



HAL
open science

Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-elements (Cu, Mn, Zn, B) a trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de Pinus pinaster Soland in Ait. I. Croissance et nutrition en elements majeurs

Etienne Saur

► **To cite this version:**

Etienne Saur. Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-elements (Cu, Mn, Zn, B) a trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de Pinus pinaster Soland in Ait. I. Croissance et nutrition en elements majeurs. *Agronomie*, 1989, 9 (10), pp.931-940. hal-02728985

HAL Id: hal-02728985

<https://hal.inrae.fr/hal-02728985>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
INRA - DOCUMENTATION
17, Rue Sully - D.V. 1840
21034 DIJON CEDEX
Tél. 80.63.30.02

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
Physiologie végétale
STATION DE GÉNÉTIQUE
DE LA MANÉGEONNATION DES PLANTES
INRA B.V. 1840
21034 DIJON CEDEX

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.

I. Croissance et nutrition en éléments majeurs

E. Saur

INRA, station d'agronomie, BP 81, 33 883 Villenave d'Ornon Cedex, France

(reçu le 5 septembre 1988, accepté le 23 septembre 1989)

Résumé — Le but de cette étude est de mesurer la croissance en conditions contrôlées (vases de végétation sous serre) et la composition minérale de semis de *Pinus pinaster* Soland in Ait., après une saison de végétation sur trois types de sols acides sableux ayant reçu des apports de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments (Mn, Cu, Zn, B), en vue de mieux connaître la nutrition minérale de cette espèce. Les apports de carbonate de calcium entraînent dans le cas du sol le plus riche en matière organique un accroissement de biomasse totale qui atteint 32% dans le cas de la plus forte dose (8 000 kg CaO/ha); cet effet bénéfique est très vraisemblablement la résultante d'une stimulation de la minéralisation de la matière organique avec production massive d'azote minéral; dans ces conditions l'azote apparaît donc comme le principal facteur limitant. Le phosphore se comporte comme facteur limitant secondaire et peut s'avérer dépressif à forte dose.

phosphore – carbonate de calcium – oligo-éléments – pin maritime – nutrition minérale

Summary — Effect of phosphorus, calcium carbonate and trace element fertilization (Cu, Mn, Zn, B) on growth and nutrition of *Pinus pinaster* Soland in Ait. seedlings in 3 acid sandy soils. I. Growth and major element nutrition. 200 day-old pine seedlings were grown on 3 acid sandy soils in plastic pots under greenhouse conditions in order to investigate the mineral nutrition as a result of phosphorus, calcium carbonate and micro-nutrient fertilization. The 3 soils differed by their organic matter level. Dry weights, heights and mineral content (N, P, K, Ca, Mg) of seedlings were measured. Dry weight yield was enhanced significantly as rates of calcium carbonate fertilization increased (i.e. maxima 32% more than control for 8000 kg CaO/ha) on the most organic soil (Table III). This beneficial effect is likely to be due to inorganic nitrogen which resulted from the stimulation of organic matter mineralization. Calcium carbonate fertilization decreased P, Mg and K translocation from root to shoot (Tables IV & V) and increased nitrogen mobilization (Table V). Dry biomass yield increased as rates of phosphorus increased except for the highest rate (250 mg/kg P₂O₅) in the most organic soil (Table III). Generally, phosphorus acted as a secondary growth limiting factor and could decrease the growth when it was highly concentrated. Phosphate fertilization logically increased the phosphorus nutrition and also N, Mg, K mobilization (Table V); calcium absorption was enhanced but not its translocation.

phosphore – calcium carbonate – micronutrient – Pinus pinaster – mineral nutrition – N – K – Mg – foliar analysis – soil analysis

INTRODUCTION

Les recherches françaises concernant la fertilisation forestière n'ont commencé que vers les années 1956 et ont eu des répercussions rapides dans la sylviculture du massif landais. Les premiers essais de fertilisation à Mimizan montrent un effet spectaculaire des engrais phosphatés sur la croissance des semis (Guinaudeau *et al.*,

1963). Depuis, l'emploi des engrais phosphatés s'est généralisé dans le massif forestier; des scories ou des superphosphates sont enfouis en plein, par labour avant les semis, à des doses de 60 à 80 kg P₂O₅/ha (Bonneau, 1981). Mauge (1974) a montré que le labour en plein favorisait la colonisation rapide et totale du sol par les racines, contrairement aux apports en bandes pratiqués initialement.

Le regonflage, fumure phosphatée apportée dans les interlignes quand la plantation est âgée de 10 ans, est spectaculaire et rentable lorsqu'il n'y a pas eu d'apport initial d'engrais.

La fertilisation en N ou K donne des résultats très variables en fonction des stations et les effets sont parfois fugaces et d'un intérêt pratique négligeable (Mauge, 1987).

Si la fertilisation phosphatée est globalement rentable et pratiquée abondamment sur le massif landais, elle peut se montrer inefficace en lande très sèche ou en milieu dunaire (Illy, 1964). Ce même auteur montre un effet positif de l'azote sur la croissance en hauteur, mais ce dispositif unique met en évidence la carence en expérimentations dans ces milieux très pauvres et drainants.

Les essais de chaulage ont été peu nombreux et il semble que Duchaufour & Guinaudeau (1957) aient été les seuls à publier sur ce sujet pour le pin maritime landais.

Tous ces essais étaient principalement axés sur la croissance et la production de bois. Nous nous proposons dans cette étude d'appréhender les aspects qualitatifs et quantitatifs de la nutrition minérale sous l'influence de quelques facteurs édaphiques.

Pour répondre à notre objectif, nous avons choisi d'utiliser trois types de sol représentatifs des grandes formations pédologiques de l'aire d'extension sylvicole du pin de Gascogne : sol de lande humide, sol de lande sèche et sable dunaire. Chaque sol a subi huit traitements faisant intervenir des doses croissantes de phosphates, de carbonate de calcium et un mélange d'oligo-éléments.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sols

Ils sont issus de trois stations représentatives de la forêt de pin maritime des Landes de Gascogne :

- lande humide, Pierroton (33)
- lande sèche, Sore (40)
- sable dunaire, Le Porge (33)

Ces formations pédologiques ont été décrites en détail par ailleurs (Saur, 1989) sur des profils de 1,20 m de profondeur.

Protocole expérimental

Les 8 traitements suivants ont été appliqués :

- témoin;
- P₅₀ : 50 ppm P₂O₅ (superphosphate à 40%);
- P₁₀₀ : 100 ppm P₂O₅ ;
- P₂₅₀ : 250 ppm P₂O₅ ;

- P₂₅₀ + O : 250 ppm P₂O₅ + oligo-éléments (Cu, B, Zn, Mn);
- Ca.x : x kg CaO/ha + 50 ppm P₂O₅ ;
- Ca.y : y kg CaO/ha + 50 ppm P₂O₅ ;
- Ca.y + O : y kg CaO/ha + 50 ppm P₂O₅ + oligo-éléments (Cu, B, Zn, Mn).

La première dose de chaux (x) a été choisie pour permettre d'atteindre un pH égal à 5, correspondant à la valeur minimale compatible avec la réussite des grandes cultures céréalières (maïs) sur ces formations très particulières. La deuxième dose (y) l'a été de manière à se rapprocher le plus possible de la neutralité, et cela en vue d'augmenter les probabilités d'apparition de carences en la plupart des oligo-éléments. La détermination de ces doses a été réalisée au laboratoire, après incubation pendant 1 mois des échantillons de sols fertilisés, maintenus à 60% de leur capacité de rétention en eau.

Le carbonate de calcium est de type «rectifié rectapur», apporté en doses variables en fonction des sols et précisées dans le Tableau II. Le mélange d'oligo-éléments utilisé est le suivant :

- sulfate de cuivre : 25 kg/ha* = 2,1 ppm Cu;
- sulfate de zinc : 25 kg/ha* = 1,9 ppm Zn;
- sulfate de manganèse : 100 kg/ha* = 10,8 ppm Mn;
- borax : 25 kg/ha* = 0,9 ppm B;

(* l'hectare ramené à 3 000 t de sol)

Après séchage à l'air, tamisage à 4 mm et prélèvement d'une aliquote en vue d'analyse puis mélange intime avec les engrais correspondant aux différents traitements, les sols ont été introduits dans des vases en matière plastique qui ont été disposés dans une serre.

Chaque traitement a été répété 5 fois dans des vases de végétation de 5 L, où l'on a repiqué 3 plantules. Les trois sols utilisés ayant des densités très différentes, la masse de sol sec est variable pour chacun : 6 kg pour Le Porge, 5 pour Sore et 3,5 pour Pierroton.

Conduite de la culture expérimentale

Les graines ont été mises à germer le 15 mars 1987 dans de la tourbe blonde et maintenues avec 12 h de jour à 25 °C en chambre climatisée, puis repiquées définitivement en serre dans les vases de végétation le 6 avril 1987. Deux traitements antifongiques à base de Karatane et de Benlathe ont été appliqués à 15 jours d'intervalle pour éviter la fonte des semis.

Un arrosage automatique par capillaire permet de maintenir le sol à 60% de sa capacité de rétention en eau. La température de la serre est régulée pour une valeur maximale de 28 °C par un système de ventilation forcée.

Les plants ont été récoltés le 1^{er} octobre 1987, 200 j après le semis.

Déterminations réalisées

Déterminations réalisées sur les végétaux

Suivi de la croissance des plantules

Chaque plant de pin a été mesuré du collet au bourgeon apical, tous les 15 j du 25 avril au 28 septembre (soit 9 dates de mesures).

Evaluation des biomasses racinaires et aériennes récoltées

Les systèmes racinaires étant impossibles à dissocier les uns des autres, les plants ont été récoltés par groupes de 3 individus issus de chaque vase. Après extraction et plusieurs rinçages dans l'eau bipermutée, les racines ont été séparées de la partie aérienne par sectionnement au niveau du collet. Les échantillons ont été pesés après séchage à 105 °C.

Composition des végétaux

Les parties aériennes et racinaires ont été séchées à 105 °C puis broyées et tamisées à 20 mesh.

Les éléments K, Ca, Mg, ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique en flamme, après minéralisation de 1 g de poudre végétale par voie sèche et reprise chlorhydrique à chaud des cendres.

Les dosages de l'azote total et du phosphore ont été réalisés à l'aide d'une chaîne d'analyse en flux continu après minéralisation par voie humide en milieu sulfurique (250 mg d'échantillon + 5 mL H₂SO₄ concentré + K₂SO₄ + Cu SO₄ à 330 °C pendant 6 h). Le phosphore est dosé par colorimétrie du complexe phosphomolybdate. L'azote est dosé par la méthode Kjeldahl (colorimétrie au salicylate de sodium selon la réaction de Berthelot 1859 modifiée (Boltz, 1958)).

En raison de la pollution des racines par des particules de sable très fines non éliminées par les nombreux lavages à l'eau bipermutée, nous avons tenu compte, pour effectuer les calculs de concentration, des poids de matière minérale retenue au cours de la filtration des minéralisats.

Caractérisation des sols

Les 3 types de sol ont été caractérisés pour leurs propriétés initiales (pH, CEC, teneurs en bases échangeables et cations métalliques totaux, matière organique, granulométrie). On a mesuré en outre l'effet des différents apports de calcaire sur le pH des trois substrats.

– la capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée par la méthode Metson (Bonneau & Souchier, 1979).

– la teneur en matière organique des sols a été évaluée par la mesure de la perte de masse d'un échantillon de 10 g à 800 °C pendant 6 h (pertes au feu).

– les pH eau et pH KCl ont été mesurés sous agitation après 1 h de contact entre 20 g de sol sec et 50 mL d'eau ou de KCl N.

– le phosphore a été dosé par colorimétrie après extraction à l'acide citrique 2%.

– l'azote a été dosé selon la méthode Kjeldahl (minéralisation sulfurique + dosage colorimétrique).

– K, Ca et Mg échangeables ont été dosés par absorption atomique en flamme, après extraction à l'acétate d'ammonium en solution normale.

– Mn, Fe, Zn et Cu ont été dosés par absorption atomique en flamme, après attaque de 1 g de sol par 10 mL d'eau régale (7,5 mL HCl + 2,5 mL HNO₃) à ébullition pendant 2 h.

– L'aluminium total a été dosé par spectrophotométrie en émission plasma, après calcination à 450 °C et

attaque à l'acide fluorhydrique. La même technique a été utilisée pour le dosage de B, après extraction avec HCl N et élimination de Fe.

Toutes les déterminations ont fait l'objet de 5 répétitions, à l'exception de la CEC, de l'azote Kjeldahl et de la granulométrie qui ont été mesurés une seule fois.

Traitements des données

Les résultats présentés sont la moyenne de 5 mesures. L'effet des traitements sur chacune des variables a été testé par une comparaison de moyennes deux à deux, utilisant la méthode du critère *t* de Student corrigée (méthode dite de Bonferroni). Les traitements statistiques ont été conduits à l'aide de la programmation d'Amance (Bachacou *et al.*, 1981).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation des sols utilisés

Les résultats d'analyse reportés dans le Tableau I font apparaître la nature essentiellement sableuse des 3 sols utilisés, les quantités relativement importantes d'argile granulométrique étant constituées de fines particules de quartz. Ces sols sont très acides, les pH variant de 4 à 4,5 pour le sol le moins organique.

Les analyses chimiques permettent de classer les 3 sols en fonction de leur richesse en matière organique et en éléments fertilisants. Ainsi le sol de lande humide (Pierroton) est globalement beaucoup plus riche que le sol de lande sèche (Sore) et que le sable dunaire (Le Perge), essentiellement constitué de la roche mère (0,9% de matière organique). La capacité d'échange cationique (CEC) est positivement corrélée avec la teneur en matière organique. Ce tableau confirme par ailleurs la très faible teneur en éléments mineurs de ce type de formation sableuse et plus particulièrement le très bas niveau en cuivre.

Le Tableau II montre que la dose moyenne de chaux (*x*) a permis comme prévu d'atteindre pH 5 alors que la forte dose (*y*) conduit à des pH voisins de la neutralité, plus faibles cependant pour le sol riche en matière organique.

Croissance des semis

Le suivi de la croissance en hauteur des semis nous a permis de fixer la date de récolte (1^{er} octobre), à un moment où tous les individus ont fini leur phase de végétation active.

L'exemple de Pierroton (Fig. 1) est représentatif, toutes proportions gardées, des autres trai-

Tableau I. Caractéristiques physico-chimiques initiales des sols utilisés.

		Le Porge	Sore	Pierroton
CEC mEq/100 g M.S.		0,9	3,3	9,4
Matière organique % (perte au feu)		0,8	3,7	9,3
pH eau		4,5	4,1	4,0
pH KCl		3,6	3,1	3,2
N % _e	Kjeldhal	0,19	0,71	2,72
P ppm	acide citrique 2 %	1	7	28
K ppm		11	23	49
Ca ppm	Eléments échangeables	71	194	380
Mg ppm	acétate NH ₄	15	31	72
Mn ppm		10,2	8,7	10,8
Fe ppm	Eléments totaux	717	366	877
Zn ppm	eau régale	3	3,2	8,6
Cu ppm		0,8	1,0	2,4
Al ppm	total H.F.	5800	3800	4200
B ppm	total	0,2	0,5	1,2
Argile %		0,5	3,1	5,8
Limon fin %		0,0	1,3	1,6
Limon grossier %		0,0	0,7	0,9
Sable fin %		0,7	6,0	5,1
Sable grossier %		98,8	88,9	86,6

Tableau II. pH des sols selon les apports de carbonate de calcium.

Sols	Traitements	kg CaO/ha	pH
Le Porge	T P50-100-250	0	4,5
	Ca x	500	5
	Ca y	2 000	7
Sore	T P50-100-250	0	4
	Ca x	2 000	5
	Ca y	6 000	7
Pierroton	T P50-100-250	0	4
	Ca x	4 000	5
	Ca y	8 000	6

tements. Notons en particulier que les témoins présentent une phase de croissance maximale plus tardive (autour du 150^e j) que les autres traitements (autour du 100^e j) en relation possible avec un décalage dans la minéralisation de l'azote en l'absence de matières fertilisantes (chaux/phosphate).

Les tailles finales des semis (Fig. 1) permettent de séparer les traitements. On constate un

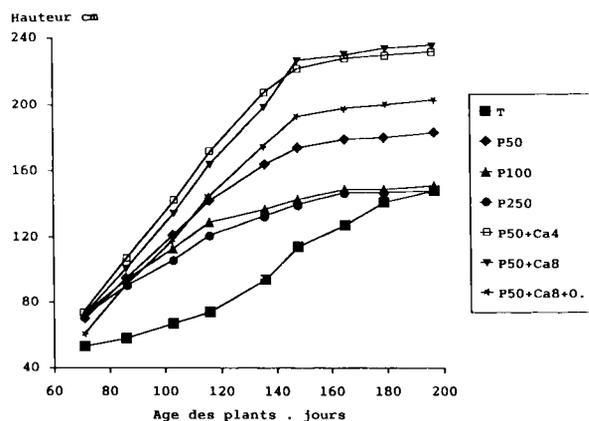


Fig. 1. Croissance en hauteur des semis en fonction du temps pour 7 traitements sur le sol de Pierroton (lande humide).

effet positif spectaculaire des fortes doses de chaux sur la croissance en hauteur. Le phosphore a une incidence favorable pour le traitement P₅₀ puis défavorable pour P₁₀₀ et P₂₅₀. Nous notons aussi l'effet dépressif du mélange d'oligo-éléments pour le traitement Ca₈₀₀₀ + O.

Production de biomasse

La mesure des biomasses sèches aériennes et racinaires nous donne des indications précises sur le développement des semis car il intègre à la fois : les effets sur la hauteur, sur le diamètre de la tige et sur le nombre de ramifications de la plante.

L'effet «sol» apparaît très nettement (Tableau III) et confirme le classement des sols tenant compte de la fertilité exprimée par l'analyse chimique. Les productions de biomasse totales sont en moyenne (tous traitements confondus, en g de matière sèche par plant) de : 8,7 pour Pierroton, 3,7 pour Sore et 2,4 pour Le Porge.

Les traitements «phosphore» ont un effet positif croissant avec la dose d'apport sur le développement des parties aériennes pour les sols de Sore et du Porge (au maximum x 1,5 et x 1,8 respectivement); l'effet sur les systèmes racinaires est positif pour la dose P₅₀ relativement au témoin, puis nul à la dose P₁₀₀ et devient négatif pour P₂₅₀ sur le sol du Porge.

En ce qui concerne le sol de Pierroton, le traitement P₅₀ entraîne un gain spectaculaire de

biomasse aérienne (x 1,7) mais surtout racinaire (x 3,6) par rapport au témoin alors que les biomasses obtenues avec les traitements P₁₀₀ et P₂₅₀ sont réduites par rapport à celles du P₅₀ bien que supérieures à celles du témoin. Dans cet essai, les fortes doses de phosphore ont un effet dépressif sur la croissance des semis.

L'apport du mélange d'oligo-éléments sur les doses P₂₅₀ est sans effet pour les traitements de Sore et de Pierroton, alors qu'il provoque une légère diminution de la production aérienne sur le sol du Porge (x 0,90).

Relativement à P₅₀, l'effet du carbonate de calcium est sans incidence sur la croissance du système racinaire, mais il se montre positif sur la production des parties aériennes, avec une intensité croissant avec la dose d'apport et la richesse du sol en matière organique (tout au moins pour la dose y la plus élevée); l'augmentation relative de matière sèche aérienne se situe alors au maximum à +39% pour Le Porge et 70% pour Pierroton.

Le résultat le plus notable de cette expérience est le développement exceptionnel (12 g MS totale/plant) des plantes sur le sol de Pierroton

Tableau III. Biomasses (g M.S./plant) pour chaque traitement.

Traitement	Biomasse aérienne	biomasse racinaire	biomasse totale
Le Porge T	0,92 a	1,11 ab	2,03 a
P50	1,01 ab	1,46 d	2,47 b
P100	1,11 bc	1,52 d	2,63 b
P250	1,64 e	0,93 a	2,57 b
P250+0	1,45 d	0,88 a	2,33 ab
P50 Ca0.5	10,9 bc	1,40 d	2,50 b
P50 Ca2	1,22 c	1,28 bd	2,50 b
P50 Ca2+0	1,13 bc	1,32 bd	2,45 b
Sore T	1,61 a	1,50 a	3,12 a
P50	1,69 a	1,75 a	3,44 ab
P100	2,07 b	1,67 a	3,74 bc
P250	2,36 c	1,63 a	3,99 bc
P250+0	2,37 c	1,56 a	3,93 bc
P50 Ca2	1,71 a	1,73 a	3,44 ab
P50 Ca6	2,34 bc	1,72 a	4,06 c
P50 Ca6+0	2,29 bc	1,87 a	4,17 c
Pierroton T	2,86 a	1,37 a	4,23 a
P50	4,47 d	4,75 e	9,22 de
P100	3,55 b	3,56 b	7,11 b
P250	3,71 bc	3,69 b	7,40 bc
P250+0	4,31 cd	4,00 bcd	8,30 cd
P50 Ca4	6,56 e	4,62 de	11,19 f
P50 Ca8	7,61 f	4,51 cde	12,12 f
P50 Ca8+0	6,26 e	3,82 bc	10,08 e

additionné de 8 000 kg CaO/ha et 50 ppm de P. Ce résultat vient à l'encontre d'une idée communément admise et déjà exposée en 1892 par Deherain qui avançait que «les Pins maritimes ne prospèrent que dans les sols exempts de chaux». Cependant Duchaufour & Guinaudeau (1957) avaient démontré pour les semis de cette espèce l'effet positif du chaulage sur des sols à humus brut des Landes de Gascogne à condition d'enfouir l'amendement et d'appliquer des «doses d'entretien». Ils conseillaient alors de choisir une dose de chaux permettant d'obtenir un pH voisin de 5,5, ce qui est complètement en accord avec nos observations à condition que le facteur limitant P ait été levé préalablement.

Dans le cas de ce traitement (Pierroton Ca₈₀₀₀), l'apport du mélange d'oligo-éléments exerce un effet dépressif inattendu sur la croissance des semis (-17%), alors qu'il est sans effet pour les autres sols, ce qui pourrait peut-être s'expliquer par un pH de 6 au lieu de 7 dans les autres sols et par une richesse initiale plus grande en oligo-éléments du sol de Pierroton.

Effet des traitements sur la nutrition minérale des semis

Les 5 éléments majeurs ont été dosés sur les parties racinaires et aériennes des semis. L'ensemble des résultats figure dans le Tableau IV. Le Tableau V présente les minéralomasses calculées à partir des teneurs et des biomasses des parties racinaires et aériennes.

Phosphore

Comparaison entre les sols

En ce qui concerne les témoins, la teneur la plus faible en phosphore pour les parties aériennes est celle obtenue pour le sol de Pierroton. Il s'agit très probablement d'un antagonisme NO₃⁻/H₂PO₄⁻ déjà décrit chez d'autres végétaux (Mengel & Kirkby; 1982). Kirkby & Knight (1977) ont décrit la stimulation du prélèvement de H₂PO₄⁻ par la diminution de la nutrition en nitrate chez la tomate. On peut aussi évoquer une com-

Tableau IV. Teneurs en éléments majeurs des parties aériennes (A) et racinaires (R) exprimées en % de la matière sèche.

	N (A)	N (R)	P (A)	P (R)	K (A)	K (R)	Ca (A)	Ca (R)	Mg (A)	Mg (R)
Le Porge										
T	0,87 d	0,67 ab	0,12 a	0,13 a	0,49 c	0,39 c	0,170 b	0,34 c	0,15 a	0,20 a
P50	0,77 bc	0,69 ab	0,82 d	0,30 b	0,64 d	0,34 bc	0,077 a	0,32 c	0,21 b	0,22 b
P100	0,83 cd	0,70 b	1,31 e	0,38 c	0,89 e	0,29 ab	0,099 a	0,24 b	0,30 c	0,22 b
P250	1,02 e	0,86 d	1,66 g	0,69 e	0,88 e	0,23 a	0,099 a	0,19 a	0,29 c	0,26 c
P250+0	1,02 e	0,78 c	1,44 f	0,59 d	0,83 e	0,29 ab	0,098 a	0,20 ab	0,24 b	0,26 c
P50 Ca0.5	0,74 b	0,63 a	0,66 c	0,31 b	0,38 b	0,24 a	0,158 b	0,49 d	0,22 b	0,18 a
P50 Ca2	0,66 a	0,71 b	0,30 b	0,32 b	0,18 a	0,27 ab	0,432 c	0,57 e	0,15 a	0,20 a
P50 Ca2+0	0,76 b	0,71 b	0,34 b	0,31 b	0,22 a	0,26 a	0,490 c	0,54 e	0,15 a	0,22 b
Sore										
T	0,90 de	0,67 a	0,22 a	0,21 a	0,64 b	0,48 d	0,079 a	0,24 c	0,13 a	0,20 b
P50	0,78 b	0,68 ab	1,21 d	0,33 b	0,95 c	0,40 c	0,082 a	0,19 b	0,23 bc	0,21 bc
P100	0,87 cd	0,70 ab	1,54 e	0,47 c	1,01 c	0,27 ab	0,076 a	0,19 b	0,25 c	0,22 bc d
P250	0,96 e	0,69 ab	1,77 f	0,67 d	1,03 c	0,31 ab	0,079 a	0,11 a	0,23 d	0,24 d
P250+0	0,92 de	0,70 ab	1,61 e	0,80 e	0,98 c	0,25 a	0,069 a	0,12 a	0,24 c	0,23 cd
P50 Ca2	0,80 bc	0,67 a	0,95 c	0,35 b	0,68 b	0,24 a	0,157 b	0,34 d	0,21 b	0,15 a
P50 Ca6	0,58 a	0,74 b	0,40 b	0,32 b	0,31 a	0,33 bc	0,281 d	0,47 e	0,16 a	0,16 a
P50 Ca6+0	0,60 a	0,73 ab	0,45 b	0,34 b	0,35 a	0,40 c	0,195 c	0,44 e	0,13 a	0,17 a
Pierroton										
T	1,59 d	1,41 d	0,09 a	0,10 a	0,29 e	0,20 b	0,089 c	0,13 b	0,15 bc	0,11 a
P50	1,18 b	1,11 c	0,17 ab	0,18 b	0,13 ab	0,18 ab	0,056 a	0,11 b	0,15 bc	0,16 c
P100	1,17 b	1,02 b	0,53 b	0,31 c	0,16 bc	0,15 a	0,062 ab	0,10 b	0,17 cd	0,22 d
P250	1,27 c	0,88 a	1,09 d	0,41 d	0,21 d	0,15 a	0,086 bc	0,07 a	0,27 e	0,16 c
P250+0	1,26 c	1,04 b	0,72 c	0,40 d	0,17 c	0,18 ab	0,066 abc	0,07 a	0,20 d	0,15 b
P50 Ca4	1,01 a	1,05 bc	0,14 a	0,19 b	0,10 a	0,17 ab	0,246 d	0,23 c	0,12 ab	0,12 ab
P50 Ca8	1,01 a	1,02 b	0,14 a	0,17 b	0,13 ab	0,14 a	0,331 e	0,36 d	0,10 a	0,16 c
P50 Ca8+0	0,95 a	0,98 b	0,11 a	0,17 b	0,13 ab	0,18 ab	0,314 e	0,39 d	0,10 a	0,17 c

Deux valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (test de Bonferroni).

Tableau V. Quantité d'éléments majeurs des parties aériennes (A) et racinaires (R) exprimées en mg/plant.

	N (A)	N (R)	P (A)	P (R)	K (A)	K (R)	Ca (A)	Ca (R)	Mg (A)	Mg (R)
Le Porge										
T	7,9	7,4	1,1	1,4	4,5	4,3	1,5	3,8	1,4	2,2
P50	7,8	10,0	8,3	4,4	6,5	4,9	0,7	4,7	2,1	3,1
P100	9,1	10,6	14,5	5,7	9,8	4,4	1,1	3,6	3,3	3,3
P250	16,7	8,0	27,3	6,4	14,4	2,1	1,6	1,8	4,7	2,4
P250+0	14,7	6,9	20,8	5,2	12,0	2,5	1,4	1,7	3,4	2,3
P50 Ca0.5	8,1	8,8	7,1	4,2	4,2	3,3	1,7	6,8	2,4	2,6
P50 Ca2	8,0	9,0	3,7	4,0	2,2	3,4	5,2	7,2	1,9	2,6
P50 Ca2+0	8,5	9,4	3,8	4,0	2,5	3,4	5,5	7,1	1,7	2,8
Sore										
T	14,5	10,0	3,6	3,1	10,2	7,2	1,2	3,5	2,0	3,0
P50	13,2	11,9	20,5	5,8	16,1	7,0	1,3	3,3	3,9	3,7
P100	18,0	11,7	31,9	7,7	20,8	4,5	1,5	3,1	5,2	3,7
P250	22,6	11,3	41,9	10,9	24,4	5,0	1,8	1,8	6,7	3,9
P250+0	21,7	10,9	38,2	12,4	23,1	3,8	1,6	1,8	5,6	3,5
P50 Ca2	13,6	11,5	16,2	6,0	11,6	4,1	2,6	5,9	3,5	2,6
P50 Ca6	13,6	12,8	9,3	5,5	7,2	5,7	6,5	8,1	3,1	2,7
P50 Ca6+0	13,8	13,6	10,2	6,3	8,0	7,6	4,4	8,4	3,0	3,1
Pierroton										
T	45,6	19,3	2,5	1,3	8,4	2,7	2,5	1,8	4,3	1,4
P50	52,3	52,9	7,6	8,7	6,0	8,9	2,5	5,2	6,9	7,6
P100	41,6	36,3	18,6	10,9	5,7	5,3	2,1	3,6	6,0	7,8
P250	47,1	32,6	40,3	15,3	7,9	5,6	3,1	2,6	10,0	5,9
P250+0	54,4	41,5	30,9	16,1	7,4	7,0	2,8	2,8	8,5	5,9
P50 Ca4	66,5	48,6	9,1	9,0	6,9	8,1	16,1	10,9	8,0	5,5
P50 Ca8	77,2	45,8	10,5	7,7	10,1	6,4	25,1	16,3	7,8	7,5
P50 Ca8+0	59,6	37,5	7,2	6,4	8,0	6,7	19,6	14,9	6,6	6,4

pétition éventuelle avec des micro-organismes dont le développement serait favorisé par la présence d'ions NH_4^+ en quantité supérieure.

Transfert dans les parties aériennes

En l'absence d'apport, il y a identité des concentrations entre parties aériennes et racinaires, alors que, dès la plus faible dose de phosphore, il y a transfert massif vers les parties aériennes, ce qui pourrait laisser supposer que dans les trois types de sol expérimentés les plantules se trouvent initialement dans un état de malnutrition accusée en cet élément. En terme de minéralomasse, ce phénomène est très net pour le sol du Porge et de Sore.

Effet du phosphore

L'apport de doses croissantes de phosphore se traduit par une augmentation rapide des teneurs, atténuée cependant dans les racines par rapport au système aérien. C'est ainsi que dans les traitements P_{250} , les semis de pin absorbent de 8 à 14 fois plus de phosphore que les témoins (dont 75% en moyenne dans les parties aériennes) et 5 fois plus que dans les traitements P_{50} , ce qui

montre l'aptitude de cette espèce à bien utiliser les ions H_2PO_4^- présents dans la solution de ces sols acides.

Effet du carbonate de calcium

Il provoque une chute brutale de la richesse en phosphore dans les feuilles, particulièrement à la dose d'apport la plus élevée et dans les sols moins tamponnés, alors que les teneurs racinaires ne sont pas affectées, ce qui pourrait signifier que l'apport de carbonate de calcium déprime le transfert du phosphore vers les parties aériennes relativement à la biomasse produite. Dans le sol de Pierroton, les teneurs – déjà très faibles – ne baissent pas significativement.

Aussi, compte tenu des effets sur la biomasse totale, l'absorption du phosphore par la plante entière diminue de 40% relativement à P_{50} dans les sols du Porge et Sore amenés à pH 7; mais elle n'augmente pas dans le sol de Pierroton à pH 6. Ces résultats pourraient être la conséquence de phénomènes physicochimiques et/ou physiologiques : d'une part, l'insolubilisation des phosphates solubles du sol sous forme de phosphates calciques consécutivement au relèvement

du pH à 7 par CaCO_3 diminuerait la concentration en ions phosphate de la solution du sol, ce qui ne se produirait pas à Pierroton en raison du pH final moindre et de la richesse de ce sol en matière organique; d'autre part le pin utiliserait peut-être moins bien les ions phosphates en présence de Ca^{2+} que de Al^{3+} .

Effet des oligo-éléments

Pour le traitement P_{250} , l'apport du mélange d'oligo-éléments abaisse significativement les teneurs en P des feuilles pour les 3 sols, en agissant donc également sur le transfert de cet élément et aussi la mobilisation du phosphore par les parties aériennes et la plante entière quelle que soit l'incidence des oligo-éléments sur la production végétale, en relation possible avec des processus physicochimiques dans le sol (précipitation de phosphates?).

Azote

Comparaison entre les sols

Le sol de Pierroton, qui donne les productions de matière sèche les plus élevées, fournit également les plus fortes teneurs en azote dans les végétaux récoltés et ainsi les exportations maximales en azote par les parties aériennes et racinaires. Ceci permet d'étayer l'hypothèse du rôle déterminant de cet élément sur la production de biomasse et de l'intensité des phénomènes d'interaction entre l'absorption de phosphate et celle de nitrate.

Transfert dans les parties aériennes

L'azote a tendance à s'accumuler dans les parties aériennes mais de façon beaucoup moins nette que le phosphore (57% en moyenne de l'azote mobilisé par la plante).

Effet du phosphore

Pour les trois sols, il y a une baisse marquée des teneurs en azote des feuilles pour la dose P_{50} puis une tendance à l'augmentation pour les doses P_{100} et P_{250} . L'antagonisme physiologique N/P se manifeste donc aux faibles doses (P_{50}) et de façon plus marquée à Pierroton où la production de nitrate est vraisemblablement beaucoup plus importante.

Mais en raison des augmentations plus ou moins importantes des productions aériennes et/ou racinaires consécutives à l'apport de phosphore, celui-ci conduit à un accroissement du prélèvement d'azote par la plante entière, pro-

gressant avec la dose appliquée pour Le Porge et Sore, mais maximal pour Pierroton dès la 1^{re} dose de P_{50} . La plante mobilise ainsi jusqu'à 1,6 fois plus d'azote qu'en l'absence de phosphore, et cela au profit des parties aériennes qui contiennent 60 à 70% de l'azote total absorbé.

La levée de la carence en P du sol assure donc une meilleure utilisation par la plante de l'azote minéralisé dans le sol en favorisant aussi vraisemblablement l'activité microbienne et par là la minéralisation de l'azote organique du sol.

Effet du carbonate de calcium

L'augmentation de pH, par apport de calcaire, n'a que peu d'influence (relativement à P_{50}) sur les teneurs en azote des parties aériennes sauf pour la plus forte dose d'application. L'azote absorbé par les parties aériennes et racinaires augmente pour le sol de Pierroton amené à pH 5. Dans ce sol riche en matière organique, il est vraisemblable que le relèvement du pH à ce niveau, en agissant sur l'intensité du développement de la population microbienne et la composition de celle-ci, et donc sur la quantité d'azote minéralisé et nitrifié, soit à l'origine d'une production aérienne et d'une mobilisation totale d'azote par les semis de pin, respectivement augmentée de 27 à 48% par rapport au témoin (P_{50}) pour des pH de 5 ($\text{P}_{50} \text{Ca}_4$) et de 6 ($\text{P}_{50} \text{Ca}_8$) (Tableau V).

Calcium

Comparaison entre les sols

Le sol du Porge (le plus pauvre en calcium échangeable : cf. Tableau I) produit les végétaux les plus riches en calcium, très vraisemblablement par mobilisation biologique de cet élément à partir de minéraux primaires peu altérés contenus dans le sable dunaire.

Transfert dans les parties aériennes

Le calcium élément retenu dans le système racinaire et en général dans les tissus conducteurs est peu transféré dans les parties aériennes (Le Porge, Sore). Ce faible transfert des racines vers les parties aériennes n'est pas vérifié pour Pierroton.

Effet du phosphore

Les doses croissantes de phosphore apportées au sol font baisser les teneurs en Ca dans les racines mais ont, à l'exception du Porge, assez peu d'effet sur le transfert de cet élément vers les parties aériennes.

Effet du carbonate de calcium

Comme on pouvait le prévoir, l'augmentation des teneurs en calcium dans les végétaux, aussi bien dans les racines que dans le système aérien, suit celle des apports de l'amendement; de même l'absorption en cet élément par la plante et son transfert vers les parties aériennes sont favorisés.

Cette observation a déjà été effectuée par Fliche & Grandeau (1873) sur des rameaux de Pin maritime provenant de sols contenant 0,05 et 3,25% de CaO dans la fraction fine. Les teneurs en CaO mesurées dans les feuilles étaient respectivement de 40 et 56% des cendres.

Magnésium

La nutrition en magnésium des semis de pin est significativement améliorée par l'apport de phosphore, principalement dans les parties aériennes, et déprimée par celui de carbonate de calcium, donc par l'augmentation du pH, relativement à P₅₀.

L'apport du mélange d'oligo-éléments pour les doses P₂₅₀ fait diminuer de manière très significative les teneurs en Mg des feuilles et les minéralomasses des parties aériennes.

Potassium

Comparaison entre les sols

Les valeurs les plus faibles se rencontrent dans les plants issus du sol de Pierroton, vraisemblablement en raison d'un antagonisme N-K : compétition K⁺/NH₄⁺ au niveau des sites de fixation du sol (Bartlett & Simpson, 1967; Mengel & Kirkby, 1982) ou au niveau de l'absorption par la plante et aussi d'une dilution plus grande dans une matière sèche plus importante.

Transfert dans les parties aériennes

Le potassium est bien transféré dans les parties aériennes du semis qui contiennent de 50 à 70% du potassium absorbé par la plante entière.

Effet du phosphore

A Sore et au Porge, il se traduit par une forte augmentation des teneurs des parties aériennes, une baisse des teneurs racinaires et une mobilisation du potassium du sol par les parties aériennes et la plante entière croissant avec la dose d'apport de P. Dans le cas de Pierroton, si l'apport de P a toujours tendance à abaisser la teneur en K des racines, il n'élève pas la concen-

tration en K des parties aériennes (dilution). L'apport de phosphore entraîne donc un profond bouleversement dans la nutrition potassique des plantules résultant notamment des antagonismes d'absorption ou de transfert phosphore/azote et azote/potassium.

Effet du carbonate de calcium

On note une diminution des teneurs en potassium des parties aériennes à la suite de l'apport de carbonate de calcium à Sore et au Porge; ceci peut être attribué vraisemblablement à un effet dépressif sur le transport du potassium.

CONCLUSION

Le résultat le plus notable de cette étude est indiscutablement l'effet bénéfique très spectaculaire de l'application d'une dose massive de chaux, élevant le pH au voisinage de la neutralité, sur la croissance et la production de biomasse du semis sur sol très riche en matière organique (Pierroton). Cet effet est à attribuer, si l'on se réfère à la composition de la plante (azote, phosphore et potassium) et à l'absence ou la moindre réaction au chaulage observée pour les autres sols (pauvres en matière organique), à une stimulation de la minéralisation de la matière organique. Dans ces conditions une nutrition azotée déficitaire sur sol dunaire (Le Porge) ou en lande sèche (Sore) apparaît comme le facteur limitant principal de la croissance des plantules de pin.

Le phosphore dont la réserve initiale se situe à un niveau très faible dans les 3 substrats expérimentaux apparaît comme un facteur limitant de deuxième ordre qui ne s'exprime totalement, notamment au niveau de la production racinaire, que lorsque la nutrition azotée se situe à un niveau convenable (sol de Pierroton); en revanche une fertilisation phosphatée excessive peut s'opposer à l'expression optimale de l'azote minéral présent dans le milieu.

REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes de la station d'agronomie (INRA Bordeaux) ont fourni, grâce à leurs compétences respectives, une aide précieuse à ce travail. Il convient donc de remercier particulièrement : M. Juste C. pour son appui scientifique; M. Gomez A. pour ses conseils en chimie analytique; MM. Barbot C., Bordessoules G., Mounissens J.C. pour leur participation à la réalisation technique des essais en serre.

RÉFÉRENCES

- Bachacou J., Masson J. & Millier C. (1981) *Manuel de la programmathèque Amance*. Service de documentation de l'INRA, INRA, Versailles
- Bartlett R.J. & Simpson T.J. (1967) Interaction of ammonium and potassium in a potassium fixing soil. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 31, 219-222
- Boltz D.F. (1958) *Colorimetric determination of non-metals*. Interscience Publisher, New York, 372 p
- Bonneau M. (1981) Fertilisation et production forestière en France en 1980. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 437-451
- Bonneau M. & Souchier B. (1979) *Pédologie. II. Constituants et propriétés du sol*. Masson, Paris, 480 p
- Dehéraïn P.P. (1892) *Traité de chimie agricole*. Librairie Agricole de la maison rustique
- Duchaufour P.H. & Guinaudeau J. (1957) Une expérience de chaulage sur humus brut. *Ann. Ec. Nat. Eaux For.* 15, 337-364
- Fliche P. & Grandeau L. (1873) De l'influence de la composition chimique du sol sur la végétation du Pin Maritime. *Ann. Chim. Phys.* 4^e série, 29, 383-414
- Guinaudeau J., Illy G., Maugé J.P. & Dumas F. (1963) Essais de fertilisation minérale sur Pin Maritime à Mimizan (Landes). *Ann. Ec. Nat. Eaux For.* 20, 3-71
- Illy G. (1964) Premiers résultats de la fertilisation azotée en forêt de dune. *Rev. For. Fr.* 10, 734-743
- Kirkby E.A. & Knight A.H. (1977) The influence of the level of nitrate nutrition on iron uptake and assimilation, organic acid accumulation and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiol.* 60, 349-353
- Maugé J.P. (1974) *Fertilisation Minérale et Développement Racinaire du Pin Maritime*. AFOCEL Rapport Annuel
- Maugé J.P. (1987) *Le Pin Maritime*. IDF, Paris, 192 p.
- Mengel K. & Kirkby E.A. (1982) *Principles of plant nutrition*. 3^e édition. International Potash Institute, Berne, 655 p.
- 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, 119-129