

**PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

**ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES
SUR L'ACCUMULATION DES RADIOELEMENTS
DANS LES TISSUS VEGETAUX**

par

J. GAGNAIRE

**avec la collaboration technique de
C. GILLY-HEUZE et J. NIZIA**

Rapport C E A n° 2131

1962

**C E N T R E D ' E T U D E S
N U C L E A I R E S D E G R E N O B L E**

CEA 2131 - GAGNAIRE J. (avec la collaboration technique de
GILLY-HEUZE C. et NIZIA J.)

ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR L'ACCUMULATION DES RADIOELEMENTS, DANS LES TISSUS VEGETAUX (1962).

Sommaire.- 1. Nous proposons un traitement spécial du sol pour favoriser l'absorption et l'accumulation de radioéléments dans les parties aériennes de jeunes arbres.

2. Grâce à ce traitement, il semble possible d'utiliser de jeunes arbres appartenant à plusieurs espèces convenablement choisies pour détecter une contamination éventuelle du sol par un radioélément pendant un cycle végétatif complet. Le pouvoir de concentration de leurs tissus est important : après quatre semaines seulement de culture sur sol contaminé, le facteur de concentration (FC) est de l'ordre de 85 dans les aiguilles d'épicéas. Les mesures d'activité sur des échantillons de tissus végétaux peuvent devenir une méthode de routine pour un contrôle de contamination des sols.

CEA 2131 - GAGNAIRE J. (with the technical collaboration
of GILLY-HEUZE C. and NIZIA J.)

STUDY OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE
ACCUMULATION OF RADIO-ELEMENTS IN PLANT TISSUE (1962)

Summary.- 1. Here is proposed an appropriate treatment of soil able to promote absorption and accumulation of radioisotopes in aerial parts of young trees.

2. Thanks to such treatment, young trees belonging to several species appropriately selected can probably be used to detect possible contamination of soil by a radioisotope during a whole vegetation cycle. The concentration power of tissues of these trees is considerable : after being cultivated on contaminated soil for only 4 weeks, the concentration rate is about 85 in spruce-needles.

Activity measurements of samples of plant tissues may become a routine process in control of soil contamination.

- Rapport C.E.A. n° 2131 -

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE GRENOBLE

Laboratoire de Biologie Végétale

(Professeur P. OZENDA)

ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES
SUR L'ACCUMULATION DES RADIOELEMENTS
DANS LES TISSUS VEGETAUX

par

J. GAGNAIRE

avec la collaboration technique
de C. GILLY-HEUZE et J. NIZIA

ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR L'ACCUMULATION DES RADIOELEMENTS DANS LES TISUS VEGETAUX

INTRODUCTION

Nous recherchons dans quelle mesure les végétaux permanents seraient utilisables comme test biologique d'une contamination éventuelle du sol, qui pourrait se produire à l'occasion d'une rupture ou d'un défaut d'étanchéité des canalisations transportant des effluents radioactifs. Nous avons choisi pour ce travail des espèces ligneuses parce que leur appareil racinaire très développé explore un volume de sol important. Parmi ces espèces nous avons étudié spécialement les arbres peu exigeants, capables de bien se développer et de croître rapidement sur un mauvais terrain tel que celui du C.E.N.G. De plus, si l'on veut que l'utilisation d'une espèce comme test biologique d'une contamination du sol, ait une valeur permanente, il est nécessaire que les prélèvements de tissus végétaux puissent être faits sur ces arbres en toutes saisons, en comparant les variations d'activité de ces tissus avec celles de tissus analogues, prélevés sur des arbres témoins cultivés sur des sols non contaminés.

Certains conifères, en particulier les épicéas, (*Picea excelsa*) répondent à ces multiples exigences. Ils possèdent en outre, la particularité de se développer sous des climats très variés puisqu'ils croissent en Dauphiné à des altitudes allant de la plaine jusqu'à près de 2 000 mètres. Nous expérimentons sur des arbrisseaux chez lesquels l'activité métabolique est particulièrement intense du fait de leur jeune âge et de leur croissance rapide.

Parmi les radioéléments contaminants, les plus redoutables sont les produits de fission et tout spécialement le ^{90}Sr . Pour des raisons de simplicité nous avons commencé à expérimenter avec ^{32}P , qui nous a permis de mettre au point les méthodes de travail, et avec ^{140}Ba dont le cheminement métabolique dans les tissus est assez comparable à celui du ^{90}Sr , du moins en première approximation et aux phénomènes de toxicité près.

Nous étudions donc l'absorption, la circulation et l'accumulation des substances radioactives dans les végétaux ligneux cultivés sur des sols ou dans des solutions contaminées avec ^{32}P et ^{140}Ba , en recherchant :

- d'une part, les points de ces organismes où les radioéléments employés se fixent de façon préférentielle,

- d'autre part, les facteurs externes susceptibles de modifier la vitesse d'accumulation de ces radioéléments et leur taux de concentration dans les tissus végétaux

Nous avons exposé précédemment (rapport n° 1854 de janvier 1961) les résultats que nous avons obtenus en 1960 en expérimentant pendant la période végétative seule et avec ^{32}P , sur des peupliers. Depuis de travail a été généralisé dans trois directions :

- a. en utilisant, outre ^{32}P , du ^{140}Ba ;

- b. en travaillant avec d'autres espèces végétales:
érables, épicéas, cyprès,
- c. en étendant la période expérimentale à un cycle
végétatif complet comprenant la phase de repos
hivernal.

PREMIERE PARTIE

A. PROPRIETES D'EPURATION DU SOL DU C.E.N.G. VIS-A-VIS DE SOLUTIONS CONTAMINEES AU ^{140}Ba

But de l'étude

Entre la solution radioactive et l'arbre se place un intermédiaire constitué par un système physico-chimique complexe, le sol : sa capacité de fixation et de rétention des éléments chimiques est capitale. Dans un travail préliminaire, nous avons tout d'abord cherché à évaluer approximativement :

1. le pouvoir d'épuration du sol du CEN-G, vis-à-vis de solutions aqueuses, contaminées avec ^{140}Ba , lorsque cet élément est dissous, soit dans l'eau permutée, ou l'eau industrielle, qui ne contiennent pas ou contiennent peu de sels alcalino-terreux jouant le rôle d'entraîneur, soit dans des solutions diluées de nitrate de calcium.

2. les échanges entre le sol et les liquides qui percolent à travers les couches de terrains, et le déplacement des zones de contamination qui peut en résulter.

3. la teneur en ^{140}Ba de "solutions de sols" que les végétaux pourraient absorber, lorsque le sol contaminé est arrosé par des solutions diluées de nitrate de calcium.

Nous nous sommes limités à l'étude d'un traitement particulier du sol, que nous proposons pour augmenter la teneur en substances radioactives "dans les solutions de sols", après une contamination accidentelle, et favoriser ainsi l'accumulation de ces radioéléments dans les tissus végétaux (rapport de janvier 1961, page 16, paragraphe III). Ce traitement diffère de ceux dont le rôle a été étudié par d'autres auteurs, comme par exemple le lessivage de sols étudié par P. COHEN et C. GAILLEDREAU (pollution radioactive des sols, aspects et remèdes, en cours de publication), ou de l'arrosage répété indéfiniment par des solutions contaminées très diluées, étudié par BARBIER, TYSZKIEWICZ, HUGET, MICHON (rapport CEA n° 1142) 1959.

Nous avons essayé de réaliser des conditions expérimentales assez comparables à celles qui seraient produites dans la nature, à la suite d'une contamination du sol due à la rupture d'une canalisation contenant des liquides plus fortement contaminés (par exemple, défaut d'étanchéité d'une canalisation provenant d'une piscine de pile du type Mélusine ou Siloé, où la radioactivité varie entre des concentrations de $10^{-1} \mu\text{c/l}$ et $1 \mu\text{c/l}$).

Expérimentation

Nous utilisons le dispositif expérimental déjà décrit (page 11 du rapport de janvier 1961). Il se compose de tubes de lucoflex de 40 mm de diamètre et de 15 cm de hauteur, volume 188 cm^3 , emplis de terre séchée à 100° et refroidie. Le débit des percolations ininterrompues est réglé à l'aide d'une ampoule à décantation. Nous effectuons des persolations de durée limitée (1 semaine), à débit réduit (50 cm^3 par 24 heures), avec des

solutions aqueuses diluées inactives (eau permutée ou solutions de nitrate de Ca inactif).

- Dans la première partie de l'expérience, les ions radioactifs sont fixés sur le complexe absorbant du sol, par des réactions d'échange d'ions.

- Dans la deuxième partie, ils sont déplacés par les réactions inverses.

Le complexe absorbant d'un sol contient une forte proportion de calcium. Nous admettrons, en première approximation, que la sélectivité des argiles est la même pour le baryum et pour le calcium. Dans ces conditions, la loi d'action de masse traduit l'équilibre qui s'établit entre deux éléments partagés entre une solution et l'échangeur d'ions avec lequel elle est en contact.

Nous utilisons les notations habituelles en pédologie.



où X représente une position échangeable monovalente.

Si $q(\text{Ba})$ et $q(\text{Ca})$ expriment, en milliéquivalent par gramme, les concentrations respectives en Ba et Ca dans les solutions, on peut écrire :

$$\frac{q(\text{Ba})}{C(\text{Ba})} \cdot \frac{C(\text{Ca})}{q(\text{Ca})} = K(\text{Ba Ca}) \quad (1)$$

$K(\text{Ba Ca})$ est une constante pour un sol défini. Elle est fonction de son complexe absorbant. C'est précisément ce que nous voulons connaître pour évaluer le pouvoir d'épuration du sol du CEN-G.

Conditions de mesures

Etalonnage. Une série de dilutions obtenues à partir

des solutions étalons livrées par Saclay nous a permis de réaliser une courbe d'étalonnage de notre ensemble de comptage. Nous évaluons ainsi le titre des solutions avant et après percolation à travers les colonnes de terre et nous mesurons leur volume. Nous disposons d'un scintillateur à cristal d'I Na muni d'un amplificateur d'impulsions type APT₂. Les mesures sont faites en 100 secondes sur le résidu d'évaporation d'une goutte de solution de 0,098 cm³ (mesurée à la pipette de Levaditi), déposée sur lame alvéolée. Les mesures de volumes sont faites à la pipette de précision.

Définitions Pendant la durée des essais, à intervalles de temps réguliers, nous avons déterminé les concentrations (C) et les volumes (V) des solutions percolant à travers les colonnes de terre, d'une part lorsque ces solutions sont versées au sommet des colonnes et d'autre part lorsqu'elles sont recueillies à la base des mêmes colonnes. Nous calculons l'activité des solutions $(CxV) = a$,

Nous appelons : activité totale à l'arrivée A, l'activité totale cumulée des solutions de percolation arrivant au sommet des colonnes pendant la phase de contamination.

S - Activité totale à la sortie,
l'activité totale des solutions de percolations recueillies à la base des colonnes pendant la phase de contamination.

$R = A - S$ - Activité résiduelle,
l'activité fixée par la colonne de terre pendant la phase de contamination.

L - Activité des solutions de lavage,
l'activité totale des solutions de percolation recueillies à la base des colonnes pendant la phase de lavage.

Le rapport $\frac{S}{A}$ permet d'apprécier la quantité de substances radioactives que pourraient absorber les plantes cultivées dans des conditions identiques de contamination.

Le rapport $\frac{L}{R}$ permet d'apprécier l'importance des échanges entre un sol contaminé et les solutions qui percolent à travers les couches de terrain.

Nous avons tracé les courbes $S = \sum (CV)$ en fonction du temps au cours des expériences et calculé la valeur des coefficients $\frac{S}{A}$ pendant la phase de contamination et $\frac{L}{R}$ pendant la phase de lavage. Le tableau 1 résume les conditions expérimentales et les résultats obtenus.

Etude des résultats

Nos résultats montrent que :

1. le sol du C.E.N.G. a un bon pouvoir d'épuration vis-à-vis des solutions contaminées au ^{140}Ba .

Lorsque cet élément est dissous dans l'eau, la plus grande partie se fixe dans la couche superficielle du terrain; de l'eau contaminée avec ^{140}Ba , percolant à travers une couche de terrain de 15 cm de hauteur, avec un débit tel qu'1 m³ de terre soit traversé par 1 m³ d'eau contaminée, en une semaine, perdrait 96 pour cent de son activité.

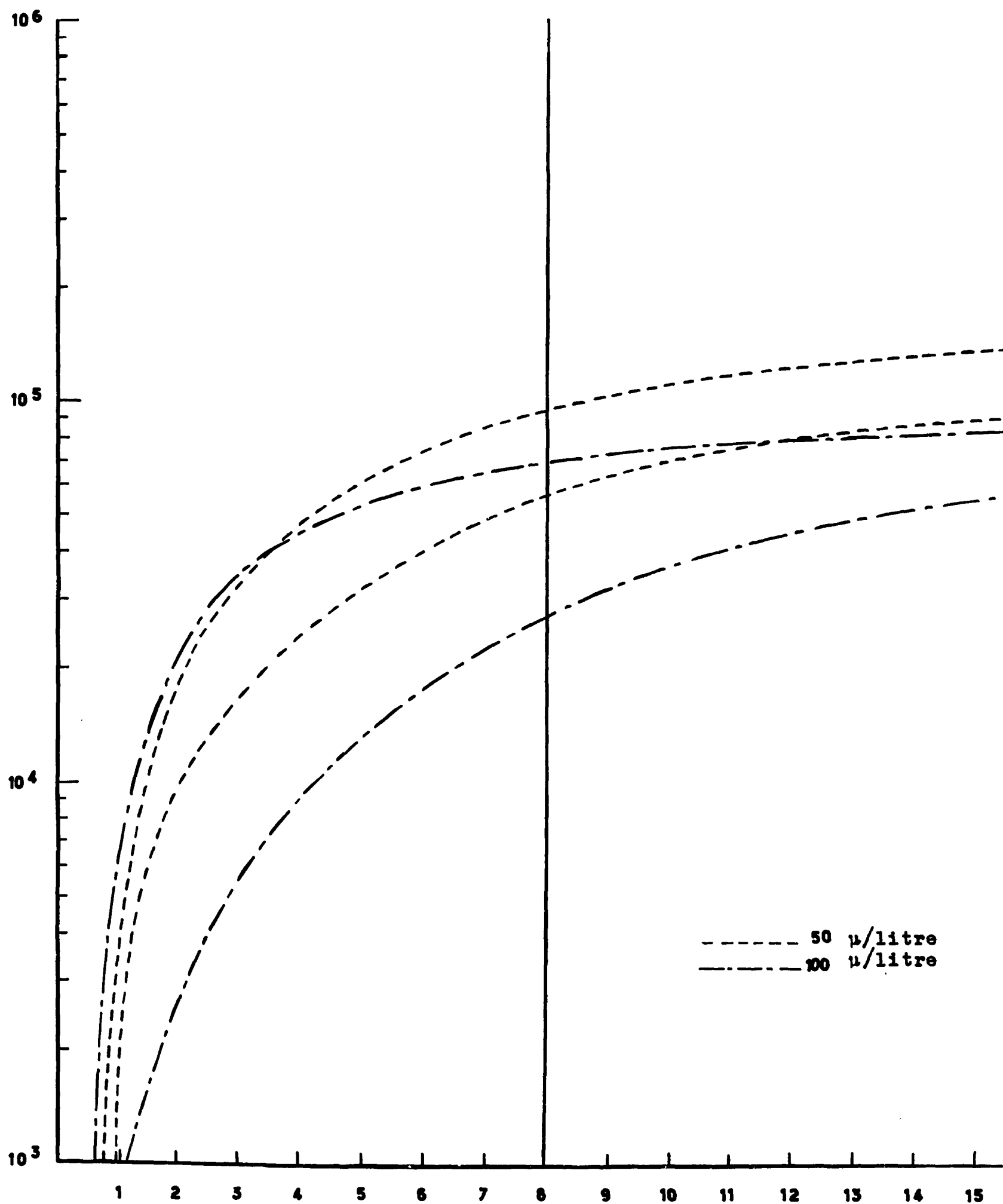
La présence de nitrate de calcium dans une proportion de 1 pour mille dans les solutions contaminantes, inhibe partiellement la fixation de ^{140}Ba sur le complexe absorbant. Une solution à 1 pour mille de nitrate de calcium contaminée au ^{140}Ba , percolant à travers une couche de terrain de 15 cm de hauteur, avec un débit tel que 1 m³ de terre soit traversé par 1 m³ de solution en une semaine, conserverait 9 à 10 pour cent de son activité.

$$S = \sum (c_v)$$

CONTAMINATION A L'EAU PERMUTÉE

140 Ba

Lavage avec $(\text{NO}_3)_2\text{Co}$ à 0,1%.

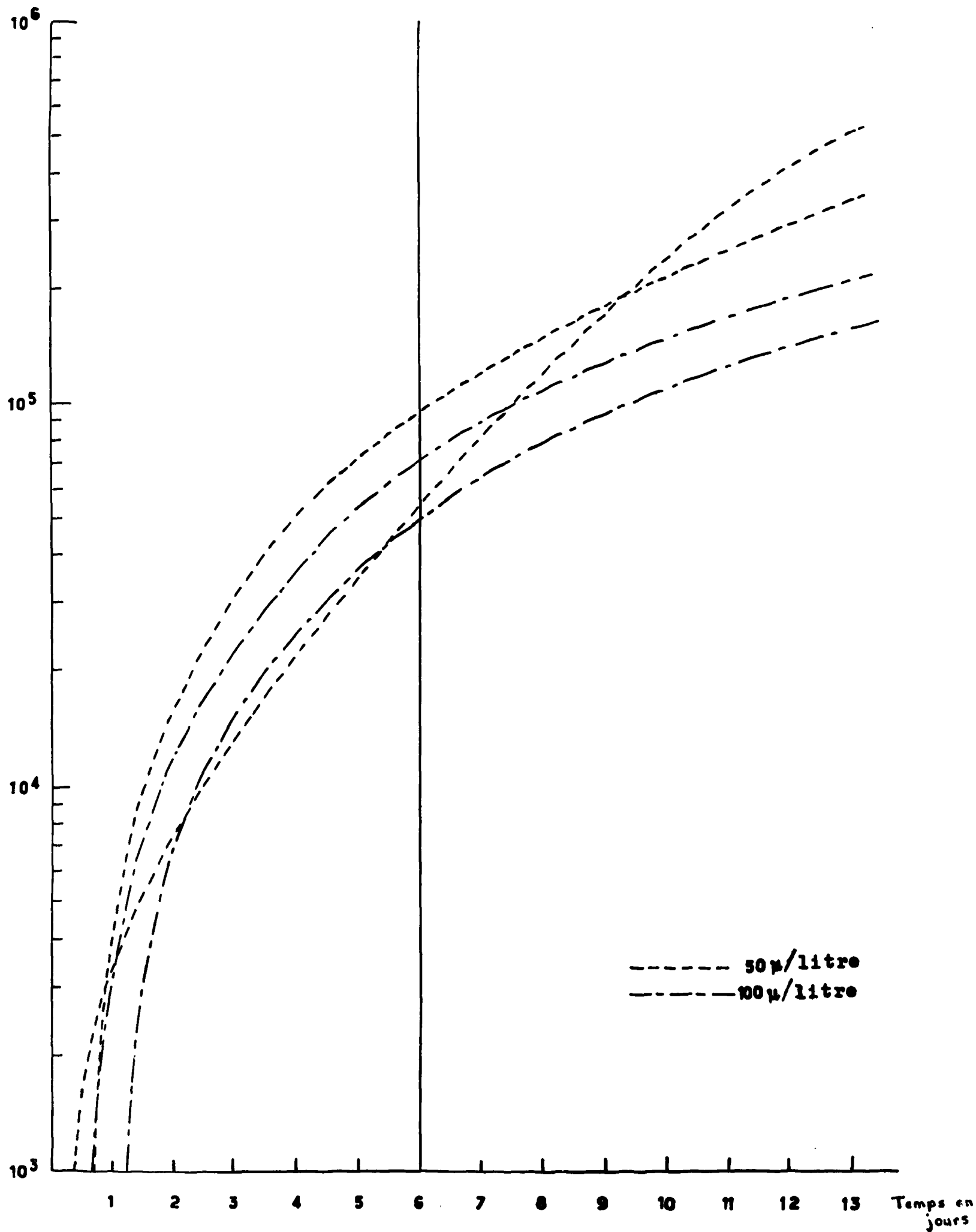


CONTAMINATION AVEC ENTRAINEUR

- 140 Be -

Lavage avec $(NO_3)_2 Ce$ à 0,1%.

$$S = \sum (cv)$$



EXPERIMENTATION AVEC ^{140}Ba

TABLEAU 1 (voir texte p. 11)

Conditions des Expériences	Phase de contamination avec ^{140}Ba		Phase de lavage	
		$\frac{S}{A}$		$\frac{L}{R}$
Dimensions (H15cm de la colonne (ø40mm) Percolations ininterrompues Débit 50 cm ³ par 24 h	Ia) Titre 50 µc/l Entraîneur sol. nitrate de Ca à 1 pour mille	6,6 pour cent	Ia) Entraîneur sol nitrate de Ca à 1 pour mille	17 pour cent
	Ib) Titre 100µc/l Entraîneur sol nitrate de Ca à 1 pour mille	11,5 pour cent	Ib) Entraîneur sol. nitrate de Ca à 1 pour mille	16 pour cent
	IIa) Titre 50 µc/l eau permutée	4,9 pour cent	IIa) Entraîneur sol nitrate de Ca à 1 pour mille	11,8 pour cent
	IIb) Titre 100 µc/l eau permutée	2,4 pour cent	IIb) Entraîneur sol nitrate de Ca à 1 pour mille	12,0 pour cent

2. Les échanges entre le sol et les liquides qui percolent à travers les couches de terrains sont importants.

Une partie de l'activité fixée, peut être facilement déplacée par une solution de nitrate de calcium à 1 pour mille. Une telle solution percolant à travers une couche de terrain de 15 cm de hauteur contaminée au ^{140}Ba , avec un débit tel que 1 m^3 de terre soit traversé par 1 m^3 de solution en une semaine déplacerait 12 pour cent de l'activité fixée.

Nous constatons ainsi qu'une fraction non négligeable des ions radioactifs fixés peuvent passer dans "les solutions de sols" lorsqu'un sol contaminé au ^{140}Ba est arrosé par une solution de nitrate de calcium à 1 pour mille.

En particulier, lorsque le volume de solutions calciques, apporté par les arrosages est réduit, et quand ces arrosages sont espacés (une fois par semaine en période sèche) les "solutions de sols" qui se sont chargées d'ions radioactifs circulent à travers les couches superficielles explorées par l'appareil racinaire des végétaux ligneux. De plus en cheminant dans le sol, elles échangent moins facilement les ions radioactifs à travers les couches sous-jacentes, puisque la présence de nitrate de calcium inhibe particulièrement la fixation de ^{140}Ba .

Il est à noter qu'au contraire des arrosages répétés très souvent, pratiqués avec un grand volume de solution calcique, provoqueraient un lessivage des couches contaminées et une contamination des couches profondes que n'atteindraient plus l'appareil racinaire des végétaux.

B. PROPRIETES D'EPURATION DU SOL DU C.E.N.G. VIS-A-VIS
DE SOLUTIONS CONTAMINEES AVEC ^{32}P .

Comme les résultats exposés dans le précédent rapport avaient été obtenus avec ^{32}P dans des conditions expérimentales un peu différentes, nous avons, par souci de pouvoir effectuer une comparaison rigoureuse, recommencé nos expériences avec cet élément dans des conditions cette fois comparables à celles qui ont été employées pour le baryum. Le tableau 2 résume nos conditions expérimentales et les résultats obtenus. Nous avons construit les courbes $S = \sum (CV)$ en portant en abscisse le temps et en ordonnée les activités cumulées à la sortie (voir courbe II). Ces résultats confirment tout à fait les conclusions du rapport de janvier 1961.

1° Le sol du C.E.N.G. a un pouvoir d'épuration important vis-à-vis de solutions contaminées avec ^{32}P , surtout lorsque cet élément est dissous dans l'eau permutée où l'eau industrielle qui ne contient pas de phosphates inactifs pouvant jouer le rôle d'entraîneur.

2° Ceci n'exclut pas la possibilité d'un déplacement ultérieur de ce radioélément et de la contamination de la nappe phréatique sous-jacente. En effet après la contamination d'une couche de sol les échanges entre le sol et les liquides qui percolent à travers les terrains (ou éventuellement les mouvements de la nappe phréatique) peuvent déplacer les zones de contamination.

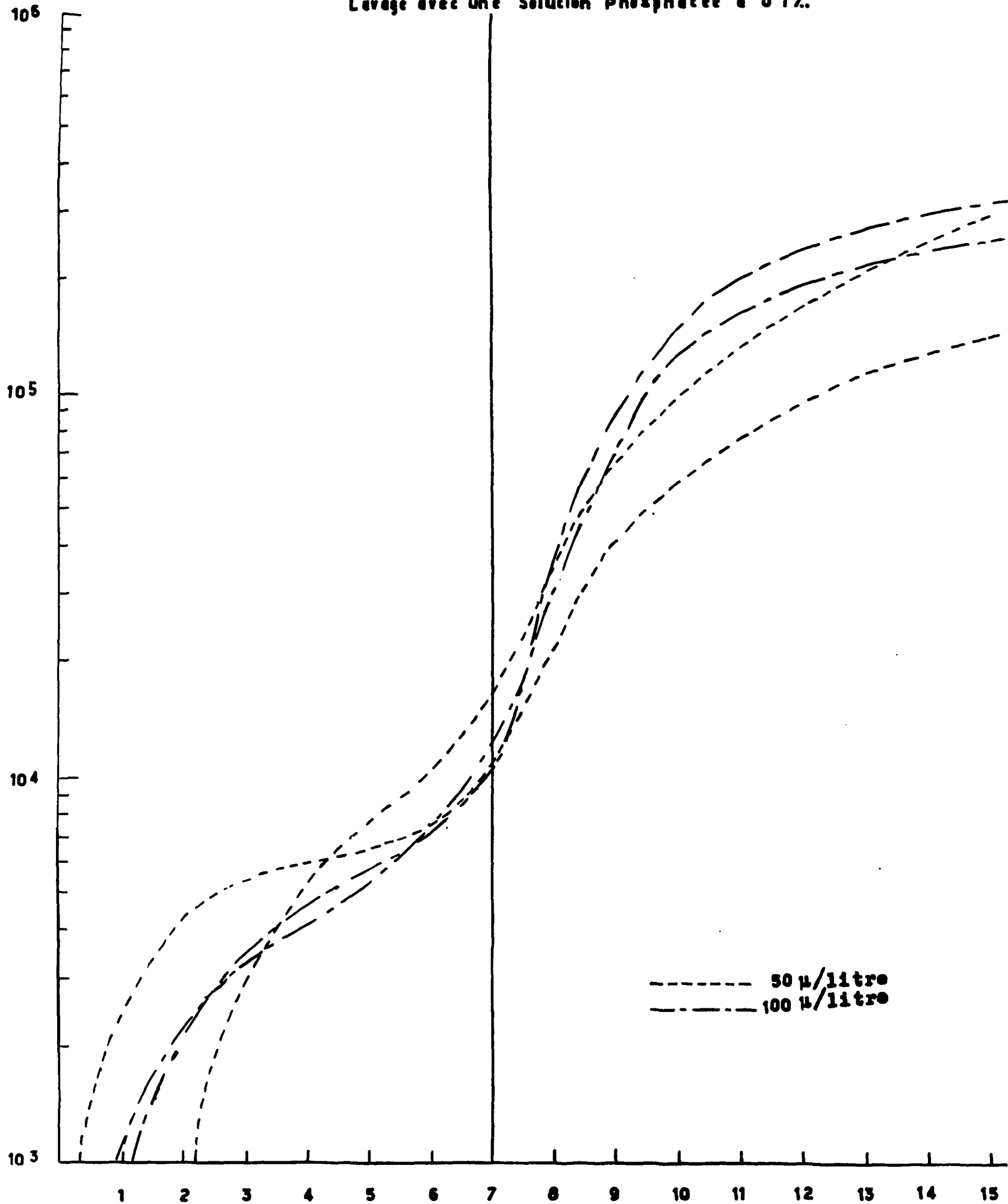
3° Nous constatons qu'une fraction non négligeable des ions radioactifs peuvent passer dans les "solutions de sols" lorsque le sol contaminé est arrosé par une solution de phosphate inactif (1 pour mille).

CONTAMINATION A L'EAU PERMUTÉE

32 P

$$S = \sum (cv)$$

Levage avec une Solution Phosphatée à 0.1%.

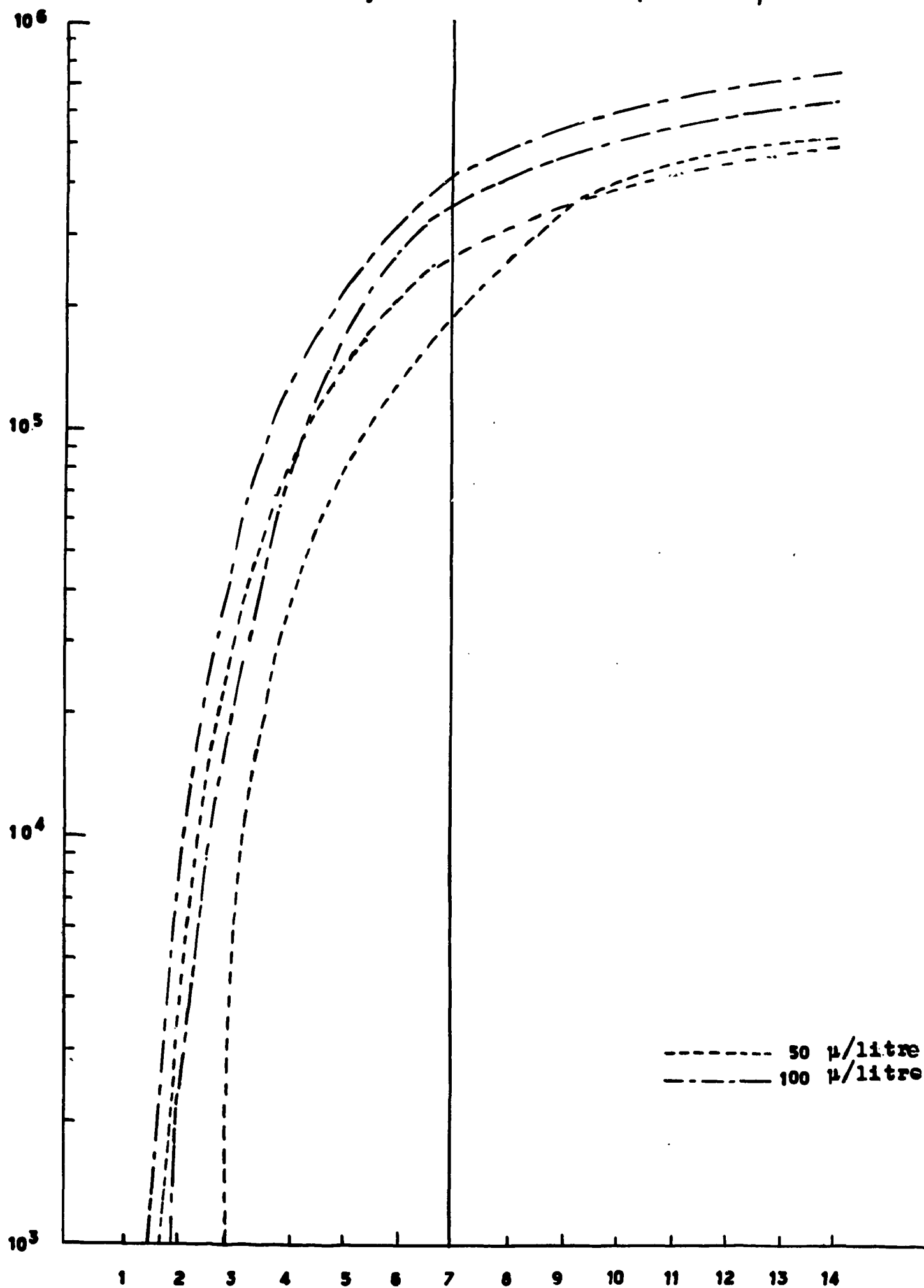


$S = \Sigma (cv)$

CONTAMINATION AVEC ENTRAINEUR

32 p

Lavage avec une Solution Phosphatee à 0,1 %.



EXPERIMENTATION AVEC ^{32}P

Tableau 2 (voir texte p 13)

Conditions des Expériences	Phase de contamination avec ^{32}P		Phase de lavage	
		$\frac{S}{A}$		$\frac{L}{R}$
Dimensions (H15cm de la colonne ($\varnothing 40\text{mm}$) Percolations ininterrompues Débit 50 cm^3 par 24 h	Ia) Titre $50\text{ }\mu\text{c/l}$ Contamination avec entraîneur	8,4 pour cent	Ia) Lavage Contamination avec entraîneur	10,5 pour cent
	sol. phosphatée 1 pour mille		sol. phosphatée 1 pour mille	
	Ib) Titre $100\text{ }\mu\text{c/l}$ Contamination avec entraîneur	7,6 pour cent	Ib) Lavage Contamination avec entraîneur	7,8 pour cent
	sol. phosphatée 1 pour mille		sol. phosphatée 1 pour mille	
	IIa) Titre $100\text{ }\mu\text{c/l}$ eau permutée	1 pour cent	IIa) sol. phosphatée à 1 pour mille	5,6 pour cent
	IIb) Titre 100 uc/l eau permutée	1 pour cent	IIb) sol. phosphatée à 1 pour mille	6 pour cent

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR L'ACCUMULATION DE ^{140}Ba et ^{32}P DANS LES TISSUS VEGETAUX

Comme dans la première partie de ce travail nous avons choisi des conditions expérimentales analogues aux conditions qui seraient réalisées dans la nature en cas de rupture ou d'un défaut d'étanchéité dans une canalisation où circulent les effluents contaminés.

Nous avons étudié l'absorption, la translocation et l'accumulation de ^{32}P et ^{140}Ba , dans diverses espèces ligneuses cultivées sur des sols contaminés avec l'un de ces éléments et soumis à un traitement particulier que nous proposons (rapport janvier 1961 page 16, paragraphe III). Il consiste en un arrosage répété à un intervalle d'une semaine par un volume limité (1,5 ou 3 pour cent du volume du pot dans lequel est cultivé l'arbre) d'une solution inactive servant d'entraîneur à l'élément radioactif contaminant.

A. PENDANT LA PERIODE DE DORMANCE HIVERNALE

Nous avons étudié cette période à l'aide de six séries d'essais dont l'ensemble recouvre la totalité des mois froids, et qui ont lieu en deux groupes, du 20 octobre 1961 au 12 décembre 1961 et du 1er décembre 1960 au 17 avril 1961. Nous avons expérimenté sur diverses espèces végétales : peupliers noirs (*populus nigra*) épicéas (*picea excelsa*), thuyas (*thuya*) avec deux éléments ^{140}Ba et ^{32}P . Chaque essai a été fait sur trois arbres dans des conditions aussi identiques que possible. Le tableau 3 résume nos conditions d'expérience.

Tableau 3 (voir texte p. 17)

Date	Agent de contamination	Erables	Epicéas	Cyprès
I du 20/10/61 au 8/12/61	^{32}P	25 μc 3 essais 50 μc 3 — T 3 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 essais T 3 essais	
II du 1/12/60 au 6/1/61	^{140}Ba	Peupliers 25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —
III du 26/1/61 au 15/2/61	^{32}P avec 2 arrosages par une sol.phosphatée à 1 pour mille	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —
IV du 13/2/61 au 3/3/61	^{32}P avec 2 arrosages par une sol.phosphatée à 1 pour mille		25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —
V du 10/3/61 au 27/3/61	^{32}P avec 2 arrosages par une sol.phosphatée à 1 pour mille			25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —
VI du 31/3/61 au 17/4/61	^{32}P avec 2 arrosages par une sol.phosphatée à 1 pour mille	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —	25 μc 3 essais 50 μc 3 — 100 μc 3 — T 2 —

CONDITIONS DE CULTURE ET MESURES D'ACTIVITE

Nous expérimentons sur de jeunes arbres de 1 m à 1,50 m de hauteur cultivés en pot de 3 500 cm³, sur terre du C.E.N.G., et laissés sur le terrain de culture, dans les conditions climatiques naturelles. Les pots sont isolés du sol en place par des sacs en polyvinyle, pour éviter à la fois les pollutions de ce dernier et les échanges entre la terre du pot et le sol naturel. Nous contaminons le contenu de chaque pot, par un arrosage avec 50 cm³ de solution de ³²P ou ¹⁴⁰Ba dans l'eau permutée. Les activités totales utilisées varient. Pendant toute la durée de l'expérience les arbres sont laissés sur le terrain. De plus, nous arrosons le sol une fois par semaine. Les arbres contaminés avec ³²P ont reçu le 15ème jour et le 8ème jour avant les expériences, 50 cm³ d'une solution phosphatée inactive à 1 pour mille qui sert d'entraîneur. Les mesures d'activité sont faites selon la méthode décrite page 25 du rapport de janvier 1961. Nous mesurons l'activité des cendres des échantillons des tissus végétaux prélevés en différents points de l'organisme. Les comptages sont faits en 100 secondes sur 2 cg de cendres. Nous utilisons un ensemble de comptage à temps précompté relié soit à un compteur GM 13 A 7 soit à un détecteur constitué par un scintillateur à cristal d'iodure de sodium muni d'un amplificateur d'impulsions du type APT 2. Les tableaux 4 et 5 résument les résultats obtenus.

(10⁻⁶ µc). Les activités sont mesurées sur 2 cg de cendres et exprimées en (10⁻⁶ µc). Chaque chiffre est la moyenne des résultats obtenus pour trois arbres.

Tableau 5 (voir texte p. 19)

I du 20.10.61 au 8.12.61 32 _p	25 _{µc} 50	ERABLES 20.10.61 au 24.11.61		EPICEAS du 20.10.61 au 1.12.61				
		sommet (bois)	base (bois)	sommet aiguilles	bois	base aiguilles	bois	
				166	250	210	170	
				du 20.10.61 au 8.12.61				
				50	80	626	230	
III du 26.1.61 au 15.2.61 32 _p	25 _{µc} 50 100			Bois sommet base		Aiguilles échelon moyen	THUYAS bois feuilles	
				32	108	16		
				48	248	120	272	
				24	372	240	635	690
IV 13.2.61 au 3.3.61 32 _p	25 _{µc} 50 100			Bois sommet base		Aiguilles échelon moyen	bois feuilles	
				68	400	152	80	120
				276	2660	348	590	500
				368	1700	760	820	1050
V 10.3.61 au 3.4.61 32 _p	25 _{µc} 50 100						Bois feuilles	
							112	232
							36	236
							156	420
VI 31.3.61 au 17.4.61 32 _p	25 _{µc} 50 100 25 _{µc} 50	<u>Peupliers</u> Bois Sommet base		Bois tronc rameaux		Aiguilles échelon moyen		
		420	810	184	388	1080	140	220
		192	492	396	280	400		188
				120	1100	3300	264	392
		Feuilles échelon moyen						
		1030						
		1300						

Tableau 4 (voir texte page 19)

II		<u>Peupliers</u>			<u>Épicéas</u>				<u>Thuyas</u>	
		sommet (bois)	base (bois)		sommet (bois)	base (bois)	aiguilles éch ^{on} moyen		bois	feuilles
du										
1/12/	25 μ c	18	95	25 μ c	0	0	0	25 μ c	0	0
60	50	0	10	50	0	0	0	50	0	0
au	100	0	40	100	0	0	0	100	0	0
6/1/										
61										
140 _{Ba}										

Les activités sont exprimées en nombre de coups en 100 s par 2 cg de cendres après déduction du nombre de coups émis dans les mêmes conditions par les tissus prélevés sur les témoins. Chaque chiffre est la moyenne des résultats obtenus pour trois arbres. Nous avons calculé au cours de nos séries d'essais le rapport entre le taux de cendres et le poids frais des différents tissus. Pour les érables, dans le bois, le rapport Poids de cendres / Poids frais varie de 2 à 3 pour cent; pour les épicéas, dans le bois, il varie de 2 à 2,5 pour cent et pour les épicéas, dans les aiguilles, de 3,5 à 4 pour cent. L'activité mesurée sur 2 cg de cendres représente donc approximativement l'activité de 1 g de tissus frais pour le bois, et de 0,50 g de tissus frais pour les aiguilles.

ETUDE DES RESULTATS

I. Entre le 20 octobre et le 12 décembre 1961

Entre le 20 octobre et le 24 novembre les érables ne sont pas contaminés. En les comparant avec les témoins nous ne pouvons pas mettre en évidence une absorption radiculaire ni une translocation du P minéral.

Entre le 20 octobre et le 12 décembre 1961, l'absorption est très faible et la translocation très réduite dans les épicéas. La concentration en radioéléments est plus importante dans les tissus (bois ou aiguilles) prélevés à la base du tronc que dans le sommet.

II. Entre le 1er décembre 1960 et le 6 janvier 1961

nous constatons que les peupliers ont été légèrement contaminés. Leurs racines commencent dès cette période à absorber le baryum contenu dans les "solutions de sols". La concentration de ce radioélément est plus importante dans les tissus prélevés à la base du tronc. On peut penser que l'absorption du calcium commence à se faire aussi à cette période.

Par contre, nous ne pouvons pas mettre en évidence un début d'absorption et de translocation dans les épicéas et les thuyas.

III. Entre le 26 janvier et le 15 février,

la contamination par ^{32}P est décelable dans tous les arbres mis en expérience

Peupliers, l'absorption, la translocation et l'accumulation de ^{32}P sont particulièrement nettes dans les peupliers. Le ^{32}P diffuse dans toutes les parties des arbres. Dans l'ensemble l'accumulation est plus importante dans les tissus prélevés au sommet du tronc.

Epicéas - Dans les épicéas le ^{32}P est surtout localisé dans les tissus prélevés à la base du tronc ou dans les rameaux bas. Le taux de contamination est plus faible dans les échantillons prélevés au sommet du tronc. L'accumulation de ^{32}P est nettement décelable dans les aiguilles. Elle reste cependant plus faible qu'à la base du tronc.

Thuyas - Les feuilles sont moins contaminées que le bois. Seuls, les thuyas qui ont reçu plus de 50 μc sont contaminés.

IV. Entre le 13 février et le 3 mars

Epicéas - On constate que ^{32}P reste toujours localisé surtout dans les parties basses du tronc. L'accumulation dans les aiguilles devient plus importante que pendant la période précédente.

Thuyas - Tous les thuyas mis en expérience sont contaminés. L'accumulation dans les feuilles est plus importante que pendant la quinzaine précédente.

V. Entre le 10 mars et le 27 mars

Thuyas - Les feuilles de thuyas sont plus contaminées que le bois.

VI. Entre le 31 mars et le 17 avril

Peupliers - L'accumulation est surtout importante dans les jeunes feuilles et les parties basses du tronc.

Epicéas - L'accumulation est plus importante dans les aiguilles qui sont plus contaminées que le bois.

Thuyas - L'accumulation se fait surtout dans les feuilles.

Ainsi les mécanismes qui permettent les différentes formes de pénétration des éléments minéraux dans les racines fonctionnent, bien qu'au ralenti, même pendant la période de "dormance apparente".

Pour le peuplier, dès le mois de décembre un ensemble de conditions climatiques provoque le réveil. L'importance de la sensibilité personnelle à ces stimuli, propre à chaque individu, apparaît nettement : dans les mêmes conditions de culture et de température, certains lots de peupliers "s'éveillent" plus précocement (II; 26 µc).

Pour chaque espèce les conditions favorables pour mettre fin à la dormance varient : besoin de froid plus ou moins grand, teneur en eau des tissus, photo-période, température. La dormance est moins profonde dans les peupliers que dans les épicéas ou les thuyas.

L'absorption des ions Ba commence dès le mois de décembre chez les peupliers. Il est généralement admis que le métabolisme du Ca et du Ba sont assez comparables. De plus, on peut penser que le P est absorbé lui aussi dès le mois de décembre, puisque (expérience II) cet élément s'accumule déjà chez la plupart des peupliers mis en expérience.

Il semblerait par ces résultats que le pouvoir d'absorption des substances minérales soit rétabli avant les phénomènes qui permettent la translocation et l'accumulation des ions dans certains tissus. En effet on constate d'abord une localisation des radioéléments dans les parties basses du tronc (en décembre pour les peupliers, fin janvier pour les épicéas, début février pour les thuyas). En mars/avril, au contraire, pendant une période d'une même durée de trois semaines, le radioélément diffuse dans tout l'organisme et s'accumule de façon préférentielle dans les feuilles jeunes des peupliers, les aiguilles des épicéas et les feuilles des thuyas.

De nombreux travaux montrent que le pouvoir d'absorption et le pouvoir d'accumulation d'un tissu végétal sont influencés par divers facteurs en particulier par l'augmentation de l'éclairement et de la température. D'ailleurs dans les expériences de mars et d'avril, la durée de l'éclairement a beaucoup augmenté par rapport aux expériences de décembre et janvier. Ainsi à

l'approche du printemps, les jours s'allongent rapidement, la vitesse de translocation des ions augmente, et les phénomènes d'accumulation sont importants. En hiver, au contraire, seuls les phénomènes d'absorption sont nettement visibles et les corps absorbés restent probablement en majeure partie dans la partie externe des racines.

A la lumière des travaux récents on admet qu'au niveau des racines, l'activité métabolique des cellules conditionne en partie l'absorption sélective des ions. Il existe en effet une barrière endodermique à la libre diffusion des ions. Leur translocation et leur accumulation se font grâce à un mécanisme de transporteurs, qui ont une affinité pour les ions et forment avec eux un complexe traversant la barrière cytoplasmique. Les complexes ainsi formés sont facilement labiles, ils libèrent ensuite les ions transportés.

D'autre part, la teneur en eau des tissus végétaux est étroitement liée à leur activité vitale. Nous avons étudié les variations du taux d'humidité des différents tissus végétaux : bois prélevé à l'extrémité du tronc ou à sa base; feuilles et aiguilles des diverses espèces utilisées, peupliers, épicéas, cyprès, dans les cinq séries d'essais.

La dessiccation est effectuée dans des conditions invariables : les échantillons sont placés à l'étuve à 100° et maintenus à cette température pendant 4 h 30. Pour chacun des échantillons nous avons calculé, le taux d'hydratation H. Appelons Pf le poids de l'échantillon frais, et Ps le poids de l'échantillon sec :

$$H = \frac{P_f - P_s}{P_s}$$

Le tableau 6 résume les valeurs moyennes de H obtenues dans chaque série d'essais.

Nos résultats montrant que la teneur en eau diminue régulièrement dans tous les tissus végétaux du début décembre à la fin février. Elle augmente très rapidement en mars et début avril, l'absorption de l'eau étant considérablement modifiée par la température. De plus, lorsque le taux d'humidité augmente, nous pouvons constater également une translocation du ^{32}P , qui diffuse dans tous les tissus et une accumulation rapide de cet élément dans les aiguilles et les feuilles. Les échanges d'eau entre la plante et le milieu extérieur : sol ou atmosphère, semblent étroitement liés aux phénomènes de translocation.

Nous continuons ce travail relatif à la période de dormance, en étudiant d'une façon systématique pendant cette période les variations de l'absorption radiculaire, de la translocation et de l'accumulation des éléments minéraux dans les différents tissus, et les échanges d'eau entre la plante et le milieu extérieur. De plus, nous cherchons à déterminer le temps de la "réponse" de l'arbrisseau aux variations des facteurs climatiques, à voir dans quelle mesure elle se traduit par des modifications de l'absorption et de la translocation, et à les comparer au cours d'un cycle végétatif complet avec les modifications de la croissance.

Tableau 6 (voir texte p. 26)

Dates	Peupliers			Epicéas			Cyprès	
	Extrémité	base	feuilles	Extrémité	base	aiguilles	bois	feuilles
II du 1.12.60 au 6.1.61	100 % 11 essais	90 % 11 essais		117 % 11 essais	93 % 11 essais	119 % 11 essais	96 % 11 essais	121 % 11 essais
III du 26.1.61 au 15.2.61	86 % 11 essais	78 % 11 essais		90 % 11 essais	87 % 11 essais	104 % 11 essais	52 % 11 essais	81 % 11 essais
IV du 13.2.61 au 3.3.61	70 % 11 essais	57 % 11 essais		42 % 11 essais	44 % 11 essais	54 % 11 essais	11 essais	72 % 11 essais
V du 10.3.61 au 31.3.61	80 % 9 essais	66 % 9 essais		55 % 9 essais		60 % 9 essais		101 % 9 essais
VI du 31.3.61 au 17.4.61	117 % 9 essais	104 % 9 essais	209 % 9 essais	83 % 9 essais	67 % 9 essais	73 % 9 essais		

B. PENDANT LA PERIODE VEGETATIVE

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Du 17 juillet au 5 septembre 1961, nous avons étudié l'absorption, la translocation et l'accumulation de ^{140}Ba dans des épicéas (picea excelsa) et des érables (acer campestris) cultivés en pots sur sols contaminés avec ^{140}Ba . Nous avons expérimenté sur 20 arbres.

Les doses totales reçues sont variables :

0,5 μc - 0,25 μc - 0,10 μc - 0,05 μc par pot

Pendant la durée de l'expérience les arbres sont laissés au laboratoire. Le degré hygrométrique de la pièce est constant. De plus, nous arrosons le sol une fois par semaine : le 7ème, le 14ème, le 21ème jour après la contamination par 100 cm^3 d'une solution de nitrate de calcium à 1 pour mille; le 28ème et le 35ème jour après la contamination par 100 cm^3 d'eau ordinaire. En fin d'expérience, sur chaque arbre, nous avons mesuré l'activité des différents tissus en la comparant avec celle d'un lot d'arbres témoins.

METHODES DE MESURE DE L'ACTIVITE DES TISSUS

Nous avons mis au point une méthode de mesure des activités de tissus plus sensible que celle que nous avons utilisée précédemment pour la période de dormance (rapport de janvier 1961 page 25). Elle permet d'obtenir des résultats très comparables entre eux et reproductibles. Nous opérons dans des conditions strictement définies :

Prélèvements de tissus végétaux et préparation de l'échantillon moyen

En fin d'expérience les troncs des arbres sont coupés à 5 cm au-dessus du sol. Pour arrêter la translocation des éléments minéraux, le tronc et les branches sont fragmentés aussitôt après, en tronçons numérotés de 12 cm de hauteur, dont la position, sur l'arbre entier est soigneusement repérée. La partie supérieure de chaque tronçon permet de préparer un échantillon moyen qui est coupé en fragments les plus comparables possible (tranches de même épaisseur et à partir de ces tranches, sections de même surface). La durée de ces opérations est fixée pour toute une série d'essais.

Dessication et calcul du taux d'hydratation des tissus

L'échantillon moyen frais est pesé, nous représentons par P_f le poids frais. Cet échantillon est ensuite déshydraté pendant 24 heures sous pression réduite à 22° en présence de chlorure de calcium desséché. En fin de dessication, le poids sec de l'échantillon est mesuré, il permet de calculer H , le taux d'hydratation; les tissus sont calcinés et réduits en cendres au four à moufle à 500° . Les cendres sont ensuite solubilisées dans l'acide nitrique dilué au 1/10 (1 cm^3 d'acide nitrique dilué pour 2 cg de cendres). Un centimètre cube de cette solution azotique, exactement mesurée, est déposé dans une capsule à fond plat en acier inoxydable et évaporé à sec à basse température sur une plaque chauffante. L'extrait sec reste bien fixé au fond de la capsule. Son activité peut être mesurée facilement sans risque de perte d'échantillon ou de contamination du manipulateur et de l'ensemble de comptage. Ceci est très important pour pouvoir utiliser un ensemble de comptage à très faible mouvement propre (ensemble Jiveco) avec lequel nous travaillerons à partir de février 1962.

ETUDE DES RESULTATS

L'étude des résultats obtenus, pendant la période végétative montre que, après cinq semaines de culture sur sols contaminés avec ^{140}Ba :

1° il est possible de déceler une augmentation de l'activité des différents tissus (bois, aiguilles, feuilles) prélevés sur de jeunes épicéas ou de jeunes érables cultivés sur un sol naturel, lorsque la contamination du sol est égale ou supérieure à $0,25 \mu\text{c}$ pour $3\ 500 \text{ cm}^3$, soit environ $75 \mu\text{c}$ par m^3 . Nous décelons par cette méthode une contamination du sol quatre fois plus faible que par la méthode utilisée l'année précédente (page 25 du rapport de janvier 1961).

Lorsque la contamination du sol est de $75 \mu\text{c}$ par m^3 ,

— l'activité moyenne des tissus prélevés sur des épicéas et rapportée à 1 g de tissu sec est plus importante dans le bois ($2,9 \times 10^{-3} \mu\text{c/g}$) que dans les aiguilles ($2,1 \times 10^{-3} \mu\text{c/g}$)

— l'activité moyenne des tissus prélevés sur des érables et rapportée à 1 g de tissus sec est de $2,1 \times 10^{-3} \mu\text{c/g}$ dans le bois et de $4 (10^{-3}) \mu\text{c/g}$ dans les jeunes bourgeons qui se forment après la chute des feuilles, existant au moment de la contamination du sol.

2° Comme précédemment (rapport janvier 1961 — page 27 paragraphe 4) nous avons observé que la contamination du sol par une solution de ^{140}Ba perturbe le développement des érables et des épicéas cultivés sur ce sol. Les érables perdent leurs feuilles. Les aiguilles des épicéas deviennent moins brillantes et se dessèchent. Les taux d'hydratation H de leurs tissus sont très inférieurs à ceux des arbres témoins conservés dans

les mêmes conditions. Ceci peut être attribué à la toxicité chimique du baruym, plus forte que celle du strontium. Nous étudions les mécanismes de cette nocivité. De plus, des expériences analogues de culture sur sol contaminé avec ^{90}Sr sont en cours.

CONCLUSION

1. Les solutions aqueuses peu minéralisées (telles que l'eau permutée, l'eau de pluie, l'eau provenant de la piscine d'un réacteur du type Mélusine ou bien encore l'eau industrielle ou la nappe phréatique sous-jacente) contaminées par ^{32}P ou ^{140}Ba sont presque totalement épurées après percolation à travers le terrain du C.E.N.G. La plus grande partie des radioéléments est fixée par la couche superficielle du sol. Les échanges entre le sol et les liquides qui le pénètrent sont importants, car inversement une percolation répétée à intervalle d'une semaine, par un volume limité d'une solution contenant une faible concentration (1 pour mille) d'un sel inactif (nitrate de Ca ou phosphate de Na) pouvant servir d'entraîneur à l'élément contaminant peut déplacer une part importante de l'activité fixée dans le sol et la faire passer dans les solutions du sol. Ce traitement, pratiqué dans les premières semaines qui suivent une contamination de sol, favorise l'absorption de l'élément radioactif contaminant, par l'appareil radiculaire, et son accumulation dans les parties aériennes de jeunes arbres.

2. Il semble possible d'utiliser de jeunes arbres, épicéas en particulier, pour détecter une contamination éventuelle du sol par un radioélément et cela pendant toute la durée du cycle végétatif : ainsi nous avons suivi l'absorption de ^{32}P et de ^{140}Ba par les racines de jeunes épicéas cultivés

sur des sols contaminés avec radioéléments en mesurant l'augmentation de l'activité des aiguilles prélevées sur ces arbres, par rapport à celle des aiguilles prélevées sur un témoin cultivé dans les mêmes conditions climatiques, sur un sol identique non contaminé. Nos résultats montrent nettement que, au cours d'un même cycle végétatif, les variations de l'absorption et de la translocation ne sont pas exactement comparables pour les différentes espèces végétales. Dans les mêmes conditions climatiques, l'absorption radiculaire et la translocation sont ralenties plus précocement à l'automne chez les peupliers et les érables que chez les épicéas; de même elles reprennent plus précocement lorsque les jours s'allongent fin décembre et en janvier. Nous pensons donc utiliser en même temps plusieurs espèces végétales convenablement choisies.

3. Le procédé paraît intéressant pour contrôler d'une façon permanente le degré de contamination d'un terrain pour l'ensemble de la couche arable.

Le pouvoir de concentration de ces tissus est en effet important : si nous comparons l'activité d'un gramme de cendres de tissu végétal sec, après 4 semaines de culture sur sol contaminé, et l'activité initiale de 1 cm³ de terre au début de la contamination, par ¹⁴⁰Ba, le facteur de concentration (Fc) est de l'ordre de 135 dans le bois d'épicéas, de 85 dans les aiguilles d'épicéas; il est également voisin de 85 dans le bois des érables mais s'élève jusqu'à 170 dans les jeunes bourgeons d'érables. La préparation des échantillons de tissus végétaux et les mesures d'activité peuvent devenir une méthode de contrôle de routine, commode à utiliser parce qu'elle ne présente pas de très grandes difficultés.

Nous poursuivons nos essais avec d'autres conifères (pinus nigra). Nous nous proposons de cultiver ces diverses

espèces ligneuses au cours d'un cycle végétatif complet, dans des bacs de fibrociment (longueur 200 cm, largeur 80 cm, profondeur 80 cm) pouvant contenir 1 m³ de terre que nous contaminerons par des volumes connus d'eau provenant de la piscine de "Mélusine" ou "Siloé". L'eau de ces piscines contient en solution un mélange d'anions et de cations radioactifs; il nous paraît nécessaire précisément d'étudier l'effet des ions interférents dans l'absorption, la translocation et l'accumulation d'un radioélément considéré.

Manuscrit reçu le 8 mars 1962

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALBAUM H.G.
The metabolism of phosphorylated compounds in plant
Ann. Rev. Plant. Physiol., 1952, 3, 35-58
- [2] ALLERUP S.
Transpiration and water movement in Young Wheat plants
Physiol. Plant. Danem., 12, 4. 907-916
- [3] BARBIER G., HUGUET-MICHON
Sur la prévision de l'accumulation dans le sol et dans
les récoltes d'éléments radioactifs de longue période
apportés indéfiniment à un rythme limité
1958, rapport C.E.A. n° 1142
- [4] BERNSTEIN L., NIEMAN R.H.
Apparent free space of plant roots
Plant Physiol., 1960, 132, 34-35, 589-598
- [5] BORTHWICK H.A., HENDRICKS S.B.
Photoperiodism in plants
Science USA, 1960, 132, 34-35, 1223-1228
- [6] BOVARD et GRAUBY A.
Etude directe de la contamination des sols en place
par la méthode autoradiographique
Rapport C.E.A. 1751
- [7] BRIGGS E., ROBERTSON R.N.
Apparent free space
Ann. Rev. Plant Physiol., 1957, 8, 11-30
- [8] BROYER T.C., OVERSTEET R.
Cation exchange in plant roots in relation to me
metabolism factors
Amer., Journ. Bot. 1940, 27, 425-430
- [9] BUTLER W.L., DONNS R.I.
Light and plant development
Scient. Amer., 1960, 203, 6, 56-63

- [10] CHAMPIGNY M.L.
Influence de la lumière sur la genèse des acides aminés
dans les feuilles de bryophyllum daigremontianum Berger
1960, thèse de l'Université de Paris
- [11] COHEN P., GAILLEDREAU G.
Pollution radioactive, aspects et remèdes
(en cours de publication)
- [12] COMBES R.
La substance azotée chez la plante ligneuse au cours
d'une année de végétation
C.R. Acad. Sc. 1927, 184, 533-535
- [13] COMBES R., BRUNEL A., CHABERT A.
Le métabolisme des protides chez un végétal cultivé
à des intensités lumineuses différentes
C.R. Acad. Sc., 1942, 214, 681-683
- [14] DEBUCH H.
Le métabolisme des composés phosphatés et des substances
dérivées - Künstliche radioaktive isotope in physiologie
Diagnostik und therapie
vol. I Springer 773-803
- [15] ECHEVIN R.,
L'azote, le phosphore, le soufre chez les plantes ligneuses
à feuilles caduques
Rev., Gen., Bot., 1931, 43, 517-677
- [16] EPSTEIN E.
Mechanism of ion absorption by roots
Nature, 1953, 171, 83-84
- [17] FONTAINE Y.
La contamination radioactive des milieux et organismes
aquatiques
1960, rapport C.E.A. 1588
- [18] GAGNAIRE J.
Utilisation des végétaux ligneux au contrôle de la
pollution radioactive d'un sol
Mémoire C.E.N.G. 1960, décembre et rapport C.E.A.
1854, 1961

- [19] GAUCH H.G.
Mineral nutrition of plants
Ann. Rev. Plant. Physiol., 1957, 8, 31-39
- [20] HALLAIRE M.
La diffusion de l'eau dans le sol. L'alimentation
hydrique des plantes annuelles
Bulletin de la Soc. Fr. Phys. Veg. n° 3 oct. 1959
et n° 2 oct. 1956
- [21] INRA
Absorption des radioéléments du sol par divers légumes
cultivés dans les conditions de la pratique
Rapport C.E.A. 1860
- [22] INRA
Etude de la vocation des sols en place à la rétention
des radioéléments
C.R. Acad. Agri. de Fr. - 16.3.60
- [23] JACKSON P.C., HAGEN L.E.
Products of orthophosphate absorption by barley roots
Plant physiol., 35, 3, 326-332
- [24] JACOBSON L.
A study of the mecanism of ion absorption by plants
roots using radioactive elements
Amer. J. Bot., 1947, 34, 415-420
- [25] KAWASE M.
Dormancy in Betula as a Quantitative State
Plant Physiol., 1961, 643-650
- [26] LEGGET J.E.
Entry of phosphate into Yeast cell
Plant Physiol., USA, 1961, 36, 3, 277-284
- [27] LEMEE G.
Bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports
avec l'humidité du sol
Bulletin Soc. Physiol. Veg., 1959, 3

- [28] LICHTENTHALER H.K.
Absorption de ^{32}P en solution aqueuse par l'appareil
radiculaire de bryophyllum daigremontianum
Rapport de stage EURATOM au Laboratoire Biologie
Végétale, C.E.N.G., 1961
- [29] LINCK A.J., SUDIA T.W.
The effect of Gibberellic acid on the absorption
and translocation of phosphorus 32 by bean plants
Amer. J. Botany, 47, 2, 101-105
- [30] LUNDEGARD H.
Mechanism of absorption transport accumulation and
secretion of ione
Ann. Rev. Plant. Physiol., 1955, 6, 1-24
- [31] MULDER
Mineral nutrition of plants
Ann. Rev. Plant. Physiol., 1960, 1, 1-21
- [32] SAXOD R.
Prélèvement de ^{32}P en solution aqueuse par l'appareil
radiculaire de quelques végétaux
D.E.S. Laboratoire Biologie Végétale, Fac. Sc. Grenoble
1961
- [33] SCHEFFER F., ULRICH B.
Use of ^{32}P for investigations in the system soil/soil,
solution plant
International Conference on the Peaceful Uses of Atomic
Energy, Geneva, 1958, 27, 100-206

FIN