ÉTUDE COMPARATIVE DE L'ABSORPTION DU STRONTIUM ET DU CALCIUM CHEZ LE RIZ IRRIGUÉ EN FONCTION DES TENEURS ET DES RAPPORTS Sr/Ca DE LA SOLUTION NUTRITIVE

C. MYTTENAERE et M. MASSET *

(Manuscrit reçu le 9 février 1971)

RÉSUMÉ

Du point de vue physiologique, il était intéressant d'étudier l'importance et le sens de la discrimination entre le strontium et le calcium en fonction des deux variables : rapport Sr/Ca et dose totale Sr + Ca du milieu nutritif.

L'essai factoriel réalisé en aquiculture pure a montré que le rapport observé était fonction de ces deux variables. Au cours de la montée, la sève minérale s'appauvrit progressivement en strontium : les organes conducteurs sont relativement plus riches en strontium que les feuilles et les grains. Les rapports observés obtenus pour les caryopses sont nettement inférieurs à l'unité, ce qui traduit une richesse relative plus grande en calcium.

ABSTRACT

From a physiological point of view, a study has been made of how and to what extent strontium and calcium are discriminated as a function of the two variables, the strontium to calcium ratio and the total amount of strontium and calcium in the nutrient medium.

A factorial study in water culture condition has shown that the observed ratio was a function of the both variables. As it flows up the mineral sap gets progressively poorer in strontium and the conducting organs are relatively rich in strontium than the leaves and grains are. The observed ratios obtained for the caryopse are well lower than 1, which demonstrates a relatively larger amount of calcium.

INTRODUCTION

Lors de l'absorption des éléments calcium et strontium par les végétaux, on observe une certaine discrimination (RUSSELL, 1966; SIDRAK *et alii*, 1964).

Le calcul du « rapport observé » a permis d'estimer l'importance de ce processus (COMAR, RUSSELL, WASSERMAN, 1957). Dans le cadre du transfert du radiostrontium dans la chaîne alimentaire, les valeurs obtenues entre substrat et plantes sont de moindre importance que celles observées pour les maillons

* Division de Biologie, C.C.R. Euratom, Ispra (Italie). Contribution N° 681.

suivants, mais il n'en est pas moins intéressant d'aborder le problème du point de vue physiologique.

Les mécanismes responsables de cette discrimination ne sont pas connus avec précision; plusieurs hypothèses ont été émises :

- phénomène passif : les sites d'échange intéressés par le transport seraient à l'origine de la discrimination observée (EMMERT, 1964; RINGOET, DE ZEEUW, 1968);
- phénomène actif : l'emploi de produits inhibant tout métabolisme (DPN) modifierait le rapport des éléments transportés vers les parties aériennes (EMMERT, 1969).

Les sites de discrimination ne sont pas connus avec certitude; les conclusions ont été basées sur des autoradiographies de plants marqués en radiocalcium (RINGOET, DE ZEEUW, 1968).

Il est possible que, étant donné la concentration différente dans le milieu, différents mécanismes soient responsables de l'absorption et du transport de ces éléments. Une telle hypothèse semble confirmée par l'étude de l'absorption et de la localisation du strontium et du calcium présents en quantités égales dans le milieu nutritif (MYTTENAERE, 1964).

Il a déjà été montré que le « rapport observé » calculé pour les différents organes de la plante varie selon le rapport Sr/Ca de la solution nutritive (MYTTENAERE, 1963; SQUIRE, MITCHELL, 1966). Toutefois, avant toute extrapolation, il était nécessaire également d'étudier la discrimination en fonction des quantités pondérales.

Le présent travail a pour but d'étudier l'absorption du strontium et du calcium par le riz irrigué cultivé en solutions nutritives dont les variables sont à la fois le rapport Sr/Ca et la teneur totale en (Sr + Ca).

I. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES ET MÉTHODES D'ANALYSE

Les graines de riz (*Oryza Sativa* var. ARBORIO) furent mises à germer en sable pur stérilisé et les plantules, repiquées sur les différents milieux nutritifs (aqui-culture pure — milieu nutritif équilibré). La solution nutritive de base présentait les caractéristiques faisant l'objet du tableau I.

Cinq milliéquivalents de (Ca + Sr), et par conséquent de NO_3 (calcium et strontium apportés sous forme de nitrates), furent substitués par 5 milliéquiva-

TABLEAU I
CARACTÉRISTIQUES DE LA SOLUTION NUTRITIVE

ions : éléments majeurs	NO_3^-	SO_4^{--}	PO_4^{---}	K^+	$(\text{Ca} + \text{Sr})^{++}$	Mg^{++}
meq/l :	15	4	3	6	10	4
Oligoéléments : H_3BO_3 : 2,86; MnCl_2 , $4\text{H}_2\text{O}$: 1,81; ZnSO_4 , $7\text{H}_2\text{O}$: 0,22; CuSO_4 , $5\text{H}_2\text{O}$: 0,08; MoO_3 : 0,02; EDTA Na Fe : 30.						

lents de NH_4^+ et NO_3^- (azote apporté sous forme de NH_4NO_3); lorsque les cinq milliéquivalents de $(\text{Ca} + \text{Sr})$ résiduels ne furent utilisés que partiellement, la différence du nombre de cations et d'anions fut apportée sous forme de NH_4NO_3 . Cette façon de procéder a permis de garder toutes conditions égales (rapport anions/cations, somme des anions et cations, acidité...) sans faire varier d'une façon appréciable le rapport NH_4/NO_3 des solutions nutritives.

Pour les trois doses totales de $(\text{Ca} + \text{Sr})$ étudiées, différents rapports Sr/Ca furent envisagés (doses : 0,5; 2,5; 5 meq/l; rapports Sr/Ca : 0/100; 1/99; 5/95; 10/90; 20/80).

Le strontium stable (traces apportées par les sels utilisés et le traceur ou par le strontium stable apporté) fut marqué à l'aide de ^{85}Sr de très haute activité spécifique (2 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ de solution nutritive). Les solutions nutritives furent renouvelées chaque semaine et le pH, contrôlé journallement. Après préparation, les teneurs des solutions nutritives en strontium et calcium stables furent contrôlées par spectrométrie par absorption atomique.

Les 60 vases (15×4 répétitions), que comprenait l'expérience, furent répartis en quatre blocs de 15 traitements. En fin de culture, les plantes furent récoltées et séparées en racines, différentes parties du chaume, feuilles, panicules vides, balles et caryopses. La détermination du ^{85}Sr a été faite par spectrométrie gamma, le calcium stable, par spectrophotométrie par absorption atomique après reprise des cendres par l'acide chlorhydrique 2N. Le rendement de cette extraction a été calculé sur la base de l'activité en ^{85}Sr des résidus d'extraction.

L'étude comparative des activités spécifiques des échantillons végétaux et des solutions nutritives a montré que le radioélément a parfaitement marqué le Sr stable.

La discrimination entre le strontium et le calcium lors du transfert solution nutritive-plante a dès lors été estimée en calculant la valeur des « rapports observés » de la façon suivante :

$$\text{RO} = \frac{{}^{85}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ organe végétal}}{{}^{85}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ solution nutritive}}$$

II. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse statistique des rendements en graines récoltées en fin de culture a mis en évidence l'influence significative ($P = 0,01$) de la dose totale ($\text{Sr} + \text{Ca}$), la différence observée étant la plus marquée entre les traitements 0,5 et 2,5 meq/l. Ce résultat peut être mis en relation avec les teneurs en calcium des végétaux qui croissent avec la dose totale de la solution nutritive.

Dans nos conditions expérimentales les variations du rapport Sr/Ca n'ont par contre aucun effet significatif sur la production et les résultats observés ne peuvent donc être imputés à des phénomènes de toxicité.

Le tableau II donne les rapports observés moyens obtenus pour les différents organes de la plante de riz. Plus élevé que l'unité, ce rapport traduit une rétention préférentielle du strontium, inférieur, une richesse relative plus grande en calcium.

TABLEAU II
RAPPORTS OBSERVÉS MOYENS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS
ORGANES DU RIZ IRRIGUÉ
(Moyenne de 15 traitements)

<i>Racines</i>	1,62	<i>Feuilles</i>	0,75
		base	0,71
<i>Chaumes</i>			0,63
base	0,99		0,56
	0,87		
	0,83	pavillon	0,55
	0,78		
sommet	0,66	<i>Panicules égrenées</i>	0,66
		<i>Caryopses</i>	0,59
		<i>Balles</i>	0,56

L'examen de ce tableau permet de déduire les conclusions suivantes :

- Le « rapport observé » varie fortement selon l'organe : il est plus élevé que l'unité pour les racines (rétention préférentielle du strontium) et inférieur à 1 pour les différents organes de la partie aérienne (rétention préférentielle du calcium).
- Le rapport observé décroît de la base du chaume vers le dernier entre-nœud. Lors de la montée, la sève minérale s'appauvrit progressivement en strontium du fait de la fixation plus intense de cet ion.
- Les organes conducteurs pourraient donc être comparés à une colonne échangeuse d'ions retenant plus de strontium que de calcium et qui se sature progressivement du fait du passage d'un très grand volume de sève (RUSSELL, 1966).
- Le « rapport observé » des feuilles est toujours plus faible que celui des entre-nœuds correspondants. Ce résultat peut s'expliquer par l'hypothèse précédente.
- Les balles présentent le même « rapport observé » que les plus jeunes feuilles tandis que les panicules égrenées présentent la même valeur que le sommet du chaume.
- Le « rapport observé » des caryopses est compris entre celui des panicules égrenées et des balles ; il est nettement inférieur à l'unité ce qui traduit une plus grande richesse relative en calcium.

Les variations du rapport observé en fonction des rapports Sr/Ca et des doses totales sont données par les résultats du tableau III.

Evolution du « rapport observé » en fonction des rapports Sr/Ca

Pour une dose totale faible (0,5 meq/l), la valeur du « rapport observé » moyen des racines diminue lorsque le rapport Sr/Ca de la solution augmente. Plus la concentration en strontium stable de la solution est grande, moins il est retenu au niveau radiculaire. Cette conclusion n'est que partiellement applicable pour

2, PETITE PLACE — 78 VERSAILLES

Tél. 951-29-30

FICHE D'INFORMATION

LECTEUR DE DOSIMETRES THERMOLUMINESCENTS

APPLICATIONS : DOSIMETRIE MEDICALE ET RADIOPROTECTION
de 0,05 mR à $2 \cdot 10^6$ R

DESIGNATION	LECTEUR DE DOSIMETRES THERMOLUMINESCENTS 7 300 - TELEDYNE ISOTOPES.
FONCTIONNEMENT	<ul style="list-style-type: none"> • L'emploi des dosimètres thermoluminescents à base de Teflon devient simple et automatique. • Le lecteur inclue pour la première fois tous les dispositifs de traitement de dosimètres permettant leur réemploi. • Une seule opération pour un type de dosimètre : <ul style="list-style-type: none"> - Insertion du dosimètre - Lecture de la dose en rads ou millirads 20 secondes plus tard.
SPECIFICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • L'appareil contient sa propre source de calibration. • L'étalonnage est vérifié par une lecture en 2 secondes. • Affichage sur 6 décades numériques à chiffres lumineux. • Visualisation des étapes de fonctionnement avec verrouillage de toutes les opérations non autorisées. • Sortie sur imprimante calculatrice.
APPLICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • Irradiations médicales supérieures à 100 Rads Utilisation de Dosimètres de dimensions réduites - de faible prix - utilisables une seule fois. • Dosimétrie inférieure à 100 Rads Réutilisation possible de nombreuses fois sans qu'aucun traitement ne soit nécessaire. <ul style="list-style-type: none"> • Mesure directe : <ul style="list-style-type: none"> - avec disques D-LiF-7-0,4 de 5 mRad à 100 000 Rad - avec disques S-D-LiF-7-0,5 de 50 mRad à 100 000 Rad - avec batonnets MR-LiF-de-0,1 Rad à 100 000 Rad • Mesure avec calibration : <ul style="list-style-type: none"> - avec disques D-CaSO₄ (DY) 0,4 et D-LB 0,4 depuis 0,05 mRad et D-LB 0,4 jusqu'à 2×10^6 Rad.

les doses 2,5 et 5 meq/l; en effet, pour ces milieux, le « rapport observé » passe par un minimum et augmente à nouveau pour les rapports Sr/Ca plus élevés.

Ces résultats montrent le danger d'extrapoler les conclusions à des milieux nutritifs divers et souligne l'intérêt d'une telle étude en milieu carencé.

La comparaison des résultats obtenus pour une légumineuse (MYTTENAERE, MASSET, 1970) à ceux repris dans cette étude souligne également la réponse

TABLEAU III

RAPPORTS OBSERVÉS OBTENUS POUR LES DIVERS ORGANES EN FONCTION DU RAPPORT Sr/Ca ET DE LA DOSE Sr + Ca DE LA SOLUTION NUTRITIVE

Rapports Sr/Ca	Organes	(Sr + Ca) dans la solution nutritive (meq/l)			
		0,5	2,5	5,0	Moyennes
0/100	R	2,90	1,93	1,37	2,06
	CH	1,15	0,90	1,10	1,05
	FE	0,43	0,66	0,78	0,62
	CAR	0,46	0,50	0,64	0,53
1/99	R	2,34	1,59	1,13	1,68
	CH	1,13	0,82	0,77	0,90
	FE	0,66	0,71	0,69	0,68
	CAR	0,86	0,58	0,56	0,66
5/95	R	1,46	1,41	1,24	1,37
	CH	0,90	0,72	0,66	0,76
	FE	0,76	0,76	0,61	0,71
	CAR	0,77	0,60	0,47	0,61
10/90	R	1,31	1,56	1,26	1,37
	CH	0,81	0,62	0,58	0,67
	FE	0,68	0,60	0,61	0,63
	CAR	0,75	0,55	0,45	0,58
20/80	R	1,06	2,13	1,65	1,61
	CH	0,78	0,65	0,53	0,65
	FE	0,66	0,67	0,50	0,61
	CAR	0,71	0,58	0,46	0,58
Moyennes	R	1,81	1,72	1,33	1,62
	CH	0,95	0,74	0,72	0,80
	FE	0,63	0,68	0,63	0,64
	CAR	0,71	0,56	0,51	0,59

R : racines; CH : chaumes; FE : feuilles; CAR : caryopes.

différente obtenue pour une plante plus riche en calcium. Dans ce cas en effet, la rétention préférentielle du strontium en milieu de rapport Sr/Ca élevé est nettement moins marquée.

Le rapport observé des chaumes décroît également en fonction de l'augmentation du rapport Sr/Ca tandis que les valeurs moyennes obtenues pour les feuilles évoluent en sens opposé.

Évolution du « rapport observé » en fonction des doses Sr + Ca

Le « rapport observé » moyen des racines et tiges diminue avec l'augmentation de la dose totale Ca + Sr. La rétention préférentielle du strontium n'est donc pas seulement fonction du rapport Sr/Ca mais aussi des quantités pondérales des deux éléments étudiés. A nouveau, on observe une évolution différente dans le cas de rapports Sr/Ca peu ou très élevés.

L'examen de la réponse du végétal dans les trois milieux sans strontium volontairement introduit présente un certain intérêt. Dans ces cas, les résultats obtenus ne sont fonction que de la variation de la teneur en calcium de la solution nutritive; en effet il ne fut pas permis d'y déceler le strontium stable par spectrophotométrie par absorption atomique.

L'apport de quantités croissantes de calcium (de 0,5 à 5 meq/l) modifie les rapports observés calculés pour les différents organes : le « rapport observé » diminue pour les racines et croît pour les feuilles et le caryopse. Il est donc permis de penser que certains sites de fixation du strontium peuvent être occupés par le calcium, ce qui permettrait une translocation relativement plus importante du strontium.

Conclusion

L'ensemble de ces résultats montre que la discrimination entre le strontium et le calcium observée lors du transfert solution nutritive-plante est fonction non seulement du rapport Sr/Ca de la solution nutritive mais aussi des quantités pondérales présentes. La comparaison des résultats repris ci-dessus à ceux d'une étude précédente montre de plus que l'intensité des phénomènes est fonction de l'espèce végétale,

Les valeurs moyennes obtenues pour la partie comestible (caryopses) soulignent une nette discrimination en faveur du calcium; le phénomène inverse étant observé pour les racines.

Les organes conducteurs de la plante présentent la propriété de fixer relativement plus le strontium que le calcium au cours du transport de la sève minérale.

Nos études ultérieures tenteront de localiser les « sites de discrimination » en fonction des conditions expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

- COMAR C.L., RUSSEL R.S., WASSERMAN R.H. 1957. Strontium-calcium movement from soil to man. *Science*, 1957, 126, 485.
- EMMERT F.H., 1964. Water utilization and calcium-strontium uptake in *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia Plantarum*, 1964, 17, 746-50.
- EMMERT F.H., 1969. Retention and passage of calcium and strontium in stems of *Phaseolus vulgaris* as mediated by xylem stream flow rate and dinitrophenol. *Physiologia Plantarum*, 1969, 22, 246-52.
- MYTTENAERE C., 1963. Influence du rapport strontium-calcium sur la croissance et l'absorption du strontium et du calcium chez *Pisum sativum* L. *Ann. Phys. Végét. U.L.B.*, 1963, 8, 47-59.
- MYTTENAERE C., 1964. Influence du rapport strontium-calcium sur la localisation du strontium et du calcium chez *Pisum sativum*, *Physiologia Plantarum*, 1964, 17, 814-827.
- MYTTENAERE C. et MASSET M., 1970. Etude de la discrimination strontium-calcium chez le haricot en fonction du rapport et des teneurs respectives en Sr et Ca de la solution nutritive. *Physiologia Plantarum*, 1971, 24, 14-1.

- RINGOET A., DE ZEEUW D., 1968. Discrimination between calcium and strontium in oat plants.
I. Influence of the growth stage of the plants and of the osmotic potential of the root medium. *Z. Pflanzengraphysiol.*, 1968, 59, 238-48.
- RINGOET A., DE ZEEUW D., 1968. Discrimination between calcium and strontium in oat plants.
II. Relation to the differential chemical binding of both ions.
Z. Pflanzengraphysiol., 1968, 59, 249-57.
- RUSSELL R.S. (Ed), 1966. Radioactivity and human diet. Pergamon Press.
- SIDRAK G.H., MIDDLETON L.J., NEWBOULD P., SQUIRE H.M., 1964. Effect of nutrient supply on the discrimination between strontium and calcium in plants.
Agric. Res. Counc. Radiob. Lab., Ann. Rpt. 1963-64, ARCRL, 12, pp. 64-5.
- SQUIRE H.M., MITCHELL W.A., 1966. The effect of variations in the ratio strontium to calcium supplied to plants in the relative uptake of these ions from solution.
Agric. Res. Counc. Radiob. Lab., Ann. Report. 1965-66, ARCRL. 16, 43-44.