



**HAL**  
open science

## Effets de conditions de sol et de fertilisations phospho-calciques sur la croissance de l'orge à 1 100 m d'altitude, dans le Massif Central

Michel Lafarge, Christine Gault, François Le Blanc, Elie Albaret, Guy Bielicki, Renée Degoutte

### ► To cite this version:

Michel Lafarge, Christine Gault, François Le Blanc, Elie Albaret, Guy Bielicki, et al.. Effets de conditions de sol et de fertilisations phospho-calciques sur la croissance de l'orge à 1 100 m d'altitude, dans le Massif Central. *Agronomie*, 1985, 5 (4), pp.313-323. hal-00884764

**HAL Id: hal-00884764**

**<https://hal.science/hal-00884764v1>**

Submitted on 11 May 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.

# Effets de conditions de sol et de fertilisations phospho-calciques sur la croissance de l'orge à 1 100 m d'altitude, dans le Massif Central

Michel LAFARGE & Christine GAULT (\*\*)

avec la collaboration technique de François LE BLANC(\*), Elie ALBARET (\*), Guy BIELICKI & Renée DEGOUTTE

I.N.R.A., Station d'Agronomie, 12, avenue du Brézet, F 63039 Clermont-Ferrand

(\*) I.N.R.A., Domaine de Marcenat, La Borie, F 15330 Marcenat

(\*\*) Elève-Ingénieur I.S.A., F 60000 Beauvais

## RÉSUMÉ

On rencontre sur sols acides en montagne des cultures de céréales à faible rendement et comportant des épis tardillons, même dans des champs apparemment bien conduits. En orge, on peut en outre observer de graves hétérogénéités de végétation.

On a cultivé de l'orge de printemps (*Hordeum vulgare* L. ssp. *distichum*, cv. « Cytris ») sur un andosol du nord du Cantal, en 3 situations différentes — notamment par le pH des sols (5,0 ; 5,3 et 5,5) — d'un terrain de 5 ha. On a comparé aux témoins l'effet d'apports de phosphore, de chaux et secondairement de potasse, sous forme de superphosphate et de scories pour P, de scories et de CaO pour la chaux et de KCl pour K. Le traitement commun aux 3 conditions de sol apporte 720 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 250 kg/ha K<sub>2</sub>O et 2 700 kg/ha CaO, la fumure azotée (150 kg/ha N) étant en principe non limitante.

Sur le témoin du sol à pH 5,0, la végétation est très chétive et présente les symptômes d'une intoxication aluminique. Elle n'est pas dépourvue d'endomycorhizes à vésicules et arbuscules, mais celles-ci ne sont pas efficaces : au tout début de la montaison, les plantes ne disposent que du phosphore apporté par la semence.

L'apparition des tardillons ne constitue qu'un cas particulier de l'étalement de la montaison, qui compense sans doute une limitation initiale dont les facteurs restent à préciser. De ce fait, la réduction du nombre de tardillons par les scories potassiques n'est pas généralisable.

La production finale dépend des conditions de sol et du phosphore apporté : la fertilisation élimine les zones de mauvaise végétation observées à pH 5,0 et, en relativement bonnes conditions de sol (pH ≈ 5,5), elle permet de récolter 50 q/ha de grains.

**Mots clés additionnels :** *Hordeum vulgare* L. ssp. *distichum* ; tallage ; endomycorhizes V.A. ; sols acides ; andosols ; toxicité aluminique ; scories ; composition chimique de la plantule.

## SUMMARY

*Effects of soil conditions and phosphorus and calcium fertilization on the growth of barley at an altitude of 1 100 m in the Massif Central (France).*

On acid mountain soils low cereal yields with late ears can be found even in apparently well cultivated fields. As far as barley is concerned, we can also recognize very heterogeneous growth. Acid soils are by far the commonest in mountain areas. Spring barley (*Hordeum vulgare* L. ssp. *distichum*, cv. « Cytris ») was grown on an andosol in the north of the Cantal department. It was sown at three places within an area of 5 ha, each place differing from the others, in particular by its pH value (5.0, 5.3 and 5.5). The effect of phosphorus and lime supply in these places, and secondarily also potassium supply, was compared to control plots. There was one common treatment for the three soils consisting of 315 kg/ha of P, 210 kg/ha of K and 1 930 kg/ha of Ca, in the form of basic slag and potassium chloride. As a rule, nitrogen fertilization (150 kg/ha of N) is not a limiting factor to yield. On the control plots of the pH 5.0 soil, vegetation was very stunted and showed symptoms of aluminium toxicity. Though vesicular arbuscular mycorrhizas were present, these did not seem to be very efficient : at the very beginning of shooting, plants have available only the phosphorus supplied by the seed. Late ears proved to be only a particular case in the spacing out of shooting, which most probably compensates for some unexplained initial limitation. That is why the reduction in number of late ears by the effect of potassic slag could not be generalized. Final production depended on soil conditions and on phosphorus supply. Fertilization eliminated zones of bad growth ; under comparatively good soil conditions, yields of 5 t/ha of grain were possible with phosphorous supply.

**Additional key words :** *Hordeum vulgare* L., ssp. *distichum* ; tillering ; vesicular arbuscular mycorrhizas ; acid soils ; andosols ; aluminic toxicity ; basic slag ; chemical composition of the seedling.

## I. INTRODUCTION

Au-dessus de 700 m d'altitude dans le Massif Central, les champs de céréales mûrissent parfois mal et produisent souvent peu. Les agriculteurs en rendent responsable le climat montagnard. En réalité, dans la pratique agricole, les rendements sont essentiellement limités par les techniques culturales (LAFARGE, 1983 *a*). La mauvaise maturation consiste couramment en la présence d'épis verts mêlés aux épis qui mûrissent normalement ; ils peuvent compromettre la récolte ou la conservation des grains. Ces tardillons sont particulièrement abondants dans les peuplements initialement clairs ou hétérogènes et dans les cultures de printemps semées tardivement par rapport au réchauffement posthivernal (LAFARGE, 1983*b*), donc en mauvaises conditions techniques.

En cultures bien conduites, on peut cependant trouver des rendements médiocres, des tardillons et, surtout chez l'orge, des hétérogénéités de végétation parfois très fortes. Quand celles-ci apparaissent en zones étendues (végétation chétive sur plusieurs dizaines de m<sup>2</sup>), on constate souvent qu'elles se retrouvent aux mêmes endroits chaque année de culture d'orge et peuvent s'aggraver rapidement. Quand les cultures paraissent soignées, on pense en premier lieu à l'installation d'un agent pathogène se conservant dans le sol, mais l'examen des zones médiocres en début de végétation révèle très souvent des symptômes d'intoxication aluminique : plantes petites à feuilles étroites, jaunies, avec des gaines rougissantes, enracinement réduit montrant des racines épaisses à ramifications courtes. Le climat montagnard a créé des sols acides sur toutes les roches autres que calcaires, et l'orge est très sensible à l'intoxication aluminique (FOY & BROWN, 1964). L'acidification progressive d'un sol hétérogène pourrait aboutir à la situation observée.

Dans cet article, nous étudions les effets d'une amélioration du sol sur une culture d'orge en altitude, avec 2 objectifs :

— éliminer les défauts de végétation observés, tardillons et zones chétives,

— contribuer à l'estimation des potentialités céréalières sous climat de montagne.

Le chaulage est en principe suffisant (JUSTE, 1966) mais, dans certaines situations d'altitude, il n'a pas paru efficace. Nous avons choisi de travailler aussi haut que possible pour apprécier quelle marge de progrès les conditions climatiques les plus difficiles laissent au cultivateur. De ce fait, nous allions nous trouver sur des sols d'origine volcanique à pouvoir fixateur pour le phosphore très élevé (GACHON, 1966) ; dans ce cas, certains auteurs préconisent des apports massifs de phosphore (YOUNGE & PLUCKNETT, 1966).

Dans des champs qui ont porté naguère des cultures d'aspect régulier, l'apparition et l'aggravation rapide des zones de végétation chétive ne paraît pas pouvoir procéder simplement d'effets directs de l'acidité. On a soupçonné la disparition par place des endomycorhizes à vésicules et arbuscules qui infestent normalement les racines de l'orge et améliorent son alimentation en phosphore (JAKOBSEN, 1983). Ces champignons sont répandus dans la majorité des sols, sous forme d'espèces et de races adaptées aux conditions du milieu (LAMBERT *et al.*, 1980), mais ils sont sensibles au pH (GREEN *et al.*, 1976). On peut imaginer qu'une faible

différence locale d'acidité puisse se traduire par d'importantes différences de végétation si elle empêche la mycorrhization normale de l'orge.

## II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. Le site d'étude choisi et son passé cultural

Le domaine INRA de Marcenat, dans le nord du Cantal, a mis en culture, au milieu des années 60, une vingtaine d'ha d'estives situées à Landeyrat entre 1 100 et 1 150 m, pour pouvoir disposer en permanence d'une douzaine d'ha de prairies temporaires de graminées nécessaires à une expérimentation de pâturage (JEANNIN *et al.*, 1984). Chacun des 8 champs créés dans ce but a été chaulé au calcaire broyé lors de la défriche de la vieille prairie, puis a supporté une rotation faisant succéder 3 ans de cultures annuelles à 5 ans de prairie temporaire. Deux des 3 années de culture sont consacrées à l'orge de printemps. Pour des semis effectués dès la sortie de l'hiver, la récolte survient habituellement en 2<sup>e</sup> quinzaine de septembre ; on se trouve donc à une altitude limite pour une culture récoltée à la moissonneuse batteuse. Chaque champ reçoit périodiquement du fumier. Chaque année, l'apport d'ammonitrate est de 100 à 140 kg/ha N, y compris sur prairie temporaire. Le phosphore est apporté le plus souvent sous forme d'hyperphosphate potassique. Ce système de culture est représentatif de ce qu'un élevage intensif de la montagne auvergnate peut pratiquer sur ses terres labourables.

Dans les orges, on observe couramment des tardillons. En 1980, le retour en orge de 2 champs contigus, l'un présentant des hétérogénéités de végétation, graves depuis 1978, l'autre, chaulé sur la moitié de sa surface en 1979, portant des cultures d'aspect homogène, nous a offert l'opportunité d'une étude sur l'origine des hétérogénéités et l'influence de certains éléments fertilisants sur celles-ci.

### B. Le dispositif expérimental

Le sol du site d'étude, développé sur basalte, est un andosol assez typique (HETIER, 1971), sans hydromorphie et profond (toujours plus de 80 cm aux endroits d'essai).

Dans le champ présentant des hétérogénéités de végétation, on a choisi 2 situations bien tranchées :

— des zones, appelées « A », où la végétation est très médiocre chaque année,

— une large zone, appelée « B », topographiquement comparable aux précédentes, où la végétation présentait jusque-là, tous les ans, un aspect normal. Aucun microrelief ne distingue les zones de mauvaise végétation de leur environnement ; aussi, pour pouvoir y installer les parcelles expérimentales, nous avons piqueté leur périmètre à l'automne, avant le labour d'hiver.

Le champ voisin, portant chaque année une végétation d'aspect homogène, constitue une 3<sup>e</sup> situation, appelée « C ».

Les sols et sous-sols prélevés dans chacune des 3 situations à fin d'analyse présentent les caractéristi-

TABLEAU 1

Caractéristiques chimiques des sols des témoins dans les situations « A », « B » et « C ».  
 Chemical characteristics of the control plot soils in the « A », « B » and « C » situations.

Profondeur (cm)	Zone	Matière organique %	C/N	C.E.C. meq %	% de saturation de la C.E.C.	PH (eau)	Aluminium échangeable meq %	Phosphore (GACHON 1969)			Cations échangeables (meq %)		
								Pouvoir fixateur ppm	Valeur E ppm	Indice I E	K	Ca	Mg
0-30	A	15,2	10,0	30,2	13	5,0	2,0	1 460	243	35	0,46	3,2	0,33
	B	13,5	9,8	31,5	26	5,3	0,7	1 200	298	59	0,79	6,7	0,68
	C	14,3	11,0	30,8	31	5,5	0,6	1 260	247	41	0,67	7,8	0,90
30-60	A	9,7	10,4	24,3	18	5,2	1,0	1 720	256	33	0,83	3,1	0,37
	B	8,8	10,5	25,0	22	5,4	0,8	1 360	204	27	0,77	4,2	0,58
	C	9,4	11,0	25,7	26	5,5	0,6	1 560	257	36	0,41	5,5	0,79

ques chimiques des andosols (cf. tabl. 1) : importante teneur en matière organique, notamment en profondeur, acidité élevée, forte capacité d'échange faiblement saturée et pouvoir fixateur pour le phosphore très élevé. Les rapports C/N, normaux pour de tels sols cultivés (# 10), et les teneurs en K échangeable assez satisfaisantes, ne différencient pas les sols des 3 situations, mais les pH, les teneurs en Al, Ca et Mg échangeables et les pourcentages de saturation de la CEC les distinguent nettement les uns des autres. Les conditions de sol en A apparaissent plus défavorables qu'en B et C, avec une acidité plus élevée (pH eau = 5,0) — les écarts de pH étant cependant assez faibles — une teneur particulièrement importante et certainement toxique en Al échangeable (2,0 meq p. 100), et une plus grande désaturation de la capacité d'échange (13 p. 100) en liaison avec la plus basse teneur en Ca échangeable et la pauvreté en Mg échangeable. Mais B et C sont encore pauvres en Ca et B présente une teneur en Al échangeable à la limite de la toxicité. La disponibilité du phosphore, mesurée par l'indice I E de GACHON (1966), ne suit pas les variations d'acidité et n'est à peu près satisfaisante que dans l'horizon supérieur de B.

Dans chacune des situations A, B, C, correspondant donc à des conditions chimiques de sol différentes, on a mis en place, en 3 répétitions, certains traitements phosphatés, calciques et/ou potassiques (tabl. 2). On n'a pas pu étudier séparément l'effet de CaO et de P en A car la place manquait et il nous semblait nécessaire, dans le cadre de l'hypothèse de défaut de mycorhization, de tester l'influence d'une suppression du traitement fongicide des semences habituellement pratiqué par le domaine. B, dans le même champ que A, supporte les mêmes traitements. En C par contre, on a effectué des apports séparés ou combinés de CaO et de P. Les quantités d'éléments minéraux apportés par chacun des traitements expérimentés sont indiquées dans le tableau 3.

Les parcelles élémentaires, séparées par des allées de 70 cm, font chacune 2 m de large sur 7 m de long. Comme l'indique la disposition générale de l'essai sur

TABLEAU 2

Traitements appliqués dans les différentes conditions de sol.  
 Experimental treatments applied under the different soil conditions.

Traitements appliqués		Conditions de sol		
Traitement fongicide des semences	Fertilisation	A	B	C
non	Témoin	X	X	
	Scories 12 % 6 t/ha + K Cl 60 % 420 kg/ha	X	X	
	Témoin	X	X	X
oxyquinoléate de cuivre	KCl 60 % 420 kg/ha			X
	chaux 90 % 3 t/ha			X
	Scories 12 % 6 t/ha			X
	Scories 12 % 6 t/ha + KCl 60 % 420 kg/ha	X	X	X
	Superphosphate 45 % 1,6 t/ha			X
	Super. 45 % 1,6 t/ha + chaux 90 % 3 t/ha			X

le terrain (fig. 1), le dispositif expérimental en C a été mis en place à cheval sur la limite du chaulage : une bande de 12 m sépare les petites parcelles chaulées des autres.

La surface des champs non occupée par les parcelles d'essai (y compris la bande laissée sur la limite du chaulage en C) est cultivée en orge avec des techniques de grande culture.

Toute la semence (var. « Cytris ») provient d'un même lot. Pour les parcelles « semences traitées », le traitement a été fait avec le produit habituellement utilisé pour les cultures en grandes parcelles, à base d'oxyquinoléate de cuivre. Le semis a été réalisé le

TABLEAU 3  
Quantités d'éléments minéraux apportées  
par les traitements expérimentaux (en kg/ha)  
Mineral supply of experimental treatments.

Traitements	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
Témoin	0	0	0	0
KCl	0	250	0	0
Chaux	0	0	2 700	0
Scories	720	0	2 700	200
Scories + KCl	720	250	2 700	200
Super 45 %	720	0	220	0
Chaux + super 45 %	720	0	2 920	0

30 avril 1980 à une densité de 600 grains/m<sup>2</sup>. Toutes les parcelles ont reçu une fumure azotée de 70 unités au stade 3 feuilles et 80 unités à la montaison. Le désherbage a comporté un traitement à l'Actril M en début montaison, suivi d'un binage contre le chien-dent, justifié par le salissement des zones A. La maturité était atteinte le 15 septembre 1980 ; les grains étaient alors à 20 p. 100 d'humidité. Les conditions climatiques subies par la culture et le déroulement du

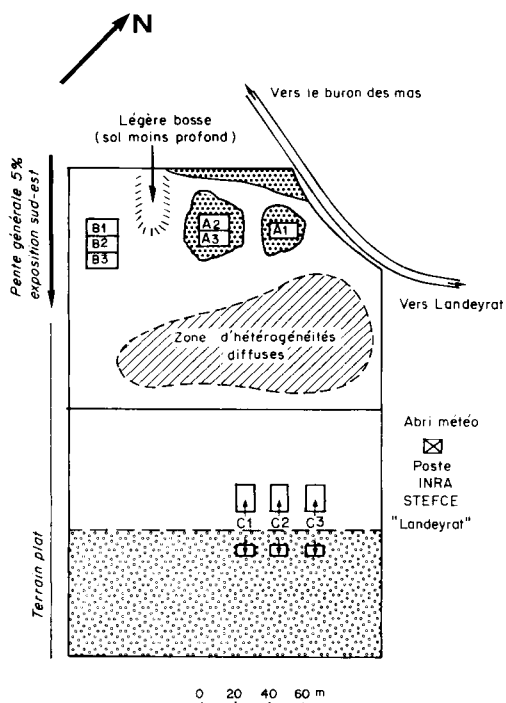


Figure 1

Disposition des parcelles expérimentales sur le terrain. La lettre désigne une condition de sol et le chiffre un numéro de répétition. La surface totale des 2 champs est de 5 ha.

Lay-out of experimental plots in the fields. Letters indicates soil conditions and numbers stand for replicates.

▨ Zones de végétation très médiocre se répétant d'année en année en s'aggravant.

▤ Partie chaulée du champ d'aspect homogène.

cycle végétatif figurent au tableau 4. La durée totale du cycle (semis-maturité), exprimée en somme des températures positives, fut de 1 503 degrés-jours, valeur normale pour une orge considérée comme précoce. La gelée blanche survenue en début d'épiaison ne semble pas avoir eu de conséquences. Le déficit hydrique fut au maximum de 45 mm, ce qui n'épuise pas la réserve utile, de l'ordre de 80 à 100 mm.

### C. Mesures et méthodes

Les mesures effectuées sur chaque parcelle élémentaire ont porté principalement sur :

- le nombre de pieds, le poids des parties aériennes et des racines et leur composition minérale au tout début de la montaison,
- la mycorhization,
- le nombre de pieds et le nombre d'épis à la floraison,
- le nombre de pieds, le nombre d'épis normaux et tardillons, les poids de tiges et d'épis, les nombres et poids de grain à maturité.

On a rangé parmi les tardillons les tiges épiées dont les feuilles et l'épi sont verts ; leur stade s'étale du début épiaison à la fin de grandissement du grain, quand celui-ci commence à adhérer aux glumelles. Ces tiges se distinguent bien des autres, d'aspect mûr. Lors de la récolte, l'ensemble des tiges d'aspect mûr forme une gamme continue d'états de sénescence, depuis des tiges à entrenœuds montrant encore quelques sections vertes et portant des grains durs, mais non farineux, jusqu'à la maturité complète.

On a considéré comme bordure à exclure de toute mesure une longueur d'1 m à chaque extrémité et une largeur de 0,5 m sur chaque côté de la parcelle élémentaire. Les prélèvements destructifs sont effectués sur des placettes rectangulaires de 0,35 m dans le sens des lignes de semis et de 0,75 m perpendiculairement à celles-ci, de milieu d'interligne à milieu d'interligne. Pour les comptages et les pesées, la totalité des plantes de la placette est dépouillée ; le prélèvement se fait par arrachage, sauf le premier, effectué à la bêche. Pour les mesures de mycorhization, un échantillon est prélevé à la bêche dans la placette et un sous-échantillon en est extrait après lavage des racines. Entre prélèvements successifs dans une même parcelle, on laisse une bande de garde d'environ 0,7 m.

Des profils culturaux (HENIN *et al.*, 1969) ont été effectués en travers de quelques parcelles dans les 3 conditions de sol, pour vérifier l'absence de problèmes particuliers d'enracinement et observer les symptômes d'intoxication aluminique.

Les analyses de terres et de végétaux ont été faites par les laboratoires de série I.N.R.A., sauf les valeurs « E » des sols et leur pouvoir fixateur pour le phosphore, déterminés à la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand selon GACHON (1969). La mycorhization a été mesurée selon la méthode alors utilisée à la station I.N.R.A. de Phytopathologie de Clermont-Ferrand : prélèvement d'un échantillon de racines jeunes, coloration à la fuchsine acide, décoloration à l'acide lactique chaud, puis comptage sous microscope du nombre d'arbuscules ou d'entrées de mycélium sur une longueur donnée de racine.

Les analyses de variance ont été faites sur des sous-

TABLEAU 4  
Conditions climatiques décennales et déroulement du cycle végétatif de la culture.  
Climatic conditions observed during ten-day periods and course of vegetative growth of the crop.

	Avril			Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Température moyenne sous abri (°C)	0,6	5,3	2,3	6,5	7,8	7,1	10,6	10,6	8,0	9,9	10,7	14,6	16,1	14,1	13,7	11,9	13,2	13,3
Rayonnement global cumulé (MJ/m <sup>2</sup> ) (Marcenat)	131	132	162	147	188	167	197	146	136	193	183	262	240	203	206	196	192	155
ETP Penman cumulée (mm) (Marcenat)	14	21	20	22	31	24	30	23	22	30	28	44	39	31	30	28	27	19
Précipitations cumulées (mm)	0	38	4	27	21	50	6	37	32	28	17	46	6	36	56	37	29	47
Nombre de jours de gel au sol (indice actinothermique à 10 cm < 0)	8	4	9	2	2	4	2	1	0	1	1	0	0	0	2	0	3	4
Nombre de jours de chaleur (température maxi sous abri > 25 °C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0
Déroulement du cycle végétatif																		

ensembles de traitements comparables entre eux et selon une méthode adaptée à des dispositifs non orthogonaux (BACHACOU *et al.*, 1981). Les régressions multiples progressives ont été limitées à 2 ou 3 variables explicatives non corrélées entre elles et constituant un modèle où les résidus paraissent indépendants des valeurs estimées. Celui-ci a été choisi après recherche automatique du meilleur ordre d'introduction des variables et comparaison avec l'introduction forcée de certaines variables.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Mycorhization

On a constaté qu'il n'y avait pas de parcelle sans mycorhizes, même en A, et on n'a observé aucun nématode. Le tableau 5 donne la mycorhization des traitements comparables entre conditions de sol. L'absence de traitement fongicide de la semence n'améliore pas l'infestation, contrairement à ce qu'ont observé

TABLEAU 5  
Moyenne et écart-type du nombre de points mycorhizés par décimètre de racine jeune.  
Average and standard deviation of the number of mycorrhizal points per 10 cm of young root.

Traitements appliqués	A		B		C	
	$\bar{m}$	s	$\bar{m}$	s	$\bar{m}$	s
Témoins						
Semences traitées	10,4	5,8	25,0	6,9	10,7	2,8
Semences non traitées	8,5	7,3	20,2	8,8	—	—
Scories K						
Semences traitées	3,1	3,1	7,7	2,4	4,9	3,4
Semences non traitées	3,1	4,6	8,7	5,8	—	—

JALALI & DOMSCH (1975) ou BÄRTSCHI (1982) utilisaient des matières actives systémiques. L'absence de systémie de l'oxyquinoléate de cuivre pourrait être responsable de son innocuité. Malgré l'importante variabilité des mesures, la zone B est significativement plus mycorhizée que les 2 autres et les parcelles ayant reçu des scories le sont significativement moins que les témoins.

L'effet dépressif d'apports de P sur la mycorhization a été signalé (HAYMAN *et al.*, 1975). L'efficacité du niveau de mycorhization constaté est cependant difficile à apprécier. D'une façon générale, la variété des méthodes de mesure empêche de s'appuyer directement sur la littérature. Dans notre cas particulier, on peut se poser en outre un problème de date de début d'infestation. Les symptômes de mauvaise nutrition liés à l'intoxication aluminique se manifestent le plus nettement lors du tallage et du début de la montaison, or nos mesures, dont l'objectif était limité à un constat de présence, n'ont commencé, pour des raisons pratiques, qu'en milieu de montaison. On ne peut donc affirmer que les mycorhizes étaient présentes plus tôt, surtout si l'on suit BLACK & TINKER (1979) qui considèrent que la mycorhization de l'orge ne se produit que tardivement. JAKOBSEN & NIELSEN (1983) contestent cependant leurs résultats : 15 j après la levée de l'orge de printemps, ils mesuraient une infestation mycorhizienne égale aux 9/10 du maximum qu'ils observent par la suite. S'il en est ainsi dans nos conditions, la mycorhization apparaît peu efficace pour la nutrition des plantes.

#### B. Absorption minérale et croissance au stade B de JONARD

Nous avons assimilé au stade B, défini sur blé par JONARD *et al.* (1952), l'apparition des premières ébauches de pièces dans les premiers primordia d'épillets. Comme pour le blé, la montaison est alors déclenchée

et l'épi se trouve vers 1 cm au-dessus du plateau de tallage. A ce stade, à l'intérieur du dispositif expérimental, les symptômes d'intoxication aluminique sont très visibles sur les témoins de A (parties aériennes et racines). On observe des symptômes sur racines dans les témoins de B, et rien ailleurs. Les principaux résultats des mesures sont données au tableau 6.

L'absorption apparente, écart entre le contenu en minéraux d'une plante complète (avec ses racines) et celui de la semence qui lui a donné naissance, n'est qu'apparente puisque, entre autres, des sous-estimations importantes de la matière sèche totale des racines sont inévitables quand on prélève celles-ci au champ. Les résultats concernant Ca et K n'ont pas été rapportés, car, dans tous les cas, la part de la semence dans la teneur de la plante est minime.

Les valeurs négatives trouvées pour le phosphore montrent qu'une partie des racines a certainement été perdue. Ceci n'invalide quand même pas les résultats : la perte de racines est normalement plus faible quand l'enracinement est réduit, ce qui est le cas lors d'une intoxication aluminique ; or, c'est sur les traitements intoxiqués que les résultats sont le plus franchement négatifs. Le sens des comparaisons n'est donc pas modifié. Dans les traitements où l'absorption apparaît négative, il est vraisemblable que la plante ne dispose pratiquement à ce stade que du phosphore apporté par la semence.

Sans éliminer les valeurs négatives, on trouve que les absorptions d'N, de P et de Mg sont bien liées entre elles (corrélations significatives au seuil 1 pour 1000). La croissance des parties aériennes est corrélée de la même manière aux absorptions de ces éléments par la plante entière.

TABLEAU 6  
Absorption apparente (\*), et production de parties aériennes  
au stade « B de JONARD ».  
Apparent absorption and production of shoots at stage  
« B » of JONARD (5 on FEEKES'S scale).

Condi- tions de sol	Traitements à	Absorption apparente (*) (en % des quanti- tés apportées par la semence)			Pro- duction des parties aérien- nes g MS/m <sup>2</sup>
		N	P	Mg	
A	Témoins	+ 86	- 39	+ 42	30
	Scories + K	+204	+ 46	+157	37
B	Témoins	+216	- 26	+119	32
	Scories + K	+361	+ 68	+203	47
C	Témoins	+291	+ 11	+186	41
	K	+306	+ 5	+186	37
	Chaux	+290	- 16	+152	43
	Scories + K	+565	+152	+305	67
	Scories	+593	+210	+339	63
	Chaux + Super 45	+799	+300	+458	56
	Super 45	+662	+258	+407	67

(\*) Absorption apparente : écart entre la quantité d'un élément présente dans la plante entière (partie aérienne + racines jusqu'à 25 cm de profondeur) et celle contenue dans la semence. La semence utilisée ici contenait en moyenne : T : 0,98 mg ; P : 0,19 mg ; Mg : 0,059 mg.

TABLEAU 7  
Tallage épi et peuplement.  
Number of ears per plant and density of plants.

Condi- tions de sol	Traitements	A la floraison		Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Tallage épi (*) normal (hors tar- dillons)	A maturité			
		Tallage épi (*)	Nombre d'épis/m <sup>2</sup>			Nombre d'épis par m <sup>2</sup>			Total
						Total normaux	% normaux apparus après floraison	Tardillons	
A	Témoins	0,90	415	375	1,15	435	20	60	495
	Scories + K	1,20	600	400	1,90	770	35	5	775
B	Témoins	1,15	555	465	1,85	870	35	20	890
	Scories + K	1,85	900	435	1,90	840	2	0	840
C	Témoins	1,25	525	360	2,15	780	40	130	910
	K	1,60	550	275	2,30	625	30	65	690
	Chaux	1,50	600	385	2,10	805	25	80	885
	Scories + K	1,60	610	395	2,75	1 080	40	10	1 090
	Scories	1,60	700	430	2,25	970	30	70	1 040
	Chaux + Super 45	1,50	625	375	2,20	830	30	50	880
	Super 45	1,85	740	405	2,20	900	15	105	1 005

(\*) Nombre d'épis par pied, maître brin compris ; les épis et les pieds sont comptés sur le même prélèvement.

On peut constater que, dans les conditions de C, la chaux seule ne permet pas une mobilisation du phosphore meilleure que celle du témoin.

**C. Evolution du peuplement de tiges fertiles et relation avec la croissance au stade B (tabl. 7)**

Le tallage épi mesuré à maturité est supérieur à celui mesuré à la floraison, même après l'enlèvement des tardillons, dans 10 traitements sur les 11 de l'essai. Cette différence permet d'estimer que 15 à 40 p. 100 des épis normaux à maturité sont apparus après floraison, bien qu'on ne puisse les distinguer sur les prélèvements. L'accroissement effectif du nombre de tiges fertiles entre les 2 stades est souvent inférieur au nombre d'épis nouveaux du fait de disparition plus ou moins importante de pieds tout au long du cycle. Quand il n'y a pas apparition d'épis normaux après floraison, les pertes de pieds peuvent aboutir à une baisse sensible du peuplement-épi (traitement scories K en B).

Cet étalement de la montaison et l'apparition des tardillons proprement dits sont la manifestation de la faculté qu'a l'orge d'émettre des talles en continu (ASPINALL, 1961). Cette émission est habituellement interrompue précocement par compétition nutritive entre plantes ou dans la plante, ou par compétition pour la lumière (ASPINALL, 1963 ; KIRBY & FARIS, 1972).

La corrélation entre le nombre de tiges fertiles et le poids sec des parties aériennes au stade B s'améliore quand on passe des épis présents à la floraison ( $r = 0,55$  PS 10 p. 100) aux épis normaux à maturité

( $r = 0,76$  HS 1 p. 100) et au peuplement total, tardillons inclus ( $r = 0,80$ ). MASLE-MEYNARD (1980) observe pour le blé d'hiver une bonne corrélation entre peuplement épi et poids sec au stade B en situation de compétition pour la lumière quand il n'y a pas de compétition pour l'azote. Cette condition paraît remplie ici (l'apport d'ammonitrate couvre à lui seul les besoins des parcelles les plus productives), mais l'espèce et le milieu différent. Si ces résultats sont applicables, l'étalement de la montaison normale et la production finale de tardillons correspondraient simplement à l'ajustement tardif à la ressource lumineuse des peuplements permis par les différentes conditions de croissance en début de végétation. Les valeurs élevées atteintes par les peuplements rendent vraisemblable une telle interprétation. Ces densités doivent être considérées comme normales à cette altitude : la verse ne s'est produite que dans quelques parcelles de B et de C, et 10 j seulement avant récolte.

**D. A maturité**

*1. Fertilité de l'épi et poids moyen du grain (tabl. 8)*

Parmi les composantes du rendement, c'est le nombre de grains par épi qui distingue le plus nettement les témoins de A dans l'ensemble des traitements étudiés. La fertilité de l'épi des autres traitements dépend des conditions de sol. En zone de mauvaise végétation, l'apport de scories permet d'atteindre le niveau de fertilité des épis du reste du champ, mais ailleurs, la fertilisation est inefficace.

Le poids moyen du grain distingue encore C de A et

TABLEAU 8

*Fertilité de l'épi, production de l'orge et production totale du couvert.  
Ear fertility, production of barley and total canopy production.*

Conditions de sol	Traitements	Orge					Poids sec total des parties aériennes g/m <sup>2</sup>	Production totale du couvert orge + adventices g/m <sup>2</sup> M.S.
		Sur les tiges fertiles normales		Tardillons				
		Nombre de grains par épi	Poids moyen d'un grain (mg M.S.)	Production de grains M.S. g/m <sup>2</sup>	Production de grains M.S. g/m <sup>2</sup>	% du poids sec total des parties aériennes		
A	Témoin	3,5	28,3	44	2,5	10,7	154	562
	Scories + K	10,3	30,4	242	0,1	0,7	586	892
B	Témoin	9,6	27,8	233	0,3	1,2	594	747
	Scories + K	10,6	27,5	245	0	0	670	760
C	Témoin	13,5	34,5	364	5	4,5	845	995
	K	12,3	33,8	260	5	4,7	598	906
	Chaux	12,5	33,6	340	3	2,8	753	907
	Scories + K	12	33,8	442	0,3	0,3	1 099	1 227
	Scories	12,5	34	413	2	1,8	1 051	1 261
C	Chaux + Super 45	14	36	423	1	1,4	1 082	1 367
	Super 45	13,4	37,1	447	2	2,5	1 121	1 254



B mais, cette fois, les témoins de A ne diffèrent plus du reste. Le nombre de grains formés par m<sup>2</sup> sur ce traitement est sans doute suffisamment faible pour qu'ils trouvent à s'alimenter normalement.

## 2. Effets des facteurs expérimentaux sur le peuplement et la production d'orge, d'après les analyses de variance

Les moyennes par traitement sont présentées aux tableaux 7 et 8, les résultats des analyses de variance au tableau 9.

Les conditions de sol, l'apport de scories K et leur interaction ont des effets très significatifs sur les 4 variables analysées dans les traitements comparables entre conditions de sol.

L'élévation par les scories K du nombre d'épis normaux, du poids sec total des parties aériennes et du rendement en grain semble surtout dû au phosphore qu'elles apportent. En effet, en C, où l'on sépare les éléments apportés, le phosphore est seul significatif et, en B, où celui du sol est relativement disponible (cf. tabl. 1), les scories sont sans effet.

La réduction du nombre de tardillons par les scories K est plus complexe. Le phosphore n'a pas d'effet direct en C et l'engrais agit en B comme en A. La potasse a un effet significatif mais il est peu probable qu'elle agisse seule. Si on admet que les tardillons ajustent le peuplement à un certain niveau de compétition, le phosphore doit avoir un effet indirect par l'intermédiaire du nombre d'épis normaux.

La chaux paraît inefficace dans notre essai. Le

chaulage d'une terre andique a été étudié autrefois à la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand. Des cultures d'orge en pots y ont été conduites sur un sol de Marcenat dont les caractères physicochimiques sont proches de ceux de B (BELOEIL, 1972). Quelques résultats en sont cités au tableau 10. La production d'orge est fortement améliorée par la plus petite dose de chaux (1,7 t/ha) et ne varie pas quand on augmente celle-ci. La terre amendée par 1,7 t/ha de CaO présente des caractéristiques voisines de celles de l'horizon cultivé de C (voir tabl. 1). L'absence d'effet de la chaux dans notre essai peut donc s'expliquer par les conditions de C. Cependant, les résultats de BELOEIL ne sont pas transposables tels quels sur le terrain. S'ils l'étaient, les scories devraient être efficaces en B par leur chaux, à défaut de l'être par leur phosphore.

## 3. Interprétation du peuplement et de la production d'orge par régressions

Les moyennes par traitement des variables analysées ci-dessus ont été comparées aux apports d'éléments nutritifs que ces traitements ont subis et aux analyses de terre de l'horizon cultivé du témoin correspondant aux conditions de sol dans lesquelles ils se trouvent. Pour les nombres d'épis, on a fait aussi intervenir une variable de peuplement : nombre de pieds pour le nombre d'épis normaux, nombre d'épis normaux pour le nombre de tardillons.

Aucun modèle satisfaisant n'a pu être construit pour interpréter le nombre de tardillons. Les variances des

TABLEAU 9  
Analyses de variance sur le peuplement et la production d'orge.  
Analyses of variance made on barley population and production.

HS = Significatif au seuil 1 %

S = » » » 5 %

— = non significatif

Sous ensemble traité	Facteurs	Variables analysées			
		Nombre d'épis normaux par m <sup>2</sup>	Nombre de tardillons par m <sup>2</sup>	Poids sec total des parties aériennes	Rendement en grains normaux
Conditions « A »	Scories K	HS	HS	HS	HS
	Trait. semence	—	—	—	—
	Interaction	—	S	—	—
Conditions « B »	Scories K	—	HS	—	—
	Trait. semence	—	—	—	—
	Interaction	—	—	—	—
Conditions « C »	Apport de phosphore	S	—	HS	HS
	Apport de chaux	—	—	—	—
	Interaction	—	—	—	—
Parcelles potasse avec et sans scories en conditions « C »	Potasse	—	S	—	—
	Interaction potasse-scories	—	—	—	S
Parcelles témoins et scories K dans les 3 conditions de sol	Conditions de sol	HS	HS	HS	HS
	Scories K	HS	HS	HS	HS
	Interaction	HS	HS	HS	HS

TABLEAU 10

Essai de chaulage d'une terre andique de Marcenat : Résultats sur les caractéristiques physico-chimiques du sol et sur la culture d'une orge de printemps réalisée en pots sous climat de plaine (d'après BELOEIL, 1972).

Liming trial of an andic soil taken at Marcenat : soil characteristics and growth of spring barley cultivated in pots in a low altitude climate (according to BELOEIL, 1972).

Apports de CaO exprimés en t/ha	Analyses de terre au dépotage après récolte				Exemples de résultats culturaux	
	pH	% de satur. de la C.E.C.	Ca éch. meq %	Al éch. meq %	MS totale parties aériennes (g/pot)	Poids moyen d'1 grain (mg MS)
0	5,3	23	4,8	0,8	56	32
1,7	5,5	32	7,5	0,2	95	36
8,7	6,3	53	15,5	0	96	36
17,5	7,0	79	24,7	0	102	38

3 autres variables peuvent être expliquées à plus de 85 p. 100 par les modèles ci-dessous :

$$\text{NEN} = 625 \text{ PHT} + 1,67 \text{ NPM} + 0,75 \text{ MGO} - 3 254$$

(r = 0,933 HS 1 p. 100 ; 87 p. 100 de variance expliquée ; coefficients de PHT et constante HS 1 p. 100, de NPM et MGO S 5 p. 100).

$$\text{MSPA} = 1 108 \text{ PHT} + 0,44 \text{ P}_2\text{O}_5 - 5 347$$

(r = 0,955 HS 1 p. 100 ; 91 p. 100 de variance expliquée ; tous coefficients HS 1 p. 100)

$$\text{RGN} = 483 \text{ PHT} + 0,15 \text{ P}_2\text{O}_5 - 2 339$$

(r = 0,937 HS 1 p. 100 ; 88 p. 100 de variance expliquée ; tous coefficients HS 1 p. 100)

NEN : nombre d'épis normaux par m<sup>2</sup>.

MSPA : matière sèche des parties aériennes (g/m<sup>2</sup>).

RGN : rendement en grains normaux (g/m<sup>2</sup>).

PHT : pH des témoins.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : apport d'anhydride phosphorique (kg/ha).

NPM : nombre de pieds par m<sup>2</sup> à maturité.

MGO : apport de magnésie (kg/ha).

Pour le poids sec des parties aériennes et le rendement, le modèle découle de l'introduction automatique des variables. Pour le nombre d'épis, cette procédure ne permet de construire avec des variables indépendantes qu'un modèle n'expliquant que 70 p. 100 de la variance ; il fait intervenir l'Al échangeable des témoins et l'apport de magnésie. En forçant le pH à s'introduire en premier, on obtient une régression globalement plus explicative. Des modèles plus apparentés aux 2 autres, c'est-à-dire comportant l'apport de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> variable explicative à la place de MGO, sont peu satisfaisants. Avec 3 variables, le pourcentage d'explication est un peu plus faible (83 p. 100) et, surtout, le coefficient de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> n'est pas significatif. Il l'est si on se limite aux variables PHT et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, mais alors, le modèle n'explique plus que 62 p. 100 de la variance et l'indépendance des résidus est douteuse.

Cette approche montre l'influence primordiale des conditions de sol sur les 3 variables et celle de l'apport de phosphore sur la production. Le nombre d'épis dépend, lui, du nombre de plantes qui arrivent à maturité et d'une variable qui traduit un effet spécifique des scories.

Ces résultats convergent pleinement avec ceux des analyses de variance pour la production. Ils divergent quant à l'effet du phosphore sur le peuplement, sans qu'il y ait pourtant contradiction.

#### 4. Production des tardillons

La production de grains par les tardillons est toujours infime, en valeur absolue (tabl. 8) et en valeur relative, même sur les témoins de A (6 p. 100). La gêne qu'ils apportent n'est en rien compensée par un surcroît de rendement. La part des tardillons complets dans la matière sèche totale est également minime (tabl. 8) sauf, dans une certaine mesure, quand la végétation est très mauvaise (témoins de A).

#### 5. Production d'adventices et production totale du couvert végétal (tabl. 8)

Malgré les désherbages, tous les traitements produisent des adventices, jusqu'à 4 t/ha sur les témoins de A. Elles ne semblent pas restreindre nettement la croissance de l'orge mais plutôt occuper la place que la céréale laisse libre. Le poids sec total du couvert, adventices comprises, présente un coefficient de variation plus faible (26 p. 100) que celui de la seule céréale (38 p. 100). En A, la production élevée de mauvaises herbes, même dans le traitement « scories », tient à la présence de très nombreux rhizomes d'*Agropyrum repens*, favorisés les années antérieures par des végétations cultivées occupant mal le terrain.

La production totale du couvert dépasse 12 t/ha sur tous les traitements de C fertilisés en P. Ce résultat est largement supérieur aux 9 t/ha d'herbe de prairie obtenues dans le rythme d'exploitation le plus productif avec la fumure la moins limitante la même année à Landeyrat (GAREL, comm. pers.). Cette année-là, l'herbe a été pénalisée par une repousse de septembre presque nulle à cause de la sécheresse du sol en surface. En l'absence de sécheresse, de MONTARD (1983) estime à 12 t/ha le potentiel d'une prairie permanente très fortement fertilisée sur sol volcanique. Malgré une mauvaise exploitation de l'énergie lumineuse en phase d'implantation, une culture annuelle de prin-

temps réalise une production équivalente à celle de la prairie qu'on présente trop souvent comme la seule végétation agricole possible en altitude.

#### 6. Adéquation de la fertilisation aux conditions de sol

L'absence d'effet de la fertilisation sur la production finale en B pose un problème. Au vu de l'analyse de terre et des résultats de BELOEIL (1972), l'orge devrait répondre à l'apport de chaux des scories. Si le pH et le calcium ne sont pas plus limitants en B qu'en C, la relativement bonne disponibilité du phosphore en B devrait se traduire par des rendements équivalents à ceux des traitements avec scories ou superphosphates de C.

Les méthodes d'amélioration des sols acides à haut pouvoir fixateur pour le phosphore ont été surtout étudiées en zone tropicale ou subtropicale. La validité des résultats rassemblés dans l'étude bibliographique de SANCHEZ & UEHARA (1980) n'est donc pas certaine pour un sol d'altitude en zone tempérée. Ils fournissent cependant d'utiles points de repère. Les auteurs cités obtiennent de bons rendements grâce à des apports de phosphore qui réalisent des concentrations très élevées dans des volumes de sol très différents selon les stratégies choisies. Dans l'une, on obtient une transformation radicale de la fertilité du sol grâce à un apport en plein de doses comprises entre 400 et 1 300 kg de P/ha ; notre fertilisation de 315 kg de P/ha serait alors nettement insuffisante. Dans l'autre stratégie, on concentre une dose/ha modeste sur les lignes de semis tout en cherchant à réduire autant que possible la fixation du phosphore, notamment par chaulage. On n'obtient pas ainsi de transformation brutale du sol, mais on assure des récoltes proches de celles obtenues par la 1<sup>re</sup> stratégie à condition de répéter cette technique sur chaque culture. L'efficacité de cette méthode a déjà été constatée dans les sols volcaniques d'Auvergne (GACHON, comm. pers.). Des recherches ultérieures sur ce thème dans nos régions devraient porter sur les effets d'apports en plein beaucoup plus élevés que ceux que nous avons pratiqués et de la localisation de doses économiquement raisonnables.

#### IV. CONCLUSION

Les zones de mauvaise végétation ne sont pas dues à l'absence d'endomycorhizes ; celles-ci sont présentes partout mais peu efficaces. Dans ces zones, au stade B

où les besoins de l'organogénèse sont élevés, les plantes ne semblent disposer que du phosphore apporté par la semence. Ceci explique la très faible fertilité des épis et le faible tallage constatés ultérieurement.

Dans l'ensemble de l'essai, le peuplement total de tiges fertiles s'ajuste progressivement en fonction de la croissance réalisée au stade B. Le blocage de l'apparition d'épis par compétition pour la lumière ne s'établit le plus souvent qu'après floraison même quand il n'y a pas de tardillons. Ce comportement traduit un freinage du tallage initial qui ne provient sans doute pas de la nutrition minérale : les parcelles ne manquent pas d'azote et les fertilisations testées ne resserrent pas la période d'apparition des épis normaux. La réduction, voire la suppression, des tardillons par les scories K dans notre essai ne constituent pas une solution généralisable à ce problème tant qu'on n'interprète pas l'étalement du tallage, dont les tardillons ne constituent qu'un élément. Le climat est couramment considéré comme responsable d'une limitation du tallage quand on s'élève en altitude, mais on manque d'analyses sur son action.

La production finale dépend étroitement des conditions de sol et de la fertilisation qui semble agir surtout par son phosphore. L'absence d'action de la chaux, même si elle provient en partie du dispositif expérimental, pose le problème de la connaissance des andosols et des moyens de les amender. La fertilisation pratiquée a été capable d'éliminer les symptômes et les effets d'une intoxication aluminique apparaissant par endroits quand les conditions physicochimiques d'un champ sont mauvaises, mais elle ne permet pas d'atteindre dans un tel champ le rendement obtenu sans fertilisation dans un autre où ces conditions sont meilleures. Dans cette 2<sup>e</sup> situation pourtant, le phosphore redevient capable d'augmenter le rendement ; il permet alors de récolter 50 q/ha d'orge à 15 p. 100 d'humidité dans un milieu habituellement considéré comme inapte à la culture.

Les quantités d'engrais que nous avons apportées en plein ne sont sans doute pas suffisantes pour améliorer radicalement la fertilité du sol ; elles sont pourtant déjà très élevées d'un point de vue économique. Des solutions plus efficaces et moins coûteuses doivent être recherchées. La localisation, qui assurerait à la plantule un environnement riche, permettrait vraisemblablement une alimentation suffisante au stade B, crucial pour le développement et la croissance de la culture. Le maintien ultérieur de l'avantage acquis conditionnerait l'intérêt de la technique.

Reçu le 26 août 1983.

Accepté le 20 novembre 1984.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aspinall D., 1961. The control of tillering in the barley plant. I. The pattern of tillering and its relation to nutrient supply. *Austr. J. Biol. Sci.*, **14**, 493-505.
- Aspinall D., 1963. The control of tillering in the barley plant. II. The control of tiller bud growth during ear development. *Austr. J. Biol. Sci.*, **16** (2), 285-304.
- Bachacou J., Masson J. P., Millier C., 1981. *Manuel de la programmation statistique, Amance 81*. I.N.R.A., Département de Biométrie, 54280 Champenoux, 516 p.

- Bartschi H., 1982. Influence de quelques pesticides sur l'infection endomycorhizienne, p. 259-266, in « *Les mycorhizes, partie intégrante de la plante, biologie et perspectives d'utilisation* ». Colloques de l'I.N.R.A. n° 13, 397 p.

- Beloeil B., 1972. *Essai de mise en évidence expérimentale de la toxicité aluminique pour l'orge d'un sol andique (Marcat, Cantal) au moyen de cultures en pots*. Mémoire de fin d'études, E.N.I.T.A. Bordeaux, Station d'Agronomie I.N.R.A. de Clermont-Ferrand, 32 p. + figures.

- Black R., Tinker P. B.**, 1979. The development of endomycorrhizal root system. II. Effect of agronomic factors and soil conditions on the development of vesicular arbuscular mycorrhizal infection in barley and on the endophyte spore density. *New Phytol.*, **83** (2), 401-413.
- Foy C. D., Brown J. C.**, 1964. Toxic factors in acids soils : II. Differential aluminium tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **28** (1), 27-32.
- Gachon L.**, 1966. Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **52**, 1108-1116.
- Gachon L.**, 1969. Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols. *Bull. Assoc. Fr. Etud. Sol. Sci. Sol*, n° 4, 17-31.
- Green N. E., Graham S. O., Schenck N. C.**, 1976. The influence of pH on the germination of vesicular-arbuscular mycorrhizal spores. *Mycologia*, **68**, 929-934.
- Hayman D. S., Johnson A. M., Ruddlesdin I.**, 1975. The influence of phosphate and crop species on *Endogone* spores and vesicular-arbuscular mycorrhiza under field conditions. *Plant Soil*, **43**, 489-495.
- Hénin S., Gras R., Monnier G.**, 1969. *Le profil cultural*. 2<sup>e</sup> éd., Masson, Paris, 332 p.
- Hétier J. M.**, 1971. Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central (région de Menet, Cantal). *Sci. Sol*, n° 2, 51-82.
- Jakobsen I.**, 1983. Vesicular arbuscular mycorrhiza in field grown crops. II. Effect of inoculation on growth and nutrient uptake in barley at two phosphorus level in fumigated soil. *New Phytol.*, **94** (4), 595-604.
- Jakobsen I., Nielsen N. E.**, 1983. Vesicular arbuscular mycorrhiza in field grown crops. I. Mycorrhizal infection in cereals and peas at various times and soils depths. *New Phytol.*, **93** (3), 401-413.
- Jalali B. L., Domsch K. H.**, 1975. Effects of systemic fungitoxicants on the development of endotrophic mycorrhiza, p. 619-626, in Sanders, Mosse, Tinker : *Endomycorrhizas*, Acad. Press, London, 626 p.
- Jeannin B., Garel J. P., Béranger C., Micol D.**, 1984. Utilisation de prairies permanentes et temporaires par un troupeau de vaches allaitantes en zone de demi-montage humide. *Fourrages*, **98**, 19-39.
- Jonard P., Koller J., Vincent A.**, 1952. Evolution de la tige et de l'épi chez la variété de blé « Vilmorin 27 » au cours de la période de reproduction. *Ann. Amél. Plantes*, **1**, 31-54.
- Juste C.**, 1966. Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du sud-ouest atlantique. Application à leur mise en valeur (2<sup>e</sup> partie). *Ann. Agron.*, **17** (3), 251-341.
- Kirby E. J. M., Faris D. G.**, 1972. The effect of plant density on tiller growth and morphology in barley. *J. Agric. Sci. Camb.*, **78**, 281-288.
- Lafarge M.**, 1983 (a). Approche des facteurs et conditions du rendement des céréales en altitude. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **69** (12), 917-928.
- Lafarge M.**, 1983 (b). La céréaliculture, p. 157-202, in Bazin, Larrère, de Montard, Lafarge, Loiseau : *Système agraire et pratiques paysannes dans les Monts Dômes*, I.N.R.A., Versailles, 320 p.
- Lambert D. H., Cole H. J., Baker D. E.**, 1980. Adaptation of vesicular arbuscular mycorrhizae to edaphic factors. *New Phytol.*, **85**, 513-520.
- Masle-Meynard J.**, 1980. *L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière*. Thèse Doct. Ing., I.N.A.P.G., Paris, 274 p.
- Montard F. X. de**, 1983. La production prairiale, p. 203-247, in Bazin, Larrère, de Montard, Lafarge, Loiseau : *Système agraire et pratiques paysannes dans les Monts Dômes*, I.N.R.A., Versailles, 320 p.
- Sanchez P. A., Uehara G.**, 1980. Management considerations for acid soils with high fixation capacity, p. 471-514, in Khasawneh, Sample, Kamprath : *The role of phosphorus in agriculture*, ASA-CSSA-SSSA, Madison WI (USA), 910 p.
- Younge O. R., Plucknett D. L.**, 1966. Quenching the high phosphorus fixation of Hawaiian latosols. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 653-655.