

**ABSORPTION DE RADIOELEMENTS DU SOL PAR DIVERS LEGUMES
CULTIVES DANS LES CONDITIONS DE LA PRATIQUE (1961).**

Sommaire. - Divers légumes ont été cultivés dans 4 types de sols différents, ayant reçu ou recevant périodiquement du strontium-90 ou du césium-137, à doses relativement fortes, de manière à faciliter la mesure de la fraction de ces radioéléments absorbée par les légumes. En sol sableux, les plantes entières ont absorbé 2 à 3 pour cent de Sr et 3 à 9 pour mille de Cs environ, en sol argileux, 1 à 6 pour mille de Sr et 0,2 à 2 pour mille de Cs ; mais Cs migre relativement plus que Sr dans les fruits ou les organes de réserve. Les expériences ont confirmé que le quotient des rapports $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ dans les légumes et dans la couche labourée est relativement peu variable ; on conserverait une certaine marge de sécurité en adoptant pour ce rapport une valeur un peu supérieure à l'unité (à préciser après homogénéisation de la couche labourée). Etant donné que sous climat aride, il faut appliquer

.../...

**ABSORPTION OF RADIOELEMENTS FROM THE SOIL BY VARIOUS
VEGETABLES GROWN UNDER NORMAL CONDITION OF CULTIVATION
(1961).**

Summary. - Various vegetables were cultivated in 4 different types of soil, having received, or receiving periodically, strontium-90 or caesium-137 in fairly strong doses, in order to facilitate the measurement of the fraction of these radioelements taken up by the vegetables. In sandy soil, whole plants absorbed 2 to 3 per cent of Sr and 3 to 9 parts per thousand of Ca approximately ; in clay soils, 1 to 6 parts per thousand of Sr and 0,2 to 2 parts per thousand of Cs ; Cs, however, migrates relatively more than Sr in fruits or storage organs. The experiments confirmed that the quotient of the ratios $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ in the vegetables and in the ploughed layer varies comparatively slightly ; there would be a certain safety margin in assuming this ratio to be slightly above unity (to be confirmed after homogenising the ploughed layer).

.../...

plusieurs dizaines de litres d'eau d'irrigation (jusqu'à 50) pour produire 1 kg de légumes (plantes entières fraîches), et qu'en outre les radioéléments des résidus de récolte retournent au sol, on peut prévoir qu'à la limite d'accumulation, 1 kg de certains légumes pourra contenir autant de chaque radioélément que plusieurs dizaines de litres d'eau d'irrigation.

In view of the fact that in an arid climate it is necessary to apply several tens of litres of irrigation water (up to 50) in order to produce 1 kg of vegetables (fresh whole plants) and that furthermore, the radioelements of the residue from the crop harvest return to the soil, it can be expected that the limit of accumulation 1 kg of certain vegetables will contain as much of each radioelement as several tens of litres of irrigation water.

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**ABSORPTION DE RADIOELEMENTS DU SOL
PAR DIVERS LEGUMES CULTIVES
DANS LES CONDITIONS DE LA PRATIQUE**

par

l'Institut National de la Recherche Agronomique

et

*le Service d'Hygiène Atomique et de Radiopathologie
du Commissariat à l'Énergie Atomique*

Rapport CEA N° 1860

**CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)**

- Rapport C.E.A. n° 1860 -

Service d'Hygiène Atomique et de Radiopathologie

**ABSORPTION DE RADIOELEMENTS DU SOL PAR DIVERS LEGUMES
CULTIVES DANS LES CONDITIONS DE LA PRATIQUE**

par

l'Institut National de la Recherche Agronomique

et

**le Service d'Hygiène Atomique et de Radiopathologie
du Commissariat à l'Energie Atomique**

- 1961 -

**ABSORPTION DE RADIOELEMENTS DU SOL PAR DIVERS LEGUMES
CULTIVES DANS LES CONDITIONS DE LA PRATIQUE**

Expériences réalisées en vertu d'un contrat de Recher-
ches entre le Commissariat à l'Energie Atomique et l'Institut
National de la Recherche Agronomique, par :

Station Agronomique d'AVIGNON	Mme HUGUET
Station Agronomique de PONT DE LA MAYE (BORDEAUX)	M. DELAS M. DELMAS Mme DEMIAS
Station Centrale d'Oenologie de NARBONNE...	M. FLANZY M. BENARD M. PUYAUBERT
Station Agronomique de TOULOUSE	M. FIORAMONTI M. MARTY
Station Centrale d'Agronomie, VERSAILLES....	M. BARBIER M. LE BLAYE
Service d'Hygiène Atomique et de Radio- pathologie C.E.A.	M. MICHON

PLAN DU MEMOIRE

	Page
I. BUT DES EXPERIENCES	1
II. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	3
III. TECHNIQUE DE DOSAGE DES RADIOELEMENTS ET EXPRESSION DES RESULTATS	6
IV. RESULTATS	11
A. Pomme de terre	11
B. Tomate	15
C. Laitue	19
D. Haricot vert	22
V. CONCLUSIONS GENERALES	24

I. - BUT DES EXPERIENCES

Il est pratiquement très difficile d'éviter la présence de quelques traces de radioéléments dans les effluents d'installations liées à la production d'énergie atomique. Des rivières utilisables pour l'irrigation des cultures peuvent se trouver ainsi légèrement contaminées. Le Service d'Hygiène Atomique et de Radiopathologie du C.E.A. a demandé à l'Institut National de la Recherche Agronomique d'entreprendre des expériences culturales pour apprécier dans quelle mesure ces radioéléments sont absorbés par les plantes alimentaires et fourragères.

Parmi les produits de fission de l'uranium, des radioéléments à vie longue, comme le strontium-90 (période 28 ans) et le césium-137 (période 30 ans) sont retenus par les échangeurs de cations des sols, et s'accumuleront donc dans les couches superficielles du sol au fur et à mesure des irrigations successives. Dans l'hypothèse où ces radioéléments seraient apportés indéfiniment selon un certain rythme, il importe de prévoir la marche et la limite de leur augmentation dans le sol et dans les denrées récoltées. Le but de l'étude entreprise est de s'assurer que le rythme

prévisible de contamination des rivières par les effluents est suffisamment lent, pour que le seuil de toxicité ne soit jamais atteint dans les denrées alimentaires (du fait de ces effluents).

Il est relativement facile de prévoir la marche et la limite de l'accumulation de chacun de ces radioéléments dans le sol en fonction du rythme des apports, si ce n'est quelque incertitude en ce qui concerne leur lente infiltration en sous-sol. Quant à l'augmentation des radioéléments dans les récoltes au fur et à mesure de leur accumulation dans le sol, il est indispensable, pour la prévoir, d'entreprendre des expériences culturales sur sols en place, dans les conditions de la pratique; en effet d'une façon générale, les résultats des expériences en vases ne peuvent pas être transposés quantitativement aux cultures normales.

Les expériences entreprises ont consisté à appliquer à des sols de nature variée une dose relativement forte (25 microcuries par m²) du radioélément étudié (⁹⁰Sr ou ¹³⁷Cs, séparément), sans entraîneur, donc de masse négligeable par rapport à celle de l'isotope stable préexistant dans le sol, et à mesurer la fraction de chaque radioélément prélevée par différentes plantes cultivées, en particulier par leurs parties comestibles.

Les résultats seraient d'ailleurs utilisables quelles que soient l'origine et l'importance de la contamination du sol par les mêmes radioéléments, notamment en cas de contamination accidentelle.

Pour déterminer le taux de prélèvement d'un radioélément du sol par les cultures, on ne saurait se contenter de doser le radioélément actuellement présent dans le sol et

dans les récoltes en provenance des retombées radioactives, étant donné que la quantité déposée sur les plantes et plus ou moins absorbée par le feuillage peut être encore aujourd'hui relativement grande par rapport à celle prélevée sur le sol par les racines.

II. - DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Cinq expériences ont été réalisées :

AVIGNON	- légumes	(depuis 1957)
BORDEAUX	- légumes	(depuis 1959)
NARBONNE	- vigne	(parcelle préparée en 1959; épandage des radioéléments au début de 1960)
TOULOUSE	- légumes	(depuis 1959)
VERSAILLES	- légumes et prairie permanente	(depuis 1959; la parcelle en prairie n'a reçu les radioéléments qu'en 1960)

Voici la composition des sols de ces cinq stations.

TABLEAU I - COMPOSITION DES SOLS

	Couche analysée cm	Argile 2 μ p.100	Matière organique p.100	Calcaire p.100	pH	Millieq p.Kg		Poids de terre fine, couche labourée, tonnes par ha
						Ca échangeable	Capacité d'échange	
AVIGNON	0-20	17,7	4,2	34	8,2	-	194	2.200
	20-40	15						
BORDEAUX	0-20	1,3	4,9	0	7,9	36	43	2.500
	20-30				8,6	53,5	63	
NARBONNE	0-40	13,5	0,94	24,8	8,2		90	
TOULOUSE	0-20	26,5	4,1	0	6,2	396	>450	3.800
	30-50	31,6	2,4	0	6,1			
VERSAILLES	0-28	15,0	2,0	0	5,75	87		3.650

A BORDEAUX, TOULOUSE et VERSAILLES, le terrain, solidement clôturé, a été divisé en petites parcelles de $4m^2$ à $6,25m^2$ ($2,25m^2$ pour la prairie à VERSAILLES) séparées par des allées. Ce terrain fait partie du domaine de chaque Station. Certaines parcelles servent de témoin (retombées, radioactivité du potassium). D'autres ont reçu au début de l'expérience une application unique du radioélément étudié (25 microcuries par m^2) par arrosage du sol nu au moyen d'une solution étalonnée du radioélément. A d'autres, on a appliqué périodiquement une dose plus petite par aspersion uniforme en cours de végétation, en principe chaque mois, soit 10 microcuries par m^2 et par an. Chaque traitement comporte 3 répétitions, ce qui fait 15 parcelles réparties au hasard :

3 témoins,
3 apports uniques ^{90}Sr ,
3 apports périodiques ^{90}Sr ,
3 apports uniques ^{137}Cs ,
3 apports périodiques ^{137}Cs .

Sur la prairie permanente de VERSAILLES, les radioéléments n'ont été appliqués qu'après installation définitive du tapis végétal, et n'ont donc pas été mélangés au sol par labour. Outre l'apport initial unique et les apports périodiques, on a combiné ces deux traitements sur d'autres parcelles.

A AVIGNON, les radioéléments sont seulement apportés périodiquement selon trois modes d'arrosage (irrigation "à la raie", irrigation souterraine, aspersion).

L'expérience sur vigne, conduite par la Station Centrale d'Oenologie de NARBONNE, a été installée dans un vignoble préexistant du domaine expérimental de Pech Rouge, en bordure de mer, entre la côte et une ligne de collines. La parcelle a été clôturée par un mur solide, et entourée de fossés de protection contre le ruissellement des eaux descendant des collines pendant les orages. Cette préparation, qui a demandé 1 an, était indispensable.

Cette expérience sur vigne comprend 5 parcelles :

Témoin,
Césium (apport initial unique),
Témoin,
Strontium (apport initial unique),
Témoin.

Chaque parcelle contient 6 rangées de 24 ceps.
Seules les deux rangées médianes seront analysées, étant donné

que les racines de chaque cep peuvent s'étaler sur les deux rangées voisines. Chaque radioélément a été réparti uniformément sur toute la surface d'une parcelle.

Les résultats ci-dessous ont été établis d'après les moyennes des 3 répétitions de chaque traitement et de chaque témoin. Malgré les fortes doses de radioélément appliquées, les différences entre les radioactivités totales des parcelles traitées et des témoins n'ont pas toujours été significatives (voir Tableau II notamment).

III. - TECHNIQUE DE DOSAGE DES RADIOELEMENTS ET EXPRESSION DES RESULTATS

Les comptages de radioéléments ont été effectués directement sur les cendres de plantes sans séparation chimique préalable de l'élément étudié. Les cendres ont été obtenues par calcination à 350 °C ou à 450 °C pour les tubercules de pomme de terre et autres produits particulièrement difficiles à calciner, après imprégnation de la poudre végétale au moyen de SO_4H_2 en quantité suffisante pour neutraliser l'alcalinité des cendres, préalablement dosée, soit en général 10 ml SO_4H_2 1, 0 N pour 20 g de poudre. Des comptages directs de poudre de plantes, bien que très imprécis, ont donné des résultats du même ordre. Il n'y a donc pas lieu de craindre des pertes importantes de césium.

La différence des comptages des récoltes traitées et des récoltes témoin a été corrigée pour l'autoabsorption selon TAYLOR. Elle a été comparée au comptage à l'épaisseur 0 d'une fraction aliquote de la solution radioactive appliquée au sol.

Dans les tableaux suivants, on a indiqué :

1° la fraction du radioélément appliqué absorbée par l'ensemble des plantes d'une parcelle, ou par l'ensemble de certains organes, y compris les dépôts radioactifs restés sur les parties aériennes dans le cas des apports périodiques par aspersion;

2° la valeur désignée par c, qui est le rapport :

$$c = \frac{\text{radioélément par kg de produit récolté}}{\text{radioélément par m}^2 \text{ de sol}}$$

1 kg de produit récolté contient autant de radioélément que c mètres carrés de sol. Les valeurs de c ont été calculées pour un taux défini de matière sèche dans les produits récoltés.

Cette donnée, c, est plus intéressante que la fraction absorbée par la récolte totale, qui peut dépendre davantage des rendements obtenus. D'ailleurs, c est directement utilisable par l'hygiène atomique.

3° On a déterminé en outre le rapport r :

$$r = \frac{\text{radioélément par kg de produit récolté}}{\text{radioélément contenu dans 1 litre d'eau d'irrigation}}$$

1 kg de produit récolté contient autant de radioélément que r litres d'eau d'irrigation (voir Tableau XI); la concentration moyenne de l'eau en radioéléments pendant les saisons d'irrigation est supposée constante.

r est en somme la quantité de radioélément contenue dans 1 kg de produit récolté, et exprimée en litres d'eau

d'irrigation de concentration déterminée en radioélément.

r s'obtient en divisant les coups minute de 1 kg de produit récolté par les coups minute d'un litre d'eau. On peut contrôler l'exactitude des calculs par la relation :

$$r = c \times (\text{volume total d'eau appliqué depuis le début des expériences, en litres par m}^2)$$

Contrairement à c , qui peut être considéré comme une constante pour chaque espèce végétale dans des conditions pédo-climatiques et culturales données, r doit augmenter d'année en année, jusqu'à une certaine limite, qui dépend du débit annuel d'irrigation (d'après la formule précédente, r augmenterait indéfiniment; ceci est dû au fait que c'est toujours la même solution radioactive initiale qui sert à la fois pour l'irrigation et comme étalon pour les comptages).

La limite de r s'établit comme suit :

$$\text{Limite d'accumulation du radioélément dans le sol} = \frac{id}{\lambda + \varphi}$$

i = concentration (moyenne) de l'eau en radioélément

d = débit annuel d'irrigation en litres par m^2

λ = coefficient de décroissance en an^{-1}

φ = fraction du radioélément perdue annuellement, par infiltration notamment

Limite du radioélément contenu dans 1 kg de produit récolté

$$= c \frac{id}{\lambda + \varphi}$$

$$\text{Limite de } r = \frac{c \frac{id}{\lambda + \varphi}}{i} = \frac{cd}{\lambda + \varphi}$$

4° Le rapport $^{90}\text{Sr}/^{40}\text{Ca}$ dans les plantes à $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ dans le sol. Ce dernier rapport a été calculé d'après la teneur en Ca échangeable de la couche labourée, dont le poids par unité de surface a été déterminé dans chaque cas, avec la marge d'erreur que comporte l'imprécision de la profondeur du labour.

Dans le cas d'une terre calcaire (AVIGNON, NARBONNE), l'attaque du calcaire par les racines peut augmenter le rapport activité Ca/activité ^{90}Sr au contact sol-racines.

Voici un exemple de déterminations (Tableau II)

TABLEAU II - EXEMPLE DE DETERMINATIONS
Pommes de terre - Tubercules - VERSAILLES 1959

Parcelles (6,25 m ²)	kg de tubercules frais per parcelle	Matiè- re sèche	Cendres % de matière sèche	Coups/ minute bruts pour 0,5 g de cendres	Coups/ minute bruts par parcelle
Témoin (1	9,4	25,5	6,88	40,5	13.358
(2	9,3	20,0	6,34	44,5	10.500
(3	8,65	23,0	7,08	46,0	<u>12.968</u>
Total					<u>36.826</u>
Césium (1	9,65	24,5	5,83	52,0	14.347
apport (2	7,44	24,25	6,60	50,0	11.909
unique (3	<u>10.45</u>	22,25	7,26	46,5	<u>15.701</u>
	27,54				41.957
Strontium (1	8,25	26,75	6,13	187	50.620
apport (2	8,1	24,5	5,97	160	37.890
unique (3	<u>10,6</u>	19,75	8,95	158	<u>59.189</u>
Total	26,95				147.699
			<u>Cs ap. unique</u>	<u>Sr ap. unique</u>	
			41.957	147.699	
			<u>36.826</u>	<u>36.826</u>	
Différence pour les 3 parcelles			5.131	110.873	
Cps/minute nets de Sr ou					
Cs par parcelle			1.710	36.958	
Correction d'autoabsorption des β selon Taylor (épaisseur de cendres : 77,8 mg/cm ²).....			x 2,39	x 1,54	
Cps/minute corrigés par parcelle			4.089	56.915	

	<u>Cs ap. unique</u>	<u>Sr ap. unique</u>
Cps/minute appliqués au sol d'une parcelle	47.362.500	147.255.000
Fraction du radioélé- ment prélevée par la récolte	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$
c en m ² par kg de tubercules frais	$\frac{8,6 \cdot 10^{-5} \times 18,75 \text{ m}^2}{27,54 \text{ kg}}$ = $5,8 \cdot 10^{-5}$	$\frac{3,85 \cdot 10^{-4} \times 18,75}{26,95}$ = $2,7 \cdot 10^{-4}$
Moyenne matière sèche %	23,7%	23,7%
c en m ² par kg de ma- tière fraîche à 20% de matière sèche	$5,8 \cdot 10^{-5} \times \frac{20}{23,7}$ = $4,9 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-4} \times \frac{20}{23,7}$ = $2,3 \cdot 10^{-4}$
Millieq Ca par g de matière sèche		0,024
Cps/minute par g de matière sèche		27,1
Millieq Ca dans la couche labourée d'une parcelle		198.000
<u>⁹⁰Sr/Ca (tubercules)</u>		
⁹⁰ Sr/Ca (couche labourée)		$\frac{27,1 \times 198.000}{0,024 \times 147.255} = 1,52$

D'après la dernière colonne du Tableau II, les résultats concernant le Cs apports unique ne sont pas significatifs, si l'on considère les prélèvements par parcelle. Ils le sont davantage d'après les coups/minute par g de cendres. C'est pour cette raison qu'il vaut mieux calculer c en partant des moyennes des coups/minute par g de matière sèche, au

lieu de multiplier la fraction prélevée du radioélément par le rapport surface/poids de récolte, comme on l'a fait dans le tableau. En l'espèce, les deux modes de calcul ont donné pratiquement les mêmes résultats.

Les résultats concernant ^{90}Sr des tubercules - apports périodiques (Tableau III) ne sont absolument pas significatifs, les prélèvements de ^{90}Sr par les tubercules ayant été pratiquement négligeables.

IV. - RESULTATS

A. - POMMES DE TERRE

1° Pommes de terre - VERSAILLES (1959) - Tableau III

	Apport unique au sol		Apports périodiques par aspersion	
	Cs	Sr	Cs	Sr
Fraction du radioélément appliqué:				
dans ou sur les fanes...	$7,4 \cdot 10^{-5}$ (a)	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$ (a)
dans les tubercules....	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$ (a)
Total	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Répartition %				
- fanes	46%	91,6%	89,5%	99,9% (a)
- tubercules	54%	8,4%	10,5%	1 % (a)
c en m ² (fanés.....)	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$
par kg (1) (tubercules....)	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$0,72 \cdot 10^{-5}$
$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ (plante) (fanés		0,64		
$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ (sol) (tubercules		1,52		

(a) excès sur les témoins non significatifs

(1) les fanes sont supposées à 10% de matière sèche, les tubercules à 20%

2° Pommes de terre - BORDEAUX (1959) - Tableau IV

	Apport unique au sol		Apports périodi- ques par aspersion	
	Cs	Sr	Cs	Sr
Fraction du radioélé- ment appliqué; dans ou sur les fanes...	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
dans les tubercules.....	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Total	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Répartition %				
- fanes	51%	67%	61%	92%
- tubercules.....	49%	13%	39%	8%
c en m^2 (fanés.....	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$
par kg^1) (tubercules....	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
$^{90}Sr/Ca$ (plante) (fanés		0,88		
$^{90}Sr/Ca$ (sol) (tubercules..		1,46		

Les tableaux III et IV donnent lieu aux remarques suivantes :

1° Cs absorbé par les racines (apport unique au sol) se répartit assez uniformément entre fanes et tubercules, par moitié environ pour l'ensemble des deux organes, aussi bien à VERSAILLES qu'à BORDEAUX. Cependant, les valeurs de c sont moins grandes dans les tubercules que dans les fanes et elles le seraient encore moins si elles étaient calculées pour un même taux de matière sèche (fanés comptés à 10% de matière sèche, et tubercules à 20%). Ce fait implique que le césium

1) voir tableau VERSAILLES

reste relativement plus concentré dans la matière sèche des fanes.

2° Au contraire, le strontium prélevé sur le sol est resté en grande partie dans les fanes; il a donc peu migré des fanes aux tubercules; (rappelons que les tubercules se forment aux dépens de sucs venant des feuilles).

3° De même dans le cas de l'aspersion, le Cs migre relativement beaucoup mieux que le Sr dans les tubercules (comparer 3ème et 4ème colonnes, répartition %).

4° Ainsi ces deux éléments, Cs et Sr, se comportent respectivement de façon analogue à K et Ca. K migre fortement dans les tubercules, alors que Ca reste en majeure partie dans les fanes.

Cependant, le rapport :

$$\frac{{}^{90}\text{Sr/Ca (tubercules)}}{{}^{90}\text{Sr/Ca (sol)}}$$

a été trouvé plus élevé que même rapport pour les fanes, dans le cas de l'apport au sol, (ce rapport n'a pas grand sens dans le cas de l'aspersion). Ce résultat, qui impliquerait une plus grande sélectivité des tubercules que des fanes pour Sr par rapport à Ca, a besoin d'être confirmé.

5° La comparaison BORDEAUX-VERSAILLES met nettement en évidence l'influence du pouvoir absorbant du sol (apport unique au sol). La valeur de c pour Cs est environ 100 fois plus grande (moyenne des fanes et tubercules) dans le sol sablonneux de BORDEAUX que dans le sol argilo-limoneux de VERSAILLES. Rappelons que Cs est fortement fixé, sous forme non échangeable,

par certaines argiles et que le pouvoir absorbant du sol pour Cs ne dépend pas seulement de la capacité d'échange du sol.

^{90}Sr a été absorbé par les plantes environ 9 fois plus à BORDEAUX qu'à VERSAILLES (comparer les valeurs de c dans les fanes, qui renferment la majeure partie de Sr), en relation, d'une part, avec le fait que dans le sol de BORDEAUX ^{90}Sr se trouve dilué dans une masse de Ca échangeable sensiblement plus petite qu'à VERSAILLES (voir tableau I), d'autre part avec le fait que les pommes de terre contiennent plus de Ca à BORDEAUX qu'à VERSAILLES. On peut noter que les quotients des rapports $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ dans les tubercules et dans le sol sont assez voisins à VERSAILLES et à BORDEAUX. Mais il vaut mieux en attendre une confirmation après répartition plus homogène de ^{90}Sr dans la couche labourée.

6° Dans le sol argilo-limoneux de VERSAILLES, les tubercules de pommes de terre ne renferment qu'une très petite fraction des radioéléments appliqués, aussi bien du Sr que du Cs, mais pour deux raisons différentes : Cs a été peu absorbé par les plantes entières, Sr beaucoup plus; mais Sr migre beaucoup moins dans les tubercules que Cs.

7° Les apports périodiques par aspersion en cours de végétation ont fourni des plantes plus radioactives que l'apport initial au sol (comparer dans chaque tableau les fractions absorbées). Il est difficile actuellement d'interpréter en détail les résultats des apports périodiques. A VERSAILLES, les pommes de terre n'ont reçu aucune pluie en 59. Par ailleurs, la fraction de la solution d'arrosage parvenue directement au sol - c'est-à-dire la majeure partie de cette solution -, a pu fournir du radioélément aux plantes dans le sol de BORDEAUX,

mais vraisemblablement pas dans le sol de VERSAILLES.

Les résultats des apports périodiques varieront très probablement au fur et à mesure que les radioéléments s'accumuleront dans le sol.

B. - TOMATES

1° Tomates - TOULOUSE (1959) - Tableau V

Fraction du radio- élément appliqué trouvée dans :	Apport unique au sol		Apports périodiques par aspersion (1)	
	Cs	Sr	Cs	Sr
fruits mûrs (2) .. $7,9 \cdot 10^{-5} (x)$		$1,68 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-3} (2)$	$8,56 \cdot 10^{-4} (2)$
fruits verts $5,05 \cdot 10^{-5}$		$1,88 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
racines $2,75 \cdot 10^{-5} (4)$		$3,96 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-4}$
tiges $2,34 \cdot 10^{-5} (3)$		$1,94 \cdot 10^{-3}$	$4,47 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$
feuilles $1,02 \cdot 10^{-4}$		$3,57 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$
	-----	-----	-----	-----
Total	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,24 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
Répartition %				
fruits mûrs et verts	55%	3,3%	61,6%	12,7%
racines	12(4)	6,5	2,3	3,7
tiges	- 10(3)	31,8	8,5	20,1
feuilles	44	58,5	27,5	63,5

c en m ² par kg				
fruits mûrs à 6% de matière sèche 1,8.10 ⁻⁵	3,3.10 ⁻⁵			
1er prélèv.		6,5.10 ⁻⁴	1,67.10 ⁻⁴	
2ème "		4,13.10 ⁻⁴	1,2 .10 ⁻⁴	
3ème "		2,38.10 ⁻⁴	3,9 .10 ⁻⁵	
fruits verts à 6% de matière sèche..... 2,0.10 ⁻⁵	2,8.10 ⁻⁵	1,1.10 ⁻⁴	5,8 .10 ⁻⁵	
racines à 20% de matière sèche 3,5.10 ⁻⁴ (4)	4,7.10 ⁻³	1,45.10 ⁻³	2,8 .10 ⁻³	
tiges à 20% de matière sèche ?	4,4.10 ⁻³	1,03.10 ⁻³	3,1 .10 ⁻³	
feuilles à 20% de matière sèche 2,33.10 ⁻⁴	7,35.10 ⁻³	2,83.10 ⁻³	8,4 .10 ⁻³	
<u>⁹⁰Sr/Ca (plante)</u>				
⁹⁰ Sr/Ca (sol)				
fruits mûrs -				
1er prélèv.	1,5			
2ème "	1,52			
3ème "	1,17			
fruits verts	1,14			
racines	3,7 ⁽⁴⁾			
tiges	2,25			
feuilles	1,62			

Notes relatives au tableau V.

(■) différence moyenne avec les témoins non significative

(1) 4 apports périodiques égaux en cours de végétation, les 3 premiers avant la 1ère récolte de fruits, le dernier avant la 2ème récolte

- (2) Il y a eu 3 récoltes successives de fruits mûrs. Les chiffres concernant les apports périodiques sont entachés d'une légère erreur, $< 10\%$, du fait que la 1ère récolte de fruits, d'ailleurs la moins importante, n'avait reçu que 3 apports radioactifs sur 4.
- (3) La différence avec les témoins a été négative. Il n'y a aucune raison de ne pas la compter comme telle dans la somme, puisque les mesures sur d'autres organes ont pu comporter des erreurs aléatoires par excès.
- (4) La radioactivité mesurée a pu être faussée par des particules de terre dont il est très difficile de débarrasser les racines.

2° Tomates - BORDEAUX 1959 - Tableau VI

	Apport unique au sol		Apports périodiques par aspersion	
	Cs	Sr	Cs	Sr
Fraction du radio- élément appliqué trouvée dans :				
les fruits	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
les fanes	0 (1)	$2,45 \cdot 10^{-2}$	0 (1)	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Total :	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
Répartition %				
fruits	"	8%	"	33%
fanés	"	92%	"	67%
o en m^2 par kg				
fruits à 6% de matière sèche...	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$

fanés à 20% de matière sèche...	"	$3,6 \cdot 10^{-2}$	"	$1,74 \cdot 10^{-2}$
$\frac{{}^{90}\text{Sr/Cs (plante)}}{{}^{90}\text{Sr/Cs (sol)}}$				
fruits		1,08		
fanés		0,6		

(1) La différence des radioactivités mesurées dans les plantes traitées et dans les plantes témoin a été pratiquement nulle.

Les expériences sur tomates donnent lieu aux remarques suivantes :

1° Cs est plus mobile que Sr dans les tomates, comme dans les pommes de terre : Cs a relativement plus migré dans les fruits que Sr (voir répartition pour 100).

2° Les tomates comme les pommes de terre absorbent beaucoup plus de Sr que de Cs. Mais ce sont surtout les organes végétatifs qui en sont affectés, d'après les valeurs comparées de c pour Cs et Sr (TOULOUSE, apport unique),

3° La comparaison TOULOUSE-BORDEAUX met encore nettement en évidence l'influence du pouvoir absorbant du sol, comme dans le cas des pommes de terre (c_{Cs} 20 fois plus grand dans les fruits sur le sol sablonneux de BORDEAUX que sur le sol argileux de TOULOUSE, et c_{Sr} 10 fois plus. Malgré tout, les coefficients c dans les fruits sont encore minimes à BORDEAUX.

Ici encore, l'influence du pouvoir absorbant du sol est plus marquée pour Cs que pour Sr.

C. LAITUES

1° Laitues - AVIGNON (1959) - Tableau VII

Mode d'irrigation	Ca			Sr		
	Raie	Souter.	Aspem.	Raie	Souter.	Aspers.
	Les nombres des 2 premières lignes sont à diviser par 10 ³					
Fraction du radio-élément prélevée par la récolte, x 10 ³	1,32	2,5	2,3	0,88	1,21	1,54
c, en m ² /kg de laitue à 10% de matière sèche ... x 10 ³	1,5	2,7	2,1	0,81	1,3	1,4
r, en litres/kg de laitue à 10% de matière sèche	1,5	1,4	1,5	0,81	0,65	0,96
Pour mémoire :						
Volume d'eau appliqué depuis le début en litres par parcelle.	5.610	5.140	2.760	5.610	5.140	2.760
Surface d'une parcelle	5,6 m ²	10m ²	4 m ²	5,6m ²	10m ²	4m ²
<u>⁹⁰Sr/Ca (plante)</u>				0,42		0,67
⁹⁰ Sr/Ca (sol)						

Voici à titre de comparaison les résultats de 1958 (Tableau VIII)

Laitues - AVIGNON (1958) - Tableau VIII

Mode d'irrigation	Cs			Sr		
	Raie	Souter.	Aspers.	Raie	Souter.	Aspers.
Les nombres des deux premières lignes sont à diviser par 10^3						
Fraction du radio-élément prélevée par la récolte						
$\times 10^3$	0,45	1,1	1,15	0,94	1,8	1,9
c, en m^2/kg de laitue à 10% de matière sèche						
$\times 10^3$	0,275	0,91	1,22	0,54	1,43	1,40
r, en litres/kg de laitue à 10% de matière sèche.....	0,19	0,31	0,65	0,37	0,47	0,75
Pour mémoire :						
Volume d'eau appliqué depuis le début en litres par parcelle.	3.810	3.340	2.160	3.810	3.340	2.160

Les valeurs de c pour Sr sont restées en 59 voisines de celles de 58.

Les valeurs de c pour Cs sont sensiblement plus grandes en 1959.

Les valeurs de r doivent normalement augmenter, puisque le volume d'eau radioactive appliqué augmente d'année en année (voir page 10).

2° Laitues - BORDEAUX (1959) - Tableaux IX

	Apport unique au sol		Apports périodiques par aspersion	
	Cs	Sr	Cs	Sr
Fraction du radio- élément prélevée par les laitues...	0 ⁽¹⁾	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
c, en m ² par kg de laitues à 10% de matière sèche	"	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$
$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ (laitue)				
$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ (sol)				

(1) La différence des radioactivités totales des plantes traitées et des plantes-témoin a été pratiquement nulle

La valeur de c pour Sr apporté au sol est environ 5 fois plus grande à BORDEAUX qu'à AVIGNON, dont le sol contient davantage de calcium échangeable et par surcroît est fortement calcaire.

Le quotient des rapports $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ dans les laitues et dans le sol est également plus élevé à BORDEAUX qu'à AVIGNON.

D. HARICOTS

Haricots - AVIGNON (1959) - Tableaux I

Mode d'irrigation	Césium			Strontium		
	Raie	Souter.	Aspers.	Raie	Souter.	Aspers.
Fraction de la radioactivité :						
dans les gousses vertes	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$
dans les fanes	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$
c en m ² par kg de mat. fraîche à 20% de mat. sèche						
gousses vertes	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
fanés	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$
r en litres/kg de mat. fraîche à 20% de mat. sèche						
gousses vertes	0,15	0,58	0,36	0,39	0,35	0,44
fanés	0,45	1,09	2,3	2,1	1,9	1,9

Comme en 1957, les valeurs de c sont sensiblement plus élevées dans les fanes que dans les gousses vertes, aussi bien pour le Césium que pour le Strontium.

Les valeurs de c sont du même ordre de grandeur pour Cs et Sr, comme cela a déjà été observé d'une façon générale à AVIGNON, et contrairement à ce qui a lieu à VERSAILLES et à TOULOUSE (pour d'autres plantes), où c est nettement plus grand pour Sr que pour Cs.

Les valeurs de c pour les gousses vertes sont sensiblement plus faibles que celles enregistrées en 1957.

CONCLUSIONS GENERALES

1° L'irrigation par aspersion tend à se généraliser. Les gouttes d'eau restées sur le feuillage après chaque arrosage y laissent une certaine quantité de radioélément, qui s'ajoute au moins en partie à celle absorbée du sol par les racines. Or dans nos expériences, à part celle d'AVIGNON, les conditions de l'arrosage sont très différentes de celles de la pratique, qu'il serait d'ailleurs dangereux de réaliser, au tourniquet par exemple, avec une eau franchement radioactive. Dans les trois expériences sur légumes récemment mises en place, chaque arrosage apporte 2,5 mm d'eau, alors qu'en pratique des arrosages de 20 mm sont courants. Pour cette raison, de la quantité totale de radioélément apportée par l'eau d'irrigation, la fraction déposée sur les feuilles ou sur les organes consommables pourrait être beaucoup plus grande dans nos expériences qu'en pratique. Mais, en compensation, le nombre des arrosages peut être beaucoup plus grand en pratique (13 sur tomates à TOULOUSE) que celui des apports périodiques de radioélément dans nos expériences (4 en tout).

Pour préciser cette question, nous envisageons de mesurer chez des maraichers, par simples pesées, la fraction de l'eau d'irrigation qui reste sur les légumes après un arrosage; on obtiendrait ainsi une valeur maximale du dépôt radioactif, puisqu'on ne tiendrait pas compte des lavages éventuels par les pluies ou par les arrosages suivants.

2° Comme à AVIGNON, les plantes n'ont prélevé qu'une petite fraction des radioéléments du sol, quoique plus importante dans le sol sablonneux de BORDEAUX : 2 à 3 pour cent de Sr et

3 à 9 pour mille de Cs à BORDEAUX, contre 1 à 6 pour mille de Sr et 2 à 20 pour 10.000 environ de Cs dans les autres stations.

Le pouvoir absorbant du sol a inhibé davantage le passage de Cs dans les plantes que celui de Sr. Ainsi les pommes de terre ont absorbé 60 fois moins de Cs à VERSAILLES qu'à BORDEAUX, et seulement 4 fois moins de Sr.

3° Il est à présumer que cet inconvénient des sols à faible pouvoir absorbant s'atténuera avec le temps, puisque les pertes de radioélément par infiltration y seront plus importantes. Cependant, même en tenant compte de ces pertes, il est à craindre qu'à la limite d'accumulation, les sols légers cèdent encore beaucoup plus de radioélément aux plantes que les sols doués d'un bon pouvoir absorbant (voir ci-dessous Tableau XI.).

4° Le quotient des rapports $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ dans les plantes et dans le sol, c'est-à-dire :

$$\frac{^{90}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ (plante)}}{^{90}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ (couche labourée)}}$$

a varié dans nos expériences de 0,6 à 1,5 environ (exceptionnellement 2,25) avec une moyenne de 1,1. Il est donc légitime, conformément à l'abondante bibliographie publiée à ce sujet, de baser l'hygiène atomique du sol, en ce qui concerne Sr radioactif, sur cette relation, du moins pour des plantes s'alimentant surtout sur la couche labourée, et en réservant le cas des sols calcaires. La limite inférieure de sécurité à adopter pour ce quotient serait environ 1,5.

5° Il a été confirmé qu'en général, ^{137}Cs et ^{90}Sr absorbés par les plantes étudiées restent concentrés dans les organes végétatifs et migrent peu dans les fruits ou les organes de réserves (tubercules de pommes de terre). C'est le cas en particulier de ^{90}Sr chez la pomme de terre (analogie avec le calcium).

6° Le tableau XI indique les valeurs prévisibles du rapport désigné ci-dessus par r , à la limite d'accumulation (voir page 7). On a admis pour le débit annuel d'irrigation une valeur relativement élevée, 500 litres par m^2 . On a admis pour φ (fraction du radioélément perdue annuellement) les valeurs suivantes :

	Cs	Sr
VERSAILLES, AVIGNON	0	0,02
TOULOUSE	0	0,01
BORDEAUX	0,01	0,04

TABLEAU XI - Limites de r, en litres par kg
(voir page 26)

Ces chiffres ne concernent que les radioéléments prélevés sur le sol, et ne tiennent pas compte des radioéléments déposés par l'eau d'arrosage sur les parties aériennes des plantes, et qui peuvent être absorbés par les feuilles.

^{137}Cs

^{90}Sr

Pommes de terre (20% de matière sèche)				
	<u>Bordeaux</u>	<u>Versailles</u>	<u>Bordeaux</u>	<u>Versailles</u>
Limite de r	50	1	15	2,5
Tomates (6% de matière sèche)				
	<u>Bordeaux</u>	<u>Toulouse</u>	<u>Bordeaux</u>	<u>Toulouse</u>
Limite de r	5,0	0,4	2,5	0,5
Laitues (9% de matière sèche)				
		<u>Avignon</u>	<u>Bordeaux</u>	<u>Avignon</u>
Limite de r		42	45	14
Haricots verts (18% de matière sèche)				
		<u>Avignon</u>		<u>Avignon</u>
Limite de r		12		5

D'après le tableau XI, sur des sols analogues à celui de BORDEAUX, sablonneux, peu humifères, ayant une faible capacité d'échange, et cédant de ce fait aux plantes une fraction relativement importante de leurs "radiocactions", tout en étant

capables d'accumuler ^{137}Cs et ^{90}Sr de l'eau d'irrigation, certains légumes contiendraient à la limite d'accumulation, par kilogramme, autant de radioélément que plusieurs dizaines de litres d'eau d'irrigation, jusqu'à 50 litres environ et cela sans tenir compte des radioéléments déposés directement sur les plantes par l'eau à chaque arrosage. Toutefois, il est peu probable que ce dépôt, même après 20 arrosages, dépasse la quantité de radioélément contenue dans 1 litre d'eau, par kilog de produit récolté.

Etant donné que l'approvisionnement en légumes de certaines populations peut provenir en majorité de tels sols, la conclusion générale qui se dégage des dernières expériences est que la limite de tolérance admissible pour la concentration en radioélément de l'eau d'irrigation devrait être plus basse que celle appréciable d'après les premières expériences, qui ne concernaient qu'un sol doué d'un bon pouvoir absorbant.

Manuscrit reçu le 13 février 1961.

FIN