

ABSORPTION DES NUTRIMENTS ET CROISSANCE DES PORTE-GREFFES DE VIGNE EN PRÉSENCE D'ALUMINIUM

ALUMINUM EFFECT ON NUTRITION AND DEVELOPMENT OF GRAPEVINE ROOTSTOCKS (*VITIS* SPP.)

A. ALBÉRICO ALVARENGA, M. de ALBUQUERQUE REGINA,
J.-C. FRAGUAS, A.LIMA DA SILVA et N.N.J. CHALFUN

Résumé : La capacité d'absorption et de mobilisation minérale des porte-greffes de vigne 'IAC 572', '1045 P', 'RR 101-14', 'Kober 5BB' et 'Gravesac' a été testée en situation de sols acides avec des niveaux de concentration en Al de 0,0; 13,5; 27; 40,5 et 54%. Les mesures concernent la longueur et la quantité de matière sèche des racines et de la partie aérienne ainsi que leur teneur respective en nutriments (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Zn et Mn) et en Al.

Le porte greffe 'IAC 572' a présenté les plus grandes croissances tant au niveau souterrain qu'aérien, suivi par 'Gravesac' et 'RR 101-14' qui s'avèrent significativement supérieurs aux autres. L'analyse minérale montre que le porte-greffe 'IAC 572' ayant présenté la plus forte croissance, a accumulé plus de Ca, Mg et Zn dans le système racinaire et présenté les plus importantes valeurs d'Al, Cu et Fe dans la partie aérienne. Le porte-greffe 'Kober 5BB' dont la croissance s'est avérée la plus faible, a accumulé plus de N, Fe et S dans le système racinaire et présenté les plus fortes teneurs en Al, Cu et Fe dans la partie aérienne. Le 'Gravesac' s'avère le plus concentré en N, P, K, S et B dans sa partie aérienne.

Des concentrations croissantes d'Al dans le sol provoquent une réduction de Ca et S dans le système racinaire et de Ca dans la partie aérienne. Elles entraînent également une augmentation des teneurs en Cu et Zn dans le système racinaire et de Zn dans la partie aérienne. La concentration d'Al dans le système racinaire des porte-greffes 'IAC 572' et 'Gravesac' augmente avec celle du sol.

Abstract : The proposal work was to detect the growth capacity and absorption of minerals on grape rootstocks in acid soils with high contents of Al. The rootstocks tested were: 'IAC 572', '1045 P', 'RR 101-14', 'Kober 5BB' and 'Gravesac', at 0%, 13,5%, 27%, 40,5% and 54% aluminum (Al) saturation levels. Plants height, roots length, leaves, stems and total dry weight; roots, stems and leaves nutrients content (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Zn and Mn) and Al were evaluated.

Development characteristic differences were observed only in rootstocks. 'IAC 572' showed the highest roots, stems and leaves development, followed by 'Gravesac' and 'RR 101-14'. Rootstocks were different in soil Al and nutrient content, and some interactions occurred between both factors. 'IAC 572' had the highest: growth, Ca, Mg and Zn roots concentration and N, K in aerial part. 'Kober 5BB' had the smallest growth but accumulated more: N, Fe and S in roots, and Al, Cu and Fe in aerial part. 'Gravesac' had the highest concentration of N, P, K, S and B in aerial part.

Increasing Al soil contents reduced: Ca and S in roots, Ca in the stems and leaves; but increased: Cu and Zn contents in roots and Zn and Mn contents in the stems and leaves. 'IAC 572' and 'Gravesac', retained more Al in roots when Al contents increased in the soil.

Mots clés: nutrition, vigne, acidité du sol, aluminium toxique

Key words : nutrition, grapevine, soil acid, toxicant aluminum

INTRODUCTION

Au Brésil, la vigne est présente dans presque toutes les régions, mais sa culture est concentrée au Sud, au Sud-est et plus récemment au Nord-est. Outre le Rio Grande do Sul où elle prédomine, les autres États producteurs sont par ordre d'importance : São Paulo, Santa Catarina, Paraná, Minas Gerais, Pernambuco et Bahia. Les sols y sont souvent acides, correspondant au 'Cerrado' qui s'étend sur 205 millions d'hectares.

Sur 112 millions d'hectares propices à l'agriculture dans cette région du 'Cerrado', 12 millions sont véritablement utilisés (REICHARDT, 1981; GAMA *et al.*, 1996). Le développement croissant de l'agriculture conduit à adapter les techniques de culture et les variétés aux conditions acides afin de parvenir à un niveau de productivité économiquement acceptable pour les agriculteurs (ANIOL, 1984 ; BONA *et al.*, 1991 ; HOWELER, 1991 ; KOCHIAN, 1995).

Tableau I - Résultats d'analyse physico-chimique du substrat**Results of the physical-chemical analysis of the substratum.**

pH	M.O. (dag.kg ⁻¹)	P (mg.dm ⁻³)	K	Ca	Mg	Al (cmol.dm ⁻³)	H+Al	S	T	V (%)	m
4,8	2,1	3,1	88,0	0,6	0,6	1,7	6,4	1,4	7,9	17	54

L'expansion de la surface viticole au Brésil, notamment de la viticulture tropicale, peut bénéficier du potentiel foncier des régions agricoles du 'Cerrado'. La sélection de porte-greffes de vigne adaptés à ces sols acides fortement, pourvus en aluminium toxique, constitue alors un enjeu économique important, notamment pour limiter l'utilisation d'intrants destinés à en corriger les inconvénients.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les expérimentations, réalisées au cours des années 1999-2000, ont été conduites en serre dans la ferme expérimentale de Lavras par EPAMIG (Institut de Recherche Agronomique de l'Etat du Minas Gerais au Brésil). Les conditions de température ont été régulées à 20-25 °C par un 'cooling-system'. Le substrat utilisé pour la préparation des traitements provient des sols de la région du 'Cerrado'.

Le modèle expérimental en schéma factoriel à trois répétitions combine au hasard cinq types de porte-greffes ('Gravesac', 'IAC 572', 'RR 101-14', '1045 P' et 'Kober 5BB'), avec cinq niveaux de saturation du sol en aluminium (0,0 ; 13,5 ; 27,0 ; 40,5 et 54,0 %). Chaque traitement est constitué de 150 pots de 5 kilos chacun. Un sol à forte saturation en Al (54 %) a été utilisé pour la réalisation d'un substrat dont les caractéristiques physico-chimiques ont été préalablement contrôlées (tableau I).

Les cinq niveaux de saturation en Al ont été réalisés avec des apports de CaCO₃ et MgCO₃ p.a. La méthodologie décrite par FRAGUAS *et al.* (1989) et FRAGUAS (1999), a servi au calcul des dosages en CaCO₃ et MgCO₃ et le niveau zéro de saturation en Al (m = 0 %) a été obtenu par 3 x Al₃⁺. Les autres niveaux sont déterminés par la formule $m (\%) = (2 - x) / [(2 - x) + (Ca_{+} + x) + (Mg_{+} + x) + K_{+}] \cdot 100$. La valeur de x a été multipliée par 3 pour obtenir la quantité de CaCO₃ en t/ha et adaptée à la contenance du pot. La correction en CaCO₃ et MgCO₃ a été calculée en fonction de la teneur du substrat en CaCO₃ et en visant un équilibre de 4 Ca pour 1 Mg.

Les pots de 5 kilos sans trous ont été remplis du substrat corrigé en CaCO₃ et MgCO₃ ainsi qu'en P₂O₅ et K₂O, conformément aux besoins de la vigne. Ils ont été incubés pour maintenir une humidité relative voisine de 80 % de la capacité au champ qui a été contrôlée par pesages réguliers. Une solution d'Azote a été apportée en fonction des besoins définis par le stade de développe-

ment de la plante. Une vérification de la stabilité des niveaux de saturation en Al a été effectuée périodiquement au cours de l'expérimentation.

La hauteur des plantes a été mesurée sur la tige principale 225 jours après le début de l'expérimentation ainsi que la longueur développée du système racinaire selon la méthodologie proposée par TENNANT (1975). La quantité de matière sèche aérienne et souterraine et la composition minérale ont été mesurées après étuvage à 70 °C jusqu'à atteindre un poids constant.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de variance concernant la variable hauteur n'est significative que pour le facteur porte-greffe. Aucune différence n'apparaît concernant les niveaux de saturation en Al et il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs.

Le cultivar 'IAC 572' connaît la plus forte croissance aérienne et souterraine mesurées tant en longueur qu'en poids de matière sèche, suivi par Gravesac (tableau II). La longueur de la tige a été quintuplée pour le premier et triplée pour le second par rapport aux deux suivants 'RR 101-14' et 'Kober 5BB'. Le porte-greffe 'Kober 5BB' n'exprime pas ici la supériorité de croissance aérienne relevée par FRAGUAS *et al.* (1989) dans les mêmes conditions de culture par rapport aux cultivars 'SO4', 'RR 101-14', '420 A', '161-49'. On ne retrouve pas non plus la supériorité du cultivar 'RR 101-14' par rapport au 'Kober 5BB' rapportée par FRAGUAS (1999).

Les différents taux de saturation du substrat en Al ne font pas apparaître de différence significative sur les niveaux de croissance, sans doute du fait du niveau élevé du coefficient de variation utilisé (tableau III). La plus forte quantité de matière sèche et la plus forte croissance restent cependant déterminées par la plus faible concentration en Al, comme cela a d'ailleurs déjà été démontré (FRAGUAS, 1993 ; FRAGUAS et TERSARIOL, 1993). Certaines différences significatives apparaissent entre porte-greffes, démontrant la supériorité de 'IAC 572' et 'Gravesac' déjà décrite. Le faible comportement de 'Kober 5BB' en présence d'Aluminium reste conforme à ce qu'a déjà constaté FRAGUAS (1999) qui rapporte une réduction de 29,73 % de la croissance de la partie aérienne dans ces conditions. Ce résultat a été également confirmé par HIMELRICH (1991) avec une réduction de 47,70 % du

Tableau II - Résultats moyens selon les différents types de porte-greffes

Average results according to different types of rootstock

Cultivars	Longueur Tige	Longueur racines (cm)	Poids sec racines (g)	Poids sec aérien (g)	Poids sec total (g)
IAC 572	99,00 a*	8550,30 a	7,508 a	34,141 a	41,649 a
Gravesac	65,13 b	5277,38 b	7,132 a	12,373 b	19,506 b
RR 101-14	20,86 c	3295,85 bc	3,762 b	8,984 bc	12,746 bc
Kober 5BB	19,33 c	2042,34 c	2,260 b	5,733 c	7,993 c
1045 P	14,60 c	1650,59 c	1,938 b	5,736 c	7,674 c

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de de Tukey à 5% de probabilité.

Tableau III - Résultats moyens selon les concentrations du substrat en Aluminium

Average results according to concentrations of the substratum in aluminum

Niveaux de m	Longueur de Tige (cm)	Longueur de Racines (cm)	Poids sec Racines (g)	Poids sec Aérien (g)	Poids sec total (g)	%
00,0%	40,66	4057,9	4,424	14,546	18,971	116
13,5%	51,33	4336,1	4,950	13,061	18,011	110
27,0%	41,40	3870,3	4,054	13,199	17,254	105
40,5%	47,26	4933,2	5,101	13,813	18,915	115
54,0%	38,06	3618,7	4,070	12,346	16,417	100
DMS (5%)	24,72	2629,6	2,706	6,370	8,367	
C.V.	54,63	61,1	57,910	46,020	45,190	

Tableau IV - Composition minérale du système racinaire des porte-greffes testés

Mineral composition of root systems of the tested rootstocks

Cultivars	N (g.kg ⁻¹)	Ca (g.kg ⁻¹)	Mg (g.kg ⁻¹)	S (g.kg ⁻¹)
Kober 5BB	28,85 a*	9,787 b	2,957 bc	1,985 a
1045 P	24,18 b	9,192 b	2,246 d	1,545 b
IAC 572	23,92 b	12,151 a	4,876 a	1,726 ab
Gravesac	22,39 b	10,000 b	3,521 b	2,069 a
RR 101-14	22,04 b	9,478 b	2,608 cd	1,723 ab

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

poids de matière sèche aérienne de 'Kober 5BB' en présence de sol acide à forte teneur en Al.

I- INCIDENCES SUR L'ABSORPTION MINÉRALE RACINAIRE

Azote: seul l'effet porte-greffe s'exprime et 'Kober 5BB' accumule la plus grande quantité d'Azote racinaire, entraînant un déséquilibre avec la partie aérienne (tableau 4). En présence d'Al excédentaire, le système racinaire semble contraint à mobiliser plus d'N pour se développer (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Phosphore: des différences significatives apparaissent entre porte-greffes ainsi qu'une interaction entre porte-greffes et niveau de saturation en Aluminium (tableau V). Avec la concentration du milieu en Al, la teneur en P des racines tend à augmenter, bloqué par l'excès d'Al auquel

il est lié. Son assimilation est alors perturbée et avec elle l'approvisionnement en énergie qui conditionne l'absorption des autres éléments minéraux. Son transfert vers les parties aériennes fortement demandeuses d'énergie, notamment pour la photosynthèse, peut s'en trouver limitée. L'excès d'Al induit ainsi un blocage racinaire du P préjudiciable au métabolisme et donc à la croissance.

Seul le porte-greffe '1045 P' a présenté une variation significative de la teneur racinaire en P selon le niveau d'Al présent dans le sol. Le test des moyennes montre une teneur maximale en condition de faible concentration en Al (13,5 %) ce qui reste conforme aux résultats déjà obtenus dans ce domaine (FRAGUAS, 1993).

Potasse : seuls les niveaux de saturation en Al font apparaître des différences significatives (tableau VI). Le test des moyennes fait apparaître des valeurs maximales

Tableau V - Teneurs moyennes en Phosphore dans le système racinaire (g.kg⁻¹)
Average contents of phosphorus of the root system (g.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	1,914 a AB*	1,932 a A	2,111 a AB	2,798 a A	2,602 a A
1045 P	1,840 ab B	2,435 a A	1,545 b B	1,972 ab A	1,978 ab A
RR 101-14	2,198 a AB	2,056 a A	2,002 a AB	2,087 a A	2,254 a A
Kober 5BB	1,635 a B	2,241 a A	1,998 a AB	2,311 a A	2,224 a A
Gravesac	2,782 a A	2,268 a A	2,715 a A	2,391 a A	1,977 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Tableau VI - Teneurs moyennes en potasse, calcium et soufre racinaires
Average contents of potassium, calcium and sulfur in the roots

Niveaux de m	K	Ca	S
	(g.kg ⁻¹)		
0,0 %	15,081 b*	11,432 a	2,024 ab
13,5 %	16,875 ab	11,300 a	2,130 a
27,0 %	16,875 ab	10,547 ab	1,756 abc
40,5 %	18,310 a	9,526 b	1,653 bc
54,0 %	17,719 ab	7,803 c	1,485 c

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

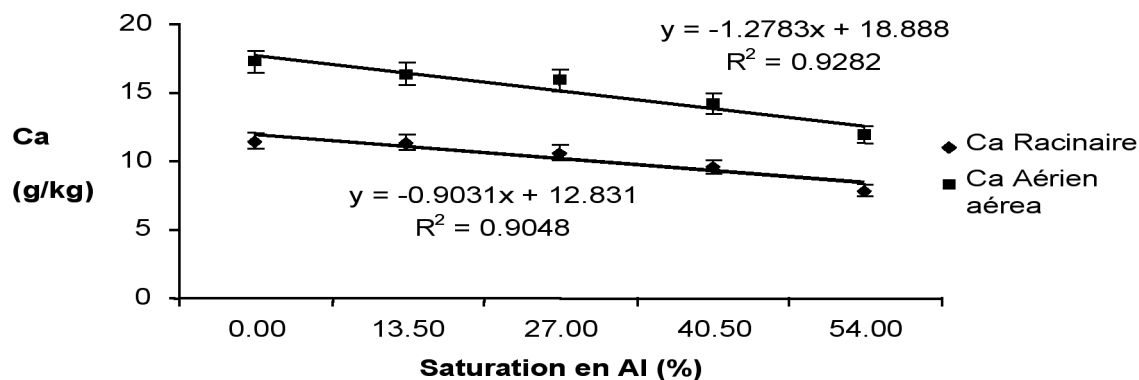


Figure 1 - Variation des teneurs moyennes en calcium racinaire et aérien
Variation of the average contents of calcium in the roots and aerial part

au niveau de saturation 40,5 % et minimales à 0 %. Ce résultat peut provenir d'une compétition dans l'absorption de K avec le Calcium et le Magnésium rapportés pour adapter la concentration du substrat en Al aux conditions de l'expérience.

Calcium : Un effet porte-greffes et niveaux de saturation en Aluminium apparaît, sans toutefois noter d'interaction entre ces deux critères (tableau IV). L'augmentation du niveau de saturation en Al tend à diminuer la teneur en Ca du système racinaire (tableau VI et figure 1).

Ce résultat est lié à l'antagonisme entre les ions Ca et Al provoqué par l'enrichissement du substrat en CaCO₃ (MALAVOLTA, VITTI et OLIVEIRA, 1997).

Le cultivar 'IAC 572' présente les plus fortes teneurs et une comparaison de treize porte-greffes de vigne a déjà montré une forte teneur de Ca dans le système racinaire de 'IAC 766' en présence d'une forte concentration en Al du sol (FRAGUAS, 1999). Par son influence sur le fonctionnement de la membrane plasmatique et la sélection

Tableau VII - Teneurs moyennes en macro-éléments dans les parties aériennes**Average contents of macronutrients of the aerial part**

Cultivars	N (g.kg ⁻¹)	P (g.kg ⁻¹)	K (g.kg ⁻¹)	Ca (g.kg ⁻¹)
Gravesac	20,30 a*	1,868 a	15,610 a	16,599 a
IAC 572	19,92 a	1,260 c	15,863 a	15,512 a
RR 101-14	14,06 b	1,601 abc	11,728 bc	14,667 ab
Kober 5BB	13,94 b	1,645 ab	12,364 b	15,702 a
1045 P	12,41 b	1,332 bc	10,716 c	12,783 b

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

Tableau VIII - Teneurs moyennes en Azote et Calcium dans les parties aériennes**Average contents of nitrogen and calcium of the aerial part**

Niveaux de m	N (g.kg ⁻¹)	Ca (g.kg ⁻¹)
0,0 %	14,080 b*	17,197 a
13,5 %	16,693 ab	16,257 a
27,0 %	16,466 ab	15,813 ab
40,5 %	17,213 a	14,124 b
54,0 %	16,200 ab	11,872 c

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

tivité des échanges ioniques, le Ca favorise l'absorption des autres nutriments et donc la croissance de la plante.

Magnésium : Seul l'effet porte-greffe apparaît avec les plus fortes teneurs pour 'IAC 572' suivi de 'Gravesac' (tableau IV). Le cultivar '1045 P' est le moins riche, 'Kober 5BB' et 'RR 101-14' restant en position intermédiaire. La fixation de Mg radiculaire est similaire à celle du Ca et semble liée à l'intensité de transpiration commandée par la croissance. La forte teneur en Mg de ces deux cultivars peut donc être mise en relation avec leur plus forte croissance.

Soufre : Les teneurs du système radiculaire augmentent avec une plus faible saturation du sol en Al (tableau VI). Des différences significatives apparaissent entre porte-greffes et entre niveaux de saturation en Aluminium sans que l'on observe d'interaction entre les deux facteurs (tableau IV). Les cultivars 'Gravesac' et 'Kober 5BB' ont présenté les plus fortes teneurs alors que le '1045 P' est au contraire faiblement pourvu. Bien qu'on ait peu de références dans ces conditions de culture, cet élément reste important dans la fabrication des protéines, même s'il intervient en quantité limitée par rapport à l'Azote.

II- INCIDENCE SUR L'ALIMENTATION MINÉRALE DE LA PARTIE AÉRIENNE

L'effet porte-greffe s'exprime pour tous les macro-éléments étudiés alors que l'effet niveau de saturation en

Al ne s'exprime que pour les teneurs en N et Ca. Une interaction entre les deux facteurs est observable pour Mg et S. (tableau VII).

Azote : les porte-greffes 'IAC 572' et 'Gravesac' présentent la plus forte teneur, se différenciant nettement des autres (tableau VII). D'autres études ont montré que la teneur en N des feuilles de 'Kober 5BB' diminuait avec le pH (Himelrick, 1991) et restait inférieur au 'RR 101-14' et 'IAC 313' (HIROCE, GALLO et RIBAS, 1970).

L'assimilation azotée s'avère inférieure dans un sol dépourvu d'Al mais sa présence ne montre pas d'effet inhibiteur au niveau aérien alors qu'elle réduit la croissance racinaire (tableau VIII). L'élément N étant très mobile dans le sol en présence d'humidité, les conditions de l'essai ont sans doute limité les risques de carence induite par l'Al.

Phosphore : Le cultivar 'Gravesac' présente les plus fortes teneurs alors que 'IAC 572' et '1045 P' sont au contraire les moins pourvus (tableau VII). Des essais ont déjà démontré des teneurs plus élevées dans les feuilles de la variété 'Seibel 2' greffée sur 'IAC 313' par rapport à l'utilisation des porte-greffes 'RR 101-14' et 'Kober 5BB' (HIROCE, GALLO et RIBAS, 1970). D'autres résultats démontrent une augmentation de la teneur en P foliaire lorsque 'IAC 766' est cultivé avec de fortes concentrations d'Al dans le sol (FRAGUAS, 1999). Avec son rôle dans le transport d'énergie, le Phosphore est un élément essentiel du métabolisme cellulaire. La forte croissance de 'Gravesac' découle donc directement de sa richesse en P alors qu'au contraire celle de 'IAC 572' a été perturbée par sa faible teneur.

Calcium : les plus fortes teneurs apparaissent dans les cultivars 'Gravesac', 'IAC 572' et 'Kober 5BB' alors que '1045 P' présente la plus faible valeur et 'RR 101-14' se situe en position intermédiaire (tableau VII). La teneur en Ca des parties aériennes augmente régulièrement avec la diminution de la concentration du sol en Al (tableau VIII et figure 1). L'addition de carbonate de Ca et de Mg pour adapter le taux de saturation du substrat ainsi qu'une mobilisation du Ca par la transpiration, sont des facteurs favo-

Tableau IX - Teneurs moyennes de magnésium dans les parties aériennes (g.kg⁻¹)
Average contents of magnesium of the aerial part (g.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	3,146 a A*	3,154 a A	2,925 a A	2,842 a AB	2,637 a A
1045 P	2,340 a A	2,135 a B	2,336 a A	1,841 a C	1,867 a A
RR 101-14	2,336 b A	2,305 b AB	2,437 b A	3,366 a A	2,525 ab A
Kober 5BB	2,939 a A	2,954 a AB	2,463 a A	2,226 a BC	2,514 a A
Gravesac	2,556 a A	2,305 a B	2,648 a A	2,426 a BC	2,591 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Tableau X - Teneurs moyennes en soufre dans les parties aériennes (g.kg⁻¹)
Average contents of sulfur of the aerial parts (g.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	1,128 a ABC*	1,012 a B	1,094 a B	1,097 a AB	1,037 a BC
1045 P	0,947 a BC	0,856 a B	0,906 a B	0,765 a B	0,689 a C
RR 101-14	0,787 b C	0,927 ab B	1,057 ab B	1,210 a A	1,060 ab B
Kober 5BB	1,141 ab AB	1,063 b AB	0,924 b B	1,121 ab A	1,464 a A
Gravesac	1,383 a A	1,379 a A	1,515 a A	1,292 a A	1,212 a AB

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Tableau XI - Teneurs moyennes de Bore dans le système racinaire (mg.kg⁻¹)
Average contents of boron of the root system (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	36,14 a AB*	40,78 a A	39,47 a A	33,38 a A	35,20 a A
1045 P	45,12 a A	31,07 b AB	26,58 b A	39,12 ab A	29,34 b A
RR 101-14	24,95 a B	32,20 a AB	38,00 a A	26,17 a A	24,16 a A
Kober 5BB	24,06 b B	30,35 ab AB	30,35 ab A	38,82 a A	24,99 ab A
Gravesac	24,98 a B	25,46 a B	27,96 a A	29,27 a A	25,74 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

rables à la concentration aérienne de Ca (MARSCHNER, 1995).

Magnésium: une interaction entre porte-greffes et niveaux de saturation en Al apparaît (tableau IX). Aux niveaux 40,5 % et 54,0 %, le cultivar '1045 P' révèle les plus faibles teneurs alors que 'IAC 572' et 'RR 101-14' sont au contraire les plus riches. Le Ca en plus grande quantité dans les traitements à faible niveau de m peut avoir induit une compétition vis-à-vis de Mg chez ces deux cultivars (MALAVOLTA, VITTI et OLIVEIRA, 1997). Ces résultats confirment les différences de teneur en Mg des feuilles et des rameaux entre 'RR 101-14' et 'Kober 5BB' déjà observées, différences qui disparaissent

cependant dans le résultat cumulé feuilles-rameaux (POUGET, 1987). Comparé aux cultivars 'IAC 766', 'IAC 313', 'Traviú' et '420 A', le porte-greffe 'IAC 572' a également présenté les plus fortes teneurs de Mg dans les feuilles, même en conditions salines (VIANA, 1997).

Soufre: l'analyse de l'interaction entre porte-greffes et niveaux de saturation en Al montre que 'Gravesac' présente la plus forte teneur à tous les niveaux de m comme on l'a déjà noté pour le système racinaire (tableau X). Au contraire, le '1045 P' est le plus faiblement pourvu à presque tous les niveaux de saturation en Al, tant au niveau aérien que souterrain.

III- INCIDENCE SUR L'ABSORPTION RACINAIRE EN OLIGO-ÉLÉMENTS

Bore : les teneurs en Bore (B) dans le système racinaire varient en fonction des porte-greffes et l'on peut noter une interaction entre porte-greffes et niveaux de saturation en Al. Les cultivars 'IAC 572' et '1045 P' ont accumulé la plus grande quantité de B aux niveaux de concentration en Al les plus faibles, alors que 'Kober 5BB' et 'Gravesac' montrent au contraire les plus faibles valeurs (tableau XI).

Les différents niveaux de saturation en Al n'ayant pas eu d'incidence sur la croissance du système racinaire, la teneur en B a également peu varié dans la majorité des cas, sauf pour le '1045 P' qui exprime une teneur supérieure au niveau 0,0 % d'Al.

Cuivre: les différences qui apparaissent sont liées seulement aux différents niveaux de saturation en Al (figure 2). La teneur en cet élément s'accroît avec le niveau de m du sol corrigé par addition de CaCO₃, ce qui est cohérent compte tenu des équilibres entre Ca et Cu qui règlent l'absorption racinaire.

Tableau XII - Teneurs moyennes en fer dans le système racinaire (mg.kg⁻¹)

Average contents of iron of the root system (mg.kg⁻¹)

Cultivars	
IAC 572	7999,73 ab*
1045 P	5985,46 bc
Kober 5BB	8160,46 a
RR 101-14	5849,93 c
Gravesac	6807,06 abc

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

Fer : les variations observées sont uniquement liées au facteur porte-greffe (tableau XII). Le cultivar 'Kober 5BB' détient les plus fortes teneurs et se différencie ainsi nettement de 'RR 101-14' et '1045 P' alors que 'IAC 572' et 'Gravesac' présentent des résultats voisins. Le Fer est indispensable dans la synthèse de la chlorophylle et son absorption est influencée par d'autres cations comme K, Ca et Mg. Les éléments Cu, Zn et Mn peuvent induire une déficience par inhibition compétitive (MALAVOLTA, VITTI et OLIVEIRA, 1997).

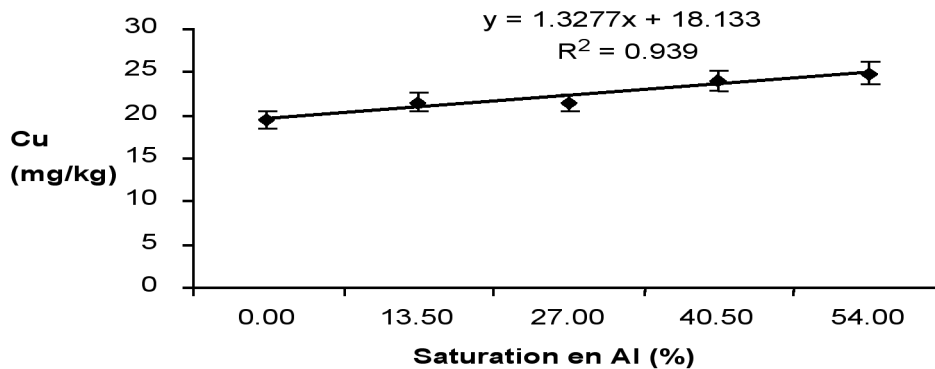


Figure 2 - Variations de la teneur moyenne en cuivre dans le système racinaire

Average contents of iron of the root system (mg.kg⁻¹)

Tableau XIII - Teneurs moyennes en Zinc dans le système racinaire (mg.kg⁻¹)

Variation of the average contents of zinc of the root system

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	26,693 c A*	36,300 bc A	44,073 b A	62,186 a A	78,613 a A
1045 P	30,433 bc A	34,100 abc A	25,960 c B	50,380 a AB	44,880 ab B
RR 101-14	27,753 c A	28,966 ab A	32,046 ab AB	40,260 ab B	45,173 a B
Kober 5BB	25,266 b A	43,560 ab A	31,570 a AB	45,980 a AB	47,740 a B
Gravesac	29,406 b A	30,433 b A	43,193 ab A	49,426 a AB	52,286 a B

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Tableau XIV - Teneurs moyennes en Manganèse dans le système racinaire (mg.kg⁻¹)Average contents of manganese of the root system (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	125,646 a A*	124,326 a A	123,446 a A	123,153 a B	122,566 a B
1045 P	129,963 a A	126,673 a A	125,280 a A	124,400 a B	124,180 a B
RR 101-14	127,330 a A	126,083 a A	124,986 a A	124,400 a B	124,106 a B
Kober 5BB	130,073 a A	125,573 a A	124,840 a A	123,813 a B	123,666 a B
Gravesac	130,770 c A	128,863 c A	124,693 c A	500,963 b A	741,773 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Tableau XV - Teneurs moyennes en Bore dans les parties aériennes (mg.kg⁻¹)Average contents of boron of the aerial parts (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	28,659 a A*	31,632 a AB	29,474 a B	28,636 a B	29,049 a A
1045 P	33,372 ab A	32,099 ab AB	39,051 a A	32,106 ab AB	27,810 b A
RR 101-14	31,626 ab A	28,299 b B	33,815 ab AB	36,980 a A	27,788 b A
Kober 5BB	36,334 a A	35,382 a AB	29,926 a B	31,734 a AB	31,734 a A
Gravesac	32,923 ab A	37,898 ab A	39,345 a A	35,598 ab AB	31,232 b A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5 % de probabilité.

Zinc : un effet porte-greffes et niveaux de concentration en Al du sol apparaît, avec interaction entre ces deux facteurs, les teneurs augmentant avec la concentration en Al du sol (tableau XIII). Comme dans le cas du Cu, le Ca présent en plus forte quantité aux niveaux inférieurs de m entraîne une inhibition compétitive dans l'absorption de Zn.

Le porte-greffe 'IAC 572' exprime les plus fortes valeurs racinaires, notamment aux niveaux élevés de concentration en Al du sol (tableau XIII). Au Brésil, certains défauts dans la formation des baies (nanisme, avortement), peuvent être attribués à une carence en Zn. Une évaluation plus précise du comportement des divers porte-greffes serait utile pour affiner la conduite de la fertilisation en Zn. Manganèse: des différences apparaissent entre porte-greffes et entre niveaux de saturation du sol en Al avec une interaction notable entre les deux facteurs (tableau XIV). Seul 'Gravesac' réagit selon le niveau de concentration du sol en Al avec des teneurs qui croissent avec celle-ci. Elles sont ainsi trois fois supérieures à la moyenne des autres porte-greffes aux niveaux 40,5 % et cinq fois à 54,0 %.

Les sols à forte acidité favorisent la disponibilité du Mn, sa phytotoxicité s'avérant alors plus fréquente que sa carence (FAQUIM, 1994). Les besoins de la vigne se situent à 50 ppm mesurés dans la feuille et 70 dans le pétiole. L'utilisation de fongicides contenant du Mn peut

entraîner des excès sans qu'il n'y ait cependant de risque de phytotoxicité puisqu'il reste stocké dans la cuticule.

IV- INCIDENCE SUR LA TENEUR EN OLIGO-ÉLÉMENTS DES PARTIES AÉRIENNES

Bore: les teneurs varient en fonction du porte-greffe et du niveau de m avec une interaction entre les deux facteurs. Bien que les différences ne soient pas significatives, 'Gravesac' tend à exprimer de plus fortes teneurs à tous les niveaux de concentration en Al (tableau XV). Les besoins de la vigne en B sont de 40 ppm dans le pétiole et 50 dans la feuille (SOUSA, 1996). L'adaptation du porte-greffe aux conditions d'alimentation en B est importante compte tenu de l'importance de cet élément dans la quantité et la qualité des fruits. Les faibles niveaux de B

Tableau XVI - Teneurs moyennes en cuivre dans les parties aériennes (mg.kg⁻¹)Average contents of copper of the aerial parts (mg.kg⁻¹)

Cultivars	
Kober 5BB	6,402 a*
RR 101-14	5,868 ab
Gravesac	5,210 bc
IAC 572	5,151 bc
1045 P	4,859 c

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

Tableau XVII - Teneurs moyennes en fer dans les parties aériennes (mg.kg⁻¹)
Average contents of iron of the aerial parts (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	619,66 a B*	902,00 a A	1437,0 a A	801,33 a A	1020,00 a A
1045 P	1587,66 a B	1165,33 a A	771,7 a A	1584,33 a A	1372,66 a A
RR 101-14	1578,00 a B	2083,66 a A	1099,0 a A	1815,66 a A	2159,33 a A
Kober 5BB	4588,33 a A	2475,33 b A	1936,7 b A	2290,00 b A	1751,33 b A
Gravesac	1865,33 a B	966,66 a A	1391,0 a A	1461,00 a A	1698,33 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

Tableau XVIII - Teneurs moyennes en manganèse dans les parties aériennes (mg.kg⁻¹)
Average contents of manganese of the aerial parts (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	133,70 c A*	192,31 bc A	329,68 abc A	567,78 ab B	668,51 a C
1045 P	177,66 c A	291,22 bc A	642,87 ab A	648,37 ab B	820,53 a BC
RR 101-14	214,29 c A	428,58 bc A	666,68 b A	1439,59 a A	1137,38 a AB
Kober 5BB	273,67 c A	377,30 c A	487,19 bc A	851,66 b B	1511,02 a A
Gravesac	221,61 c A	426,75 c A	879,14 b A	1395,63 a A	1300,39 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

Tableau XIX - Teneurs moyennes en aluminium du système racinaire (mg.kg⁻¹)
Average contents of aluminum of the root system (mg.kg⁻¹)

Cultivars	% de m				
	0,0	13,5	27,0	40,5	54,0
IAC 572	10944 ab A*	12219 ab A	8844 b A	15977 a A	13147 ab A
1045 P	11134 a A	7573 a AB	5854 a A	9104 a B	10412 a A
RR 101-14	7317 a A	8928 a AB	6049 a A	9199 a B	8892 a A
Kober 5BB	6438 b A	10008 ab AB	9279 ab A	15295 a AB	10792 ab A
Gravesac	8375 b A	5457 b B	9646 ab A	9815 ab AB	15065 a A

*Pas de différence significative pour une même lettre (minuscule pour les porte-greffes et majuscule pour la concentration en Al) selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

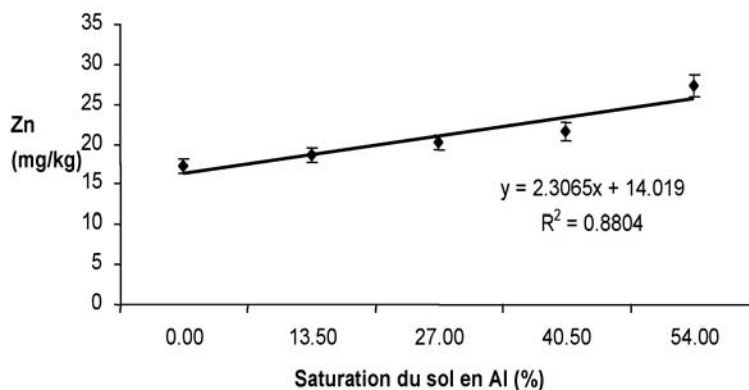


Figure 3 - Variation de la teneur moyenne en Zinc dans les parties aériennes
Variation of the average contents of zinc of the aerial part

Tableau XX - Teneurs moyennes en aluminium dans les parties aériennes (mg.kg⁻¹)**Average contents of aluminum of the aerial part (mg.kg⁻¹)**

Cultivars	
Kober 5BB	4092,666 a*
RR 101-14	2402,066 b
1045 P	2234,266 b
Gravesac	2004,733 b
IAC 572	1308,866 b

*Pas de différence significative pour une même lettre selon le test de Tukey à 5% de probabilité.

des parties aériennes reflètent la faible disponibilité naturelle du sol du 'Cerrado' utilisé pour le substrat.

Cuivre: seul l'effet porte-greffe apparaît, 'Kober 5BB' ayant exprimé les plus fortes teneurs alors qu'au contraire '1045 P' est le moins pourvu (tableau XVI). Les besoins de la vigne mesurés au niveau de la feuille, sont de 20 ppm (SOUSA, 1996) avec des variations de 5 à 20 ppm dans la Matière Sèche selon les différentes parties de la plante.

Fer: un effet porte-greffes et niveaux de concentration en Al apparaît avec une interaction entre les deux facteurs. Le test des moyennes sur les porte-greffes montre des différences seulement au niveau 0,0 % d'Al (tableau XVII). Le cultivar 'Kober 5BB' est le plus riche à ce niveau de concentration comme on a déjà pu le noter au niveau racinaire. Cette aptitude est intéressante, notamment en sols calcaires où la carence induite en Fe par des teneurs élevées de Ca est fréquente. En sols acides à forte disponibilité, cette caractéristique présente au contraire un intérêt secondaire (FAQUIN, 1994).

Zinc: les différences n'apparaissent qu'entre niveaux de concentration en Al. Les plus forts niveaux sont responsables des valeurs les plus élevées comme on l'a d'ailleurs noté dans le cas des racines (figure 3). Cela peut résulter d'un phénomène de compétition lié à l'enrichissement du substrat en CaCO₃ pour neutraliser l'Al.

Manganèse : un effet porte-greffes et niveaux de saturation en Al avec interaction des deux facteurs est mis en évidence (tableau XVIII). La teneur de tous les porte-greffes s'accroît nettement avec la concentration du substrat en Al. Le cultivar 'IAC 572' présente cependant les plus faibles teneurs aux niveaux de concentration en Al les plus élevés alors que l'effet inverse apparaît pour 'Kober 5BB'. Le déséquilibre des teneurs observées entre partie aérienne et souterraine peut entraîner un phénomène de phytotoxicité préjudiciable à la croissance.

Le pH est un des principaux facteurs conditionnant la disponibilité du Mn dans le sol. Celle-ci étant élevée en sol acide grâce à une plus grande solubilité, le risque de phytotoxicité est plus grand. Une perte de 10 % de Matière

Sèche peut intervenir avec des teneurs toxiques variant de 100 et 7000 ppm selon les espèces.

V- INCIDENCE SUR LES TENEURS AÉRIENNE ET SOUTERRAINE EN ALUMINIUM

au niveau racinaire: les teneurs varient en fonction du porte-greffe et du niveau de saturation en Al avec une interaction entre les deux facteurs. Le cultivar 'IAC 572' présente les plus fortes teneurs à tous les niveaux de concentration en Al du sol (tableau XIX). Les porte-greffes 'Gravesac' et 'Kober 5BB' voient leurs teneurs s'accroître avec les niveaux de m alors que les autres n'affichent pas de relation avec ce critère. au niveau aérien: les teneurs varient seulement en fonction du facteur porte-greffe et sont dans tous les cas inférieures à celles mesurées dans le système racinaire, 'Kober 5BB' exprimant les plus forts résultats (tableau XX). Des essais à pH 6,7 et 4,8 ont déjà démontré l'aptitude de ce cultivar à accumuler trois fois plus d'Al dans les feuilles lorsque le pH est faible (HILMELRICK, 1991).

La libération d'Al dans la phase liquide du sol est directement liée à un processus d'acidification. En plus de son effet toxique sur la plante, la présence d'Al entraîne une réduction de la disponibilité du P et des carences induites par compétition pour Ca, Mg et K ainsi que pour les oligo-éléments (FAQUIN, 1994). Il en résulte également une diminution de croissance du système racinaire avec grossissement des racines qui réduit la capacité d'absorption de l'eau et donc des nutriments. La croissance aérienne est perturbée et la sensibilité à la sécheresse accrue. Une grande variabilité des formes d'Al apparaît selon le niveau de pH du milieu et le plus grand risque de phytotoxicité pour le système racinaire se situe à pH 4,5 (MARSCHNER, 1995).

L'adaptation des plantes aux sols acides à forte concentration en Al découle de mécanismes de résistance des tissus à la toxicité ou de mécanismes de contournement permettant d'éviter l'absorption d'Al. Le système racinaire est en général plus chargé en Al que les parties aériennes, les plantes ayant pu utiliser certains mécanismes de protection pour éviter son transfert, voire même son absorption racinaire. C'est notamment le cas des cultivars 'IAC 572' et 'Gravesac' qui ont respectivement accumulé 13.147,00 et 15.065,00 mg.kg⁻¹ d'Al dans le système racinaire au niveau de concentration le plus élevé du sol, contre seulement 1.308,866 et 2.004,733 mg.kg⁻¹ dans la partie aérienne (tableau XIX et XX). Ces résultats montrent une réduction respective de 90 et 87 % dans la transmission d'Al vers les parties aériennes qui leur confère une plus grande adaptabilité aux sols acides riches en Aluminium. En revanche, 'Kober 5BB' a accumulé 10.792,000 mg.kg⁻¹ d'Al dans le système racinaire et 4.092,666 mg.kg⁻¹ dans la partie aérienne, ce qui correspond seulement à 62 % de réduction dans la transmission

d'Al vers les parties aériennes. Il est important de remarquer aussi, que les analyses des nutriments réalisées dans cet étude ont été faites sur les parties aériennes des porte-greffes, à partir de racines cultivés en pots, et s'agissait effectivement d'une première approche sur le comportement des différents porte-greffe vis-à-vis de l'aluminium. Évidemment, des nouvelles études sont à poursuivre, dans le but de vérifier les interactions entre porte-greffe/cépage, notamment pour les variétés porte-greffe mieux adaptées à la présence d'Al au sol.

CONCLUSION

La méthodologie utilisée a permis de classer les différents porte-greffes étudiés selon leur niveau de tolérance à l'Aluminium. Les cultivars 'IAC 572' et 'Gravesac' sont les mieux adaptés à la phytotoxicité qui en découle et expriment les meilleures croisances tant au niveau souterrain qu'aérien. Cela semble résulter de leur capacité à réduire la transmission d'Al vers les parties aériennes. Au contraire, 'Kober 5BB' dont la capacité de réduction est plus faible s'avère le moins adapté. La réduction de la saturation en Al par addition de CaCO₃ et MgCO₃, induit une réduction de l'absorption de certains cations par inhibition compétitive.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FAQUIN V., 1994. *Nutrição mineral de plantas*, Lavras: ESAL:FAEPE, 227 p.
- FRÁGUAS J. C., AMARAL F. de A.L. do, BRAGA J.M., CARDOSO A.A., 1989. Tolerância de porta-enxertos de videira (*Vitis* spp) à saturação de alumínio. *Rev. Ceres*, **36**, n°203, Viçosa, pp. 13-26.
- FRÁGUAS J.C., 1993. Efeito do alumínio no comprimento de raízes e na absorção de fósforo e cálcio, em porta-enxertos de videira. *Rev. Brasileira Ciências do Solo*, **17**, 251-255.
- FRÁGUAS J.C., TERSARIOL A.L., 1993. Comportamento de porta-enxertos de videira em relação a níveis de saturação de alumínio no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **28**, n°8, Brasília, 897-906.
- FRÁGUAS J.C., 1999. Tolerância de porta-enxertos de videira ao alumínio do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **34**, n°7, Brasília, 1193-1200.
- HIMELRICK D.G., 1991. Growth and nutritional responses on nine grape cultivars to low soil pH. *Hortscience*, **6**, n° 3, Alexandria, 269-271.
- HIROCE R., GALLO J.R. et RIBAS W.C., 1970. Efeito de dez diferentes cavalos de videira na composição foliar da copa do cultivar Seibel 2. *Bragantia*, **29**, Campinas, 21-24.
- HOWELER R.H., 1991. Identifying plants adaptable to low pH conditions. In: WRIGHT R.J., BALIGAR V.C., MURRMANN R.P. (Eds.): *Plant-soil interactions at low pH*, Kluwer Academic, Netherlands, 885-904.
- KOCHIAN L.V., 1995. Cellular mechanisms of aluminum resistance in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **46**, pp. 237-260.
- MARSCHNER, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2^e éd. San Diego, Academic Press, 889 p.
- MALAVOLTA E., VITTI G.C., OLIVEIRA S.A. de, 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas. *Princípios e aplicações*, 2^e éd., Potafos, Piracicaba, SP, 319 p.
- NOGUEIRA, D.J.P.; FRÁGUAS, J.C., 1984. Nutrição da videira, in: *Informe Agropecuário*, **10**, n°17, Belo Horizonte, 29-47.
- POUGET R., 1987. Méthode de classification des variétés de porte-greffes de la vigne en fonction de leurs capacités d'absorption du potassium, du calcium et du magnésium. In: *Symp. Int. Physiol. vigne*, Annales 3, Office International de la vigne et du vin, Paris, pp. 265-270.
- SOUSA, J. S. I., 1996. *Uvas para o Brasil*, FEALQ, Piracicaba
- TENNANT, D., 1975. A teste of modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, **63**, n° 3, Oxford, 995-1001.
- VIANA, A.P., 1997. Avaliação da tolerância de porta-enxertos de videira a condições de salinidade em solução nutritiva, UFV, Viçosa, 58 p. (Tese de Mestrado).

Manuscrit reçu le 26 juin 2003 ; accepté pour publication, après modifications le 2 décembre 2003