ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONTAMINATION DU MAÏS PAR LE RADIOSTRONTIUM ET LE RADIOCAESIUM APPORTÉS PAR L'EAU D'ARROSAGE

J. DELMAS, R. DISDIER, A. GRAUBY, P. BOVARD *

(Manuscrit reçu le 3 Juin 1971)

RÉSUMÉ

Les conséquences de l'emploi pour l'irrigation du maïs d'une eau éventuellement contaminée par le ^{90}Sr et le ^{137}Cs sont étudiées; les points suivants sont traités: absorption par la plante et distribution dans les différents organes de ces 2 radionucléides en fonction du mode d'apport de l'eau d'arrosage. En particulier, les rapports entre le taux de contamination des eaux et celui des organes du maïs sont précisés.

Les expériences sont conduites de façon à simuler des conditions de contamination proches de la pratique culturale. Des arrosages par aspersion au moyen d'eau contaminée sont distribués dans une chambre d'essai de grande dimension. D'autre part, des apports de radionucléides sont réalisés sur des sols contenus dans des caissons de grande capacité. Des études sur différents types de sol sont également entreprises en pots de végétation.

Les résultats obtenus, ainsi que le rôle joué par le maïs dans l'économie agricole, les besoins en eau nécessités par sa culture, montrent que le maïs peut constituer un vecteur important du transfert de ^{90}Sr et ^{137}Cs dans le milieu et la ration alimentaire.

SUMMARY

The consequences of irrigation of zeo mays by water liable to contamination by ^{90}Sr and ^{137}Cs have been studied from the points of view of the plant uptake and the distribution through its various organs of both radionuclides as a function of the spraying practice; the relationships between water and corn contamination levels have been determined.

The experiments have been conducted so as to simulate contaminating conditions near to agricultural practices. Spraying by contaminated water was carried out in a large-sized test room; radionuclide deposits were effected on soils contained in tanks. Studies have also been undertaken on various types of soils in culture pots.

The results obtained, the part played by corn in agricultural economy, the water supplies, required by its culture have shown that corn can constitute an important vehicle of ^{90}Sr and ^{137}Cs transfer to the environment and the diet.

* Commissariat à l'Energie Atomique - Département de Protection, Section de Radio-écologie, Groupe de Radioécologie continentale. Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache B.P. n° 1 - 13-Saint-Paul-lez-Durance.

I. — INTRODUCTION

L'estimation du niveau de contamination de la ration alimentaire nécessite l'étude des conséquences de l'emploi d'une eau éventuellement radiocontaminée dans l'agriculture.

Dans ce but, nous nous sommes particulièrement attachés à préciser les rapports entre le taux de contamination des eaux d'arrosage par le ^{137}Cs et le ^{90}Sr (+ ^{90}Y) et celui des plantes cultivées, avec le souci de rendre nos résultats directement applicables au domaine de l'hygiène atomique. Des résultats importants dans ce domaine ont déjà été apportés par BARBIER *et alii* [1].

Dans cette optique nous nous sommes préoccupés du maïs du fait de son importance dans l'agriculture, de son large emploi dans l'alimentation du bétail et de ses besoins en eau considérables.

Pour ces raisons, en effet, la culture du maïs pouvait constituer, a priori, un vecteur de la contamination du milieu et de la ration alimentaire.

Pour évaluer cette possibilité de contamination, nous avons étudié l'absorption et la distribution dans le maïs du ^{90}Sr (+ ^{90}Y) et du ^{137}Cs en fonction du mode d'apport d'eau d'irrigation.

II. — ORGANISATION DE L'EXPÉRIENCE

L'entrée, dans le maïs, des radionucléides éventuellement présents dans les eaux d'arrosage, résulte de deux modes d'apport :

- l'irrigation par aspersion,
- l'irrigation à la raie.

L'irrigation par aspersion peut être à l'origine d'une absorption foliaire, florale ou par la base des plantes; la contamination est dite « directe ».

Les irrigations par aspersion et à la raie peuvent être à l'origine d'une absorption racinaire; la contamination est dite « indirecte ».

II.1. LA CONTAMINATION DIRECTE du maïs a été vue sous les deux aspects suivants :

- conséquences d'une série d'aspersions distribuées pendant le cycle végétatif de la plante;
- influence d'une seule aspersion apportée à une époque déterminée du cycle végétatif, la floraison.

II.1.1. Pour l'étude du premier cas, un protocole a été conçu de manière à simuler une contamination du maïs dans des conditions proches de la pratique.

Les aspersions ont été faites dans un caisson où ont été maintenues les conditions climatiques données au tableau I.

Pour avoir des résultats suffisamment significatifs, l'expérimentation a été conduite sur 14 plants de la variété IOWA; 772 l/m² ont été distribués au cours de 15 arrosages tout au long de la végétation sur ces plants disposés en ligne, à raison de 7 plants par bacs de 1 m². L'eau de la Durance a été utilisée. Son pH est élevé, ainsi que sa teneur en Ca⁺⁺, comme l'eau de la plupart des rivières du bassin Rhodanien (tableau I).

TABLEAU I
CONDITIONS EXPÉRIMENTALES - SOL, EAU, CLIMAT

Caractéristiques du sol %	Caractéristiques de l'eau	Conditions climatiques
Sable grossier 8	pH 7,7	Température 22 °C
Sable fin 19	Résidu sec g/l 0,330	Hygrométrie 45 à 65 %
Limon grossier 32	Résistivité Ω.cm 2210	
Argile 10	Ca mg/l 76	
Calcaire total 28	Mg mg/l 6,8	
Calcaire actif 7	Na mg/l 9,86	
pH 7,9	K mg/l 1,18	
Matières organiques .. 1,1	CO ₃ ²⁻ + CO ₃ H ⁻ +	
Capacité d'échange	CO ₂ mg/l 96	
meq/100 g 7,8		
Ca mg/g (acétate NH ₄) 11,8		
Mg mg/g » 0,2		
K mg/g » 0,08		
Na mg/g » 0,08		

Les caractéristiques de chaque aspersion figurent au tableau II.

TABLEAU II
CONDITIONS EXPÉRIMENTALES
CARACTÉRISTIQUES DES ARROSAGES

Densité d'aspersion	10,3 mm/h
Durée de chaque arrosage	4 h 45 mn
Dose par arrosage	50 mm
Nombre d'arrosages	15
Volume total distribué par unité de surface	772 l/m ²

Les activités spécifiques moyennes de l'eau étaient, pour le ¹³⁷Cs, de 0,29 µCi/l et, pour le ⁹⁰Sr, de 0,36 µCi/l.

224 µCi/m² du premier radionucléide et 278 µCi/m² du second ont été ainsi distribués.

Le sol des bacs a été protégé avec des plaques de polyvinyle. Les interstices entre plantes et plaques ont été rendus étanches au moyen de lutol.

II.1.2. Pour le deuxième cas (apport unique), deux autres séries de 7 plants ont subi chacune un arrosage (50 l/m^2), la première avant la floraison, la seconde au cours de la floraison. Chaque arrosage présentait les mêmes caractéristiques que précédemment. Pour faciliter les mesures, la quantité de ^{137}Cs , distribuée au mètre carré, a été portée à $557 \mu\text{Ci/m}^2$.

II.2. LE PROBLÈME DE LA CONTAMINATION INDIRECTE a été traité sous les deux aspects suivants :

- influence du mode de contamination sur le niveau de la contamination du maïs en cours de croissance;
- influence du type de sol sur la contamination du maïs par ^{90}Sr .

II.2.1. Dans la première série d'expériences, la contamination a été réalisée de deux façons différentes :

a) $557 \mu\text{Ci/m}^2$ de ^{137}Cs et $389 \mu\text{Ci/m}^2$ de ^{90}Sr ont été répartis uniformément dans une couche de 25 cm d'épaisseur d'un limon du Rhône, dans des bacs de 1 m^2 de surface et de 300 kg de contenance.

b) Les mêmes quantités de radionucléides ont été apportées en surface en une seule fois avant le semis. Chaque expérience a porté sur 14 plants cultivés sur deux bacs. La contamination des feuilles a été suivie en cours de développement.

II.2.2. L'influence du type de sol sur l'absorption du ^{90}Sr par le maïs a été étudiée sur neuf sols courants dans la région sud de la France. L'expérience, exécutée en pots de 1,3 kg, comportait trois répétitions et un témoin par type de sol. Le radio-élément a été mélangé d'une manière homogène à chaque sol de façon à porter la contamination à $1,38 \mu\text{Ci/kg}$.

II.3. Des méthodes classiques ont été employées pour la préparation des divers échantillons (séchage, broyage, mise en cendres), les analyses physico-chimiques et les mesures radioactives.

III. — ABSORPTION DU RADIOSTRONTIUM ET DU RADIOCÆSIUM PAR LE MAÏS ET DISTRIBUTION DANS LES PLANTES

Le tableau III montre la répartition de ces radionucléides en pourcentage de la quantité accumulée dans les parties aériennes.

TABLEAU III
DISTRIBUTION DES RADIONUCLÉIDES DANS LE MAÏS
(stade pâteux des grains)

Mode de contamination		Cæsium 137		Strontium 90	
		Indirecte	Directe	Indirecte	Directe
Répartition des radionucléides dans les différents organes en pourcentage de la quantité accumulée dans les parties aériennes	Grains	0,6	1,4	1,3	
	Rafles	1	0,7	1,5	
	Spathes	1,5	0,2	3,7	0,7
	Feuilles				
	avec gaines	35,3	69,7	62,9	96,4
	Tiges	61,6	28	30,6	2,4

Le tableau IV donne le rapport de la quantité de radionucléides par kg de produit frais, de grains et de l'ensemble des organes aériens, à la quantité de radionucléides distribués par m².

Ces rapports, déjà employés par BARBIER *et alii* [2], peuvent être considérés comme des coefficients de prélèvement des plantes vis-à-vis des radionucléides mis à leur disposition.

III.1. CONTAMINATION DIRECTE

Les radionucléides s'accumulent essentiellement dans les feuilles et les tiges. A la récolte, après la série d'aspersions pendant la durée de la végétation, on constate que le ⁹⁰Sr reste fixé au niveau des organes aériens atteints par les gouttelettes. La plus grande partie de ce radionucléide est éliminée par lavage. La contamination des grains de maïs par le radiostrontium-90 est pratiquement nulle.

Le ¹³⁷Cs est absorbé cinq fois plus facilement que le ⁹⁰Sr. Une fraction du radiocæsium déposé sur les organes verts se retrouve dans les grains. Elle peut être considérée cependant comme faible.

En raison de certaines observations relatives aux retombées qui montrent que l'absorption florale joue un rôle dans l'entrée des radionucléides dans les grains, nous avons appliqué une contamination par aspersions à ce stade du maïs.

La contamination des grains de maïs par le ¹³⁷Cs, provoquée par un arrosage au moment de la floraison, n'a pas amené de contamination différente de manière significative.

Les coefficients de prélèvement des grains obtenus à la suite de ces deux aspersiones n'ont pas différé sensiblement de ceux qui ont été obtenus après aspersion répétées.

III.2. CONTAMINATION INDIRECTE

Pour des quantités équivalentes de radionucléide disponible, la contamination par le ¹³⁷Cs et le ⁹⁰Sr, résultant d'un seul apport en surface du sol, est moindre

TABLEAU IV
ABSORPTION DU RADIOSTRONTIUM ET DU RADIOCAESIUM PAR ZEA MAYS

	¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y		
	Indirecte		Directe	Indirecte		Directe
	Sur 25 cm d'épaisseur de sol	En surface du sol	<div>Série d'aspersions en cours cycle végétatif</div> <div>Aspersion unique</div> <div>Avant floraison</div> <div>A la floraison</div>	Sur 25 cm d'épaisseur de sol	En surface du sol	<div>Série d'aspersions en cours cycle végétatif</div>
Mode d'apport et de répartition des radionucléides						
Grains	0,510	0,575	0,712	0,510	0,575	0,712
Poids frais à la récolte (kg/m ²)	4,475	4,511	3,203	4,475	4,511	3,203
Plante entière	0,014	0,003	0,34	0,18	0,07	
Grains						
Rapport de la quantité de radionucléides par kg de produit frais à la quantité de radionucléides distribuée par m ² , multiplié par 10 ³			non lavé 6,9 lavé 4,8	1,5	1	non lavé 5,2 lavé 1
Plante entière	0,12	0,034				

que celle qui résulte du mélange de ces radionucléides avec le sol. Elle est cependant assez élevée. Elle peut s'expliquer par l'influence des travaux du sol de surface, des arrosages en cours de culture et du développement des racines du maïs en surface.

Comme dans la contamination directe, les radionucléides s'accumulent essentiellement dans les feuilles et les tiges. C'est le maïs-fourrage qui contribuera au transfert de la contamination au bétail. Cependant une fraction de ^{90}Sr notable se retrouve dans les grains lors de ce mode de contamination.

Cette contamination indirecte des organes verts n'a pas la même valeur pour les deux radionucléides. Elle est 12 fois plus faible pour le ^{137}Cs . Comparativement à la contamination directe, la contamination par le ^{137}Cs des organes verts par voie racinaire est très faible (40 fois plus petite). Il n'en est pas de même pour le ^{90}Sr . Vis-à-vis de ces radionucléides, le coefficient de prélèvement par voie indirecte de l'ensemble des organes aériens du maïs est sensiblement du même ordre de grandeur que le coefficient de ces mêmes organes par voie directe (tableau IV).

Le niveau de ce coefficient de prélèvement par voie racinaire de ^{90}Sr nous a conduit à suivre sa variation en fonction du degré de développement de la plante et des principaux types de sols du sud de la France.

Dans le premier cas, la teneur en radionucléide varie en effet d'une manière conséquente au cours du développement de la plante (tableau V). Une certaine variation peut s'observer également pour le ^{137}Cs . En conséquence, selon l'époque de coupe, le maïs, destiné à la consommation en vert ou à l'ensilage, peut présenter des niveaux de contamination différente.

TABLEAU V

EVOLUTION DANS LES FEUILLES DE MAÏS
EN COURS DE DÉVELOPPEMENT DE LA TENEUR EN STRONTIUM 90 ET CÆSIUM 137
A PARTIR D'UNE CONTAMINATION DU SOL DE $557 \mu\text{Ci}/\text{m}^2$ DE CÆSIUM 137
ET DE $389 \mu\text{Ci}/\text{m}^2$ DE STRONTIUM 90
Contamination indirecte

Nombre de jours après levée ..	15	36	51	121
^{137}Cs pCi/g frais	2	64	86	229
^{90}Sr pCi/g frais	695	1 560	2 141	5 050

Le tableau VI montre une amplitude de variation du coefficient de prélèvement du maïs vis-à-vis du ^{90}Sr par rapport aux sols de l'ordre de 1 à 5.

Les coefficients de corrélation entre les facteurs de transfert (activités par gramme de plantes de maïs rapportées aux activités par gramme de sol) d'une part, et les différentes caractéristiques des sols d'autre part, ont été calculés. Ils sont significativement différents de zéro pour la teneur en matière organique : — 0,716, la capacité totale d'échange : — 0,849 et la teneur en argile : — 0,865. Les écarts types des droites ajustées pour les deux premières relations sont petits par rapport aux coefficients de corrélation, l'ajustement est assez bon. La relation entre les facteurs de transfert et la teneur en argile donne le meilleur ajustement de points (l'écart type est le 1/5 du coefficient de corrélation).

TABLEAU VI
CONTAMINATION DU MAÏS PAR ^{90}Sr + ^{90}Y À PARTIR DE 9 TYPES DE SOL
VARIATION DU FACTEUR DE TRANSFERT EN FONCTION DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE CES SOLS

Type de sol	Calcaire total %	Calcaire actif %	pH	Capacité totale d'échange meq/100 g	Matière organique %	Argile %	Facteur de transfert pCi/kg végétal sec pCi/kg sol
Brut de sable dunaire	15	3	8,4	4,6	0,66	4	3,65
Brun lessivé recarbonaté	7		8,3	10,3	0,02	10	3,33
Brun calcaire de complexe-classique	27	4	8,1	14,2	1,38	5	2,64
Brun de lehm	traces		7,9	11,2	1,09	8	2,59
Alluvion du Rhône	28	7	7,9	7,8	1,1	10	1,90
Hydromorphe calcimorphe	50	19	7,9	23,8	1,37	20	1,07
Brun calcaire	38	9	8,1	17,5	2,09	14	1,03
Alluvial-calcaire	32	10	7,7	19,3	2,04	21	0,77
Rouge décarbonaté	traces		8,2	22,8	0,95	27	0,75

Ces résultats sont en accord avec nos travaux concernant la tomate et 7 autres sols de la région du sud de la France [3].

Au cours de ces travaux, il a été trouvé également qu'il pouvait exister une relation linéaire inverse entre les facteurs de transfert et ces mêmes caractéristiques des sols.

Les contaminations les plus importantes se présentent sur des sol sableux. La contamination en sol-alluvions du Rhône est moindre. Ces résultats sont valables pour un même niveau de contamination dans les sols. En fait, l'accumulation des radionucléides dépend des apports par les arrosages. Il dépend aussi, à long terme, de l'équilibre qui s'établit entre ces apports, les pertes par décroissance radioactive et les infiltrations dans les sols de ces radionucléides [4].

Dans ce domaine, nos travaux [5] nous ont permis de mettre en évidence l'importance de la contamination directe pour le radiocésium et indirecte pour le radiostrotrontium dans le cas de l'utilisation agricole, par aspersion, d'une eau contaminée par ces 2 radionucléides.

Il a été montré en effet que :

- Pour ^{90}Sr , la contamination indirecte est rapidement supérieure à la contamination directe.
- Dans le cas de ^{137}Cs , il faudrait attendre plusieurs dizaines d'années, pour que la contamination indirecte de ^{137}Cs soit du même ordre de grandeur que la contamination directe.

CONCLUSION

Du fait du mode de transfert, la contamination directe du maïs est limitée aux organes verts et est nettement plus importante pour ^{137}Cs que pour le ^{90}Sr .

La contamination indirecte par voie racinaire est faible pour le radiocésium. Elle est en particulier négligeable pour les grains. En ce qui concerne le radiostrotrontium, elle est liée à l'accumulation de ce radionucléide et aux caractéristiques des sols : texture, capacité d'échange, teneur en matière organique. Des apports prolongés peuvent donner une certaine importance à ce mode de contamination pour certains sols. Cette contamination restera cependant limitée par la décroissance nucléaire et par les pertes par infiltration.

En résumé, le maïs-fourrage jouera, dans tous les cas, un rôle plus important que le maïs-grain dans le transfert du césium et du strontium à l'animal.

Dans le cas de rejet concomitant des deux radionucléides, le risque principal est dû, au cours d'un premier stade, au césium pulvérisé par aspersion. Ce type de contamination est lié au cycle annuel du végétal et restera constant. Par contre, si les rejets se prolongent, le strontium prendra, au bout d'un certain temps, le pas sur le césium, mais en s'introduisant dans la plante par la voie racinaire.

Le rôle que joue le maïs dans l'économie agricole, ses besoins élevés en eau, la capacité de fixation de ses organes verts vis-à-vis du ^{137}Cs et du ^{90}Sr font du maïs un vecteur important du transfert de ces radionucléides dans le milieu et la ration alimentaire.

Nous estimons de ce fait, également, qu'il constitue un matériel valable pour la surveillance de la contamination des sites aux alentours des installations nucléaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARBIER *et alii*. Absorption de radioéléments du sol par divers légumes cultivés dans les conditions de la pratique. *Rapport C.E.A. n° 1860*, 1961.
- [2] BARBIER *et alii*. Compte rendu d'expériences de plusieurs années sur l'absorption du strontium et du césium radioactifs par les plantes cultivées. *Rapport C.E.A. n° 2159*, 1962.
- [3] P. BOVARD, J. DELMAS, R. DISDIER, A. GRAUBY. Estimation de la contamination de la ration alimentaire. Etude du transfert du césium et du strontium à travers la plante jusqu'au produit consommable. Données expérimentales. Journées d'études sur la contamination radioactive du milieu du point de vue de l'agriculture et de la santé publique. AIEA, Vienne, 24-28 mars 1969, 113 à 124.
- [4] BARBIER *et alii*. Etude expérimentale de la contamination radioactive par l'eau d'irrigation de certaines plantes cultivées. *Rapport C.E.A. n° 2625*, 1964.
- [5] J. DELMAS, R. DISDIER, A. GRAUBY, P. BOVARD. Radiocontamination expérimentale de quelques espèces cultivées soumises à l'irrigation par aspersion. *Symposium International de Radioécologie Continentale, C.E.A., Cadarache*, 8-12 septembre 1969, tome 2, 707-729.