

Influence de la fertilisation sur la pérennité des aiguilles de jeunes *Pinus sylvestris* en plantation forestière

Ahmad Rahmani, Jean-Pierre Verger*,
Daniel Petit, Alban Laroche

Biologie cellulaire et valorisation des espèces ligneuses, faculté des sciences de Limoges,
87060 Limoges cedex, France.

(Reçu le 15 janvier 1997 ; révisé le 10 mars 1997 ; accepté le 23 septembre 1997)

Résumé – L'action favorable des fertilisants sur la croissance in situ de jeunes plants de *Pinus sylvestris* résulte d'un ensemble complexe de facteurs. Outre l'amélioration des conditions de la nutrition minérale qui conduit à une plus grande incorporation des éléments par la plante, les modifications de la pérennité des aiguilles constituent un facteur essentiel. En Haute-Corrèze sur rédoxisol très oligotrophe les apports en magnésium et en microéléments influent favorablement sur la pérennité des aiguilles et sur la croissance. (© Inra/Elsevier, Paris)

***Pinus sylvestris* / nutrition minérale / magnésium / microéléments / pérennité des aiguilles**

Abstract – Note about the effects of fertilization on senescence needles of *Pinus sylvestris*. The positive effect of fertilization on plant growth is related to improvement of soil nutrient availability and plant uptake. Dry weight of two years old needles was increased by fertilization (*table III*). Mean 2 years old needles dry weight for one tree was 0.39 g for control. This was multiplied by 1.4 for Ca, 2.4 for CaMg and NPKCaMg and 3.8 for complete treatment (including microelements). Mineral analysis of needles (*table IV*) indicated that Ca concentration was increased significantly in all fertilized plots. Mg and K contents were increased significantly in treatment with Mg supply. The Mn concentration was significantly decreased by fertilization. In Haute-Corrèze (France) a delay of the senescence period can have a positive effect on photosynthesis of young scots pine and consequently on growth and biomass rate. (© Inra/Elsevier, Paris)

***Pinus sylvestris* / mineral nutrition / magnesium / microelements / senescence needles**

* Correspondance et tirés à part
E-mail: lbcvel@unilim.fr

1. INTRODUCTION

La fertilisation en matière forestière constitue depuis longtemps un moyen efficace et important pour accroître la biomasse ligneuse [8, 33, 37]. D'autre part les conditions actuelles de fonctionnement des écosystèmes forestiers (pollutions, essences à croissance rapide) semblent rendre de plus en plus nécessaire l'utilisation d'une fertilisation correctrice [8, 33].

Parmi les phénomènes souvent observés il convient de noter les effets des carences magnésiennes dans le jaunissement des aiguilles [6, 7, 9, 19, 28, 29, 31], le jaunissement et la chute précoce des aiguilles [30] les modifications de l'ultra-structure [24, 38, 39].

Les actions bénéfiques de la fertilisation, que ce soit sur la croissance ou la lutte contre le dépérissement des peuplements forestiers (arrêt de la chute des feuilles et/ou reverdissement) [12, 50] focalisent l'attention des chercheurs au travers des phénomènes de compétition qui apparaissent dans les sols acides entre l'aluminium et les cations basiques [17, 20, 21, 42, 46–48].

En ce qui concerne le pin sylvestre, de nombreux auteurs ont récemment étudié ces effets :

- soit sur le système racinaire [18] ;
- soit sur le devenir des éléments dans le sol [35, 44] ;
- soit sur l'aspect nutrition minérale et croissance [2, 15, 22, 27].

Nos observations de terrain sur la croissance de jeunes plantations de pin sylvestre nous ont ainsi amené à rechercher et préciser l'influence de la nutrition minérale, et des carences, sur une possible modification de la pérennité des aiguilles des jeunes plants.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Le site d'étude

La plantation expérimentale est située au NW de la Corrèze (France) en bordure du plateau de Millevaches, à une altitude de 750 m. La topographie, régulière, forme un plateau faiblement incliné (< 5 %) au NW.

Le climat est de type océanique à tendance continentale [49]. Il présente une augmentation des pluies de fin de printemps et de début d'automne. La pluviométrie est forte pour la région (1 100 mm) et les conditions thermiques sont fraîches (8,4°).

La végétation initiale est constituée par une lande hygrophile à Molinie. Les plants, âgés de 1 an, sont mis en place au début de 1992. Ils sont répartis sur cinq placettes de 20 m × 20 m, à raison de 80 plants par placette. Les amendements (Ca, Mg) et fertilisants (N, P, K) sont apportés en surface, juste après la plantation. Celle-ci est réalisée sans autre travail du sol que le passage des disques pour la mise en place des plants. La nature des apports ainsi que les quantités qui déterminent la notation des placettes de *Pinus sylvestris* pour les analyses sont indiquées dans le *tableau I*. L'apport de calcium est constitué par des granulés de chaux vive agricole. L'amendement calco-magnésien est apporté sous forme de poudre, la fertilisation azotée sous forme de granulés d'ammonitrates. Celles en phosphore et potassium proviennent de phosphates naturels broyés et les oligoéléments de Lithothamnes broyés.

Le matériau de base du sol, allochtone, est représenté par des dépôts sablo-argileux de plateaux riches en blocs de quartz anguleux reposant sur des migmatites. La morphoscopie de ces formations, d'origine indéterminée et d'épaisseur variable, indique une provenance proche.

Le sol est du type luvisol-rédoxisol. Les données analytiques sont présentées dans le *tableau II*. L'horizon humifère (0 à -20 cm) est un hydromoder à structure en microagrégats friables parcouru en tous sens par le lacis racinaire de la Molinie. L'horizon Eg (-20 à -25 cm) est faiblement exprimé. La présence des horizons Sg, peu compactés, ne semble pas présenter un obstacle absolu à l'enracinement. Les mesures de perméabilité (K de l'ordre de 6 cm·h⁻¹ en Eg et

Tableau I. Caractéristiques qualitatives et quantitatives (kg.ha⁻¹) des traitements appliqués.

Nature	Traitements				
	O Témoin	A Ca	B CaMg	C Macro	D Complet
Chaux vive (94 % CaO)	–	1 000	–	–	–
Chaux magnésienne (42 %CaO + 10 % MgO)	–	–	1 000	1 000	1 000
Ammonitrates 16,75 % N Nitrique + 16,75 % N Ammoniacal	–	–	–	500	500
Phosphates naturels de P et K (18,5 % P ₂ O ₅ + 24 % K ₂ O)	–	–	–	500	500
Microéléments (Algues broyées) 46 % CaO, 5 % MgO, Fe, Mn, Cu, Co, Ni < 0,01 %)	–	–	–	–	50

Les quantités apportées sont exprimées en kg d'amendements/ha.

de 8,2 cm.h⁻¹ en Sg) indiquent un écoulement assez rapide et une perméabilité suffisante pour éviter un engorgement de longue durée préjudiciable aux plantations. Ce sol est également caractérisé par une très forte désaturation et une aluminisation élevée du complexe adsorbant. Le rapport C/N élevé en surface (C/N = 19), décroît nettement en profondeur (12 en Sg), ce qui est un caractère de brunification. Lors de la plantation, les racines des jeunes plants sont localisées au niveau de l'horizon A. Les caractéristiques générales limites des horizons humifères des placettes avant plantation traduisent l'oligotrophie et l'homogénéité des sols (tableau III).

2.2. Les méthodes de prélèvement

Les mesures sont réalisées sur des plants âgés de cinq ans.

Au-delà des variations individuelles, les observations de terrain montrent une densité de répartition des aiguilles du tronc différente selon les placettes. Comme il est impossible de récolter toutes les aiguilles sénescentes au pied de chacun des jeunes plants nous avons

quantifié les aiguilles restant sur le tronc. Quatre ans après la plantation, les aiguilles de quatre et trois ans sont toujours absentes. Les mesures portent donc sur les aiguilles de deuxième année, insérées sur le dernier entre-noeud du tronc (surface disponible d'insertion sur le tronc, poids des aiguilles restantes). Les prélèvements d'aiguilles s'effectuent fin mai, lorsque le développement des nouvelles aiguilles est terminé. Cette période marque le début d'une chute accélérée des aiguilles du dernier entre-noeud du tronc. La vitesse de cette chute est différente selon les traitements. Les estimations de surface sont réalisées à partir de cinq plants représentatifs de chacun des traitements. Les poids des aiguilles portent sur l'ensemble des aiguilles récoltées sur chacun des plants des placettes, au niveau du dernier entre-noeud.

2.4. Les analyses

Les concentrations en Ca, Mg, Mn, Fe et Cu sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique, Na et K par spectrométrie d'émission de flamme après attaque sul-

Tableau II. Analyses pédologiques du solum sous la plantation de *Pinus sylvestris*.

Horizon	Terre Fine %	pH H ₂ O	KCl	Matière organique				Terre Fine %			
				C %	N %	C/N	SG	Sf	LG	LF	A
A	86,5	4,70	4,51	2,63	0,138	18,8	35,3	19,2	7,5	13,5	21,5
Eg	91,0	4,70	4,42	1,35	0,081	16,7	42,3	16,4	5,5	11,5	17,6
Sg	83,6	4,78	4,30	0,60	0,048	12,5	23,7	20,6	8,5	13,5	32,0
Cg	87,6	4,63	4,50	–	–	–	28,1	24,7	4,5	12,5	26,5
	Bases échangeables (cmolc/kg)					A.e. (cmolc/kg)		Saturation au pH du sol		mg/kg	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn ²⁺	H ⁺	Al ³⁺	T	V %	Fe	Cu
A	0,02	0,22	0,63	0,07	0,06	0,2	3,2	4,34	21,7	24,20	5,90
Eg	0,04	0,07	0,20	0,17	0,06	0,2	2,3	3,35	23,6	32,00	5,40
Sg	0,05	0,04	0,18	0,20	0,05	0,2	2,1	2,82	16,7	36,00	5,00
Cg	0,03	0,03	0,18	0,16	0,04	0,2	2,2	2,84	14,1	36,00	–

Tableau III. Analyses pédologiques de l'horizon humifère de la parcelle *Pinus sylvestris* avant plantation (valeurs minimales et maximales obtenues par la prise en compte de cinq prélèvements par dispositif).

Données analytiques	pH H ₂ O	pH KCl	Bases échangeables (cmolc/kg)					mg/kg	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn ²⁺	Fe	Cu
Minimum	4,8	4,0	0,02	0,14	0,35	0,20	0,03	26,1	2,55
Maximum	5,1	4,2	0,08	0,22	0,40	0,20	0,13	37,7	2,95
	C %	Matière organique			A.e. (cmolc/kg)			T	V %
		N %	C/N	M.O. %	H ⁺	Al ³⁺	Ae	pH sol	pH sol
Minimum	3,25	0,20	17,1	6,50	0,20	2,55	2,75	3,49	20,34
Maximum	4,43	0,26	17,0	8,86	0,24	3,50	3,74	4,77	18,87

fonitique-eau oxygénée à chaud de 0,4 g de matériel séché et homogénéisé [26]. La concentration en P est mesurée par colorimétrie (minéralisation selon méthode Afnor 1980 et colorimétrie au phosphovanomolybdate à 430 nm) et celle de N par dosage au Kjeldhal.

La recherche de variations significatives dans la composition minérale des aiguilles est obtenue par utilisation du test de Tukey, (*Systat statistical package*).

Les données sont analysées au moyen d'une ACP normée (Analyse en Composantes Principales) avec le logiciel GTABM ver. 2.0. [40], afin de préciser les corrélations entre les facteurs et l'influence des amendements et/ou fertilisants.

3. RÉSULTATS

3.1. Discrimination des traitements

Les résultats concernant les différentes mesures correspondant à chaque traitement sont rappelées dans le *tableau IV*. L'ACP normée montre les relations suivantes entre les variables (*figures 1a et 1b*).

Les projections sur les axes 1 et 2 rendent compte de 92 % de la variance, l'essentiel des explications se trouvant exprimé sur l'axe F1 (80 % de la variance).

Les points représentatifs des dispositifs sont fortement dispersés.

L'axe 2 (12 % de la variance) permet la séparation de B (apport Ca-Mg) et surtout de D (apport Complet), par rapport aux autres points.

Les relations entre les variables morphologiques font ressortir deux groupes de données (tableau V).

Les points représentatifs du nombre d'aiguilles (nba), du poids frais (pdfr), de la surface (surf) et du poids sec (pdsc) sont très proches les uns des autres et nettement séparés du rapport poids sec/poids frais (scfr). On peut en déduire que la surface des entre-noeuds agit sur la quantité des aiguilles, donc sur les poids.

De façon analogue on trouve deux ensembles de variables analytiques corrélées négativement l'une par rapport à l'autre Na, Ca, Mg, K, N et P, proches les uns des autres, s'opposent à l'ensemble Mn, Fe et Cu.

Les traitements sont ordonnés selon l'axe F1 dans le sens « O » (Témoin), « A » (apport Ca), « C » (apport macro-éléments), « B » (apport CaMg) et « D » (apport complet). Les traitements « C » et « B » s'opposent au traitement « D » sur l'axe F2, bien que leurs projections sur l'axe F1 soient proches.

La position de « D » montre que les conditions édaphiques (composition du sol, pédoclimat) de ce point influent sur le poids sec, la surface, le poids frais et le nombre d'aiguilles, autant de caractères favorables à la croissance. « A » est quasiment équivalent au témoin et ne présente guère d'influence sur la croissance. Les deux stations « O » et « A » sont les plus riches en Mn, Fe et Cu. Le couple « C » et « B » présente des points communs en favorisant l'azote et le magnésium. C'est cependant pour « D » que la présence de P s'exprime davantage.

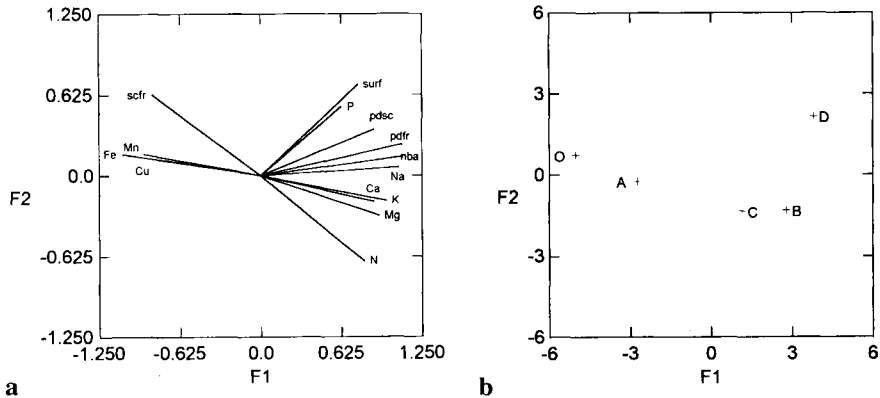


Figure 1. ACP des données analytiques.

a : Projection en mode vecteur des variables morphologiques et analytiques sur les deux premières axes factoriels. F1 exprime 80,57 % de la variance. F2 exprime 12,65 % de la variance. Signification des abréviations voir tableau IV.

b : Projection des points correspondant aux différents traitements. Les axes F1 et F2 sont les mêmes que ceux de la figure 1a.

Tableau IV. Données morphologiques et analytiques des aiguilles du dernier entre-nœud du tronc* de *Pinus sylvestris* et des aiguilles de l'année. Signification des abréviations surf = moyenne des surfaces du dernier entre-nœud du tronc (cinq arbres) ; pdfr = poids frais des aiguilles portées par le dernier entre-nœud du tronc ; pdsc = poids sec des aiguilles portées par le dernier entre-nœud du tronc ; scfr = rapport poids sec / poids frais ; nba = nombre d'aiguilles portées par le dernier entre-nœud du tronc. Dans chaque colonne, les valeurs associées à la même lettre ne diffèrent pas significativement (test de Tukey). Les tirets indiquent une absence de mesure.

	surf en cm	pdfr en g	pdsc en g	scfr	nba	Ca en g/kg	Mg en g/kg	K en g/kg	Na en g/kg	Mn en g/kg	Fe en g/kg	Cu en g/kg	P en g/kg	N en g/kg
2 ans														
O	51,21	71,16	39,00	0,55	19,30	2,80 d	0,31 b	2,87 c	0,06 a	0,9 a	0,13	0,024	0,70 b	11,90
A	57,80	98,68	53,82	0,54	21,80	3,10 c	0,31 b	3,00 c	0,07 a	0,73 b	0,14	0,022	0,70 b	13,58
B	64,40	181,82	95,38	0,52	35,30	4,13 a	0,50 a	3,16 a	0,08 a	0,47 d	0,08	0,019	0,76 ab	14,49
C	58,00	175,71	94,10	0,53	37,20	3,90 b	0,51 a	3,02 ab	0,07 a	0,51 c	0,09	0,018	0,70 b	14,21
D	83,00	273,90	148,78	0,54	48,10	4,10 a	0,50 a	3,13 ab	0,08 a	0,45 d	0,09	0,018	0,81 a	13,65
1 an	—	—	—	—	—	1,99	0,71	4,24	0,03	0,60	0,10	—	1,15	20,10

3.2. Les résultats des mesures

La prise en considérations du rapport entre les poids secs unitaires des aiguilles et le poids moyen par arbre pour chacun des traitements, permet d'estimer le nombre des aiguilles présentes sur les plants (*tableau IV*). Le nombre le plus faible d'aiguilles s'observe sur le témoin (moyenne de 19,3). L'apport de chaux vive seul ne modifie que peu cet aspect (21,8 aiguilles) et présente une efficacité limitée, ce qui confirme la proximité de O et A montrée par l'ACP. Un premier gain dans le nombre d'aiguilles est fourni par les apports CaMg d'abord, Macroéléments ensuite avec des chiffres très voisins (35,3 et 37,2). L'apport CaMg est très bénéfique. La pérennité des aiguilles est très sensiblement accrue. L'apport complémentaire (N et PK) favorise un peu plus cette pérennité (même poids sec que sur les dispositif CaMg mais pour une surface réduite, analogue à celle du dispositif Ca). L'incorporation des microéléments constitue un second palier qui élève une nouvelle fois largement le nombre des aiguilles (48,1) sur le dispositif complet.

Le *tableau V* montre la bonne corrélation surface/poids frais et poids sec mais aussi celle, très acceptable, entre la surface et le nombre d'aiguilles (coefficient de 0,872 au lieu de 0,878 au seuil de 5 %). Le calcium est bien corrélé aux poids frais, poids sec et nombre d'aiguilles alors que le magnésium est corrélé au seul nombre d'aiguilles. Enfin, parmi les microéléments, ce même nombre d'aiguilles est fortement (et négativement) corrélé au manganèse et au cuivre.

L'azote est corrélé à la qualité des aiguilles par l'intermédiaire du rapport poids sec/poids frais. Le phosphore est le seul élément minéral intervenant sur la surface d'insertion des aiguilles et sur le poids.

Le *tableau V* permet aussi d'apprécier les corrélations entre les éléments miné-

raux. Le calcium est corrélé à tous les éléments sauf l'azote et le phosphore, négativement avec Mn, Fe et Cu tout comme Mg pour ces seuls microéléments. Le potassium est corrélé au sodium et négativement au manganèse (comme Na pour ce dernier). Mn est bien corrélé aux fer et cuivre et négativement à l'azote. Enfin le fer n'est corrélé qu'au seul cuivre. Le phosphore n'est lié à aucun autre élément minéral.

Les analyses foliaires constituent un reflet important du bilan nutritionnel du végétal [23]. Par rapport à la composition minérale des aiguilles de l'année prélevée sur le Témoin (« O » - 1an) qui servira de référence (*tableau IV*), les aiguilles de 2 ans montrent logiquement un enrichissement en Ca et Na, de faibles variations pour le fer et un appauvrissement souvent très net pour les autres éléments (Mg, P et N). Le cas du Mn est à dissocier en raison de la variabilité du taux de cet élément qui n'apparaît pas liée à l'âge des aiguilles. Les analyses réalisées sur les aiguilles de deuxième année font ressortir plusieurs aspects.

– Une élévation conséquente et significative par rapport au témoin pour le calcium. L'effet de l'amendement calcaire est toujours positif mais l'apport calcique seul s'avère moins efficace. L'adjonction de magnésium au calcium (apport CaMg) est très positive pour le calcium en premier mais aussi pour le magnésium et pour le potassium même sans apport de cet élément.

– Une différence significative par rapport aux aiguilles des plants des traitements Témoin et Ca pour le magnésium et le potassium. Pour Mg, le seuil de déficience est estimé à $0,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [36] dans les aiguilles de l'année. Ce seuil est dépassé dans le Témoin. En revanche les phénomènes de redistribution affectent nettement les aiguilles de seconde année du tronc ($0,31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Cette valeur est particulièrement basse, surtout en ce qui

concerne de jeunes plants. La fertilisation corrige cette déficience et permet d'atteindre cette limite cruciale même dans les aiguilles de seconde année dans les trois autres cas. Les aiguilles des parcelles fertilisées (sauf avec Ca seul) contiennent davantage de potassium que le témoin mais le gain, bien que significatif, est beaucoup plus faible que pour un feuillu comme le hêtre [45]. Le potassium reste à des concentrations très basses alors que la réserve du sol permettrait une plus grande richesse.

– On note une quasi stabilité de la teneur en sodium (différences non significatives entre les plants).

– Les traitements Macroéléments et Complet sont assez inattendus quant à la seule composition minérale des aiguilles qui ne s'enrichissent pas en éléments minéraux. Dans ce dernier cas il convient de tenir compte de l'augmentation très importante de la biomasse qui entraîne un phénomène de dilution.

– Dans tous les cas, l'apport des divers amendements et fertilisants entraîne une diminution très significative des teneurs en manganèse par rapport au témoin mais aussi entre les dispositifs Ca d'une part, CaMg et Complet, Macroéléments d'autre part. Ces données confirment les observations de Toutain et al. [45]. Elles recourent également d'autres données expérimentales obtenues dans le laboratoire de biologie cellulaire et valorisation des espèces ligneuses de Limoges en milieu semi-contrôlé en serre sur de jeunes plants de châtaignier [32]. Il en est de même pour le cuivre dont les teneurs, assez analogues sous les apports CaMg, Macro et Complet, baissent de 20 % par rapport au Témoin et Ca.

4. DISCUSSION

La plus faible quantité d'aiguilles s'observe sur le témoin (moyenne de 19,3

aiguilles par arbre) et l'apport de chaux vive modifie peu cet aspect (21,8 aiguilles). Ce résultat illustre les faibles différences nutritionnelles des sols. Cet aspect confirme la proximité des points représentatifs des deux traitements, montrée par l'ACP.

Le potassium est à des concentrations insuffisantes. On mesure une baisse importante (30 %) de cet élément dans les aiguilles du tronc par rapport aux aiguilles du Témoin de l'année (*tableau IV*). Il apparaît donc, très tôt, un décalage minéral lié à une redistribution plus précoce des éléments minéraux des aiguilles de deux ans par rapport à celles de l'année en cours. L'abscission des aiguilles du tronc débute dès le milieu de leur seconde année d'existence et ce fait se traduit par une composition minérale appauvrie en potassium.

Le magnésium apparaît comme un élément déterminant de la durée de vie des aiguilles. Duchaufour et Bonneau ont depuis longtemps [16] mis en évidence le rôle de la richesse du sol en magnésium sur la concentration des aiguilles d'épicéa et de pin sylvestre en cet élément. Plusieurs auteurs ont récemment mis en évidence le rôle de la carence magnésienne dans la lutte contre le dépérissement des peuplements forestiers [14, 50], le jaunissement des aiguilles d'épicéa [31, 37] sur le plateau de Millevaches où l'amélioration de la densité du feuillage [12, 13, 41] dans les Vosges ou les Ardennes sur des peuplements d'épicéa ou de sapin. Dans notre expérimentation la quantité d'aiguilles (qui mesure en fait une plus grande longévité) est augmentée de 85 % par rapport au témoin, de plus de 60 % par rapport à l'apport calcium seul. Il paraît vraisemblable d'attribuer cette évolution au relèvement de façon durable de la concentration du magnésium foliaire. Cet enrichissement en magnésium par l'amendement rejoint aussi les observations réalisées sur épicéa par Weissen et

Tableau V. Corrélations entre les variables morphologiques et analytiques. Les valeurs des corrélations sont multipliées par mille. Elle sont calculées après transformation (centrage et réduction) des variables. Les valeur en gras sont significatives au seuil de 5 %.

	surf	pdfr	pdsc	scfr	nba	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	Cu	N	P
surf	-													
pdfr	928	-												
pdsc	935	999	-											
scfr	-177	-407	-376	-										
nba	872	991	989	-441	-									
Ca	711	894	878	-766	913	-								
Mg	607	853	837	-720	901	968	-							
K	761	819	804	-756	788	912	781	-						
Na	817	842	830	-681	801	887	744	994	-					
Mn	-727	-897	-883	754	-911	-988	-941	-920	-902	-				
Fe	-559	-797	-778	747	-842	-945	-976	-776	-730	889	-			
Cu	-637	-869	-856	727	-912	-973	-982	-813	-785	974	925	-		
N	394	584	563	-906	603	829	751	835	794	-873	-691	-826	-	
P	950	870	871	-229	810	701	596	773	816	-675	-617	-576	323	-

Nys [50]. L'apport Macroéléments seul est un peu plus efficace sur la pérennité que l'apport CaMg. L'adjonction à Ca et Mg de phosphore et d'azote pourraient en être responsable comme l'ont observé Bonneau et al [11] sur des peuplements adultes de pin maritime.

C'est dans le traitement complet que le nombre d'aiguilles augmente de nouveau très sensiblement. À cet égard le rôle des microéléments apparaît donc essentiel à côté de celui du magnésium. La comparaison avec le dispositif macroélément (qui ne diffère que par la présence des microéléments) montre une forte élévation (près de 30 % et trois fois plus par rapport au témoin) de la quantité des aiguilles de 2 ans présentes sur les troncs. En l'état actuel de nos mesures nous ne pouvons malheureusement pas attribuer cet effet à l'un plus qu'à l'autre de ces microéléments. Le cuivre notamment semble sans effet direct, à ce stade des mesures, en présentant des teneurs analogues sur les dispositifs CaMg, Macro et Complet ($0,018 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) mais moindre que les dispositifs Témoin et Ca ($0,022$ et $0,023 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Il ne faut cependant pas oublier que nous nous adressons à des aiguilles sénescents et que la redistribution des éléments mobiles (Mg notamment) vers le matériel jeune est importante [25]. D'autre part les oligoéléments pourraient cependant avoir un effet indirect et bénéfique sur la nutrition en autres éléments. Le rôle positif de l'azote sur le douglas [3, 34] mais aussi du phosphore et du potassium dans la persistance des aiguilles a été mis en évidence chez le pin maritime [10] et l'épicéa [5].

L'impact de la nutrition minérale sur la croissance de jeunes plants forestiers de *Pinus sylvestris* ne dépend pas seulement de mécanismes nutritionnels, d'un développement racinaire accru, des interactions entre les nutriments et de la composition du sol.

L'action positive des amendements et fertilisants sur la croissance résulte aussi d'un ensemble de facteurs complexes qui interagissent sur la physiologie des aiguilles et de l'arbre en général.

– L'incorporation plus forte et différenciée des cations dans les diverses parties de la plante et notamment des aiguilles ne peuvent qu'assurer un meilleur fonctionnement de ce compartiment du végétal.

– Ces améliorations font intervenir les macroéléments, notamment le magnésium, qui constitue un élément clé de la vie des aiguilles et de la photosynthèse. C'est un domaine que nous souhaitons aborder dans les années à venir. Ces améliorations font aussi appel, de façon importante, aux microéléments. Il reste à préciser la nature du(es) élément(s) concerné(s) et leur lieu d'action. Le cuivre et le fer, dont les teneurs sont plus élevées dans les aiguilles des dispositifs Témoin et Ca, ne semblent pas être directement impliqués pour prolonger la longévité des aiguilles du pin sylvestre.

En prolongeant la durée de vie des aiguilles – et donc en maintenant la photosynthèse – la plus grande pérennité du système foliaire de l'arbre favorise la production de biomasse et contribue à une meilleure croissance.

Comme chez le châtaignier [32] la réaction des aiguilles aux fertilisants s'accompagne d'une baisse du taux de manganèse foliaire. Cet élément, qui présente une variation d'un facteur 2 entre le Témoin et le Complet, pourrait être utilisé comme marqueur de l'action précoce de l'amendement d'une part et de l'intensité de cette action sur l'arbre d'autre part.

RÉFÉRENCES

- [1] NF V 18-106, Aliment des Animaux. Dosage du phosphore total. Méthode spectrophotométrique, Afnor, 1980.

- [2] Arnold G., Sweers I.L., Vandiest A., Response of a Scots pine (*Pinus sylvestris*) stand to application of phosphorus, potassium, magnesium and lime. 2. Soil solution composition, Neth. J. Agric. Sci. 41 (1993) 267-289.
- [3] Bonneau M., Déformation de jeunes douglas dans le Massif Central, Rev. For. Fr., 1 (1970) 44 p.
- [4] Bonneau M., Causes de déformations de jeunes douglas dans le Limousin. Ann. Sc. For. 28 (3) (1971) 341-353.
- [5] Bonneau M., Quelques résultats d'essai de fertilisation sur épicéa dans le Massif Central, Rev. For. Fr. 5 (1972) 354-363.
- [6] Bonneau M., Que sait-on maintenant des causes du dépérissement des forêts?, Rev. For. Fr. XVI (4) (1989) 367-385.
- [7] Bonneau M., Remèdes au dépérissement, in : Les recherches en France sur le dépérissement des forêts, programme DEFORPA 2^e rapport, Engref Nancy, 1991.
- [8] Bonneau M., Chaulage en forêt Justification et problèmes posés in : Forêt et Amendements calcaires, Inra-CRF Nancy (1993a) 17-24.
- [9] Bonneau M., Fertilisation sur résineux adultes (*Picea abies* Karst et *Abies alba* Mill) dans les Vosges composition foliaire en relation avec la défoliation et le jaunissement, Ann. Sci. For. 50 (1993b) 159-175.
- [10] Bonneau M., Gelpe J., Le Tacon F., À propos du dépérissement du pin portugais dans les Landes, Rev. For. Fr. 1 (5) (1993a) 343-350.
- [11] Bonneau M., Gelpe J., Illy G., Résultats d'essais de fertilisation de peuplements adultes de pin maritime, Rev. For. Fr. (6) (1973) 539-543.
- [12] Bonneau M., Landmann G., Adrian M., La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide, Rev. For. Fra. XLIV (3) (1992) 207-223.
- [13] Bonneau M., Landmann G., Ranger J., Dreyer E., Nys C., Fertilization of declining conifers in the Vosges and the Ardennes: effects on soil, nutrient cycling and tree health, growth and physiology, Springer -Verlag, 1995, pp. 300-326.
- [14] Bouvarel P., Le dépérissement des forêts attribué aux dépôts atmosphériques acides, Rev. For. Fr. 3 (1984) 173-180.
- [15] De Visser P.H.B., Van Breemen N., Effects of water and nutrient applications in a Scots pine stand to tree growth and nutrient cycling, Plant Soil 173 (1995) 299-310.
- [16] Duchaufour P., Bonneau M., Note sur la physiologie de la nutrition des résineux, Rev. For. Fr. 4 (1960) 250-256.
- [17] Ericsson T., Göransson A., Van Oene H., Gobran G., Interactions between aluminium, calcium and magnesium. Impacts on nutrition and growth of forest trees, Ecol. Bull. 44 (1995) 191-196.
- [18] Finn H., Braekke F.H., Response of under storey vegetation and Scots pine root systems to fertilization and multiple deficiency stress, Plant Soil 168-169 (1995) 179-185.
- [19] Garrec J.P., Effets de la pollution atmosphérique sur la partie aérienne in : Les recherches en France sur le dépérissement des forêts, programme Deforpa 2^e rapport, Engref Nancy 1991, 65-94.
- [20] Gobran G.R., Fenn L.B., Persson H., Al Windi I., Nutrition response of Norway spruce and willow to varying levels of calcium and aluminium, Fert. Res. 34 (1993) 181-189.
- [21] Godbold D., Fritz E., Huettermann A., Aluminium toxicity and forest decline, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 85 11 (1988) 3888-92.
- [22] Göransson A., Eldhuset T.D., Effects of aluminium on growth and nutrient uptake of small *Picea abies* and *Pinus sylvestris* plants, Trees 5 (1991) 136-142.
- [23] Guigou B., Thonnellier B., L'analyse foliaire une complémentarité avec l'analyse de sol, Cultivar, Dossier Oligo-éléments, 187 (1985) 66-67.
- [24] Hannick A.F., Waterkeyn L., Weissen F., Van Praag H.J., Vascular tissue anatomy of Norway spruce needles and twigs in relation to magnesium deficiency, Tree Physio, 13 (4) (1993) 337-349.
- [25] Helmissaari H.S., Temporal Variation in Nutrient Concentrations of *Pinus sylvestris* needles, Scand. J. Res. 5 (1990) 177-193.
- [26] Hoenig M., Vanderstappen R., Dosage de Cd, Cu, Pb, Zn et Mn dans les végétaux par spectrométrie d'absorption atomique en flamme. Effets de la minéralisation, Analysis 6 (1978) 312-316.
- [27] Holopainen T., Heinonen-Tanski H., Effects of different nitrogen sources on the growth of Scots pine seedlings and the ultrastructure and development of their mycorrhizae, Can. J. For. Res. 23 (1992) 362-372.
- [28] Huettl R.F., Mg deficiency - a 'new' phenomenon in declining forests - symptoms and effects, causes, recuperation, in: Huettl RF, Mueller-Dombois D. (Ed), Forest decline in the Atlantic and Pacific regions, Springer, Berlin 1993, pp. 97-114
- [29] Huettl R.F., Fink S., Diagnostic fertilization trials for revitalization of declining Norway spruce stands (*Picea abies* Karst) in southwest Germany, Forstwiss. Centralbl., 107 (3) (1988) 173-183.
- [30] Kandler O., Miller W., Dynamics of 'acute yellowing' in spruce connected with Mg defi-

- ciency, *Water Air Soil Pollut.* 54 (1991) 21–34.
- [31] Landmann G., Bonneau M., Bouhot-Delduc L., Fromard F., Chéret V., Dagnac J., Souchier B., Crown damage in Norway spruce and Silver fir relation to nutritional status and soil chemical characteristics in the french mountains, Springer-Verlag, 1995, pp. 41–81.
- [32] Laroche A., Freyssac V., Rahmani A., Verger J.P., Morvan H., Growth and mineral content of young chestnut trees under controlled conditions of nutrition, *Ann. Sci. For.* 54 (7) (1997) 681–696.
- [33] Laudelout H., La pratique du chaulage Historique et Philosophie in: Laudelout H., Bonneau M., Forêts et Amendements calcaires, Inra-CRF Nancy (1993) 5–16.
- [34] Le Tacon F., Observation sur la nutrition azotée des peuplements adultes en France, *Rev. For. Fr.* 1 (1970), 44.
- [35] Marschner B., Stahr K., Renger M., Lime effects on Pine forest floor leachate chemistry and element fluxes, *J. Env. Qual.*, 21 (1992) 410–419.
- [36] Martin-Prével P., Gagnard J., Gautier P., Analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales, Technique et documentation, Lavoisier, Paris, France (1984), pp. 525–546.
- [37] Nys C., Fertilisation, dépérissement et production de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans les Ardennes, *Rev. For. Fr.* 4 (1989) 336–347.
- [38] Palomäki V., Effects of magnesium deficiency on needle ultrastructure and growth of Scots pine seedlings, *Can. J. For. Res.* 25 (1995) 1806–1814.
- [39] Palomäki V., Raitio H., Chemical composition and ultrastructural changes in Scots pine needles in a forest decline area in southwestern Finland, *Trees* 9 (1995) 311–317.
- [40] Quris R., GTABM ver 2.0., gestionnaire de tableaux multiples. Station biologique de Paimpont, Université Rennes I (1994).
- [41] Ranger J., Mohamed Ahamed D., Gelhaye D. Effet d'un amendement calco-magnésien associé ou non à une fertilisation, sur le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) dépérissement dans les Vosges, *Ann. Sci. For.* 51 (1994) 455–475.
- [42] Rost-Siebert K., Aluminium-Toxizität und-Toleranz an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst) und Buche (*Fagus sylvatica* L.), *Allg. Forstz.* 38 (1983) 686–689.
- [43] Rost-Siebert K., Aluminium toxicity in seedlings of Norway spruce (*Picea abies* Karst) and beech (*Fagus sylvatica* L.), in: Anderson F., Kelly J.M. (Eds), Aluminium toxicity in trees, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden (1984), pp. 49–68.
- [44] Rehfuess K.E., Makeschin F., Rodenkirchen H., Results and experience from amelioration trials in Scots pine (*Pinus sylvestris*) forest of Northeastern Bavaria. *Fert. Res.* 27 (1991) 95–105.
- [45] Toutain F., Diagne A., Le Tacon F., Effets d'apports de calcium et de divers éléments majeurs sur le fonctionnement d'un écosystème forestier acide de l'est de la France. Forêts et Amendements calcaires, Inra-CRF Nancy (1993), pp. 35–48.
- [46] Ulrich B., Soil acidity and its relations to acid deposition. in: Ulrich B., Panchrath J. (Eds), Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. Reidel Publishing, Boston, 1983, pp. 127–146.
- [47] Van Praag H.J., Weissen F., Aluminium effects on spruce and beech seedlings. I. Preliminary observations on plant and soils, *Plant Soil* 83 (3) (1985a) 331–338.
- [48] Van Praag H.J., Weissen F., Aluminium effects on spruce and beech seedlings. II. Statistical analysis of sand culture experiments, *Plant Soil* 83 (3) (1985b) 339–356.
- [49] Vilks A., Analyse chorologique de la flore vasculaire du Limousin, Thèse, Université de Limoges, 1991, pp. 577.
- [50] Weissen F., Nys C., Rôle des amendements dans la lutte contre le dépérissement des peuplements forestiers. Forêts et Amendements calcaires, Inra-CRF Nancy (1993) 75–89.