

# Influence d'une fertilisation cuprique et phosphatée sur la croissance et la nutrition minérale du pin maritime (*Pinus pinaster* Soland in Ait) en sol sableux riche en matière organique

E Saur

INRA, station d'agronomie, centre de recherches de Bordeaux, BP 131, 33140 Pont-de-la-Maye, France

(Reçu le 17 mars 1989; accepté le 16 mai 1989)

**Résumé** — Des pins maritimes ont été cultivés pendant 200 jours en vases de végétation et en serre, sur du sol des Landes de Gascogne riche en matière organique, additionné de 6 doses de sulfate de cuivre croisées avec 2 doses de phosphate. L'apport des doses croissantes de cuivre n'a pas eu d'effet sur la production de biomasse, seule la forte dose de phosphate entraînant un gain de 7% sur la biomasse totale. Nous avons défini la répartition de 10 éléments chimiques dans les aiguilles, les racines et les tiges. L'absorption du phosphore est améliorée par les apports de phosphate, qui entraînent une baisse significative des teneurs en zinc du végétal ainsi qu'une augmentation du cuivre racinaire et des concentrations en cuivre soluble à l'eau du sol. L'apport de doses croissantes de sulfate de cuivre n'augmente pas la teneur en cet élément dans les parties aériennes mais accroît celles en cuivre et en bore des racines. Il y aurait donc une synergie entre absorption du cuivre et du bore.

**nutrition / oligo-élément / analyse foliaire / analyse de sol / *Pinus pinaster* / podzol / Landes de Gascogne**

**Summary** — Changes in dry matter yield and mineral nutrition of the maritime pine (*Pinus pinaster* Soland in Ait) as a result of copper and phosphate fertilization. Maritime pine was grown for 200 days on a typical Landes de Gascogne acid sandy soil, fertilized at 6 increasing copper sulfate levels linked with 2 phosphate levels. Dry weight yields were not significantly affected by the copper supply. The highest phosphate level increased dry weight yield by up to 107% of the control. Ten mineral elements (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu and B) were analyzed in the needles, roots, stems and soil. Of course, phosphorus uptake was enhanced in phosphate supplied treatments. Zinc content decreased as phosphorus increased. Copper and boron contents in roots were enhanced by increased copper supply but no higher translocation from roots to shoots was observed. A synergy between copper and boron uptake is probable and should be considered. Phosphorus enrichment of the soil increased the copper content of the roots; this phosphorus effect was related to an enhancement of soil water soluble copper resulting from P addition to the substrate.

**nutrition / micronutrient / foliar analysis / soil analysis / *Pinus pinaster* / podzol / The Landes of Gascony**

## INTRODUCTION

En sylviculture, les études sur la nutrition cuprique ont porté essentiellement sur les

corrections de carence dans les sols très pauvres et/ou riches en matière organique. Par exemple, Bonneau (1971) a montré l'efficacité de la fertilisation en

cuivre pour la suppression des déformations de jeunes conifères (*Pseudotsuga menziesii*) dans le Limousin; Lambert et Weindensaul (1972) ont défini les besoins en cuivre de semis de *Picea pungens*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies procera*, et *Pinus strobus* cultivés sur substrat de tourbe et vermiculite. D'autre part, une étude très complète sur la dynamique et la répartition des éléments minéraux dans des plantules de *Pinus radiata* (Lachica *et al.*, 1979) a permis de fixer les teneurs optimales en oligo-éléments pour cette espèce. Des travaux récents ont mis en évidence les problèmes d'alimentation cuprique du pin maritime dans les Landes de Gascogne avec, en particulier, un antagonisme entre la fertilisation phosphatée et le transfert de Cu vers les parties aériennes (Saur, à paraître a et b). Oldenkamp et Smilde (1966) avaient déjà montré une interaction entre la richesse du sol en phosphore soluble à l'eau et la nutrition en cuivre de *Pseudotsuga menziesii*.

Dans le cadre de l'étude de la nutrition en cuivre du pin maritime dans les sols très particuliers des Landes de Gascogne (sols sableux, quartzueux, originellement très pauvres en Cu et à forte capacité de rétention de cet élément), nous avons observé l'effet de doses croissantes de cuivre, en interaction avec le phosphore, sur la composition du sol, la production de biomasse et l'état nutritionnel de jeunes semis cultivés sous serre.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Le sol

Le sol utilisé a été prélevé dans l'horizon superficiel (0-20 cm) d'une station forestière de lande humide (domaine de l'Hermitage, Pierroton) de type podzol humique à Molinie. Après séchage à l'air et tamisage à 4 mm, le sol a été mélangé avec les engrais correspondant aux différents traitements.

### Protocole expérimental

Nous avons appliqué 6 doses de sulfate de cuivre correspondant à 0, 2, 4, 8, 16, 32 mg Cu/kg de terre (notées Cu0, Cu2, Cu4, Cu8, Cu16, Cu32), croisées avec 2 doses de superphosphate à 40% équivalent à 50 et 100 mg  $P_2O_5$ /kg (notées P50 et P100). Un apport de 50 mg  $K_2O$ /kg a été effectué sur l'ensemble des traitements. Chaque traitement a été répété 5 fois, dans des vases de végétation en matière plastique de 5 l contenant 4,5 kg de sol sec, dans lesquels ont été repiquées 3 plantules.

### Conduite de la culture expérimentale

Les graines ont été mises à germer le 21 mars 1988 dans de la tourbe blonde et maintenues en chambre climatisée avec 16 h de jour à 25°C; les plantules ont été repiquées le 18 avril 1988, dans les vases de végétation qui ont été placés en serre. Pour éviter la «fonte des semis», 2 traitements antifongiques (Karatane et Benlathe) ont été appliqués à 15 jours d'intervalle. Le sol a été maintenu à 60% de sa capacité de rétention en eau par arrosage automatique et la température de la serre régulée à 28°C maximum grâce à un système de «cooling». Les plants ont été récoltés 200 jours après le semis. Le système racinaire a été lavé plusieurs fois à l'eau bipermutée.

### Déterminations réalisées

#### Evaluation des biomasses

Les systèmes racinaires étant impossible à dissocier, les plants ont été récoltés par groupes de 3 individus issus de chaque vase. Racines, tiges et aiguilles ont été séchées séparément à 105°C puis pesées.

#### Caractérisation des sols

Les dosages chimiques et les mesures (pH, capacité d'échange cationique) ont été décrits dans Saur (1989). Le cuivre soluble à l'eau a été dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique (électrothermie au four graphite), l'extraction étant réalisée par agitation de 50 g de sol avec 100 ml d'eau distillée pendant 4 h,

puis centrifugation et filtration du surnageant à 0,45  $\mu\text{m}$ . Le pH a été mesuré dans les extraits aqueux et dans les sols à la fin de la culture.

### Composition des végétaux

Dix éléments ont été dosés dans les différents organes de la plante: K, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu au spectrophotomètre d'absorption atomique en flamme et N, P, B par les méthodes colorimétriques décrites dans Saur (1989). En raison de la pollution des racines par des particules de sable, les calculs tiennent compte du poids des grains de quartz retenus au cours de la filtration des minéralisats.

### Traitement des données

Chacun des résultats présentés est la moyenne de 5 déterminations. L'effet des traitements sur chacune des variables a été évalué par un test de comparaison de moyennes 2 à 2 utilisant la méthode du critère *t* de Student corrigée (méthode dite de Bonferroni). Le traitement statistique des données a été effectué à l'aide de la programmation d'Amance (Bachacou *et al*, 1981).

## RÉSULTATS

### Caractéristiques du sol utilisé

Les résultats d'analyses portés dans le tableau I font apparaître la nature essentiellement sableuse du sol utilisé. Schématiquement, ce sol est constitué par la juxtaposition de particules de quartz et de matière organique. Les teneurs en Zn, Cu et B y sont exceptionnellement basses et son caractère acide est très marqué (pH 3,9). Cela traduit sa pauvreté originelle en alcalins et alcalino-terreux et la présence d'une matière organique très acide.

### Production de biomasse

L'apport de doses croissantes de cuivre n'a eu aucun effet significatif sur la production de biomasse tant aérienne que racinaire (tableau II). Ce résultat traduit, d'une part, une très forte rétention du

Tableau I. Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé.

	Moyenne	Ecart type
Granulométrie (% de terre fine)		
– Argile .....	5,8	—
– Limon fin .....	1,6	—
– Limon grossier .....	0,9	—
– Sable fin .....	5,1	—
– Sable grossier .....	86,6	—
Matière organique .....	8,5	0,6
Capacité échange cations mEq/100 .....	6,2	1
pH-eau .....	3,9	0,2
Analyse chimique		
– N (Kjeldahl) ..... % MS	0,27	—
– P (Dyer) ..... ppm "	29	4
– K échange. acétate ammonium " "	54	6
– Ca " " " " " "	348	40
– Mg " " " " " "	71	2,5
– Mn total (eau régale) " "	10	0,7
– Fe " " " " " "	879	40
– Zn " " " " " "	8,6	0,4
– Cu " " " " " "	2,3	0,2
– B " " " " " "	1,2	—

**Tableau II.** Biomasse récoltée (g MS/plant).

Traitement P	Cu	Tiges	Aiguilles	Racines	Total
50	0	1,04	3,32	2,56	6,92
50	2	0,98	3,25	2,88	7,12
50	4	1,07	3,17	2,69	6,94
50	8	0,96	3,12	2,52	6,60
50	16	1,01	3,03	2,55	6,60
50	32	1,06	3,41	2,81	7,28
Moyenne		1,02	3,22	2,67	6,91
100	0	1,10	3,29	3,10	7,48
100	2	1,14	3,41	2,81	7,36
100	4	1,05	3,33	2,69	7,08
100	8	1,19	3,53	2,59	7,30
100	16	1,07	3,49	2,85	7,41
100	32	1,07	3,39	3,15	7,62
Moyenne		1,10	3,41	2,87	7,38

cuivre par le sol, qui s'explique par des phénomènes de complexation de cet élément avec la matière organique connus pour leur intensité (Barber, 1984) et, d'autre part, l'absence d'effet toxique ou stimulant du cuivre prélevé par le pin. En effet, la sensibilité des racines aux fortes doses de cuivre a été décrite chez de nombreuses espèces végétales, en particulier chez le pin maritime (Seillac, 1971), et nous aurions pu nous attendre à un effet toxique des plus fortes doses de sulfate de cuivre. De plus, l'observation des systèmes racinaires a montré une mycorrhization abondante quel que soit le traitement considéré et les champignons mycorrhiziens, très sensibles au cuivre, n'ont pas été affectés par les apports de sulfate de cuivre. Par rapport au traitement P50, la dose P100 apporte un gain significatif de 7% sur la biomasse totale.

#### **Nutrition minérale des semis**

#### **Teneurs en azote, potassium, calcium, magnésium, fer et manganèse**

Un certain nombre d'éléments minéraux ne présentent pas de variations de teneur

en fonction des différents traitements (tableau III). L'azote est bien transféré dans les parties aériennes, où il s'accumule dans les aiguilles aux dépens de la tige. K, Ca et Mg se répartissent de manière assez homogène dans les différents organes de la plante, tandis que le fer est très fortement retenu dans les racines où l'on note une teneur de 900 mg/kg; à l'inverse, le manganèse est largement transféré dans les parties aériennes et plus particulièrement dans les aiguilles où les teneurs atteignent 4 fois celles des racines. Les teneurs en Ca sont extrêmement basses par rapport à celles rencontrées habituellement dans les semis d'un an (0,2% Ca dans les aiguilles).

**Tableau III.** Teneurs moyennes en éléments minéraux dans le végétal.

Eléments		Aiguilles	Tiges	Racines
N %	MS	0,94	0,37	0,83
K "	"	0,63	0,68	0,54
Ca "	"	0,065	0,061	0,066
Mg "	"	0,15	0,15	0,12
Fe mg/kg	"	23	16	899
Mn "	"	224	163	52

**Tableau IV.** Teneurs en P et Zn. Dans une même ligne et pour un même élément, 2 valeurs suivies de la même lettre ne sont significativement différentes au seuil de 5%.

Traitement P:	P % MS		Zn mg/kg MS	
	50	100	50	100
Aiguilles .....	0,17a	0,35b	44b	37a
Racines .....	0,19a	0,38b	51b	44a
Tiges.....	0,21a	0,33b	82b	60a

### Teneurs en phosphore

Les concentrations en phosphore du végétal augmentent logiquement avec les apports de superphosphate au sol (tableau IV). Cette augmentation s'effectue surtout en faveur des parties aériennes et traduit un bon transfert de cet élément dans la plante. Dans cet essai, le phosphore est un facteur limitant de croissance, et l'augmentation des teneurs en phosphore dans le végétal est à mettre en relation avec le gain de biomasse.

### Teneurs en zinc

Le zinc est un élément assez bien transféré dans les organes aériens (tableau IV) et le test de Bonferroni nous indique que les concentrations en zinc dans les parties aériennes et racinaires baissent significativement avec l'augmentation de la dose de phosphate: P100 par rapport à P50. Cet antagonisme Zn-P a déjà été mis en évidence chez de nombreuses espèces végétales (Loue, 1986) et le pin maritime en particulier (Saur, à paraître a).

### Teneurs en cuivre

Il est remarquable de noter qu'à l'instar des biomasses, les teneurs en cuivre du système aérien ne varient pas avec les différents traitements Cu (tableau V); tout se passe comme si le pin était capable de

réguler, dans les conditions de cette expérience, sa teneur foliaire à 3,4 mg Cu/kg de moyenne. Le transfert du cuivre vers les parties aériennes serait lié au métabolisme général de la plante et plus particulièrement au métabolisme azoté (Loue, 1986) et ne dépend pas, dans les conditions de l'expérience, des concentrations racinaires en cet élément. Le cuivre serait fortement adsorbé sur les parois cellulaires de la racine (Turner, 1970) sans que cela entraîne une amélioration de l'absorption «sensu stricto» et du transfert

**Tableau V.** Teneurs en cuivre (mg/kg MS). Dans une même colonne, 2 valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Traitements	Cu		Aiguilles	Tiges	Racines
	P				
0	50		3,2a	3,6a	2,8a
	100		3,4a	3,4a	4,2b
2	50		3,2a	3,4a	5,3b
	100		3,1a	3,2a	6,4c
4	50		3,6a	3,5a	8,6d
	100		3,3a	3,5a	10,4e
8	50		3,4a	3,6a	10,9e
	100		3,2a	3,8a	13,4f
16	50		3,7a	3,4a	14,1f
	100		3,3a	3,8a	17,7g
32	50		3,8a	3,6a	21,1h
	100		3,5a	3,4a	31,3i

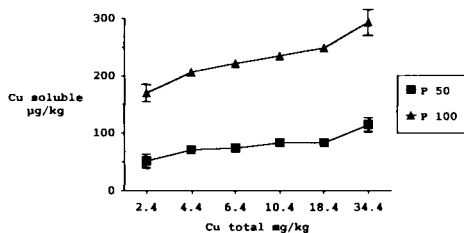


Fig. 1. Teneurs en cuivre soluble à l'eau du sol en fonction des teneurs en cuivre total pour 2 doses de phosphates apportées au sol. Les barres verticales indiquent 2 écarts types de la moyenne.

du métal vers les organes aériens. Ce même type d'observation a été effectué par Lastra *et al.* (1988) sur semis de *Pinus radiata* et Saur (à paraître, b) sur pin maritime. Comme on pouvait le prévoir, les teneurs en cuivre des racines sont positivement corrélées au seuil de 1% ( $r = 0,973$  pour P50;  $r = 0,992$  pour P100) avec les apports de sulfate de cuivre, mais le résultat le plus marquant est l'augmentation des concentrations en cuivre dans les racines pour la dose P100 de phosphate.

Nous avons cherché une méthode d'extraction du cuivre du sol pouvant refléter la biodisponibilité de cet élément. La spectrophotométrie d'absorption atomique par électrothermie au four graphite nous a permis de doser le cuivre soluble à l'eau dans les sols non séchés, prélevés au moment de la récolte de l'essai. Il apparaît de manière hautement significative que les teneurs en cuivre soluble sont supérieures pour les traitements P100 (fig. 1). Ce phénomène n'est pas lié à l'acidification du sol, dont les pH sont identiques avant et après la culture.

Ce résultat ne correspond pas à l'instauration d'un équilibre physicochimique rapide car il nous a été impossible de reproduire ce phénomène en faisant agir pendant quelques heures des solutions de phosphates sur le sol ayant servi à l'expérimentation. La solubilisation du cuivre par

les phosphates correspond donc à un phénomène progressif qui s'est révélé au cours des 200 jours de culture et qui fait probablement intervenir le végétal et ses exsudats ainsi que les micro-organismes du sol et de la rhizosphère. Une augmentation des teneurs en cuivre soluble à l'eau sous l'effet de la fertilisation phosphatée a déjà été mise en évidence par Bingham et Barber (1960) dans des sols acides de Californie du Sud.

La figure 2, qui représente les teneurs en cuivre des racines en fonction du cuivre soluble à l'eau, fait apparaître 2 droites de régression en fonction de la dose de phosphates ( $r = 0,967$  pour P50;  $r = 0,962$  pour P100,  $P = 1\%$ ). Ce dédoublement de la régression traduit le fait que, pour une même teneur du sol en cuivre soluble, les racines en contiennent beaucoup moins dans un sol plus fortement enrichi en phosphore; cela peut s'expliquer soit par un comportement différent du pin vis-à-vis du cuivre soluble en fonction de son alimentation phosphatée, soit par l'existence d'une fraction du cuivre soluble non utilisée par la plante et qui augmenterait avec l'apport de phosphate.

### Les teneurs en bore

Les teneurs en bore des parties aériennes ne sont pas affectées par les différents

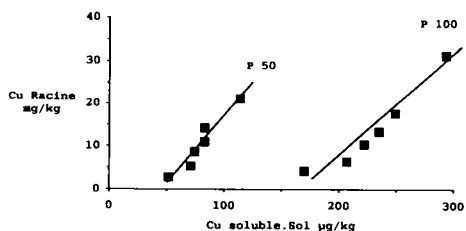


Fig. 2. Teneurs en cuivre des racines en fonction du cuivre soluble du sol pour 2 doses de phosphate apportées au sol.

traitements, elles sont en moyenne de 38 mg/kg dans les aiguilles et 15 mg/kg dans les tiges (tableau VI). La figure 3 met en évidence une corrélation positive entre les concentrations en bore et en cuivre des racines ( $r = 0,933$ ). Cette synergie B-Cu, limitée dans cette expérience aux racines, a été décrite par Adams et Winsor (1974) sur tomate pour des faibles teneurs en bore disponibles dans le sol.

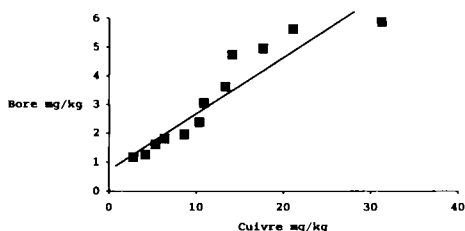
## CONCLUSION

Le résultat le plus remarquable de cette étude est l'importante capacité du sol de lande humide à complexer le cuivre et à le rendre peu disponible pour le végétal; des doses de 32 mg Cu/kg apportées au sol ne provoquent pas de symptômes de toxicité sur les racines (les teneurs n'atteignent que 30 mg Cu/kg MS) ou sur les champignons mycorhiziens, ni d'amélioration du transfert du cuivre vers les parties aériennes. Ceci peut s'expliquer par la richesse du sol en matière organique stable très complexante et par son pH très bas (3,9). L'effet de doses croissantes de sulfate de cuivre se résume en une augmentation modérée des teneurs en cuivre des racines et, corrélativement, une amélioration du prélèvement du bore par les racines. Ces observations ne laissent guère envisager la correction d'une éventuelle carence ou subcarence en cuivre (Saur, 1989) sur ce type de sol par apport de sulfate de cuivre. Cependant, cette constatation n'est pas une règle générale et il faut rappeler l'effet spectaculaire et rapide de l'apport de cuivre sur le Douglas dans le Limousin (Bonneau, 1971) ou le Morvan (Laffont, 1981) à des sols aussi riches en matière organique que ceux de notre expérience:

L'apport de phosphate au sol a provoqué une amélioration de la nutrition en phosphore, une augmentation de la bio-

**Tableau VI.** Teneurs en bore (mg/kg MS). Dans une même colonne, 2 valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Traitements		Aiguilles	Tiges	Racines
Cu	P			
0	50	35,5a	15,5a	1,17a
	100	37,3a	14,9a	1,25a
2	50	37,2a	14,9a	1,61b
	100	33,5a	15,1a	1,81c
4	50	38,5a	13,9a	1,95c
	100	41,0a	15,3a	2,38d
8	50	38,6a	13,8a	3,05e
	100	39,9a	15,0a	3,62f
16	50	42,5a	15,1a	4,74g
	100	41,4a	15,0a	4,96h
32	50	36,0a	15,3a	5,62i
	100	41,9a	14,3a	5,86j



**Fig. 3.** Corrélation entre le bore et le cuivre dans les racines.

masse produite, une baisse des teneurs en zinc ainsi qu'une élévation des concentrations racinaires en cuivre. Les interactions entre P et Cu constituent un exemple complexe d'effets contradictoires à différents niveaux. Les phosphates provoquent une solubilisation du cuivre contenu dans le sol, ce cuivre soluble est bien absorbé par les racines mais dans une moindre

mesure pour la forte dose de phosphate, traduisant ainsi une modification du processus physiologique d'absorption. En ce qui concerne le transfert dans les parties aériennes, il n'est pas amélioré par l'augmentation des teneurs racinaires et il est même notablement réduit par des apports importants de phosphates chez des pins maritimes jeunes ou adultes (Saur, à paraître a).

D'une manière générale, il semble bien que la nutrition en cuivre observée au niveau des parties aériennes dépende moins de la quantité de cuivre disponible ou accumulée dans les racines que du métabolisme général de la plante et, en particulier de son niveau de nutrition en phosphore. Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, il serait souhaitable de localiser au niveau subcellulaire le cuivre racinaire et de définir la fraction réellement disponible pour le végétal ainsi que la fraction immobilisée, définitivement ou non, dans l'apoplasme.

## REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes, grâce à leurs compétences respectives, ont fourni une aide précieuse pour ce travail. Je remercie particulièrement M. Juste C pour son appui scientifique, M. Gomez A, pour ses conseils en chimie analytique, MM. Barbot C, Bordessoulles G et Mounissens JC pour leur participation au suivi des essais en serre.

## RÉFÉRENCES

- Adams P, Winsor GW (1974) Some responses of glasshouse tomatoes to boron. *J Hort Sci*, 49, 355-363
- Bachacou J, Masson J, Millier C (1981) Manuel de la programmathèque Amance. Service Documentation INRA
- Barber SA (1984) Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. A. Wiley, Interscience Publication
- Bingham FT, Garber MJ (1960) Solubility and availability of micronutrient in relation to the phosphorus fertilization. *Soil Sci Soc Am Proc* 24, 209-213
- Bonneau M (1971) Causes de la déformation des jeunes Douglas dans le Limousin. *Ann Sci For* 28, 341-353
- Lachica M, Kosche R, Gonzalez C (1979) El *Pinus radiata* D. Don en Chile. Determinación de los índices nutritivos óptimos de las plantulas. *An Edafol Agrobiol* 38, 2142-2157
- Laffont H (1981) Déformation chez le Douglas: Problème des carences en cuivre et en zinc des peuplements du Morvan granitique. DEA Université Nancy-I
- Lambert DH, Weidensaul TC (1982) Copper requirement of container grown conifer seedlings. *Can J For Res* 12, 848-852
- Lastra O, Checa A, Lachica M, Lopez-Gorge J (1988) Root uptake and partition of Copper, Iron, Manganese and Zinc in *Pinus radiata* seedlings grown under different copper supplies. *J Plant Physiol* 132, 16-22
- Loue A (1986) *Les Oligo-éléments en agriculture*. Agro-Nathan
- Neuwiner I, Schinner F (1980) The influence of compound fertilizer and cupric sulfate on the growth and bio-element of *Cembra pine* seedlings. *Plant Soil* 57, 257-270
- Oldenkamp L, Smilde KW (1966) Copper deficiency in Douglas Fir. *Plant Soil* 25, 150-152
- Saur E (1989) Alimentation oligo-minérale du pin maritime (*Pinus pinaster Soland in Ait*) en relation avec quelques caractéristiques physico-chimiques des sols sableux des Landes de Gascogne. *Ann Sci For* 46
- Saur E (19 a) Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments (Cu, Mn, Zn, B) à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de *Pinus pinaster Soland in Ait*. *Agronomie (à paraître)*
- Saur E (19 b) Effect of phosphate fertilization on trace element nutrition of *Pinus pinaster* grown in a sandy soil. *International Symposium on Forest Tree Physiology, Nancy, Septembre 1988*, 25-30
- Turner RG (1970) The subcellular distribution of zinc and copper within the roots of metal tolerant clones of *Agrostis tenuis*. *New Phytol.* 69, 725-731