

La fertilisation a amélioré la croissance. Aucune étude générale sur l'ensemble des

essais n'a été effectuée à l'heure actuelle, mais l'effet est très net dans les 4 essais étudiés par Lebourgeois (1991) : l'indice de croissance relative (qui élimine l'effet de l'âge) s'améliore continuellement depuis 1980, y compris dans les témoins, et les courbes marquent une divergence nette entre traitements depuis 1985. Suivant les essais, l'indice de croissance s'améliore par rapport aux témoins, de 1985 à 1990, de 34 à 50%. Le traitement KMg est, sous ce rapport, aussi efficace que les 3 autres traitements (tableau V).

Composition foliaire

Les tableaux VI, VII et VIII donnent l'évolution de la composition foliaire en Mg, Ca et K, d'une part dans les témoins entre 1985 et 1989, et d'autre part entre témoins et traitements Ca, CaMg et NPKCaMg en 1989. Le traitement KMg n'est pas inclus dans les tableaux et n'a pas donné lieu à interprétation, vu son effet faible ou même

Tableau IV. Notes de jaunissement dans l'essai du Col de Louchbach en 1986 et 1990 suivant les traitements.

Traitements	1986	1990
Témoins	2,00	2,0
Ca	1,52	0,12 --
CaMg	1,72	0,04 --
NPKCaMg	1,84	0,00 --
KMg	2,76	1,33 --

-- Différence significative à 1%.

Tableau V. Augmentation de l'indice de croissance relative dans 4 essais de 1985 à 1990 par rapport aux témoins (d'après Lebourgeois, 1991).

	<i>Ca</i>	<i>CaMg</i>	<i>NPKCaMg</i>	<i>KMg</i>
Vologne	+48(+)	+48(+)	+35(+)	+45(NS)
Mortagne	+50(+)	+50(NS)	+48(+)	+50(NS)
Russ	+47(NS)	+48(NS)	+47(+)	+44(+)
Grendelbruch	+34(+)	+35(NS)	+49(+)	+50(+)

+ Différence significative à 5% par rapport au témoin; NS : différence non significative.

négalif sur l'évolution de la masse foliaire ou le reverdissement.

Évolution dans les témoins entre 1985 et 1989

La teneur en Mg des aiguilles des témoins s'est nettement améliorée de 1985 à

1989 : 0,109 en 1989, contre 0,078 en 1985. La différence est significative au seuil de 2,5% (tableau VI). Cette amélioration est sensible aussi bien dans les essais où la teneur de 1985 était faible que dans ceux où elle était satisfaisante (Russ, Remiremont). Ce n'est que dans l'essai de Rouffach qu'on ne note aucune différence positive.

Tableau VI. Teneur des aiguilles de l'année courante en magnésium dans les témoins en 1985 et 1989 et dans les traitements Ca, CaMg et NPKCaMg en 1989, en pourcentage de la matière sèche.

	<i>Témoins</i>		<i>Ca</i>	<i>CaMg</i>	<i>NPKCaMg</i>
	<i>1985</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>
Rouffach	0,13	0,12	0,11	0,12	0,13
Vologne	0,06	0,08	0,11	0,13	0,13
Remiremont	0,08	0,17	0,12	0,15	0,20
Mortagne	0,08	0,09	0,11	0,12	0,11
Russ	0,12	0,16	0,13	0,16	0,14
Grendelbruch	0,06	0,09	0,10	0,18	0,12
Grossmann	0,06	0,08	0,09	0,10	0,08
Louchbach	0,04	0,08	0,08	0,11	0,09
Moyenne	0,078	0,109	0,106	0,134	0,125
		+	NS	+++	+++

+, ++, +++ Différences significative à 5%, 1%, 1% entre témoins en 1989 et témoins en 1985, ou entre traitements et témoins en 1989.

Tableau VII. Teneur des aiguilles de l'année courante en calcium dans les témoins en 1985 et 1989 et dans les traitements Ca, CaMg et NPKCaMg en 1989, en pourcentage de la matière sèche.

	<i>Témoins</i>		<i>Ca</i>	<i>CaMg</i>	<i>NPKCaMg</i>
	<i>1985</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>
Rouffach	0,68	0,58	0,57	0,55	0,61
Vologne	0,18	0,33	0,62	0,55	0,53
Remiremont	0,22	0,35	0,66	0,80	0,75
Mortagne	0,36	0,44	0,60	0,56	0,50
Russ	0,31	0,47	0,50	0,49	0,39
Grendelbruch	0,28	0,43	0,43	0,44	0,44
Grossmann	0,26	0,29	0,44	0,41	0,31
Louchbach	0,15	0,24	0,36	0,45	0,30
Moyenne	0,305	0,385	0,522	0,531	0,478
		+	+	+	NS

+ Différence significative à 5% entre témoins en 1989 et témoins en 1985, ou entre traitements et témoins en 1989.

La teneur en calcium augmente aussi dans presque tous les essais, sauf celui de Rouffach. La différence est significative au seuil de 2,5%.

Les teneurs des aiguilles des témoins en Ca en 1989 restent significativement corrélées avec celles de 1985 (tableau IX); cette corrélation est légèrement inférieure

Tableau VIII. Teneur en potassium des aiguilles de l'année courante des témoins en 1985 et 1989 et des traitements Ca, CaMg, NPKCaMg en 1989, en pourcentage de la matière sèche.

	<i>Témoins</i>		<i>Ca</i>	<i>CaMg</i>	<i>NPKCaMg</i>
	<i>1985</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>	<i>1989</i>
Rouffach	0,65	0,65	0,59	0,65	0,78
Vologne	0,67	0,70	0,58	0,60	0,63
Remiremont	0,77	0,56	0,48	0,40	0,59
Mortagne	0,71	0,71	0,55	0,55	0,56
Russ	0,43	0,60	0,50	0,41	0,59
Grendelbruch	0,67	0,69	0,61	0,69	0,67
Grossmann	0,72	0,57	0,60	0,57	0,64
Louchbah	0,70	0,76	0,70	0,66	0,76
Moyenne	0,665	0,655	0,576	0,566	0,652
		NS	--	--	NS

-- Différence significative à 1% entre témoins en 1989 et témoins en 1985 ou entre traitements et témoins en 1989.
NS : différence non significative.

au seuil de signification pour le magnésium.

Les teneurs en N, P et K varient peu : N passe de 1,35% à 1,40% en moyenne, P de 0,150% à 0,152%, K de 0,665 à 0,655.

Différences entre traitements

Le tableau VI montre que la teneur en Mg n'augmente pas dans le traitement Ca par

rapport au témoin, contrairement à ce qu'on avait constaté lors des analyses de 1987. L'amélioration de la teneur en magnésium dans le traitement CaMg est au contraire très nette, significative à 1%; elle passe de 0,109 à 0,134; dans le traitement NPKCaMg, elle est très légèrement plus faible.

La teneur en calcium des aiguilles dans les traitements Ca et CaMg augmente très significativement par rapport aux témoins

Tableau IX. Formes, coefficients et niveau de signification des corrélations entre différentes grandeurs dans les placeaux témoins.

Grandeur	Forme de la relation	r	Degré de signification
<i>Défoliation</i>			
D86/[Mg] ₁ ,85	$y = -215 x + 42,3$	-0,834	2%
D90/[Mg] ₁ ,89	$y = -97 x + 26,5$	-0,390	NS
D90/[Mg] ₄ ,89	$y = -24,8 \log x - 18$	-0,645	NS
D86/[Mg] ₁ ,89	$y = -42 \log x - 15$	-0,702	NS
D86/[Mg] ₄ ,89	$y = -29 \log x - 14$	-0,855	1%
D86/[Ca] ₁ ,85	$y = -34,3 x + 35,9$	-0,702	NS
D90/[Ca] ₁ ,89	$y = -69,7 x + 42,8$	-0,739	5%
D86/[Ca] ₁ ,89	$y = -50 \log x + 4,46$	-0,761	5%
<i>Jaunissement</i>			
NJ ₁ ,86/[Mg] ₁ ,85	$y = -125 \log x - 109$	-0,738	5%
NJ ₁ ,90/[Mg] ₁ ,89	$y = -81 \log x - 58$	-0,338	NS
NJ ₁ ,90/[Mg] ₄ ,89	$y = -82 \log x - 91$	-0,603	NS
NJ ₁ ,86/[Mg] ₁ ,89	$y = -76 \log x - 42$	-0,359	NS
NJ ₁ ,86/[Mg] ₄ ,89	$y = -66 \log x - 58$	-0,553	NS
NJ ₁ ,86/[Ca] ₁ ,85	$y = -88 \log x - 17$	-0,619	NS
NJ ₁ ,90/[Ca] ₁ ,89	$y = -209 \log x - 68$	-0,739	5%
NJ ₁ ,86/[Ca] ₁ ,89	$y = -192 \log x - 50$	-0,772	5%
<i>Concentrations entre années</i>			
[Mg] ₁ ,89/[Mg] ₁ ,85	$y = 0,768 x + 0,048$	+0,647	NS
[Ca] ₁ ,89/[Ca] ₁ ,85	$y = 0,58 x + 0,21$	+0,878	1%

D86, D90 : pourcentage de pertes d'aiguilles en 1986 et 1990. NJ₁,86, NJ₁,90 : pourcentage du nombre d'arbres de note de jaunissement égale ou supérieure à 1 en 1986 et 1990. [Ca]₁,85, [Ca]₁,89 : teneurs des aiguilles de l'année courante en Ca en 1985 et 1989, en pourcentage de la matière sèche. [Mg]₁,85, [Mg]₄,85, [Mg]₁,89, [Mg]₄,89 : teneurs des aiguilles de l'année courante, ou de 4e année, en magnésium en 1985 et 1989, en pourcentage de la matière sèche. Nombre de couples de valeurs : 8. Seuil de signification à 5% : 0,706.

(0,531 et 0,522 par rapport à 0,385). L'augmentation de teneur en Ca est plus modérée dans le traitement NPKCaMg.

Les teneurs en azote ne varient pas sensiblement avec la fertilisation, même dans le traitement NPKCaMg. Au contraire, les teneurs en phosphore remontent sensiblement dans le traitement NPKCaMg, notamment dans certains essais où elle était assez basse, de l'ordre de 0,12–0,14% (Mortagne, Remiremont, Grendelbruch). Dans les témoins et les traitements Ca et CaMg, la valeur moyenne est de 0,150%, contre 0,167 dans le traitement NPKCaMg.

La fertilisation calcique ou calcomagnésienne entraîne une diminution très significative (à 1%) de la teneur en potassium des aiguilles, qui passe de 0,65% dans les témoins en 1989 à 0,56–0,57% dans les traitements Ca et CaMg, pour remonter à 0,65 dans le traitement NPKCaMg (tableau VIII).

Elle reste suffisante dans la plupart des essais, sauf à Remiremont (0,48 et 0,40% dans les traitements Ca et CaMg) et à Russ (0,50 et 0,41%), ce qui peut expliquer que dans l'essai de Russ l'effet des traitements NPKCaMg et KMg sur la croissance soit plus significatif que celui des traitements Ca et CaMg.

Relations entre la composition foliaire en Ca et Mg et les niveaux de défoliation et de jaunissement

Le tableau III indique en 1986 et 1990 le pourcentage moyen de défoliation dans les témoins par essai (D86 et D90) ainsi que le pourcentage d'arbres dont la note de jaunissement est égale ou supérieure à 1 (NJ,86 et NJ,90).

Le tableau IX indique les corrélations entre ces valeurs et les concentrations en Ca et Mg des aiguilles de l'année courante

(parfois des aiguilles de 4^e année) en 1985 et 1989.

Défoliation

La perte de feuillage en 1986 est bien corrélée, linéairement, avec la teneur en magnésium des aiguilles de l'année courante, en 1985. Mais, en 1990, la corrélation avec la teneur en magnésium des aiguilles de l'année disparaît; avec la teneur en Mg des aiguilles de 4 ans, la corrélation, bien que meilleure, reste inférieure au seuil de signification. En ce qui concerne le calcium, la corrélation en 1986/1985 est légèrement inférieure au seuil de signification, mais elle devient significative en 1990/1989 (fig 1).

Jaunissement

En ce qui concerne le pourcentage d'arbres ayant une note de jaunissement égale ou supérieure à 1, on trouve une corrélation non linéaire significative à 5% entre la teneur en magnésium des aiguilles de l'année en 1985 et le pourcentage d'arbres jaunissants en 1986, mais cette corrélation n'est plus significative en 1990 (fig 2). La corrélation jaunissement 1990/ teneur des aiguilles de 4 ans en magnésium, bien que meilleure, n'est pas non plus significative. Avec le calcium, au contraire, il n'existe pas de corrélation entre jaunissement en 1986 et teneur en aiguilles en 1985, mais cette corrélation devient significative à 5% en 1990/1989.

En résumé, dans les témoins, au début des essais, en 1985/1986, la défoliation est en relation étroite avec la teneur en magnésium des aiguilles de l'année courante, en relation un peu plus lâche avec la teneur en calcium, mais la teneur en calcium devient dominante en 1989/1990. Le

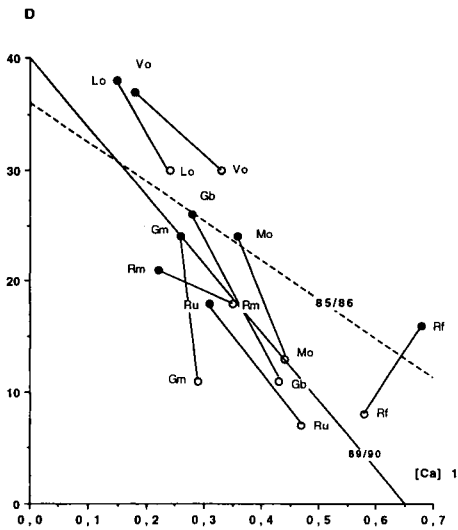


Fig 1. Pourcentage de défoliation en 1986 (D86) et en 1990 (D90) en fonction de la teneur en calcium des aiguilles de l'année courante en 1985 : $[Ca]_{85}$, et en 1989 : $[Ca]_{89}$ en pourcentage de la matière sèche. Gb : Grendelbruch; Gm : Grossmann; Lo : Louchbach; Mo : Mortagne; Rf : Rouffach; Rm : Remiremont; Ru : Russ; Vo : Vologne. ● $[Ca]_{85}$ et D86; ○ $[Ca]_{89}$ et D90.

jaunissement, au début des essais, est également plus étroitement relié à la teneur en magnésium des aiguilles de 1^{re} année qu'à leur teneur en calcium; mais, en 1989/1990, c'est la relation avec le calcium qui devient la plus étroite, comme pour la défoliation.

DISCUSSION

L'amélioration spontanée constatée dans les témoins de 1986 à 1990 coïncide bien avec une amélioration, spontanée également, de la nutrition magnésienne et calcique, tandis que le niveau des autres éléments n'a guère varié. On pourrait invoquer, pour expliquer cette évolution, une baisse progressive de la pollution acide.

On a constaté par exemple que les pointes hivernales du teneur en SO_2 enregistrées à la station de mesure du Donon ont considérablement diminué de 1985/1986 à 1990 (Target *et al*, 1991). Mais elles correspondent à des émissions par temps plutôt sec, venant du secteur Est (plaine du Rhin) et leur réduction n'implique pas forcément une réduction de la teneur en acides des pluies qui viennent plutôt du secteur Ouest-Sud-Ouest. Si l'acidité sulfurique a sans doute progressivement diminué, l'acidité nitrique a probablement augmenté, comme l'indique la tendance générale des réseaux EMEP et BAPMON.

Nous sommes plutôt tenté de relier cette amélioration de la santé des peuplements et de leur nutrition à des facteurs climatiques. Les années 1983 et 1984 ont été marquées par des printemps excessi-

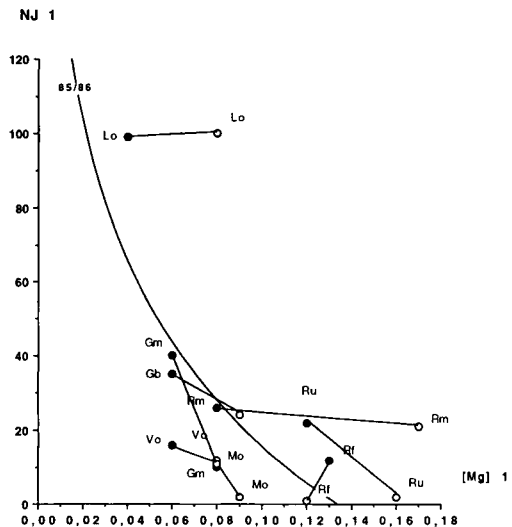


Fig 2. Pourcentage d'arbres de note de jaunissement égale ou supérieure à 1 en 1986 : NJ_{86} et en 1990 : NJ_{90} , en fonction de la teneur en magnésium des aiguilles de l'année courante en 1985 : $[Mg]_{85}$ et en 1989 : $[Mg]_{89}$, en pourcentage de la matière sèche. ● NJ_{86} et $[Mg]_{85}$; ○ NJ_{90} et $[Mg]_{89}$.

vement pluvieux et des étés chauds et secs. Les fortes pluies du printemps ont probablement provoqué une forte perte de cations échangeables par lessivage. En effet, l'étude des pluies sur un réseau de 10 postes dans les Vosges (Aschan *et al*, 1991; Bonneau *et al*, 1992b) a montré que l'acidité totale apportée par la pluie est positivement corrélée à la pluviométrie annuelle. D'autre part une expérimentation menée à Aubure a montré qu'un dessèchement du sol accentue le jaunissement en fin d'été (Dambrine *et al*, 1991a). Cela est confirmé par les analyses foliaires des aiguilles de 1991, année à été sec : elles régressent, dans les témoins, de 0,108% de Mg en 1989 à 0,08 en 1991.

Ainsi, le fort jaunissement qui s'est déclenché dans les Vosges de 1983 à 1985, puis le rétablissement progressif qui s'est produit, pourraient-ils être l'expression d'une crise climatique, puis d'un retour à la normale, avec une évolution parallèle de l'alimentation en calcium et en magnésium.

Comment expliquer alors que le jaunissement, bien qu'atténué dans certains de nos essais, subsiste encore en partie, voire en totalité comme dans le peuplement témoin du Louchbach ? Il faut faire intervenir, dans l'alimentation magnésienne notamment, la notion de transfert. Dambrine *et al* (1991b) ont montré, dans leurs travaux sur le bassin d'Aubure, que le jaunissement coïncidait avec une situation particulière où le magnésium nécessaire à l'élaboration des aiguilles de la pousse annuelle vient en forte proportion d'un transfert à partir des générations antérieures d'aiguilles. La meilleure teneur en magnésium constatée depuis la fin de la crise climatique de 1983-1985 pourrait masquer un transfert encore élevé suppléant une offre du sol en magnésium encore déficitaire. Deux arguments pourraient aller dans ce sens. Le premier est la teneur en Mg restée en moyenne égale à

celle des témoins dans le traitement Ca; en fait, cette constance moyenne de la teneur en Mg des aiguilles après fertilisation calcique est l'expression d'une baisse dans les peuplements où l'alimentation magnésienne était la plus élevée (Rouffach, Remiremont, Russ) et d'une légère augmentation dans ceux où elle était la plus basse, plutôt que l'inverse, ce qui pose un problème d'interprétation non résolu. Le second argument, encore que non explicatif, est une meilleure corrélation entre défoliation ou jaunissement et teneur en magnésium des aiguilles de 4^e année, teneur résiduelle après transferts successifs de cet élément vers les aiguilles jeunes, qu'avec la teneur dans les aiguilles de 1^{re} année.

Un troisième point important de discussion est le rôle joué respectivement par le calcium ou le magnésium dans la défoliation ou le jaunissement. Le calcium semble plus fortement impliqué que le magnésium dans la défoliation : la corrélation entre le taux de pertes d'aiguilles en 1986 et la teneur en Ca des aiguilles de l'année en 1985 est presque aussi forte qu'avec le magnésium, et elle persiste en 1989/1990, alors que la corrélation avec le magnésium devient très faible. De plus, une simple fertilisation calcique, qui n'améliore que peu, qualitativement, l'alimentation en magnésium, est aussi efficace pour la restauration de la masse foliaire qu'une fertilisation calco-magnésienne. Cependant, les témoins eux-mêmes sont revenus en 1989 à un niveau de calcium foliaire (0,38%) réputé suffisant pour une physiologie normale.

Sans doute faudrait-il voir l'effet du calcium comme un rôle surtout indirect sur la dynamique racinaire. Il peut s'agir d'une diminution importante du taux d'aluminium échangeable sur le complexe absorbant, telle qu'elle a été mise en évidence par l'étude de l'évolution des propriétés du sol de 4 essais (Bonneau *et al*, 1991; Bonneau *et al*, 1992a) ainsi que d'une diminution de la teneur en aluminium des solu-

tions du sol (Mohammed *et al*, 1992). Certes on croit de moins en moins à une réelle toxicité directe de l'aluminium dans les sols forestiers, même acides, mais son rôle comme antagoniste du calcium et du magnésium au niveau des surfaces absorbantes des racelles est de plus de plus admise (Van Praag *et al*, 1991). On peut alors penser que l'effet d'une fertilisation calcique est de faciliter l'absorption du calcium et du magnésium, par diminution de l'antagonisme aluminique, mais aussi de favoriser le développement racinaire et la mycorhization, ce qui multiplie d'autant l'effet précédent. La fertilisation calcique a eu son effet maximal sur les peuplements dont le sol était le plus acide à 30 cm de profondeur (Louchbach, Grossmann). Il faut rappeler ici que les recherches microbiologiques ont mis en évidence l'existence d'une microflore fongique particulière, dite «délétère», qui s'oppose à la fois à une bonne alimentation minérale et à une bonne mycorhization; elle semble liée aux sols à forte teneur en aluminium échangeable, et cesse d'être opérante quand on a enrichi le sol en calcium (Estivalet, 1989; Estivalet *et al*, 1990; Devèvre, 1990).

Dans le phénomène de jaunissement, le magnésium a un rôle plus net. Le «jaunissement dans les montagnes acides» correspond exactement à la carence magnésienne (Parameswaran *et al*, 1985). Il a pu être jugulé par de simples fertilisations magnésiennes (Zech et Popp, 1983). En 1985/1986, l'intensité du jaunissement est bien mieux corrélée avec l'alimentation magnésienne qu'avec l'alimentation calcique (tableau IX).

Par ailleurs, une fertilisation calcomagnésienne, qui relève de manière significative la teneur en magnésium des aiguilles, surtout dans les peuplements les plus dépérissants tels que Louchbach, Grossmann ou Vologne (tableau VI), est un peu plus efficace sur le reverdissement

qu'une fertilisation seulement calcique (tableaux II et IV). En 1989/1990, la relation jaunissement-composition minérale des feuilles est cependant plus significative avec le calcium qu'avec le magnésium (tableau IX). Il faut sans doute voir ici à nouveau le rôle indirect du calcium.

Les essais de fertilisation rapportés ici ont mis en évidence le rôle de l'alimentation calcique et magnésienne dans le dépérissement sur sols de faible fertilité dans les Vosges. Pour passer à des opérations de fertilisation opérationnelles, compte tenu de leur prix élevé (1 800 à 2 600 F/ha), il faudrait savoir détecter les situations les plus préoccupantes. Il y a eu, depuis la crise de 1983/1985, une certaine amélioration, comme nous l'avons souligné plus haut. Il y a eu aussi amélioration des caractéristiques d'alimentation minérale. Il faut donc rechercher si cette alimentation minérale actuelle, en période de non-crise (au moins hors période de crise aiguë), peut donner des indications sur le risque, pour tel ou tel peuplement, de revenir, en cas de nouvelle crise climatique, à des niveaux préoccupants de défoliation ou de jaunissement. C'est pourquoi nous avons étudié les corrélations entre alimentation minérale en 1989 et défoliation ou jaunissement en 1986.

En ce qui concerne la défoliation, le niveau du calcium dans les aiguilles de l'année courante en 1989 et celui du magnésium dans les aiguilles de 4^e année semblent pouvoir être des indicateurs corrects (tableau IX, figs 3 et 4). La teneur en magnésium des aiguilles de 1^{re} année est un indicateur nettement moins bon, avec une corrélation significative à 10% seulement. Supposons qu'on veuille par exemple que, en période de crise, la défoliation d'un peuplement n'excède pas 20% en moyenne; celle-ci correspond, sur la base d'une corrélation qui existe, dans les essais décrits, entre défoliation moyenne et nombre d'arbres défoliés, à moins de

30% d'arbres ayant perdu plus de 25% de leurs aiguilles (moyennement et fortement endommagés suivant la terminologie française); il faudrait alors fertiliser les peuplements qui, en 1989, avaient moins de 0,47% de calcium dans leurs aiguilles de 1^{re} année (fig 3) et/ou moins de 0,07% de magnésium dans leurs aiguilles de 4^e année (fig 4). Cela correspond à une teneur en magnésium de moins de 0,14% dans les aiguilles de 1^{re} année si l'on se réfère à la courbe de la figure 4.

En ce qui concerne le jaunissement, il existe une corrélation significative entre la teneur en calcium des aiguilles de 1^{re} année en 1989 et le pourcentage d'arbres dont la note de jaunissement est supérieure à 1 en 1986 (tableau IX). Pour une proportion maximale souhaitée de 15% d'arbres de note supérieure à 1 en cas de crise, il faudrait, sur les mêmes bases que pour la défoliation, fertiliser les peup-

lements dont les aiguilles de 1^{re} année en 1989 contiennent moins de 0,47% de calcium (fig 5). Le manque de corrélation significative entre teneur des aiguilles de 1^{re} année ou de 4^e année en 1989 et jaunissement en 1986, rend difficile l'utilisation de la teneur en magnésium. Cependant, si l'on se base sur la corrélation entre jaunissement en 1986 et teneur en Mg des aiguilles de l'année en 1985 et sur la relation (bien qu'elle ne soit significative qu'à 10%) entre teneurs en magnésium en 1985 et en 1989, on aboutit à une valeur de 0,13% de Mg dans les aiguilles de l'année courante en période de non-crise.

Les teneurs-seuils en magnésium ainsi obtenues sont élevées, et remettent en question, à la hausse, les seuils d'insuffisance adoptés jusqu'ici, ou proposés récemment (Bonneau, 1992a). Ces seuils

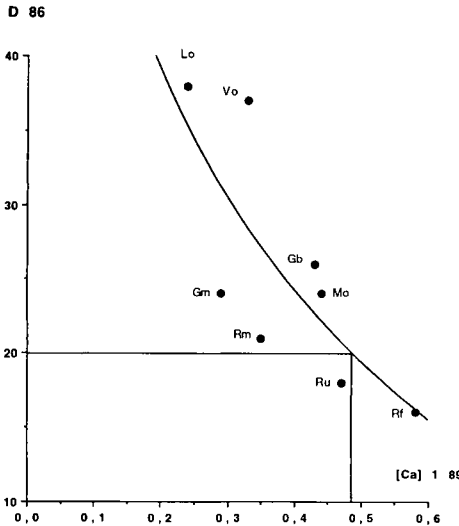


Fig 3. Pourcentage de défoliation en 1986, D86, en fonction de la teneur en calcium des aiguilles de 1^{re} année en 1989, [Ca]_{1,89}.

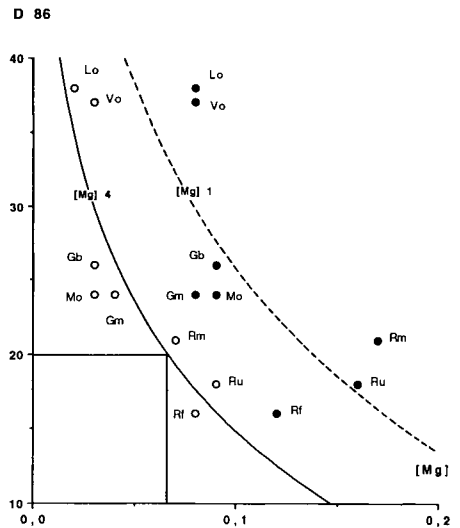


Fig 4. Pourcentage de défoliation en 1986, D86, en fonction de la teneur en magnésium des aiguilles de 1^{re} année en 1989, [Mg]_{1,89}, ou de la teneur en magnésium des aiguilles de 4^e année en 1989, [Mg]_{4,89}, en pourcentage de la matière sèche. ● [Mg]_{1,89}; ○ [Mg]_{4,89}.

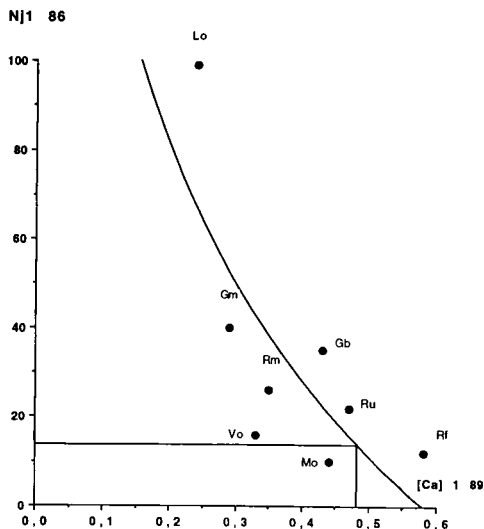


Fig 5. Pourcentage d'arbres de note de jaunissement égale ou supérieure à 1, en 1986, NJ,86, en fonction de la teneur en calcium des aiguilles de l'année courante en 1989, [Ca]₁89, en pourcentage de la matière sèche.

élevés sont compatibles avec les travaux des chercheurs allemands en Forêt Noire (Liu et Huettl, 1991) qui fixent le seuil de carence «dramatique» pour l'épicéa à 0,07% dans les aiguilles de 1^{re} année, mais qui montrent que des jaunissements sensibles peuvent exister jusqu'à 0,14%. Par ailleurs, Stefan (1991) estime que la teneur des aiguilles de l'année de l'épicéa est suffisante si elle est supérieure à 0,11%.

Notons *in fine* que les corrélations jaunissement ou défoliation avec les analyses de sol sont mauvaises dans nos essais, la moins mauvaise étant celle qui existe entre le taux de défoliation en 1986 et la teneur en aluminium échangeable en A₁ (significative à 15%) (elle donnerait un risque de défoliation moyenne supérieur à 20% pour une teneur en aluminium de plus de 20 meq/kg de sol).

Enfin, il est évident que le nombre des essais réalisés est insuffisant pour cher-

cher à différencier le sapin et l'épicéa et que, statistiquement, les données acquises concernent l'ensemble des 2 : il y a 6 essais sur le sapin, contre 2 pour l'épicéa, mais l'essai du Louchbach, sur épicéa, fortement dépérissant, «pèse» certainement lourd dans les corrélations établies.

CONCLUSION

Les essais de fertilisation mis en place dans les Vosges en 1985 et le suivi régulier dont ils ont fait l'objet fournissent plusieurs informations intéressantes, concernant la genèse et l'évolution du dépérissement sur les sols de fertilité moyenne ou faible de ce massif.

La crise forte de 1983-1985 avait probablement des causes climatiques : forte pluviométrie de printemps et sécheresse d'été. Cela est montré par un certain rétablissement spontané de la santé des peuplements, alors que la pollution acide n'a sans doute pas diminué de manière très significative. Ce rétablissement spontané s'accompagne d'une amélioration de l'alimentation calcique et magnésienne.

Le jaunissement et la défoliation sont assez bien corrélés au niveau d'alimentation calcique et magnésienne des aiguilles de 1^{re} année au moment de la crise, en 1985-1986, mais la corrélation avec l'alimentation magnésienne s'estompe progressivement lorsque l'on sort de la période de crise; il faut alors faire entrer en jeu la teneur en magnésium des aiguilles de 4^e année pour que cet élément conserve une valeur explicative; encore cette valeur est-elle faible. Au contraire, la corrélation entre défoliation ou jaunissement et niveau d'alimentation en calcium des aiguilles de 1^{re} année se maintient, et même s'améliore dans le cas du jaunissement, après la période de crise.

Une fertilisation calcique ou calco-magnésienne conforte le rétablissement de l'état de santé. Pour l'élaboration d'une nouvelle masse foliaire la fertilisation calcique paraît suffire alors que pour le reverdissement un apport calco-magnésien est un peu plus performant.

Les corrélations établies à partir des données recueillies dans ces essais permettent d'établir une prévision des risques de défoliation et de jaunissement en cas de nouvelle crise climatique à partir de la composition foliaire en dehors des périodes de crise. Le degré de signification relativement faible de ces corrélations donne aux seuils proposés de teneur en Ca et Mg des aiguilles une simple valeur indicative assez grossière qui peut cependant servir de guide pour choisir les peuplements à fertiliser. Au-dessous de 0,47% de calcium dans les aiguilles de 1^{re} année ou de 0,13% de magnésium dans les aiguilles de 1^{re} année, ou de 0,08% dans les aiguilles de 4^e année en période de non-crise, une fertilisation semble indispensable si l'on veut, en période de crise, ne pas dépasser 20% de défoliation moyenne ou 15% d'arbres présentant plus de 10% d'aiguilles jaunes.

L'intervention importante du calcium dans les corrélations établies est en bon accord avec l'hypothèse, émise par d'autres chercheurs, de l'intervention d'une microflore délétère favorisée par l'acidification des sols. Elle milite en tout cas pour que les mesures d'amélioration des sols vosgiens ne se limitent pas à l'apport de sels de magnésium, comme le suggèrent certaines équipes de recherche en Allemagne.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont pu être conduits grâce aux financements du ministère de l'Agriculture et de la Forêt et de la Direction Générale VI de la

commission des Communautés européennes, ainsi qu'à la participation active du personnel de l'Office national des forêts, et au dévouement de M Adrian, D Gelhaye et M Bitsch, techniciens du laboratoire «Sols et nutrition des arbres forestiers» du centre INRA de Nancy.

RÉFÉRENCES

- Aschan C, Dambrine E, Nourrisson G, Tabeaud M (1991) Dépôt d'éléments minéraux sur les écosystèmes naturels terrestres. Rapport scientifique au ministère de l'Environnement relatif aux résultats de l'exercice 1989-1991, INRA, centre de Nancy, 167 p
- Becker M (1987) Bilan de santé actuel et rétrospectif de sapin (*Abies alba* Mill) dans les Vosges. Étude écologique et dendrochronologique. *Ann Sci For* 44, 4, 379-402
- Bonneau M, Landmann G, Nys C (1991) Fertilization of declining conifer stands in the Vosges and in the French Ardennes. *Water, Air Soil Pollut* 54, 577-594
- Bonneau M, Fichter J (1991) Cartographie du dépérissement à partir de photographies aériennes sur un secteur des Hautes-Vosges, à partir des travaux de l'Institut géographique national. Rapport au ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 19 p
- Bonneau M, Landmann G, Adrian M (1992a) La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sols acide : essais dans les Vosges. *Rev For Fr* 44, 3, 207-223
- Bonneau M, Dambrine E, Aschan C (1992b) Apports de pollution et de nutriments aux peuplements forestiers par l'atmosphère : intensité et variations dans le massif vosgien. *Courr Cell Environ INRA* 16, 27-33
- Dambrine E, Ranger J, Pollier B, Bonneau M, Granier A, Carisey N, Lu P, Probst A, Viville D, Biron P, Garbaye J, Devevre O (1991a) Influence of various stresses on Ca and Mg nutrition of a Spruce stand developed on acidic soil. First European Symposium on Terrestrial Ecosystems: Forests and Woodlands. Florence, Italy, 20-24 May 1991 (A Teller, P Mathy, INR Joffers, eds) Elsevier Appl Sci 465-472
- Dambrine E, Le Goaster S, Ranger J (1991b) Croissance et nutrition minérale d'un peuple-

- ment d'épicéa en sol pauvre. II. Prélèvement racinaire et translocation d'éléments minéraux au cours de la croissance. *Acta Oecol* 12 (6), 791-808
- Devèvre O (1990) Mise en évidence expérimentale d'une microflore rhizosphérique délétère associée au dépérissement de l'épicéa en France et en Allemagne. DEA de biologie forestière, Université de Nancy I, 65 p
- Estivalet D (1989) Contribution à l'étude du dépérissement des forêts : mise en évidence du rôle de la microflore tellurique sur le jaunissement de l'épicéa commun (*Picea abies* Karst). Thèse de biologie et physiologie végétales de l'Université de Nancy I, 117 p
- Estivalet D, Perrin R, Le Tacon F, Bouchard D (1990) Microbial aspects of forest decline in the Vosges forest area (France). *For Ecol Manage* 37, 233-248
- Landmann G, Bonneau M, Adrian M (1987) Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ? *Rev For Fr* 39(1), 5-11
- Lebourgeois F (1991) Modifications observées à la suite d'une fertilisation dans diverses sapinières dépérissantes des Vosges. Étude phytocéologique et dendrochronologique. DEA en écologie générale et production végétale, Université d'Orsay (Paris XI), 65 p
- Levy G, Becker M (1987) Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. *Ann Sci For* 44, 4, 403-416
- Liu JC, Huettl RF (1991) Relations between damage symptoms and nutritional status of Norway spruce stands (*Picea abies* Karst) in Southwestern Germany. *Fert Res* 27, 922
- Mohamed AD, Ranger J, Dambrine E, Bonneau M, Gelhaye D, Granier A (1992) The effect of limestone and limestone plus NPK fertilization on the soil and mass balance of a spruce stand (*Picea abies* L Karst) in the Vosges mountains. *For Ecol Manage* (sous presse)
- Parameswaran N, Fink S, Liese W (1985) Feinstrukturelle Untersuchungen an Nadeln geschädigter Tannen und Fichten aus Waldschadengebiet im Schwarzwald. *Eur J For Pathol* 15, 168-182
- Target A, Kleinpeter J, Fiegel G, Perros P (1991) Climat de pollution gazeuse dans le massif vosgien. Journées de travail DEFOR-PA, 8-10 octobre 1991, INRA, centre de Nancy, 96 p
- Stefan K (1991) Das österreichische Bioindikatorenetz. Ergebnisse der Schwefel- und Nährelementuntersuchungen. *VDI Berichte* 901, 259-273
- Van Praag HJ, Weissen F, Delecour F, Ponette Q (1991) Aluminium effects on forest stands growing on acid soils in the Ardennes (Belgium). *Belg J Bot* 124 (2), 128-136
- Zech W, Popp E (1983) Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten und Tannensterben in NO-Bayern. *Forstwiss Centralbl* 102, 50-53
- Zöttl HW, Mies E (1983) Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen in Südschwarzwald unter Immissionseinfluss. *Mitt Dtsch Bodenkundl Gesellschaft* 38, 429-434