

## Transfert du $^{65}\text{Zn}$ de l'eau aux parties aériennes du maïs et du haricot irrigués par aspersion (\*)

INFLUENCE DE LA FORME CHIMIQUE DU POLLUANT  
ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU

J. DELMAS, R. DISDIER, A. GRAUBY (\*\*)

(Manuscrit reçu le 21 novembre 1977)

### RÉSUMÉ

L'influence de la qualité de l'eau d'irrigation et de la forme chimique du  $^{65}\text{Zn}$ , présent dans cette eau, sur son transfert aux plantes cultivées (haricot, maïs) est étudiée aux cours d'expérimentations en conditions contrôlées qui simulent l'irrigation par aspersion. Deux formes chimiques du polluant ( $\text{Cl}_2\text{Zn}$  et  $\text{Zn EDTA}$ ) sont additionnées à une eau déminéralisée et une eau de rivière. L'influence de la présence dans l'eau d'irrigation du Cd et du Zn stables sur le transfert direct du  $^{65}\text{Zn}$  au maïs est également étudiée. Les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  et du cadmium sont évalués. L'incidence des résultats obtenus quant à la protection du consommateur final est discutée.

### ABSTRACT

The effect of the quality of irrigation water and of the chemical form of  $^{65}\text{Zn}$  available in the water on its transfer to crops (beans, corn) was studied during experiments under controlled conditions simulating spray irrigation. Two chemical forms ( $\text{Cl}_2\text{Zn}$  and  $\text{Zn EDTA}$ ) were added to demineralized and river water. The effect of stable Cd and Zn present in irrigation water on the direct transfer of  $^{65}\text{Zn}$  to corn was also studied. Transfer factors for  $^{65}\text{Zn}$  and cadmium were evaluated. The consequences as to the protection of the final consumer are discussed.

(\*) Travail effectué dans le cadre de l'association Euratom/C.E.A., Contrat VEN n° 0693.

(\*\*) Commissariat à l'Énergie atomique, Institut de Protection et de Sécurité nucléaire, Département de Protection, Service d'Études et de Recherches sur l'Environnement, Section de Radioécologie, B.P. 1, 13115 Saint-Paul-Les-Durance.

## 1. INTRODUCTION

Le  $^{65}\text{Zn}$  est un des radionucléides pouvant se trouver dans les effluents liquides rejetés en rivière par les installations nucléaires. En radioécologie, il paraît important pour différentes raisons : par ses caractéristiques nucléaires, par le rôle du zinc dans le milieu vivant, et par la complexité de ses propriétés chimiques.

Son transfert de l'eau d'irrigation aux produits agricoles a été mis en évidence par des chercheurs de Hanford [1-2]. Ils ont montré que les facteurs de transfert  $a$  pouvaient varier de façon considérable avec le type de végétal et le mode d'apport. Le transfert est faible pour la vigne et le blé ( $a =$  respectivement 0,47 et 0,83). Il est faible également pour la tomate :  $a = 2,4$ , et élevé pour l'herbe de pâturage :  $a = 440$ . Dans ce dernier cas, l'absorption foliaire est vraisemblablement à l'origine de ce transfert relativement important. Nous avons donc voulu préciser certains aspects du mode de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  à la suite d'irrigation contaminante.

La mobilité du  $^{65}\text{Zn}$  dans les divers écosystèmes concernés par les rejets dépend notamment de ses formes chimiques dans l'eau de rivière. Ces formes chimiques résultent des traitements appliqués en usine et de la qualité de l'eau. Pour ces raisons, dans le cadre des travaux sur la contamination radioactive de la chaîne alimentaire par les eaux d'arrosages éventuellement polluées, nous avons étudié le transfert du  $^{65}\text{Zn}$  sous forme ionique ou complexée en fonction de la qualité de l'eau.

Il est bien connu également que des éléments homologues peuvent influencer le transfert des éléments traces dans le milieu. Aussi nous avons, pour compléter ces travaux, étudié également l'influence du cadmium et du zinc stables, éléments fréquemment rejetés en rivière, sur le transfert du  $^{65}\text{Zn}$ .

## 2. ORGANISATION DE L'EXPÉRIENCE

L'objectif de l'expérimentation est de préciser les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  de l'eau d'arrosage aux parties aériennes des plantes irriguées par aspersion sous l'influence de ces divers paramètres :

- formes chimiques du radionucléide;
- qualité de l'eau;
- présence dans l'eau des éléments stables du cadmium et du zinc.

Par ailleurs, afin d'obtenir des facteurs de transfert proches de ceux du milieu exploité par l'homme, le modèle expérimental a été conçu de façon à simuler au mieux les conditions de la pratique. Dans ce but, l'irrigation par aspersion entraînant la contamination directe du maïs a été pratiquée en chambre climatique de grandes dimensions [3]. La culture des plantes a été menée dans des bacs de  $1\text{ m}^2$  de section remplis de terre sur une hauteur de 0,50 m. Cette pratique permet d'avoir des conditions de croissance reproductibles et un développement équilibré des végétaux. Par ailleurs, il est possible de mettre en œuvre des quantités d'eau équivalentes à celles des irrigations de plein champ. Il en est de même pour la distribution de l'eau pendant la croissance des plantes.

Le maïs et le haricot ont été choisis en se basant sur les critères suivants :

- importance dans l'agriculture;
- large utilisation dans l'alimentation du bétail ou de l'homme;
- besoin en eau en cours de culture.

Par bac ont été mis en place 6 plants de maïs de la variété « Iowa 44-17 » ou 8 plants de haricots de la variété « Contender »; tous ces plants ont été conduits à maturité complète, stade auquel les récoltes ont été effectuées.

Deux types d'eau ont été utilisés :

- de l'eau déminéralisée à pH 5;
- de l'eau du Rhône à pH 8,2 avec une teneur en  $\text{Ca}^{++}$  relativement élevée (tableau I).

Dans une série d'essais le  $^{65}\text{Zn}$  ajouté à l'eau était sous 2 formes :  $\text{Cl}_2\text{Zn}$  et complexé à l'EDTA. Dans cet essai, les pulvérisations ont été appliquées sur des maïs et des haricots.

TABLEAU I

CARACTÉRISTIQUES DU SOL, DE L'EAU DE RIVIÈRE, DU CLIMAT

Sol Caractéristiques physicochimiques		Eau d'aspersion Caractéristiques	
Sable grossier (%).....	14	pH.....	8,2
Sable fin (%).....	14	Résidu sec (g/l).....	0,34
Limon grossier (%).....	12	Résistivité ( $\Omega/\text{cm}$ ).....	2 770
Argile (%).....	9,4	Ca (mg/l).....	65
Calcaire total (%).....	40	Mg (mg/l).....	6,7
Calcaire actif (%).....	40	Na (mg/l).....	14,6
(méthode à l'oxalate)		K (mg/l).....	2,2
pH eau.....	8,7	Zn ( $\mu\text{g/l}$ ).....	40
Matières organiques (%).....	1	Bicarbonates (mg/l).....	140
Capacité d'échange		Chlorures (mg/l).....	32,3
(meq/100 g).....	33,4	Sulfates (mg/l).....	69
Bases échangeables		Nitrates (mg/l).....	3,4
à pH 7 (acétate $\text{NH}_4$ ) :		Cd ( $\mu\text{g/l}$ ).....	< 4
Ca (meq/100 g).....	32,7	Densité d'arrosage (mm/h)...	9,9
Mg (meq/100 g).....	0,6		à 10,3
K (meq/100 g).....	0,09	Dose (mm).....	50
Na (meq/100 g).....	0,05	Intervalle (jours).....	8
Conditions climatiques : Température, 23° C; Hygrométrie, 45 à 65 %.			

Dans une autre série d'essais, des arrosages ont mis en œuvre de l'eau de rivière additionnée d'une part de 5 mg/l de zinc stable, et d'autre part de cadmium stable aux concentrations de 10 et 50 ppb soit, respectivement, 0,010 et 0,050 mg/l. Ces concentrations ont été choisies en se référant aux concentrations limites admises [5]. La concentration maximale admissible du

cadmium pour l'eau de boisson est 0,010 mg/l. Pour le zinc, les normes OMS pour l'eau de boisson en 1965 sont :

- concentration maximale acceptable : 5 mg/l;
- concentration maximale admissible : 15 mg/l.

Les limites de concentration recommandées pour les eaux d'irrigation sont les suivantes [6] :

- en *irrigation continue et intense* :  $5 \cdot 10^{-9}$  ( $5 \cdot 10^{-3}$  mg/l) pour le cadmium et  $5 \cdot 10^{-6}$  (5 mg/l) pour le zinc;
- en *irrigation discontinue* :  $50 \cdot 10^{-9}$  ( $50 \cdot 10^{-3}$  mg/l) pour le cadmium et  $10 \cdot 10^{-6}$  (10 mg/l) pour le zinc, avec possibilité, pour les irrigations peu intenses sur sols relativement lourds, de dépasser ces valeurs.

Dans la première série d'essais où étaient mises en œuvre de l'eau déminéralisée et de l'eau de rivière, il n'y avait pas de protection du sol. Dans la deuxième série d'essais pour éviter l'incidence de la contamination indirecte par voie racinaire, le sol était protégé par une feuille de polyvinyle dont les interstices à la base des plants étaient soigneusement rendus étanches. L'emploi de ces deux procédés devait nous permettre d'évaluer l'importance respective des contaminations directe et indirecte.

Le tableau I présente l'ensemble des conditions expérimentales.

La préparation des échantillons et les mesures radioactives ont été effectuées suivant des méthodes classiques. Les feuilles et les grains ont été séchés et broyés. La poudre ainsi obtenue minéralisée à 60-70°C avec  $\text{HNO}_3$  6 N a été analysée par absorption atomique pour la recherche du cadmium.

Le  $^{65}\text{Zn}$  a été déterminé par spectrométrie  $\gamma$  à l'aide d'un sélecteur Inter-technique.

Au cours des essais présentés dans ce rapport, nous avons constaté que les teneurs en zinc stable des feuilles et des grains du maïs témoins sont normales. Les végétaux ne sont pas carencés (tableau II).

TABLEAU II

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES PARTIES AÉRIENNES DU MAÏS TÉMOIN

	Ca (mg/g)	Cd (mg/g)	K (mg/g)	Mg (mg/g)	Na (mg/g)	Zn (mg/g)
Feuilles . . . . .	19	< 0,000 5	1,20	1,48	0,507	0,066
Grains . . . . .	5,5	< 0,000 5	4,30	1,19	0,124	0,027

### 3. TRANSFERT DU $^{65}\text{Zn}$

Les tableaux III et IV présentent les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  de l'eau au végétal pour les différents organes à la récolte

$$a = \frac{\text{pCi/kg frais}}{\text{pCi/l}}$$

Ce rapport indique que 1 kg de produit frais contient une quantité de radionucléide équivalente à celle contenue dans « a » litres d'eau d'aspersion.

TABLEAU III  
FACTEURS DE TRANSFERT DU  $^{65}\text{Zn}$  AU MAÏS ET AU HARICOT

		Taux de transfert <i>a</i> $\frac{\text{pCi/kg frais}}{\text{pCi/l eau}}$			
		Eau déméralisée		Eau de rivière	
		$^{65}\text{ZnCl}_2$	$^{65}\text{Zn}$ EDTA	$^{65}\text{ZnCl}_2$	$^{65}\text{Zn}$ EDTA
Haricots Volume eau distribuée : 150 l/m <sup>2</sup>	Feuilles	7,3	4,8	10,1	8,5
	Gousses	0,5	0,5	0,6	0,5
Maïs Volume eau distribuée : 400 l/m <sup>2</sup>	Feuilles sans gainés	8,6	15,2	20,1	26,6
	Grains	3,2	4,2	4,2	4,7

Ce tableau permet de mettre en évidence l'influence sur le transfert du  $^{65}\text{Zn}$  de différents paramètres :

- partie et nature du végétal;
- formes chimiques du radionucléide et qualité de l'eau.

Les facteurs de transfert observés ici, sur les feuilles et les fruits, sont différents. Les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  sont plus élevés pour les feuilles des deux espèces que pour les grains de maïs et les gousses de haricot. Les gousses, qui n'apparaissent que tardivement en cours de croissance, sont moins soumises à la contamination par contact direct avec l'eau que les feuilles. Par contre, les grains de maïs protégés par les spathes sont plus contaminés que les gousses, proportionnellement à la contamination des feuilles respectives. On peut donc penser à une certaine mobilité du  $^{65}\text{Zn}$  qui serait plus importante dans le maïs que dans le haricot. Les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  observés dans ces essais sont plus élevés que ceux que nous avons observés sur la salade [3], mais ceux-ci avaient été relevés sur des végétaux lavés avant les mesures spectrométriques. Le lavage a, sans doute, éliminé partiellement le  $^{65}\text{Zn}$ .

Cependant, des pommes soumises à des conditions de contamination et des traitements d'échantillons identiques à celles mises en œuvre dans cet essai, donnaient lieu à des facteurs de transfert plus faibles que ceux que nous

observons sur le maïs (10 fois moindres). Les raisons de ces différences sont multiples : volume d'eau d'aspersion, port de la plante, forme des feuilles, caractéristiques du tissu des feuilles, comportement du zinc dans la plante. Elles ont pour conséquence un facteur de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  aux feuilles de maïs plus important. Le maïs fourrage pourrait donc être une voie possible de transfert de ce radionucléide à la ration alimentaire.

TABLEAU IV

FACTEURS DE TRANSFERT DU  $^{65}\text{Zn}$  DE L'EAU DE RIVIÈRE AUX PARTIES AÉRIENNES  
DU MAÏS IRRIGUÉ PAR ASPERSION  
INCIDENCE DE LA TENEUR DE L'EAU EN ZINC ET CADMIUM STABLES  
(volume d'eau distribuée 300 l/m<sup>2</sup>)

	$\frac{\text{pCi/kg frais}}{\text{pCi/l eau}}$		
	Eau de rivière	Eau de rivière + Cd (0,010.10 <sup>-6</sup> )	Eau de rivière + Zn (5.10 <sup>-6</sup> )
Feuilles.....	14,3	15,3	25,5
Grain.....	5,3	4,3	1,4

Aux tableaux III et IV sont présentés deux essais sur le maïs avec du  $^{65}\text{Zn}$  sous forme de  $\text{Cl}_2\text{Zn}$  et en eau de rivière, mais avec des conditions différentes en ce qui concerne le volume d'eau distribué et la protection du sol. On peut constater que les facteurs de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  de l'eau aux feuilles ne sont pas les mêmes :

- 20,1 avec 400 l/m<sup>2</sup> et sans protection du sol;
- 15,3 avec 300 l/m<sup>2</sup> et avec protection du sol.

La différence est proportionnelle aux volumes d'eau distribués et par conséquent à la quantité de radionucléide apportée. Celà, nous l'avons déjà observé dans d'autres essais [3]. Il est donc très vraisemblable que l'absorption du  $^{65}\text{Zn}$  sous forme de  $\text{Cl}_2\text{Zn}$  par voie racinaire a été faible. Le transfert par voie foliaire pourrait donc être une voie prépondérante du transfert du  $^{65}\text{Zn}$  au maïs. Or, nous avons observé, dans un précédent essai de contamination du maïs par  $^{60}\text{Co}$ , davantage de mobilité pour la forme complexée que pour la forme chlorure. Cette différence de mobilité s'était traduite par des facteurs de transfert plus élevés de l'eau aux feuilles pour  $\text{Cl}_2\text{Co}$  que pour  $\text{Co EDTA}$  [3].

Dans cet essai, l'influence de la forme chimique du radionucléide sur les taux de transfert apparaît comme un phénomène complexe. On constate bien pour le haricot un phénomène identique à celui présenté pour  $^{60}\text{Co}$  dans le précédent rapport. Par contre ici, les facteurs de transfert concernant les feuilles de maïs et  $\text{Zn-EDTA}$  sont nettement plus élevés que ceux qui concernent les mêmes organes et  $\text{Cl}_2\text{Zn}$ . Il se pourrait donc que l'influence de la forme

chimique d'un radionucléide sur son transfert de l'eau d'irrigation aux plantes soit un problème complexe qui dépende non seulement de la nature de l'élément mais également du végétal considéré.

Les taux de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  sont plus élevés lorsque la contamination est apportée par l'eau de rivière et ceci pour les deux végétaux : maïs et haricot. La variation est assez considérable. Dans cet essai, les feuilles sont deux fois plus contaminées par le  $^{65}\text{Zn}$  en eau de rivière que lorsque celui-ci est en eau déminéralisée. Les différences au niveau des gousses ou des grains sont moins nettes. Il est vraisemblable que l'eau de rivière contient des produits de nature variée dont les effets sur le  $^{65}\text{Zn}$  peuvent être très déterminants. Dans l'expérience suivante où du cadmium et du zinc stables ont été additionnés à l'eau d'irrigation, ceci apparaît nettement (tableau IV).

Le cadmium et le zinc stables présents dans l'eau n'ont pas les mêmes effets sur le transfert du  $^{65}\text{Zn}$ , et le niveau de ce transfert varie en fonction de la partie du végétal considérée. Le transfert du  $^{65}\text{Zn}$  aux feuilles résulte de mécanismes complexes. Les mesures que nous avons effectuées portaient sur des feuilles non lavées. Cette méthode d'observation masque les phénomènes métaboliques d'incorporation dans les feuilles mais intègre tous les phénomènes de dépôt. Avec ce mode d'observation, il n'apparaît pas que la présence de cadmium influe sur le facteur de transfert du  $^{65}\text{Zn}$ . Celui-ci reste du même ordre de grandeur que dans le cas où le cadmium n'est pas additionné à l'eau. Le zinc stable, par contre, contribue à élever considérablement le facteur de transfert du  $^{65}\text{Zn}$ . Tout ce passe comme si le zinc stable jouait le rôle d'entraîneur.

Le facteur de transfert du  $^{65}\text{Zn}$  de l'eau aux grains est 2,7 à 3,5 fois moins élevé que ceux qui ont été observés sur les feuilles. Ce taux n'est pas, non plus, influencé significativement par la présence de cadmium aux concentrations utilisées <sup>(1)</sup>. La teneur en zinc stable mise en œuvre semble avoir l'effet inverse sur le facteur de transfert aux grains du  $^{65}\text{Zn}$  de celui qui a été observé sur les feuilles. Ce transfert est la résultante de deux phénomènes: d'absorption au niveau des feuilles et de migration jusqu'aux grains. Dans ce deuxième phénomène qui fait intervenir des phénomènes biologiques de régulation, l'apport de zinc stable a eu pour effet de diluer le  $^{65}\text{Zn}$  qui migre à partir des feuilles.

#### 4. TRANSFERT DU CADMIUM STABLE

On constate une fixation du cadmium sur les plantes. Le dépôt sur les feuilles croît quand la teneur en cadmium de l'eau augmente. Cependant, il ne semble pas y avoir proportionnalité entre l'élévation de la teneur en cadmium des feuilles et l'élévation de la teneur en cadmium de l'eau d'arrosage.

---

<sup>(1)</sup> MYTTENAERE *et al.* ont montré l'importance du niveau de la concentration de l'eau en cadmium sur le facteur de transport de  $^{65}\text{Zn}$  lors d'études de contamination indirecte en écosystème irrigué [7].

Les facteurs de transfert du cadmium aux feuilles semblent donc plus élevés pour les faibles concentrations en cadmium de l'eau. Ce phénomène peut être rapproché de celui qui a été observé chez la tomate sur le plan absorption par voie racinaire [4].

TABLEAU V

TRANSFERT DIRECT DU CADMIUM STABLE DE L'EAU D'ARROSAGE  
AU MAÏS IRRIGUÉ PAR ASPERSION

	Teneur en cadmium de l'eau (mg/l)	Teneur en cadmium des parties aériennes du maïs (mg/kg sec)	
Limites de mesure	0,004	0,5	
		Feuilles	Grains
1 <sup>er</sup> essai.....	0,008	1,77	< 0,5
2 <sup>e</sup> essai.....	0,044	3,27	< 0,5

Aucun transfert significatif aux grains n'a été mis en évidence. Le cadmium n'est sans doute pas un élément physiologique indispensable. Bien qu'homologue du zinc, il est peu absorbé par voie foliaire et il est peu mobile dans la plante.

### CONCLUSION

La qualité de l'eau et la forme chimique du radiozinc peuvent intervenir sur le niveau du facteur de transfert de ce polluant au maïs et au haricot, mais différemment selon la partie du végétal considérée.

Les facteurs de transfert du <sup>65</sup>Zn aux gousses du haricot sont inférieurs à 1 pour les deux formes chimiques du polluant (Cl<sub>2</sub>Zn-Zn EDTA) et les qualités de l'eau (eau de rivière - eau déminéralisée). La contamination directe par le <sup>65</sup>Zn, qui peut éventuellement en résulter, n'est pas de nature à augmenter notablement la contamination de la ration alimentaire.

Le <sup>65</sup>Zn présente une certaine mobilité dans le maïs, et peut s'accumuler dans les grains de façon plus importante que dans les gousses du haricot. Ce sont surtout les feuilles qui présentent des taux de transfert élevés (20 à 26 en eau de rivière). L'absorption par voie foliaire semble un facteur prépondérant.

Bien qu'homologues chimiquement, le cadmium et le zinc stables n'exercent pas les mêmes effets sur le transfert du <sup>65</sup>Zn. Dans nos conditions expérimentales, le cadmium n'a pas d'influence appréciable sur le comportement du <sup>65</sup>Zn. Par contre, les répercussions dues à la présence du zinc stable dans l'eau d'irrigation sur le taux de transfert du <sup>65</sup>Zn au maïs sont importantes.

Elles sont aussi de sens contraire si l'on considère les feuilles d'une part et les graines d'autre part. Le zinc stable fait croître le taux de transfert aux feuilles. Il agit alors comme entraîneur dans les mécanismes de fixation sur les tissus superficiels de ces organes. Il fait diminuer le facteur de transfert aux grains en diluant le  $^{65}\text{Zn}$  qui migre à partir des feuilles.

Le cadmium de l'eau d'irrigation appliquée au maïs se fixe sur les feuilles. Par contre, on ne constate pas de migration significative du cadmium des feuilles aux grains pour les concentrations mises en œuvre dans l'expérimentation.

Le rôle important que joue le maïs fourrage dans l'économie agricole, ses besoins en eau, la capacité de fixation des feuilles vis-à-vis du zinc et du cadmium, font du maïs un vecteur possible du transfert de ces produits à la ration alimentaire des animaux d'élevage.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] PERKINS R. W., NIELSEN J. M., Zinc 65 in foods and people. *Science*, 1959, **129**, 94-95.
- [2] PERKINS R. W., NIELSEN J. M., ROESCH W. C., McCALL R. C., Zinc 65 and chromium 51 in foods and people. *Science*, 1960, **132**, 1895-1897.
- [3] DELMAS J., GRAUBY A., DISDIER R. Études expérimentales sur le transfert dans les cultures de quelques radionucléides présents dans les effluents des centrales électro-nucléaires. In : *Environmental behaviour of radionuclides released in the nuclear industry*, Aix-en-Provence, 14-18 May 1973. Vienne, A.I.E.A., 1973, 321-332.
- [4] STEINER A. A., Uptake of cadmium by plants. *Landbouwk. Tijdschr.*, 1973, **85**, 4, 124-128.
- [5] COX C. R. *Techniques et contrôle du traitement des eaux*. O.M.S., Genève, 1967, 191-192.
- [6] United States, Department of Interior, Federal Water Pollution Control Administration. *Report of the Committee on water quality criteria*, Washington, 1968.
- [7] MYTTENNAERE C., MERLINI M., BITTEL R., DABIN P., MOUSNY J. M., POZZI G. Étude de l'influence du cadmium stable sur le transfert du zinc-65 en écosystème irrigué par submersion (rizière irriguée). In : *Impact of nuclear releases into the aquatic environment*, Otaniemi, 30 June-4 July 1975. Vienne, A.I.E.A., 1975, 39-47.