CEA-R 3306

PRAT G. MERCIER F.-J. .-
Radioécologie appliquée à l'hygiène atomique. Radiotoxicologie alimentaire en zône contaminée. Retombées locales et chaîne alimentaire animale. (Monographie).-
Commissariat à l'énergie atomique, Centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), 1967.- 27 cm, 92 p., fig., tabl., dépl.

CEA-R 3306 - PRAT Georges, MERCIER Ferdinand-Jérôme

RETOMBEES LOCALES ET CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE

Sommaire. - Les conséquences locales des retombées fraîches, notamment dans le cas d'explosions nucléaires atmosphériques, sont passées en revue en ce qui concerne les problèmes de contamination interne du consommateur de denrées d'origine animale.

La comestibilité des aliments provenant de bêtes de boucherie ayant paturé sous les retombées est évaluée au double point de vue de la salubrité et de la radiotoxicologie. Le niveau de contamination de ces denrées est calculé en fonction de la retombée au sol, des paramètres agronomiques et écologiques pour chaque radioélément de la chaîne alimentaire animale.

./.

CEA-R 3306 - PRAT Georges, MERCIER Ferdinand-Jérôme

LOCAL FALL-OUT AND THE ANIMAL FOOD CHAIN

Summary. - The local consequences of fresh fall-out, especially in the case of atmospheric nuclear explosions, are reviewed from the point of view of the internal contamination of the consumer of foodstuffs of animal origin.

The edibility of foodstuffs derived from animals having grazed in the presence of fall-out is evaluated both from the wholesome and radiotoxicological points of view. The contamination level of these foodstuffs is calculated as a function of the ground fall-out, and of agronomical and ecological parameters for each radio-nuclide of the animal food chain.

The internal exposure of the human consumer is calculated from this level as a function of the diet and of

./.

La contamination interne du consommateur humain est calculée à partir de ce niveau en fonction des modalités d'ingestion et de divers paramètres, notamment temporels. L'équivalent de dose au niveau de chaque organe critique, y compris le tube digestif, est déduit des charges de ces organes.

L'hygiène alimentaire en zone affectée par les retombées en découle, en relation avec les niveaux d'action fixés par les autorités responsables dans des circonstances exceptionnelles. Des critères concernant ces niveaux d'action sont donnés et les éléments de ces critères sont calculés en fonction des rations alimentaires.

1967 96 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

various parameters especially temporal. The equivalent dose to each critical organ, including the digestive tract is deduced from the burdens of each organ.

From this a nutritional hygiene in the areas affected by fall-out is obtained, in relationship to the action levels fixed by the responsible authorities in exceptional circumstances. Criteria for these action levels are given as function of the food rations.

1967 96 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

CEA - R 3306

RETOMBEES LOCALES
ET CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE

par

Georges PRAT et Ferdinand-Jérôme MERCIER

Rapport CEA - R 3306

CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES
DE FONTENAY-AUX-ROSES

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire,

- Rapport CEA-R 3306 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses
Département de la Protection Sanitaire

RADIOECOLOGIE APPLIQUEE A L'HYGIENE ATOMIQUE

RADIOTOXICOLOGIE ALIMENTAIRE EN ZONE CONTAMINEE

RETOMBEES LOCALES ET CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE

(Monographie)

par

Georges PRAT
Service de Santé des Armées

Ferdinand-Jérôme MERCIER
Service Biologique et Vétérinaire des Armées

- Novembre 1967 -

PREFACE

Cette monographie, présentée dans le cadre de l'écologie des retombées locales après explosions aériennes, a été réalisée par le Service de Santé et le Service Biologique et Vétérinaire des Armées, sous l'autorité scientifique du Département de Protection Sanitaire du Commissariat à l'Energie Atomique.

Les auteurs, Vétérinaire-Lt. Colonel MERCIER, du Service Biologique et Vétérinaire des Armées, pour la partie vétérinaire, et Médecin-Commandant PRAT, remercient Monsieur le Docteur MECHALI, Chef du Service d'Hygiène Atomique du Commissariat à l'Energie Atomique, qui a bien voulu accepter de guider cette étude.

Ils remercient aussi Monsieur DOUSSET, Adjoint au Chef du Service d'Hygiène Atomique, qui a bien voulu assumer la lourde tâche de vérifier les calculs (en partie), Monsieur FARGES, Chef de la Section de Contrôle Sanitaire du Département de Protection Sanitaire, sous l'autorité de qui s'effectue le contrôle de la radiotoxicologie des viandes, ainsi que Messieurs ERGAS et LE GRAND, du Service d'Hygiène Atomique, dont les conseils mathématiques furent précieux.

Cette étude a été effectuée à la demande du Service Biologique et Vétérinaire des Armées dans la perspective de l'examen des viandes, destinées à la collectivité militaire, au point de vue de la radiotoxicologie alimentaire.

INTRODUCTION A L'ETUDE DE LA RADIOTOXICOLOGIE

DES DENREES ANIMALES EN ZONE CONTAMINEE

- Incidence des retombées sur l'élevage
- Nature et investigation des problèmes posés
- Annexe

INTRODUCTION

Les conséquences des retombées immédiates des explosions nucléaires sur la pollution de l'alimentation sont importantes. Elles posent, dans certaines circonstances, le problème du risque à accepter une nourriture contaminée pendant des périodes, en général courtes, succédant immédiatement à l'explosion.

La contamination des produits végétaux est initialement dûe au dépôt actif sur leurs parties aériennes. Malgré une petite absorption foliaire, le niveau de contamination de la chaîne alimentaire végétale pourra être réduit sensiblement par lavage soigneux, tant que le dépôt actif ne sera pas introduit par la voie des racines, au niveau des parties consommables.

Il n'en sera pas de même pour la chaîne alimentaire animale, dont le niveau de contamination effectif sera plus élevé, bien souvent. D'autres problèmes se posent à son sujet, car, à la contamination des denrées s'ajoute leur diminution de comestibilité, liée à la radiopathologie du bétail irradié.

Les mesures convenables à appliquer dans les circonstances nécessitant l'acceptation du risque d'alimentation contaminée dépendront des situations réelles, des procédés de décontamination /5/ et de la durée de cette alimentation. Ces mesures ont été envisagées par Strop en 1959 /1/, dans les cas d'urgence, notamment en ce qui concerne l'abattage des animaux /2 et 3/ et leur état sanitaire /4/ .

En effet, les conséquences directes des retombées radioactives sur les conditions d'élevage et de ravitaillement en denrées animales sont les premiers problèmes à envisager, dans les cas où les prévisions de retombées n'ont pas amené la mise en stabulation préventive du bétail.

Après l'arrivée du fallout, le débit de dose d'exposition délivrée par le dépôt actif va interdire, s'il est trop élevé, le séjour sur les prés, du personnel chargé de l'entretien ou de la garde du bétail. La traite du lait et la recherche des bêtes pour l'abattoir devront être interrompues jusqu'à ce que ces opérations puissent s'effectuer avec des risques acceptables.

Il en résulte des délais de collecte des denrées animales et des précautions particulières de décontamination cutanée du cheptel avant l'abattage, ainsi que l'abandon du "cinquième quartier" (os, tractus digestif et respiratoire, certains abats) en raison de son niveau probablement trop élevé de contamination.

La comestibilité des denrées animales (surtout de la viande) sera conditionnée, au point de vue de l'hygiène, par deux risques :

— celui de la salubrité, liée à l'état sanitaire du bétail à la suite de l'irradiation qu'il aura

subie sur le pré. Ce risque est radiobiologique ; les bêtes malades du syndrome d'irradiation seront éliminées, suivant les critères vétérinaires classiques. Il y aura, d'autre part, des pertes par décès d'un certain pourcentage du troupeau ayant pâturé sous les retombées.

— celui de la radiotoxicologie des denrées consommables : liée à la contamination interne par suite de l'assimilation des radioéléments ingérés par les animaux producteurs.

Ce dernier risque nécessite une étude détaillée (objet de ce rapport).

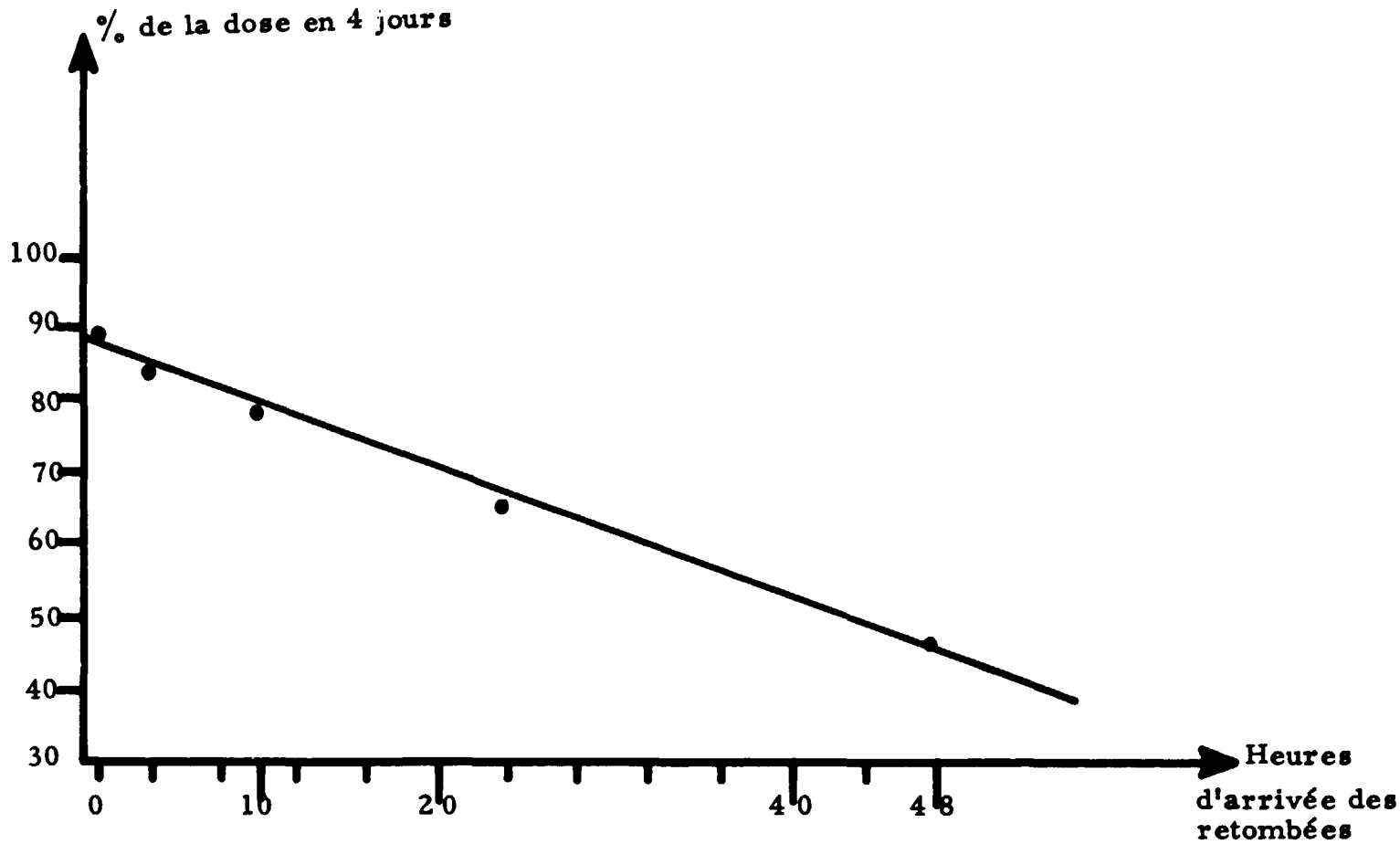
I - IRRADIATION DU CHEPTEL

Elle va entraîner le rejet des bêtes malades du syndrome d'irradiation, la perte définitive de celles qui vont périr et un délai d'abattage jusqu'à guérison pour les survivantes. Initialement, toute bête (saine) peut être abattue et consommée avant qu'elle n'ait pu assimiler la nourriture contaminée, si l'apparition des symptômes cliniques de l'irradiation n'est pas constatée au contrôle vétérinaire aux abattoirs. Ce cas entraîne des risques graves d'irradiation du personnel (fermier) et semble peu fréquent, en raison des délais de collecte.

En fait, pour des doses d'irradiation externe du bétail de l'ordre de la DL_{50}^{30}, l'abattage est possible d'après le seul critère de l'état sanitaire des bêtes sur pied, au cours de la première semaine après les retombées, si le débit de dose du dépôt a permis d'amener les bêtes à l'abattoir dans ce délai. Tout abattage, dans cette gamme de doses d'exposition, est déconseillé formellement entre le 14ème jour et le 30ème jour (délai nécessaire à la restauration), car il fournirait de la viande refusée au contrôle sanitaire vétérinaire /6/. La perte au 90ème jour est encore de 53 % (50 % décédé et 3 % malade) à cette dose.

a) Les doses d'irradiation externe à considérer sont celles accumulées en moins de quatre jours, délai suffisamment court pour qu'elles agissent comme des doses délivrées en une seule fois et à partir duquel l'étalement de la dose permet la mise en oeuvre des phénomènes de restauration. Les doses sont délivrées à des débits rapidement variables, suivant la loi en $t^{-1,2}$ (heures) de décroissance de l'activité du dépôt du mélange de produits de fission ; de sorte qu'à partir du 4ème jour, l'irradiation est beaucoup plus faible, et que les doses léthales sont délivrées en moins de quatre jours, en moyenne.

La date d'arrivée du fallout est aussi un facteur qui influence le débit de dose et les potentialités léthales des retombées ; elle conditionne le pourcentage de la dose délivrée en moins de quatre jours. La courbe et le tableau suivant donnent ce pourcentage /7/.



- Figure n°1 - % DE LA DOSE DELIVREE EN MOINS DE 4 JOURS

Heures d'arrivée après fission	1 h	4 h	10 h	24 h	48 h
% dose d'exposition en 4 j	89	84	78	65	46

Du fait de l'évolution quantitative et qualitative du mélange de produits de fission et de leur activité, notamment de la disparition des nucléides à vie courte, les doses, délivrées par les retombées d'arrivée tardive, ont un débit suffisamment bas pour que les processus de restauration puissent jouer. Dans ce cas, les DL_{50}^{30} sont plus élevées : le porc a une DL_{50}^{30} en exposition brève (inférieure à 4 jours) de 610 r et de 1540 r au débit de 50 $r.j^{-1}$; dans ces conditions, l'état sanitaire du bétail est moins influent sur la comestibilité.

b) Résultats expérimentaux concernant les DL_{50}^{30} en exposition brève, les pourcentages de bétail utilisable pour la consommation, suivant le délai d'abattage après l'irradiation et les doses reçues /6/ .

Les doses d'exposition ont été délivrées en moins de 4 jours par irradiation du bétail avec les rayons γ du Co^{60} pour l'établissement des doses léthales et avec des rayons X à 250 KvP pour les critères de morbidité et de comestibilité des animaux producteurs .

DL_{50}^{30}	785 r	610 r	540 r	524 r	640 r	1000 r	900 r
Animaux	Ane	Porc	Gros bétail	Mouton	Poulet	Poule	Poussins

∝ - Effet d'une dose d'exposition de 350 r sur l'utilisation du gros bétail

Temps après exposition	1 j	2 j	3 j	7 j	14 j	21 j	30 j	90 j	1 an	5 ans
% morts	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
% vivants	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99
Rejet ante mortem	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1
Rejet post mortem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilisables %	100	100	100	100	100	98	100	100	98	98

A cette dose, l'irradiation a peu d'effet sur la comestibilité et l'utilisation des denrées animales.

β - Effet de la DL_{50}^{30} (550 r) sur le même bétail

Temps après exposition	1j	2j	3j	7j	14j	21j	30j	90j	180j	1 an	5 ans
% morts	0	0	0	0	20	48	50	51	52	52	55
% vivants	100	100	100	100	80	52	50	49	48	48	45
Rejet ante mortem	0	0	2	2	75	50	25	0	0	0	0
Rejet post mortem	0	2	0	4	5	2	25	2	2	0	0
% consommable	100	98	94	0	0	0	0	47	46	48	45

L'effet est important, aucun animal n'est utilisable du 14ème au 30ème jour.

γ - Effet de la DL_{100}^{30} (750 r) sur le gros bétail

Temps après exposition	1 j	2 j	3 j	7 j	14 j	21 j	30 j
% morts	0	0	0	0	65	90	100
% vivants	100	100	100	100	35	10	0
Rejet ante mortem	0	2	10	30	30	10	100
Rejet post mortem	0	0	5	15	0	0	0
% consommable	100	98	85	55	0	0	0

L'effet est rapide : perte de 100 % définitive
dès le 14ème jour .

δ - Effets de l'irradiation sur la volaille

Doses en rem	300	400	500	600	800	900	1000	1200
Morts au 14ème jour	0	5	10	20	50	70	80	100
Morts au 30ème jour	0	5	10	20	50	70	85	100
Malades au 14ème jour	10	30	40	50	45	30	20	0
Malades au 30ème jour	0	0	0	5	10	20	15	0
Consommables au 14ème jour	90	65	50	30	5	0	0	
Consommables au 30ème jour	100	95	90	75	40	10	0	

c) Effets sur la perte d'animaux consommables d'autres types d'irradiation :

- Outre l'environnement qui les irradie par la source externe qu'il constitue, les animaux sont irradiés au niveau de leur tube digestif par le contenu de leur alimentation contaminée (herbe du pré) ; le niveau de cette contamination décroît initialement en $t^{-1,2}$ jusqu'à ce

que l'activité ait disparu du pré et évolue différemment par la suite. Le détail de cette irradiation est donné en annexe de ce chapitre.

- L'irradiation par les nucléides assimilés au niveau des organes critiques de stockage est très faible par rapport aux deux types précédents, en ce qui concerne les incidences léthales, au début, tout au moins. Les phénomènes de restauration jouent pleinement en ce qui les concerne. Le débit de cette irradiation interne est calculé d'après les données du chapitre III :

$$d = \frac{K_{\ell_{ai}} . R_f . F_{\ell_{ai}} . S}{\Lambda_{\ell_{ai}} - \lambda_{2,\ell}} \left(e^{-\lambda_{\ell,2} t} - e^{-\Lambda_{\ell_{ai}} t} \right)$$

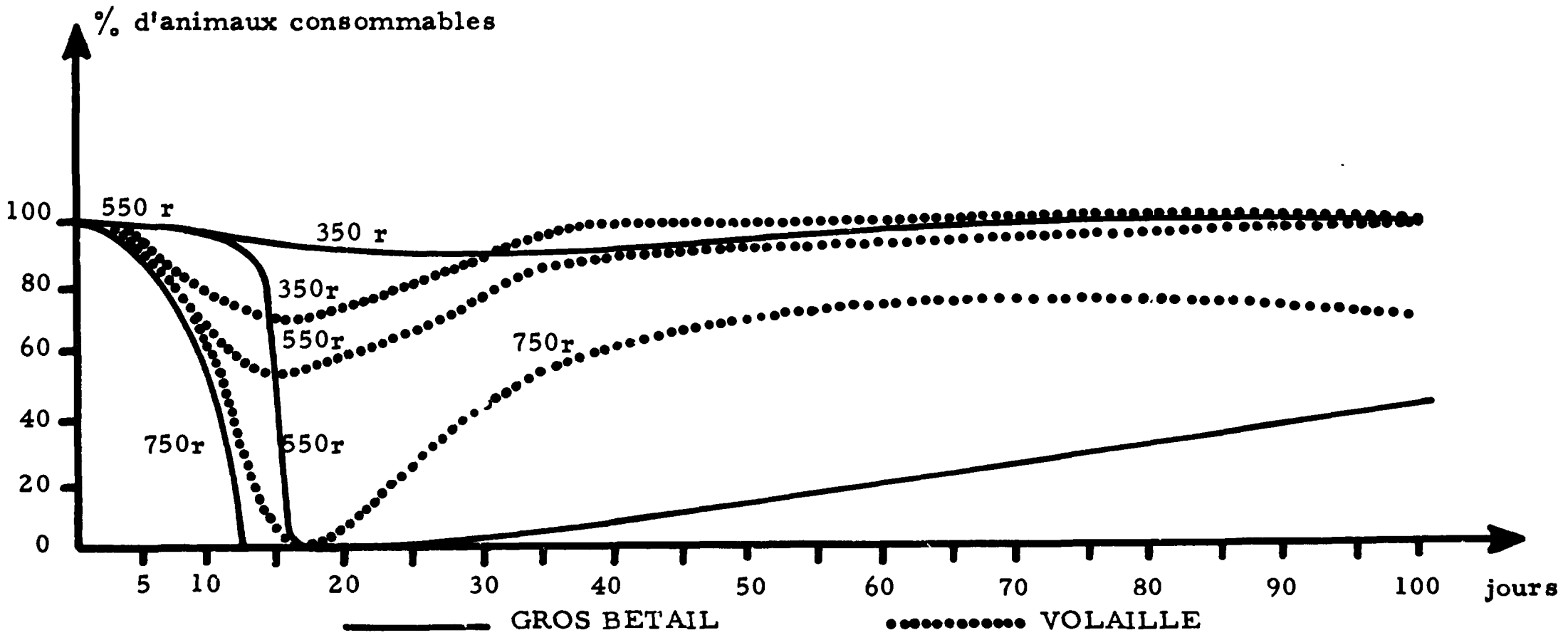
pour chacun des nucléides ayant pénétré dans l'économie animale. La dose en résultant est au bout d'une longue période " t " :

$$D^x_\ell = \frac{K . R_f . F_{\ell_{ai}} . S}{\Lambda_\ell - \lambda_{2,\ell}} \left(\frac{1-e^{-\lambda_{\ell,2} t}}{\lambda_{\ell_2}} - \frac{1-e^{-\Lambda_\ell t}}{\Lambda_\ell} \right)$$

pour chaque organe critique et chaque nucléide ℓ . Les symboles sont :

R_f : fraction de l'activité soluble du dépôt retenue sur l'herbe,
S : surface en m^2 broûtée par jour,
$F_{\ell_{ai}}$: fraction du nucléide ℓ parvenant à l'organe critique animal,
$\lambda_{2,\ell}$: constante effective de décroissance du nucléide ℓ sur le pré,
$\Lambda_{\ell_{ai}}$: constante de décroissance effective de ce nucléide chez l'animal pour l'organe critique concerné.

- Ces trois modes d'irradiation (externe, digestive et interne) cumulent leurs effets sans être additifs ; l'irradiation externe est prépondérante pour les prévisions des pertes à la consommation ; l'irradiation digestive n'est pas négligeable et donne des pertes plus élevées que celles prévues par les expériences d'irradiation isolée, de par sa simultanéité avec l'irradiation externe. Les résultats numériques des tableaux précédents sont schématisés par ces courbes :



- Figure n°2 -: % D'ANIMAUX CONSOMMABLES

II - CONSEQUENCES DE L'INGESTION D'HERBE CONTAMINEE

L'ingestion est la plus importante voie de contamination des denrées alimentaires d'origine animale, car la charge corporelle au cours du fallout est peu importante du fait de l'inhalation /8/ par rapport à celle résultant de l'ingestion.

L'herbe contaminée par dépôt et ultérieurement par absorption racinaire de la fraction soluble du dépôt actif qui a pénétré dans le sol, est pratiquement la seule voie de contamination des denrées, la voie hydrique étant négligeable par rapport à elle /11/ .

L'apport journalier va déterminer une charge corporelle en radioéléments des denrées consommées (muscles) ou des sécrétions (lait). C'est par ce mode indirect que le consommateur humain sera contaminé.

La nuisance radiotoxicologique de la fraction soluble du dépôt est donc conditionnée par la ration alimentaire et le régime du consommateur humain, la durée de consommation en zône contaminée, le niveau de contamination des denrées qui dépend de celui du fourrage et des modalités de la consommation animale (durée et ration alimentaire contaminée du bétail).

Cette étude se propose de préciser cette nuisance et de déterminer le risque acceptable pour l'homme en fonction des paramètres de contamination de la chaîne alimentaire animale, dans les circonstances du fallout.

Elle comporte les démarches suivantes :

- évaluation du niveau de contamination de l'herbe en fonction de l'activité du dépôt au sol et en fonction du temps,
- détermination des facteurs de transfert de la contamination du sol à l'herbe, de l'herbe à l'animal et de l'animal à l'homme,
- calcul des débits d'équivalents de dose au niveau des organes critiques humains et des équivalents de dose en fonction de l'activité au sol,
- principes de protection radiotoxicologique, nécessaires au choix des mesures à prendre en vue de l'hygiène alimentaire du consommateur.

ANNEXE

Dose délivrée au tractus gastro-intestinal des ruminants

Le débit suit une loi de décroissance en $t^{-1,2}$ et la dose en résultant est négligeable à partir du 15ème jour, par rapport à celle délivrée au niveau des autres organes critiques, qui stockent les nucléides, suivant une loi biologique de charge, à taux décroissant.

Une bête pâturant sous fallout d'un débit de 100 $r.h^{-1}$ à H^{+1} (débit de pâture), correspondant à 6.100 $mCi.m^{-2}$ à ce moment, avec un taux de rétention foliaire de 1 % (cf. chap. II) prend en 14 jours 30 rads au TGI contre 150 à l'organisme entier /10/ .

Le calcul de la dose d'exposition au TGI effectué suivant la méthode de Harrison /105/ donne pour la dose totale $(\beta + \gamma)$:

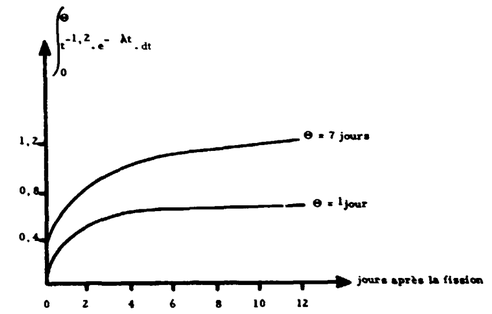
$$D = S.R_f.\left(\frac{E}{m} \times 1,6 \times 10^{-6} \times 8,64 \times 10^{2} + \frac{4\pi k.24}{2m} r\right).\int_0^{\theta_1} t^{-1,2}.e^{-\lambda t}.dt$$

(r. des. m^{-2} au temps ξ)

avec :

S : surface broûtée en m^2 ,
R_f : taux de rétention foliaire,
m : masse en g. du T.G.I.,
r : volume de la sphère de même masse et de même densité que le T.G.I. ,
k : est la dose en r. $mCi^{-1}.h^{-1}$ d'une source ponctuelle de rayons X d'énergie égale à l'énergie moyenne du mélange de produits de fission (0,55 à 5 MeV vers 5 jours après les retombées ;
$\bar{E}$: énergie moyenne par désintégration en MeV,
θ_1 : durée de la contamination de l'alimentation,
k # 3,4 /106/ ,
λ : est la constante d'élimination du T.G.I.

L'intégration $\int_0^{\theta_1} t^{-1,2}.e^{-\lambda t}.dt$ étant impossible algébriquement, les valeurs sont données graphiquement par les courbes suivantes :



- Figure n° 3 - : VALEURS NUMERIQUES DE $\int_0^{\theta} t^{-1,2}.e^{-\lambda t}.dt$

CHAPITRE I

RADIOTOXICOLOGIE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE EN ZONE CONTAMINEE

I - LES RADIOELEMENTS DE LA CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE

Seuls certains nucléides, parmi les produits de fission, présentent une nuisance dans la chaîne alimentaire animale, dont les produits consommés sont essentiellement le lait et la viande. D'après LEISTNER /11/, les critères de nuisance sont : un rendement de fission partiel suffisant pour que la dilution en surface laisse subsister une quantité minimale de radioélément, des périodes de décroissance effectives, à tous les maillons de la chaîne, assez longues pour permettre les transferts et un métabolisme tel que ceux-ci soient possibles.

L'évolution en masse du mélange de produits de fission permet, en fonction des périodes, l'élimination de certains d'entre eux, d'après les courbes d'AEBERHARDT /48/. D'autres, au contraire, apparaîssent. GREITZ et EDVARSON /54/ ont chiffré les critères de LEISTNER /11/. L'élimination, dans le cas d'ingestion directe humaine, porte sur les rendements partiels de fission inférieurs à 0,1 %, les périodes physiques inférieures à 0,2 jours et des métabolismes tels que la fraction ingérée qui parvient à l'organe critique humain soit inférieure à 1 %. Cette sélection extrapolable au bétail et à la nuisance de leurs produits, laisse subsister les Sr et Y 89, 90 et 91, le Mo^{99}, les Tellures 129, 131 et 132, les Iodes 131, 132, 133, 135, le Cs et Ba^{137} et le Ba et La^{140}. On peut y ajouter les Ru^{103} et Ru^{106} dans le lait, peu métabolisés et irradiant le T.G.I.

Dans le cas d'ingestion indirecte par le canal des aliments d'origine animale, on peut poursuivre l'élimination du fait des délais de rumination, d'abattage, de collecte, de durée totale minimale 3 à 4 jours. Leur métabolisme écarte les nucléides de tropisme différent des muscles ou du lait.

On élimine de la consommation les autres denrées consommables du fait de leur trop haut niveau de contamination sauf la cervelle /31/. Les Tellures n'ont de nuisance que comme précurseurs des iodes dont le principal est l'iode 131. L'iode 135 est négligé à 1 % du fait de sa période physique /30/ . La contribution à la dose thyroïdienne de l'iode 133 est de 10 % pour des consommations débutant avant le 7ème jour /30/. L'iode 132 a une période trop courte pour intervenir à partir du dépôt, mais on majorera de 1 % la dose thyroïdienne du fait de l'iode 132 engendré par le Tellure 132, éliminé dans le lait /30/. Le Ba^{140} est éliminé par son métabolisme, caractérisé par une faible excrétion lactée (0,6 %) /11 et 23/. Le ruthénium du lait sera évalué à partir de la dose en Cs^{137} /107/.

En définitive, les seuls nucléides à partir desquels les calculs seront faits sont l'iode 131, les strontium 89 et 90 et le Césium 137, en accord avec LEISTNER /11/.

II - EVOLUTION DES NUCLEIDES DE LA CHAINE, APRES LEUR DEPOT SUR LE SOL

Au cours du transport du lieu de la fission au lieu de dépôt, pendant le temps $\mathcal{E}$, l'activité d'un de ces nucléides évolue d'après les équations de BATEMAN :

$$A_{\ell\mathcal{E}} = N_{1,0}\left[\prod_{i=1}^{i=n}\right]\lambda^r_i \sum_{i=1}^{i=n} \frac{e^{-\lambda^r_i \mathcal{E}}}{\prod_{k=1}^{k=n}\left(\lambda^r_k - \lambda^r_i\right)}$$

avec λ^r_k et λ^r_i = constante de décroissance des précurseurs de 'ℓ' au nombre de (n-1)

$\left[\prod_{i=1}^{i=n} \lambda^r_i\right]$ = produit de ces " n " constantes $(\lambda^r_n = \lambda^r_e) - k \neq i$

$N_{1,0}$ = nombre de noyaux aussitôt après la fission, du premier terme de la chaîne isobarique.

Chaque nucléide est caractérisé, outre ses propres constantes, par la structure de sa chaîne isobarique. Les schémas structuraux adoptés sont ceux de MECHALI, DOUSSET, PARDO et PENOTET /49/ basés sur les constantes de Blomeke et Todd /53/ :

Chaîne 89 - Rendement cumulé total = 1,84 %

$Se^{89} \longrightarrow Br^{89} \longrightarrow Kr^{88}$ ----- chaîne 88

$Br^{89} \longrightarrow K_r^{89} \longrightarrow Rb^{89} \longrightarrow Sr^{89} \longrightarrow Y^{89}$ (stable)

Rendement partiel					
	0,193	0,69	0,736	0,193	0,04

Chaîne 90 - Rendement cumulé total = 4,9 %

$Br^{90} \longrightarrow Kr^{90} \longrightarrow Rb^{90} \longrightarrow Sr^{90} \longrightarrow Y^{90}$ (stable)

Rendement partiel				
	0,605	1,086	0,538	0,067

Chaîne 131 - Rendement cumulé total : 5,8 %

$In^{131} \longrightarrow Sn^{131} \longrightarrow Sb^{131} \longrightarrow Te^{131}_m \rightarrow Te^{131} \longrightarrow I^{131} \longrightarrow Xe^{131}$ (stable)

Rendement partiel					
	0,159	1,23	2,313	0,532	0,125

Chaîne 137 - Rendement cumulé total : 5,8 %

$Te^{137} \longrightarrow I^{137} \longrightarrow Xe^{137}_I \longrightarrow Xe^{137}$ (stable)

$Xe^{137}_m \longrightarrow Cs^{137} \longrightarrow {}^mBa^{137} \longrightarrow Ba^{137}$ stable

Rendement partiel				
	0,905	2,552	1,926	0,365

Ces quatre schémas concernent la fission du Pu 239 par les neutrons rapides.

Les rendements et les schémas de ces chaînes montrent que tous les précurseurs des quatre principaux nucléides de la chaîne animale ont disparu 1 h 30 après la fission, sauf le Te^{131} dont la période est de 30 h. (les périodes des autres précurseurs variant de quelques secondes à quelques minutes). Le nombre d'atomes d'iode 131 engendrés à partir du Te^{131} est de l'ordre de 10^{-6} fois celui du dépôt d'I^{131} après l'arrivée au sol.

Dans tous les cas, le dépôt des précurseurs ne donnera qu'une faible masse de nucléides de la chaîne et chaque nucléide évoluera comme s'il était déposé isolément ; ce qui est rigoureusement le cas si l'antépénultième précurseur est gazeux (Kr, Xe). L'activité de chaque nucléide est une fraction de celle du mélange soit $\ell\mathcal{E}$ cette fraction qui varie avec le temps $\mathcal{E}$ de dépôt. On mesurera, sur le terrain, l'activité du mélange dont l'évolution suit une loi en $t^{-1,2}$ et l'on ramènera cette activité au moment des retombées $\mathcal{E}$. On déduira de cette activité $A_\mathcal{E}$ celle dûe au nucléide ℓ : $A_{\ell,\mathcal{E}} = \ell\mathcal{E} \cdot A_\mathcal{E} \cdot \ell\mathcal{E}$ dépend du temps $\mathcal{E}$ écoulé entre la fission et les retombées /47, 49/.

III - SIGNIFICATION BIOLOGIQUE DU DEPOT ACTIF DE CHAQUE NUCLEIDE DE LA CHAINE

Les dépôts au sol, évoluant suivant les paramètres spécifiques des nucléides, indépendamment de leurs précurseurs, n'ont de signification que dans la mesure où ils entrent effectivement dans les chaînes alimentaires. C'est dire que leurs nuisances radiotoxicologiques sont liées à leurs solubilités dans l'eau ou les sucs digestifs du cheptel, donc à leurs formes physico-chimiques et, en définitive, à la granulométrie du fallout /60/ . Ce dernier facteur se révèle plus important que la nature chimique des radioéléments /61/ .

La granulométrie et la solubilité sont quasi constantes dans les retombées d'accidents de réacteur, mais varient dans des proportions considérables dans celles des tests nucléaires, suivant la distance /60/ d'après SCOTT RUSSEL.

Les particules vectrices de l'activité retombent d'autant plus près du lieu de l'explosion qu'elles sont plus grosses /9/. Les auteurs américains ont mis en évidence la variation de la solubilité avec la distance /62/. Ils l'expliquent en fonction de la granulométrie par la formation des particules d'entraîneurs de l'activité, au sein de la boule de feu. Les mouvements de convection de celle-ci sédimentent ces particules par centrifugation et ascension thermique. L'adsorption en surface des radioéléments de par sa localisation, détermine la nuisance biolo-

gique pour l'homme. L'évolution thermique liée à la puissance de l'arme, et le point de fusion du sol (dans le cas où la boule de feu le touche) sont les paramètres directeurs de ces phénomènes, ainsi que les proportions relatives des phases gazeuses, liquides et solides (variables avec le temps).

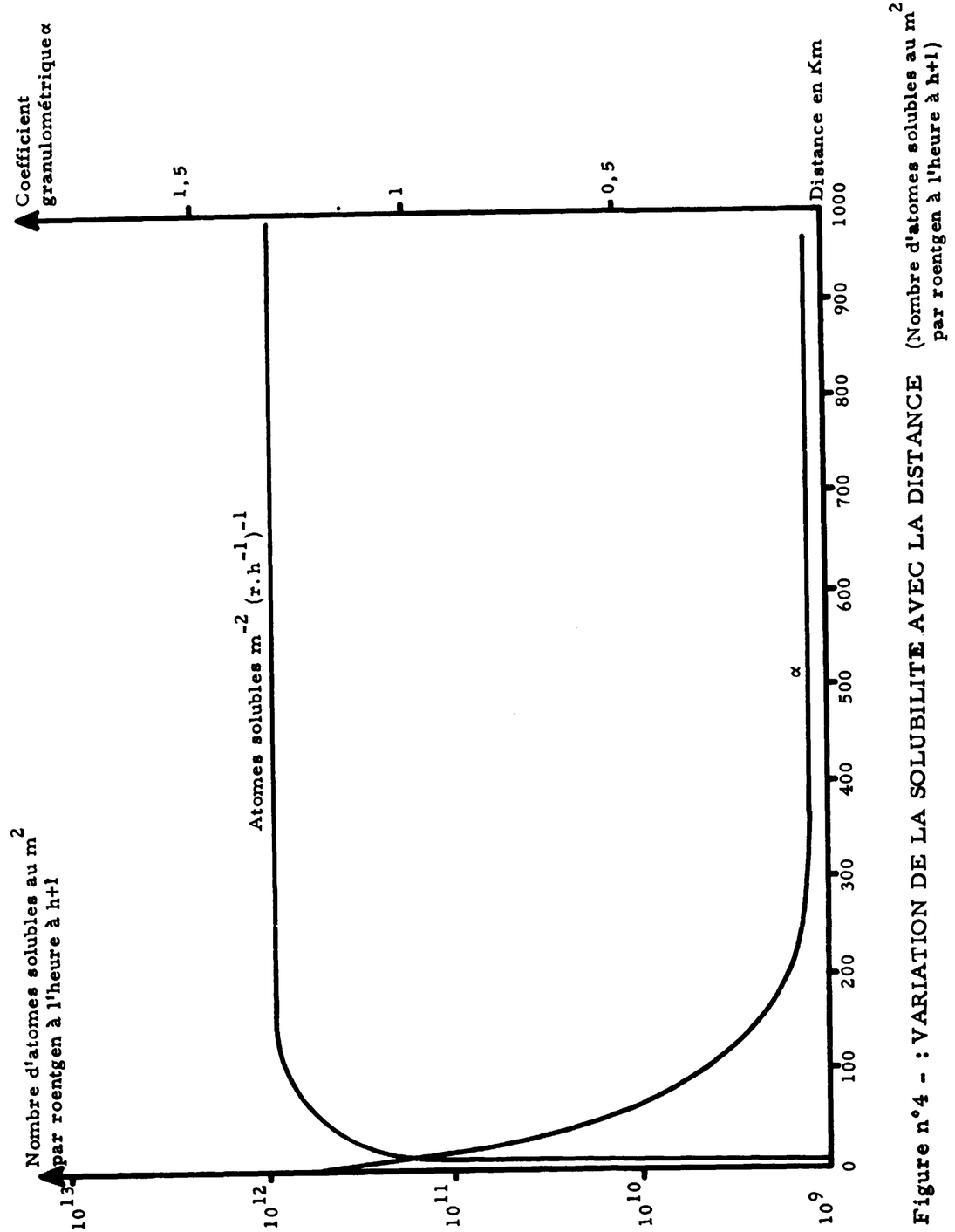
La granulcmétrie est définie par un coefficient constant $\alpha = \frac{h}{d}$ où d est la distance du lieu des retombées à celui de la fission et h l'altitude moyenne du champignon 7 minutes après la détonation. La granulométrie devient plus homogène avec la distance, la taille des entraîneurs a une distribution gaussienne, f $(\frac{h}{d})$, en un lieu donné, autour d'une valeur de α.

D'après les données de la référence /62/, nous avons calculé la solubilité de chaque nucléide de la chaîne, définie par le nombre d'atomes solubles par m^2, rapporté au débit de dose, mesuré sur le terrain et ramené 1 heure après la fission (en $r.h^{-1}$). Les données sont relatives à un rendement de 5 % de l'arme, de puissance nominale 15MT, à un sol de point de fusion 1400°K, à des rendements de fission partiels de 3,2 à 3,17 % et à un vent effectif, pondéré en altitude, de 24 $km.h^{-1}$. Les résultats sont figurés dans ce tableau, la matière fissible étant de l'U^{235}.

Distance (Km). d	11,4	19,2	30,4	74	94	110
$\alpha = \frac{h}{d}$	1,5	1,3	1	0,6	0,4	0,3
I $r.h^{-1}$ à h^{+1}	0	5×10^3			5×10^2	3×10^{11}
N^{89}/I $\frac{\text{atomes } m^{-2}}{rh^{-1}}$	-	$2,6 \times 10^9$	$2,6 \times 10^{11}$	3×10^{11}	4×10^{11}	6×10^{11}
N^{90} "	-	$1,6 \times 10^{10}$	9×10^{11}	$1,15 \times 10^{12}$	$1,15 \times 10^{12}$	10^{12}
N^{131} "	-	$2,5 \times 10^9$	6×10^{11}	10^{12}	10^{12}	10^{12}
N^{137} "	-	3×10^9	10^{11}	10^{12}	10^{12}	10^{12}

Distance (Km). d	152	221	320	528	736	944
$\alpha = \frac{h}{d}$	0,2	8×10^{-2}	4×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}
I $r.h^{-1}$ à h^{+1}	$1,3 \times 10^3$	5×10^2	500	50	5	5×10^{-1}
N^{89}/I $\frac{\text{atomes } m^{-2}}{rh^{-1}}$	7×10^{11}	7×10^{11}	7×10^{11}	$7,8 \times 10^{11}$	$7,8 \times 10^{11}$	8×10^{11}
N^{90} "		10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}
N^{131} "	7×10^{11}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}
N^{137} "	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}

- Pour d'autres puissances, les extrapolations en distance se font suivant le rapport des racines cubiques des puissances
- Pour d'autres vitesses de vent, elles se font proportionnellement à ces vitesses.
- L'altitude est basse : boule de feu au sol.



- Figure n°4 - : VARIATION DE LA SOLUBILITE AVEC LA DISTANCE

Le nombre total d'atomes déposés diminue avec la distance, mais la granulométrie étant plus faible, le dépôt est de plus en plus soluble. Il en résulte une quasi constance, à partir d'une certaine distance, de l'ordre de 10^{12} atomes m^{-2} $(rh^{-1})^{-1}$. Au point 0, il n'y a pas d'atome soluble.

$$\text{Atomes solubles par } rh^{-1} = \gamma_\ell \frac{r^*_\alpha . \ell - r_\alpha \ell}{K_\alpha} = \frac{N\ell}{I}$$

$N\ell$ = Nombre d'atomes solubles du nucléide ℓ par m^2 à l'instant des retombées;

r_α, ℓ = activité totale du nucléide ℓ des particules de granulométrie α ;

r^*_α, ℓ = activité incluse dans la matrice vitreuse des particules ;

$\gamma\ell$ = rendement de fission de la chaîne isobarique (atomes.fission^{-1}) ;

I = débit de dose d'exposition en $r.h^{-1}$ à h + 1 ;

$K\alpha = 4,3 \times 10^{-12} \left[r_1^\alpha + 0,02 \right] rh^{-1}$ fission^{-2}.m^2 = coefficient de conversion du débit (rh^{-1}) en fission.m^{-2} ;

r_1^α = rendement global de fission du mélange ;

0,02 est la contribution de l'activité induite par les neutrons.

Ces courbes montrent que la solubilité du dépôt par roentgen.h^{-1} est approximativement la même pour tous les nucléides, si on l'exprime en atomes.m^{-2} ; elle est dans le rapport des masses atomiques si on l'exprime en gramme.m^{-2} et dans celui des constantes de désintégration si on l'exprime en activité.

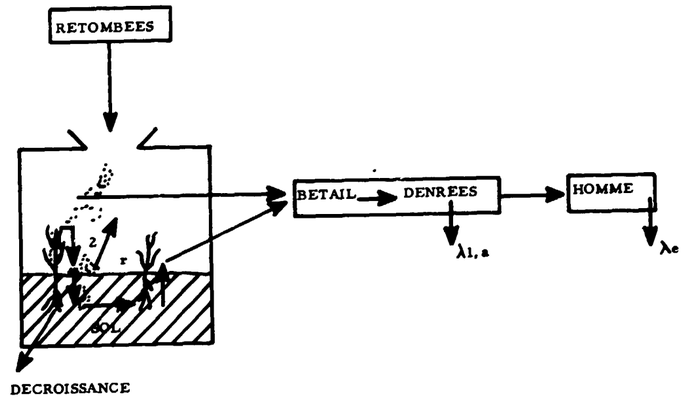
Elle est quasi constante à partir d'une certaine distance, ainsi que le coefficient α ; c'est dans cette zone que l'étude est la plus intéressante et peut aboutir à des résultats généraux ; cette solubilité est mal déterminée au voisinage du lieu de l'explosion. Ces données permettent de connaître la solubilité des retombées et l'on ne parlera par la suite que du dépôt soluble, à partir d'une distance de 100 km pour 15 MT soit 10 km pour 15 KT et 2,5 Km pour 1 KT.

Les distances inférieures ne présentent pas d'intérêt pratique ou théorique.

IV - CONSEQUENCES DES TRANSFERTS ECOLOGIQUES : RADIOTOXICITE DES DENREES ANIMALES

D'après MARTIN /130/, les transferts écologiques se schématisent ainsi : les poussières actives tombent :

- d'une part, sur la surface du sol où la fraction soluble pénètre et où elle décroît,
- d'autre part, sur les parties aériennes des plantes où elles décroissent avec une constante effective $\lambda_1 + \lambda_r = \lambda_2$. L'herbe contaminée par les deux voies foliaire et racinaire, contamine le bétail. Les produits animaux ont un niveau de contamination de constante effective de décroissance $\Lambda_{\ell, a}$.



- Figure n°5 - : TRANSFERTS ECOLOGIQUES

L'homme contaminé par les denrées animales élimine l'activité ingérée avec une constante $\lambda\ell$, au niveau de ses organes critiques. Son tube digestif est irradié au cours du transit gastro-intestinal.

La radiotoxicité alimentaire est plus importante que l'inhalation : les rapports des doses thyroïdiennes des deux sources de contamination lactée varient de 40 chez l'adulte à 400 chez l'enfant, en faveur de la voie alimentaire /55/ . La nuisance alimentaire est le produit du niveau de contamination par le niveau de consommation. Le lait est très pollué. La nocivité globale et le danger s'établissent ainsi par risque décroissant : lait, légumes, fruits, viande, produits laitiers, oeufs, poissons /11/.

a) La nuisance dépend du régime :

Il y a des différences entre les nourrissons et les adultes ainsi qu'entre des groupes donnés de population. LEISTNER a établi une monographie importante sur le niveau de contamination alimentaire en pollution à taux constant /11/. Il donne les pourcentages de la ration quotidienne retrouvée dans les denrées produites par les animaux, ainsi que les délais d'apparition des radioéléments /12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22/. Certaines pratiques diminuent le niveau du lait (désionisation sur résine : facteur 10^{-1} ou inhibition de la secrétion par NaI, NaSCN, KCN : facteur 0,25). Le lait, après équilibre avec le fourrage, contient 1 % de litre^{-1} de la ration en iode /12/ et 0,1 % litre^{-1} de celle en Sr /23 à 26/, ainsi que de 1,4 à 9 % (respectivement chez la vache et la chèvre) de celle en Cs^{137} et beaucoup moins en Ru^{103} ou ^{106} /107/ (30 % de la teneur en Cs avec une décroissance rapide). Les produits laitiers contribuent aux doses humaines au taux de 6 % pour Cs^{137} et Sr^{89} et 25 % Sr^{90}.

Dans la viande, on trouve surtout du Cs^{137} /32/ ; la période effective en est très variable suivant les auteurs /11, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45/.

Le tableau suivant représente à l'équilibre, à taux de contamination constant, les pourcentages des quantités de nucléides apportés par les différents aliments pour un régime européen moyen.

Aliments \ Nucléides	I^{131}	Sr^{89}	Sr^{90}	Cs^{137}
Lait	90	80	36	46
Produits laitiers	0	5	9	3
Viande	-	-	3	21
Oeufs	0,5	0,5	1,5	0,1

b) Les organes humains concernés par le métabolisme de ces nucléides sont les organes "critiques" suivants : thyroïde pour les iodes, la masse musculaire de l'organisme entier pour le Césium, le squelette et la moëlle osseuse pour les isotopes du Sr, le tube digestif (TGI) pour tous les nucléides.

L'évolution des nuisances dépend du temps : au début, c'est la thyroïde et le risque iodé (du lait) qui sont les plus critiques, puis les organes stockeurs de Cs et de Sr /55/, respectivement muscles et squelette.

L'évolution de la toxicité alimentaire en découle : le lait est initialement et reste longtemps l'aliment le plus dangereux, surtout pour les petits enfants (en ce qui concerne leur thyroïde). SCOTT RUSSEL donne des doses thyroidiennes 20 fois supérieures à celle des adultes, par litre de lait, en raison de la faiblesse relative de la masse de cet organe /56/. Ce danger diminue avec le temps, mais aucune accumulation n'est possible dans le lait, qui est un "reflet" de l'herbe, à la différence de la viande, où une charge, ou au moins une quantité maximale, se manifeste.

Les nuisances sont fonction, outre les périodes effectives chez l'homme et la variation de l'apport alimentaire, des énergies effectives, au niveau des organes critiques, données dans ce tableau, d'après la C.I.P.R. /111/. Elles dépendent également des facteurs de passage aux organes critiques, par suite de la digestion et du transfert sanguin, donc du taux d'absorption au niveau de la muqueuse intestinale, et de l'organotropisme des radioéléments de la chaîne alimentaire.

Nucléides	I^{131}	Sr^{89}	Sr^{90}	Cs^{137}
Organes	thyroïde	Os	Os	Organisme entier
$\sum$ EF (EBR)n E en MeV	0,22	2,8	1,1	0,59

CHAPITRE II

LE PREMIER TRANSFERT ECOLOGIQUE :

DU DEPOT A L'HERBE

L'herbe est une partie importante de la nourriture du bétail ; dans le cas d'alimentation mixte, tout se passe comme si son niveau de contamination diminuait, si le reste de la ration n'est pas contaminé.

D'après le schéma écologique de MARTIN /131/, les phases foliaire et racinaire se suivent et ne coexistent pratiquement jamais. Le bétail, surtout les bovins, ne peut récolter l'herbe qu'à 5 cm du sol /12/, de sorte que le dépôt du sol n'est jamais ingéré. La radioactivité parvient aux feuilles par dépôt, par assimilation racinaire et absorption foliaire /84 et 91/. Le dépôt foliaire disparaît avec l'herbe qui l'a reçu ; l'herbe de repousse est contaminée par le sol, en général (par les racines).

I - LA PHASE FOLIAIRE

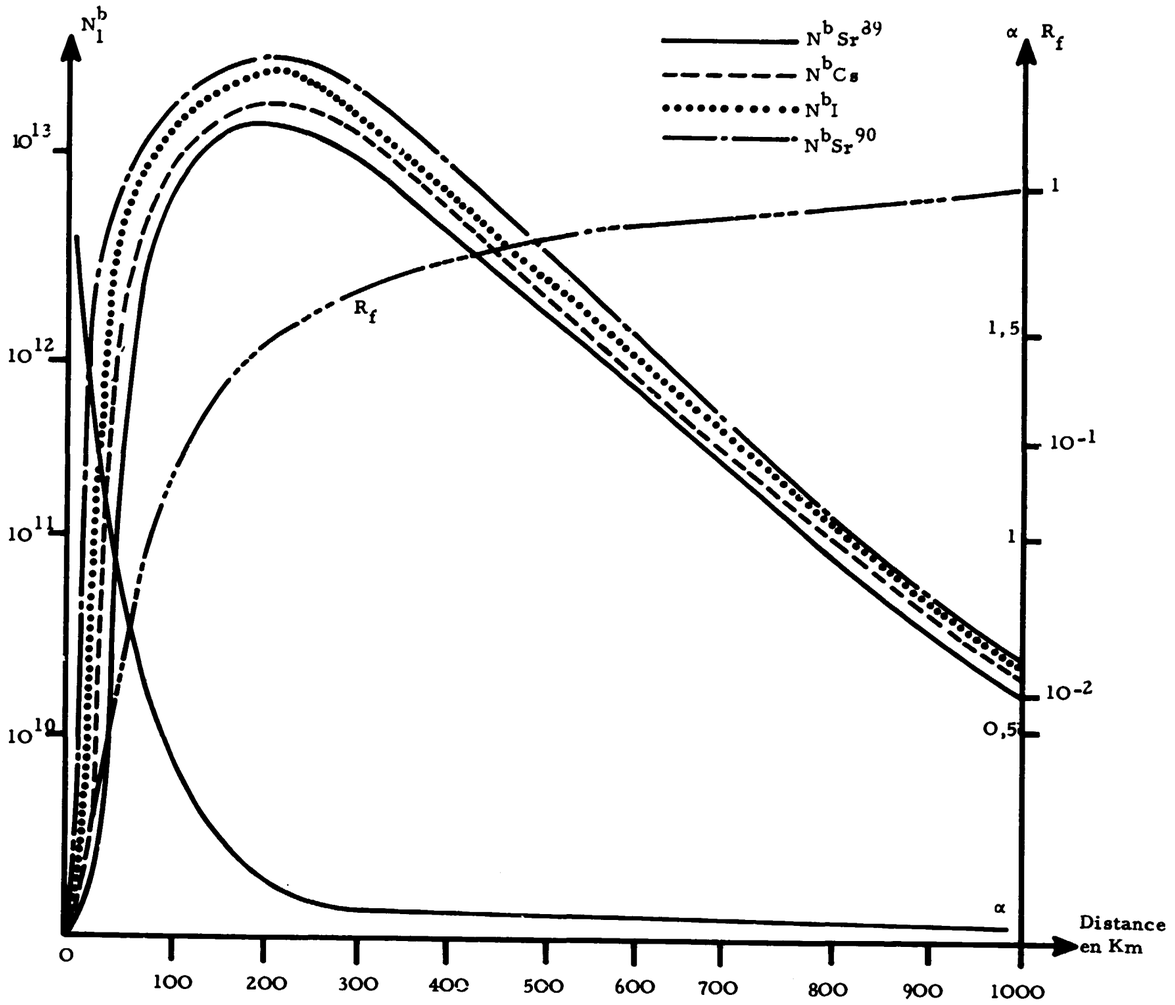
Elle est caractérisée par le taux de rétention foliaire (fraction de l'activité du dépôt, retenue au niveau des feuilles), la période de décroissance effective du radioélément sur les feuilles et la durée de cette phase, liée à la prédation alimentaire, en relation avec les conditions de pâture.

a) La rétention foliaire :

Ce phénomène est bien connu depuis les travaux de SCOTT RUSSEL et POSSINGHAM au cours de l'opération Buffalo, à Maralinga (Australie), sur des fourrages européens (Lolium perenne et Trifolium repens) et indigènes (Atriplex, Kochia, Erodium, Danthonia et Stipa /58 à 60/. Les mesures d'activité furent complétées par des autoradiographies de fourrage montrant la répartition topographique et histologique, différente suivant les contaminations de dépôt, par absorption foliaire ou par assimilation racinaire /58, 59, 60, 84, 91/.

Les auteurs ont établi des relations entre le taux de rétention et la granulométrie des particules d'entraîneurs (ce taux est nul si cette dernière est supérieure à 40 µ) du type exponentiel ou puissance. Ces résultats sont confirmés par d'autres auteurs /34/. La rétention foliaire varie avec le type de fourrage : le trèfle retient moins que le gazon. Les conditions météorologiques (pluie et vent) sont importantes /58, 64, 65, 66/ d'après les mesures sur le terrain et aussi d'après les expérimentations /67/.

La variation du taux de rétention foliaire avec la granulométrie implique sa variation avec la distance dans les tests militaires. Une importante étude américaine a été faite sur



- Figure n°6 - : VARIATION DE R_f ET N_1^b AVEC LA DISTANCE

Le tableau suivant donne les valeurs du nombre d'atomes N_ℓ^t retenus sur l'herbe d'un m^2 de pré, de rendement 220 g de matière sèche par m^2, et du taux de rétention foliaire, dans les mêmes conditions que les valeurs de la solubilité du fallout (cf. chapitre précédent). Ces valeurs Rf, taux de rétention foliaire, et N_ℓ^f ont été calculés d'après la référence /63/ :

Distance Km	17,6	19,2	30,4	60	74	94
Rf	9×10^{-3}	$1,3 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	$5,5 \times 10^{-2}$	$7,32 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-2}$
N_{89}^f	$7,7 \times 10^{9}$	2×10^{10}	7×10^{10}	10^{12}	2×10^{13}	3×10^{13}
N_{90}^f	7×10^{10}	8×10^{10}	10^{11}	3×10^{12}	4×10^{13}	4×10^{13}
N_{131}^f	10^{10}	10^{10}	5×10^{10}	2×10^{12}	3×10^{13}	4×10^{13}
N_{137}^f	10^{10}	8×10^{9}	3×10^{10}	7×10^{10}	2×10^{12}	3×10^{13}
α	1,4	1,3	1	0,8	0,6	0,4

Distance Km	152	224	320	528	736	944
Rf	0,2	0,26	0,44	0,6	0,6	0,7
N_{89}^f	$1,8 \times 10^{13}$	10^{13}	2×10^{12}	$2,5 \times 10^{12}$	2×10^{11}	2×10^{11}
N_{90}^f	4×10^{13}	$2,5 \times 10^{13}$	10^{13}	2×10^{12}	3×10^{11}	4×10^{10}
N_{131}^f	4×10^{13}	2×10^{13}	10^{13}	2×10^{12}	3×10^{11}	4×10^{10}
N_{137}^f	4×10^{13}	2×10^{13}	$1,5 \times 10^{13}$	2×10^{12}	3×10^{11}	3×10^{10}
α	0,2	8×10^{-2}	4×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}

On a représenté les variations de Rf et de α avec la distance (α coefficient granulométrique) ainsi que la conséquence pratique (le nombre d'atomes de chaque nucléide au m^2, retenus sur les feuilles) sur les courbes suivantes. L'analyse mathématique révèle, pour Rf, une expression du type :

$$Rf = 1 - e^{-\lambda_{15} D}$$. D est la distance.

Pour les conditions expérimentales de la référence /62/ (15 MT)

$$\lambda_{15} = 1,466 \times 10^{-3}.Km^{-1}$$

l'extrapolation à une puissance quelconque est immédiate :

$$Rf = 1 - e^{-\lambda_p . D} \quad \text{avec, pour } \lambda_p, \text{ la relation}$$

$$\lambda_p = \frac{\lambda_{15}}{0,43\sqrt{p}} = 3,61 \times 10^{-3} . p^{-\frac{1}{3}}$$

$$\boxed{Rf = 1 - e^{-3,61 \times 10^{-3} . p^{-\frac{1}{3}} . D}} \quad \text{avec D en Km et p en MT}$$

b) La période de décroissance effective au niveau des feuilles :

" Les pertes sur le terrain " (SCOTT RUSSELL) vont diminuer la durée du séjour des nucléides sur le fourrage vert ; à la décroissance radioactive s'ajoute une décroissance écologique que l'expérimentation a révélé être de forme exponentielle /61, 82 et 108/ . Elle est dûe à divers phénomènes : volatilisation et échange avec les éléments stables de l'environnement /68, 69, 70, 72, 73, 76/, ce phénomène reste limité /70, 73, 74/ ; croissance et métabolisme de l'herbe /77, 78, 79, 80, 108/ ; pluie et vent /67 et 81/, facteurs granulométriques et d'absorption /61/.

La période effective de décroissance sur l'herbe sera la combinaison de la période radioactive et de la période écologique T_1. Si T_r est la période radioactive, T_2 la période effective, celle-ci s'écrit :

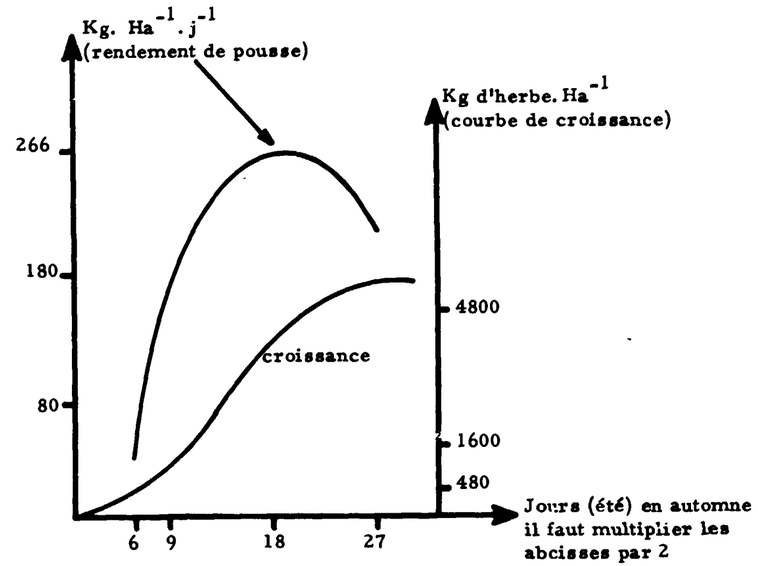
$$T_2 = \frac{T_1 . T_r}{T_1 + T_r}$$

Les périodes T_1 sont identiques pour tous les nucléides, car elles dépendent plus de la granulométrie et du fourrage que des nucléides /61/. SCOTT RUSSELL et THOMPSON donnent une valeur de 14 jours pour T_1 /61 et 82/. Cette valeur, confirmée par MILLBOURN et TAYLOR /108/ est cependant susceptible, d'après eux, d'être réduite à 9 jours en phase active de végétation. On adoptera la longue période, par prudence. On déduit de ces données les périodes effectives ainsi que les constantes λ_1 et λ_2 :

Nucléides	Périodes Tr (jours)	T_1 (jours)	T_2	λ_1 (jour^{-1})	λ_r (jour^{-1})	λ_2 (jour^{-1})
I^{131}	8	14	5	5×10^{-2}	9×10^{-2}	$1,4 \times 10^{-1}$
Sr^{89}	50	14	11	5×10^{-2}	$1,368 \times 10^{-2}$	$6,386 \times 10^{-2}$
Sr^{90}	10^4	14	14	5×10^{-2}	$6,93 \times 10^{-5}$	5×10^{-2}
Cs^{137}	$1,1 \times 10^4$	14	14	5×10^{-2}	$6,90 \times 10^{-5}$	5×10^{-2}

c) Durée de la phase foliaire

Elle dépend de la croissance de l'herbe, variable avec la saison et le climat, de la répartition des bêtes à l'hectare, de la richesse du pré, donc de la surface quotidienne broûtée. Après tonte, la vitesse de repousse de l'herbe est d'abord rapide (flambée de croissance), puis plus lente /57/. Les délais nécessaires à l'obtention d'une hauteur de foin convenable (10 cm) /12/ varient de 21 jours en été à 42 en automne, d'après VOISIN /12/ et SCOTT RUSSEL /58/ ainsi que d'après le NRC /34/. La courbe de croissance et les rendements de pousse à l'hectare sont tirés de VOISIN /57/.



- Figure n°7 - : CROISSANCE DE L'HERBE

Il résulte de ces courbes que les éleveurs, pour avoir un bon rendement, pratiquent une rotation du bétail entre les pâturages, de sorte que le cheptel broûte la hauteur optimale sur chaque pré pendant 21 jours en été et plus longtemps en automne. La durée de la phase foliaire ne dépassera pas 2 rotations, soit 42 jours. Pendant l'hiver suivant les retombées, les bêtes en stabulation seront nourries avec une alimentation de très faible niveau de contamination ; il n'en sera pas de même les années suivantes .

d) Niveau de contamination du fourrage en phase foliaire :

Son expression est :

$$A_\ell^f = R_f . e^{-\lambda_\ell , 2t} . g(t) \text{ par } \mu \text{ Ci du radioélément } \ell \text{ déposé sur 1 m}^2$$

avec : $g(t) = H(t - 42) + 1 = 1$ pour $t \leqslant 42$ jours
$g(t) = H(t - 42) - 1 = 0$ pour $t > 42$ jours
} H = fonction d'Heaviside

$H(t) = 0$ $t < 0$
$H(t) = 1$ $t > 0$

t est le temps écoulé depuis le temps $\mathcal{E}$ des retombées. Sa représentation graphique est donc une simple exponentielle de période T_2. Rf dépend de la puissance de l'arme et de la distance.

$$A^f_{\ell}\ \mu_{Ci} = Rf.e^{-\lambda \ell\ ,2t}.g(t)$$

$$Rf = 1 - e^{-3,6 \times 10^{-3} p^{-\frac{1}{3}}.D}$$

A^f_{ℓ} est la fraction soluble du nucléide ℓ retenue au niveau de l'herbe à la disposition du bétail en μCi de dépôt du nucléide ℓ sur 1 m^2

La décontamination du fourrage est possible par lavage, éventuellement avec du Versène ou du DTPA ou par fauchage et rejet. BORMAN, SHAFER et MULCAHY ont ainsi éliminé 20 à 53 % de la contamination foliaire /85/. Les quantités tombées des feuilles sur le sol contribuent ultérieurement à la contamination racinaire ; il se forme un cycle d'autocontamination /86/.

II - LA PHASE RACINAIRE

Négligeable pendant la phase foliaire, elle est importante après, suivant le critère de SCOTT RUSSELL : " l'absorption à partir du sol est une source de contamination notable uniquement si l'accumulation tellurique est grande par rapport au dépôt récent " /56/ (sur les feuilles).

La fraction soluble du dépôt disparaît vite de la surface du sol à la moindre pluie ou rosée, car il faut peu de liquide pour dissoudre les faibles masses solubles déposées : 1 Ci d'iode 131 pèse 8 µg, 1 Ci de Sr^{89} 35,6 µg, 1 Ci de Sr^{90} 8 mg et 1 Ci de Cs^{137} 1,23 cg.

La pénétration intéresse d'abord l'humus des prés (stem-base ou mat horizon /104/). L'absorption se fait, à ce moment, à la jonction tige-racine ; ce phénomène, étudié par SCOTT RUSSEL et POSSINGHAM /58/ par des coupes à 21 jours d'intervalle, a montré que les rapports des activités de seconde coupe sur la première étaient représentés par l'expression :

$$\frac{II}{I} = K.Rf^{-4}$$

Le niveau de contamination du fourrage en phase racinaire est lié au sol et il n'est pas possible de l'estimer d'une façon générale comme dans le cas de la phase foliaire /72 à 132/. Ce niveau est très faible pendant 2 à 6 mois.

La contamination en phase racinaire, c'est-à-dire au bout d'un à 3 mois après les retombées, se trouve donc exclue de la 1ère partie de notre étude.

Elle constitue un cas d'espèce différent pour chaque sol de prairie et pose des problèmes d'hygiène et d'agronomie, notamment pour la remise en pâture dans des régions fortement contaminées par les retombées immédiates, en vue d'une consommation prolongée.

Ces problèmes sont moins importants que ceux de la phase foliaire. Ils devront faire l'objet d'études spéciales.

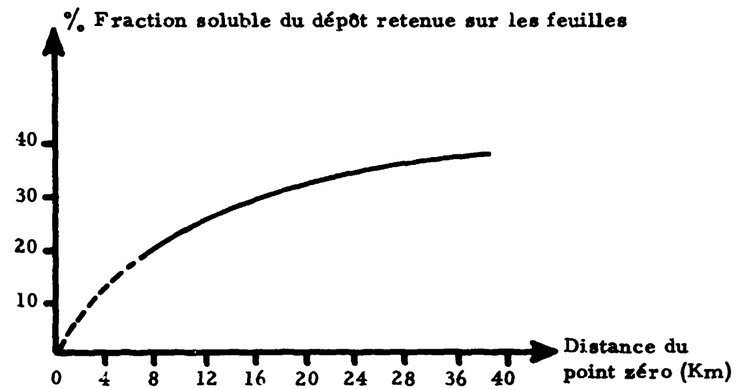
II - ANNEXE : SOLUBILITE ET RETENTION FOLIAIRE

Ces deux propriétés des retombées sont liées à la granulométrie, elles varient donc de la même façon avec la distance : elles augmentent avec elle, à mesure que la granulométrie diminue et tendent vers une valeur constante.

D'après NISHITA et LARSON /133/, la solubilité dans le suc gastrique (0,1 N d'acide chlorhydrique) du mélange des produits de fission retenus sur l'herbe, au cours de la série d'expérimentation Teapot aux USA, est donnée dans ce tableau :

Plante	Distance du point Zéro	Fraction soluble retenue au niveau des feuilles
Blé	3,8 Km	19,2 %
Blé	9,6 Km	17,3 %
Blé	36,8 Km	34,7 %

La puissance nominale étant inconnue, il est possible qu'au voisinage du point zéro, les lois sus-mentionnées ne s'appliquent pas rigoureusement.



- Figure n°8 - : SOLUBILITE ET RETENTION

En un point donné, la répartition granulométrique est de type gaussien autour d'une valeur bien déterminée de α. Le débit de dose est dû aussi bien au dépôt tombé au sol qu'à celui resté sur les feuilles. Le rapport du nombre d'atomes solubles à ce débit (par m^2) est quasi constant. On admettra que la fraction Rf s'applique aussi bien aux atomes solubles qu'à ceux qui ne le sont pas. En conséquence, on fera d'abord la conversion débit de dose, mesuré sur le terrain, en atomes par m^2, solubles ; puis on évaluera la fraction soluble retenue sur les feuilles. Cette hypothèse est d'autant plus vérifiée que la granulométrie en un point est peu variable, en raison de la sédimentation en distance, du fait des retombées. Il en résulte que le

taux de rétention foliaire, fonction de la distance (c'est-à-dire de la granulométrie homogène), applicable à l'ensemble des atomes déposés est applicable, sans correction notable, à l'ensemble des atomes solubles à partir d'une distance suffisante.

On multipliera donc le nombre d'atomes solubles déterminé d'après le débit, par le taux de rétention foliaire en un point, pour obtenir le nombre d'atomes solubles à considérer en phase foliaire.

Ce nombre d'atomes varie de la même façon que le taux de rétention foliaire, avec la distance.

CHAPITRE III

LE SECOND TRANSFERT ECOLOGIQUE : DE L'HERBE AUX DENREES ANIMALES

Le niveau de contamination des denrées est le résultat du métabolisme animal sur le niveau de contamination de son alimentation.

La fonction d'entrée est la quantité d'activité ingérée quotidiennement, produit du niveau de contamination, calculé au chapitre précédent (en $\mu Ci.Kg^{-1}$ ou en μCi dans la quantité d'herbe ayant poussé sur 1 m^2 de pré) par le niveau de consommation (respectivement en $Kg.jour^{-1}$ ou en $m^2.jour^{-1}$). Les paramètres spécifiques de cette fonction, à l'échelon du second transfert, sont le rendement moyen des pâturages $\bar{R}$ c'est-à-dire le poids d'herbe (sèche ou fraîche) au m^2 et la surface broûtée quotidiennement. Le niveau de consommation, c'est-à-dire la ration alimentaire du bétail en dépend. Nous ne considèrerons, ici, que les bovins, dans l'établissement des formules.

Cette ration, spécifique du cheptel, est de 48 $kg.jour^{-1}$ de foin frais, correspondant à 10 à 15 kg de foin sec, d'après VOISIN /56/. Il en découle une surface broûtée moyenne de 100 $m^2.jour^{-1}$ dans les pâturages riches (200 à 250 g de matière sèche au m^2) /56/. Une "unité gros bovins" est de 48 $kg.jour^{-1}$ /59/ correspondant à 100 bovins à l'hectare, pour des animaux de 500 kg /57/. D'autres auteurs, SCOTT RUSSELL /58/, le National Research Council /34/, donnent des chiffres analogues ou peu différents (60 $kg.jour^{-1}$ pour les pâturages moins riches de 100 à 150 $g.m^{-2}$ de matière sèche, correspondent à des surfaces de 150 à 200 $m^2.jour^{-1}$ /34 et 58/). Plus le pâturage est riche, moins grande est la surface nécessaire à la récolte de la ration et moins le niveau de contamination est élevé. En pratique, on adoptera des surfaces de 100 $m^2.jour^{-1}$ pour les pâturages riches et 200 $m^2.jour^{-1}$ pour les pauvres ; il en découlera, dans ce dernier cas, des niveaux doubles de ceux du premier.

Cette surface est constante, car on supposera l'élevage réalisé dans les conditions optimales de rendement en lait et en viande par le système de la rotation des près, exposé au chapitre précédent. La durée de consommation de fourrage contaminé en phase foliaire sera le paramètre temporel du niveau de contamination des denrées animales.

I - EXPRESSION MATHEMATIQUE DE CE NIVEAU

On cherche la charge, en radioélément, des denrées, par unité de masse ($\mu Ci.Kg^{-1}$) et par μCi de dépôt de chaque nucléide à l'instant des retombées, $\mathcal{E}$ (dépôt soluble). Cette charge va dépendre de la fraction d'activité quotidiennement ingérée qui parvient à la denrée "ai" $F_{\ell,ai}$ et de la période effective de décroissance dans la denrée, $T_{\ell,ai}$, (période du nucléide ℓ

dans la denrée a_i). A cette période correspond une constante de décroissance effective Λ_{ℓ, a_i}.

a) l'apport quotidien à cette denrée est, par $\mu Ci.m^{-2}$ de dépôt :

$A^f_\ell . S.F_{\ell, a_i}$, si S (m^2) est la surface journalière broûtée,

A^f_ℓ étant l'activité soluble du dépôt au m^2 retenue au niveau de l'herbe, à la disposition du bétail. D'après le chapitre précédent, cette activité est :

$$A^f_\ell = R_f \; e^{-\lambda_{\ell, 2} t}$$

L'apport quotidien est, par $\mu Ci.m^{-2}$ de dépôt, $R_f . S.F_{\ell a_i} . e^{-\lambda_{\ell, 2t}}$

Au bout de τ jours, cet apport est $R_f \; S.F_{\ell, a_i} . e^{-\lambda_{\ell, 2\tau}}$ j pendant un court instant de τ , l'apport est : $R_f \; S.F_{\ell, a_i} \; e^{-\lambda_{\ell, 2\tau}} . d\tau$.

b) la méthode des produits de convolution donne immédiatement la charge par unité de masse.

Soit p_{ai} le poids total de la denrée par animal (masse musculaire ou volume de traite quotidienne). Au temps t , l'apport pendant $d\tau$ est devenu :

$R_f . S.F_{\ell, a_i} \; e^{-\lambda_{\ell, 2\tau}} . e^{-\Lambda_{\ell, ai}(t-\tau)} . d\tau$, par décroissance dans la denrée a_i , suivant la constante $\Lambda_{\ell\ ai}$, durant l'intervalle de temps $t-\tau$.

La charge, au temps t , est par unité de masse :

$$\frac{Q_{, a_i}(t)}{p_{ai}} = R_f . S.F_{\ell a_i} \int_0^t e^{-\lambda_{\ell, 2\tau}} . e^{-\Lambda_{\ell, ai}(t-\tau)} . d\tau$$

pour une consommation animale immédiate.

$$\frac{Q_{\ell, a_i}}{p_{a_i}} = \frac{R_f . S.F_{\ell, ai} \left(e^{-\lambda_{\ell, a_i} t} - e^{-\lambda_{\ell, 2t}} \right)}{p_{ai} \left(\Lambda_{\ell, 2} - \Lambda_{\ell, ai} \right)}$$

Cette expression est valable pour les temps inférieurs à θ , durée de la consommation en phase foliaire.

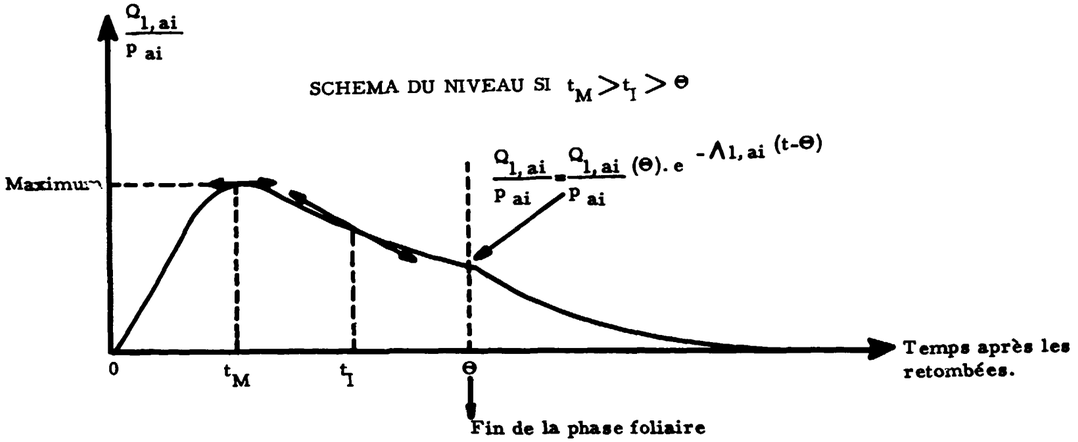
c) Pour des temps postérieurs à θ : l'activité décroîtra suivant la constante $\Lambda_{\ell, ai}$, à partir de la valeur correspondant au temps θ :

$$\frac{Q_{\ell, a_i}}{p_{ai}} = \frac{R_f . S.F_{\ell, ai} \left(e^{-\Lambda_{\ell, ai}\theta} - e^{-\lambda_{\ell, 2\theta}} \right)}{p_{ai} \left(\lambda_{\ell, 2} - \Lambda_{\ell, ai} \right)} . e^{-\Lambda_{\ell, ai}(t-\theta)}$$

d) Ce niveau, nul pour $t = o$, présente un maximum pour le temps :

$$t_M = \frac{\frac{\Lambda_{\ell, ai}}{\lambda_{\ell, 2}}}{\Lambda_{\ell, ai} - \lambda_{\ell, 2}}$$

et un point d'inflexion pour un temps double $t_I = 2\, t_M$



- Figure n°9 - : NIVEAU DE CONTAMINATION

Il importe de déterminer les deux paramètres $F_{\ell, ai}$ et $\Lambda_{\ell, ai}$.

II - DETERMINATION DE $F_{\ell, ai}$.

C'est la fraction de l'activité soluble de chaque nucléide de la chaîne alimentaire, ingérée quotidiennement, qui parvient à une denrée a_i (viande ou lait). Cette fraction dépend du nucléide, de l'animal, des conditions d'alimentation et de la denrée considérée.

Pour la déterminer, nous choisissons les données publiées par l'Académie des Sciences des Etats-Unis, qui sont une synthèse raisonnée des nombreuses publications donnant le pourcentage d'activité de chaque radioélément de la chaîne, retrouvé dans les denrées animales, après contamination alimentaire unique ou brève /34/.

Ces données concernent des animaux dont les caractéristiques biologiques sont les suivantes :

Animaux	Poids du corps	Masse musculaire	Squelette	Volume sanguin	Consommation hydrique	Consommation en fourrage par jour	
						Sec	vert
Vaches	500 kg	160 kg	60 kg	35 l	80 l	9 kg	60 kg
Boeufs	450 kg	180 kg	45 à 60 kg	30 l	60 l	8 kg	50 kg
Moutons	70 kg	24 kg	7 kg	5,5 l	4 l	2 kg	6 kg
Porcs	200 kg	85 kg	16 kg	10 l	15 l	4 kg	6 kg

La production moyenne est de 10 litres.jour^{-1} en moyenne.

Après contamination, le National Research Council /34/ et l'Académie des Sciences des Etats-Unis donnent le rapport entre le niveau de contamination du fourrage et celui des denrées animales (activité par kg) pour un rendement moyen de 200 à 250 g de matière sèche au m^2, en fonction du temps écoulé depuis l'ingestion contaminante. Soit

$R^{\ell}_{ai} = f(t)$ ce rapport variable avec le temps ; le niveau des denrées est :

$$\frac{S.R_f F_{\ell ai}\, e^{-\Lambda_{\ell ai} t}}{p_{ai}} \quad \mu Ci.Kg^{-1} \text{ pour } 1\ \mu Ci.m^{-2} \text{ de dépôt sur l'herbe à } \xi .$$

Le niveau de l'herbe est, à l'instant de l'ingestion :

$\frac{R_f}{\bar{R}}$ pour $1\ \mu Ci.m^{-2}$ de dépôt, en appelant $\bar{R}$ le rendement moyen en $Kg.m^{-2}$

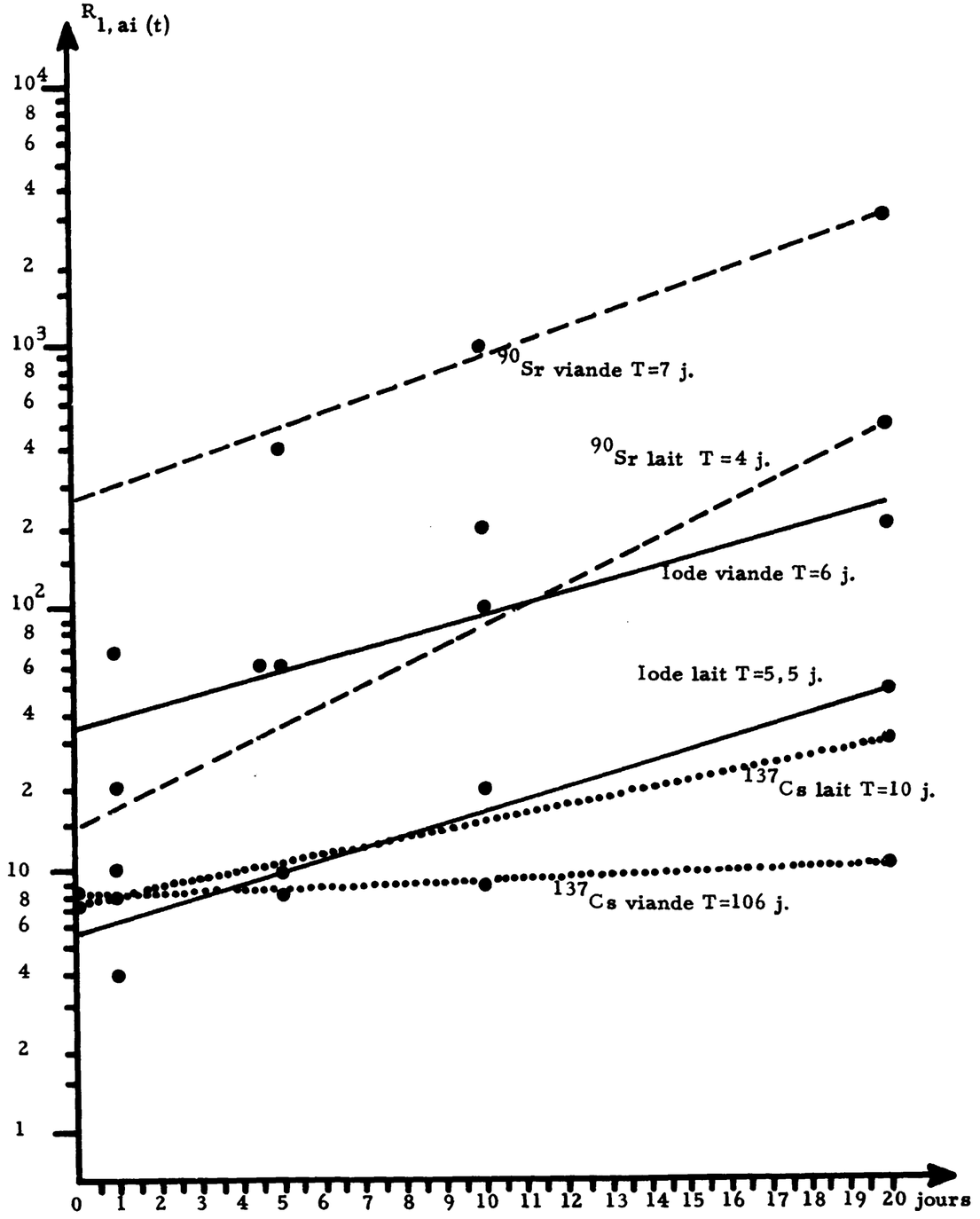
le rapport $R^{\ell}_{ai} = \frac{\text{niveau de fourrage}}{\text{niveau des denrées}} = \frac{p_{ai}.\, e^{-\Lambda_{\ell, ai} t}}{S.\, F_{\ell ai}.\, \bar{R}}$

Il suffit de tracer la courbe : $R = f(t)$ en coordonnées semi-log pour déterminer à la fois $F_{\ell, ai}$ et $\Lambda_{\ell, ai}$

En effet, pour $t = 0$, $R^{ai}_{(0)} = \frac{p_{ai}}{s.F_{\ell, ai}.\bar{R}}$, $F_{\ell, ai} = \frac{p_{ai}}{S.\bar{R}.\, R_{0, ai}}$

avec $S = 100\ m^2$ (pâturage riche de rendement $0,250\ kg.m^{-2}$)

$$F_{\ell, ai} = \frac{p_{ai}}{0,25 \times 10^2 .\, R_{(0)\, ai}} = \frac{p_{ai}}{25.\, R_{0, ai}}$$



- Figure n°10 - : RAPPORTS DES NIVEAUX DE CONTAMINATION DES DENREES ET DE L'HERBE

Les résultats numériques sont donnés dans ce tableau ; ils concernent les bovins :

Jours après *ingestion*	1	1	1	5			10			20		
Lait	4	10	4	10	60	10	20	200	20	50	500	30
Viandes (muscles)	20	70	8	60	400	8,5	100	10^3	9	200	$3x10^3$	10
Abats (foie)	10	-	10	30	-	10	50	-	20	200	-	30
Radioéléments	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}

D'après ces valeurs de $R_{\ell, ai} = f(t)$, on trace les courbes correspondantes qui coupent l'axe des ordonnées au point $R0, {}^{\ell}ai$. Les valeurs de $R_0{}^{\ell, ai}$ sont les suivantes :

Nucléides / Aliments	I^{131}	Sr^{89} et Sr^{90}	Cs^{137}
Lait	5,8	14	7,5
Viande	35	145	8
Abats	8	-	8,7

On en déduit les valeurs de $F_{\ell, ai}$ pour chaque nucléide et chaque aliment. Ces valeurs sont données dans le tableau suivant :

Radioéléments	I^{131}	Sr^{89} et Sr^{90}	Cs^{137}
Lait	6×10^{-2}	3×10^{-2}	5×10^{-2}
Viande	0,2	3×10^{-2}	0,9
Abats (foie)	$7,5 \times 10^{-2}$	-	10^{-2}

Ces valeurs de $F_{\ell, ai}$ sont confirmées par LENGEMANN et COMAR /40/ ainsi que par GLASCOOK /41/ tout au moins partiellement.

III - DETERMINATION DES PERIODES ET DES CONSTANTES EFFECTIVES DANS LES ALIMENTS

Les courbes $R_{\ell, ai} = f(t)$ en coordonnées semi-logarithmiques étant les droites, les périodes effectives s'en déduisent immédiatement, par lecture sur le graphique. La précision, dans le cas du Cs^{137} dans la viande, est meilleure par le calcul, en raison de la faible variation de $R_{Cs, viande}$:

$$\frac{R_{Cs,\ viande}\ (20ème\ jour)}{R_{Cs,\ viande}\ 1er\ jour} = e^{19 \lambda_{Cs,\ viande}} = 1,25$$

$\lambda_{\ell, a} = 6,5 \times 10^{-3}$ jour^{-1} ; la période corresponte est de 106 jours.

Les valeurs, lues sur le graphique, sont rassemblées dans ce tableau :

Radioéléments	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}	I^{131}	Sr^{90}	Cs^{137}
Périodes effect. (en jours)	5,5	3 - 4	10	6	7	106	5	-	10
$\lambda_{\ell, ai}$ (jour^{-1})	$1,3x10^{-1}$	$2,33x10^{-1}$	$7,1x10^{-2}$	$1,1x10^{-1}$	10^{-1}	$6,5x10^{-3}$	0,12	-	$7x10^{-2}$
Aliments	Lait			Viande			Abats (foie)		

La période effective du Sr^{90} est différente de celle du Sr^{89}, bien que leurs périodes biologiques soient identiques. Cette dernière période est obtenue, dans chaque aliment, en combinant les périodes effectives et radioactives du Sr^{90}. Au niveau des constantes, on a plus simplement en appelant $\lambda^b_{Sr,\ ai}$, la constante d'élimination biologique des isotopes du Strontium :

$$\lambda^b_{Sr,\ ai} = \lambda_{Sr,\ ai} - \lambda^r_{Sr\ 90}$$

Aliments	Lait	Viande	Abats
$\lambda_{Sr^{90},\ ai}(j^{-1})$	0,233	0,1	-
$\lambda^b_{Sr,\ ai}\ (j^{-1})$	0,233	0,1	-
$\lambda_{Sr^{89},\ ai}(j^{-1})$	0,247	0,114	-

On a évidemment :

$$\lambda_{Sr^{89},\,ai} = \lambda^{r}_{Sr^{89}} + \lambda^{b}_{Sr,\,ai} \qquad \text{avec } \lambda^{r}_{Sr^{89}} = 1{,}386 \times 10^{-2}$$

et $\lambda^{r}_{Sr^{90}} = 6{,}93 \times 10^{-5}$, si λ^{r}_{Sr} exprime les constantes de décroissance radioactive des isotopes du Strontium.

Ces valeurs sont confirmées pour l'iode par LEISTNER /23/ et de nombreux auteurs /14 à 22, 134 à 145/, ainsi que pour les isotopes du strontium. En particulier, la période effective de l'iode dans le lait semble être bien établie autour d'une valeur moyenne de 5 jours /134, 135, 136/, tant du point de vue expérimental que par des mesures à la suite d'accidents /136 à 145/, qui confirment les valeurs calculées à partir de la référence /34/.

Il y a dans la littérature de grandes divergences pour la valeur de la période effective du Césium dans la viande ; dans le lait, cette période est peu connue /35 à 45/. Certains auteurs donnent des valeurs faibles pour la période biologique du Césium dans la viande : 2 jours chez la chèvre et 20 jours chez la vache, d'après LEISTNER /11/. Des valeurs faibles sont données chez le cobaye et le rat, de l'ordre d'une dizaine de jours d'après Mc CLELLAN, Mc KE. .Y et BUSTAD /36/ et WASSERMANN, COMAR et TWARDOCK /39/, ainsi que STARA /42/ et M. .K, LODDE et PARR /43/.

Nous choisissons cependant une valeur plus élevée (106 jours) compte tenu de la taille de l'animal et en raison du fait qu'elle se rapproche de celle de l'homme, 140 jours. Enfin, cette valeur, calculée à partir des données de la référence /34/, plus récente que ces travaux antérieurs, est le fruit d'une synthèse de données et d'expérimentations réalisées par l'Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis. Elle semble, de ce fait, être plus digne de créance.

IV - VALEURS NUMERIQUES

Les paramètres étant connus, le calcul est possible à partir des formules du paragraphe I. Le tableau suivant donne les résultats pour $Rf = 1$ et $\theta = 30$ jours, concernant le niveau des denrées en $\mu Ci.Kg^{-1}$ par μCi de dépôt soluble au temps des retombées par m^2 de dépôt, dans le cas d'une surface quotidienne de 100 $m^2.jour^{-1}$ (rendement de 0,250 $kg.m^{-2}$).

Nucléides et aliments	I^{131} lait	I^{131} viande	I^{131} foie	Sr^{89} lait	Sr^{89} viande	Sr^{90} lait	Sr^{90} viande	Cs^{137} lait	Cs^{137} viande	Cs^{137} foie
λ_ℓ^r (jour^{-1})	9×10^{-2}	9×10^{-2}	9×10^{-2}	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$6,93 \times 10^{-5}$	$6,93 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$
$\lambda_{\ell,2}$ (jour^{-1})	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$6,4 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-2}$	5×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-2}
$\Lambda_{\ell,a}$ (jour^{-1})	$1,3 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	0,121	0,247	0,114	0,233	0,1	$7,1 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-3}$	7×10^{-2}
t_M (jours)	3,0	4	4,15	6,85	11,52	8,25	14	20	6	16
t_I (jour)	6	8	8,3	13,4	23	16,5	28	40	12	32
Niveau maximal	2,77	0,133	0,28	2,5	$5,6 \times 10^{-3}$	2,82	$6,4 \times 10^{-3}$	3,08	1	10^{-3}
Niveau de contamination des denrées µCi. Kg^{-1} par µCi de dépôt soluble à $\mathcal{E}$, par m^2 — Temps / Niveau — jour 1	0,63	$4,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-5}$	0,88	$1,15 \times 10^{-3}$	0,865	$1,22 \times 10^{-3}$	0,48	0,16	0,016
5	1,81	0,133	0,09	2,38	$2,06 \times 10^{-3}$	2,56	$4,44 \times 10^{-3}$	1	0,75	0,07
10	0,92	0,08	$2,15 \times 10^{-2}$	2,1	$5,42 \times 10^{-3}$	2,52	$6,24 \times 10^{-3}$	2,68	0,95	0,1
20	0,25	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-3}$	1,48	$4,4 \times 10^{-3}$	1,97	6×10^{-3}	3	0,38	0,1
30	0,06	6×10^{-3}	$5,9 \times 10^{-4}$	0,8	$2,8 \times 10^{-3}$	1,26	$4,26 \times 10^{-3}$	2,6	0,33	$6,8 \times 10^{-2}$
40	0,015	$2,65 \times 10^{-3}$	3×10^{-4}	$7,25 \times 10^{-3}$	7×10^{-4}	$7,6 \times 10^{-2}$	4×10^{-3}	1	0,3	4×10^{-2}
50	0,004	6×10^{-4}	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,36 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	6×10^{-4}	0,62	0,28	$1,7 \times 10^{-2}$
60	0,001	-	-	$7,2 \times 10^{-4}$	-	$1,2 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-5}$	$8,3 \times 10^{-4}$	0,267	7×10^{-3}
100	$2,72 \times 10^{-4}$	-	-	$2,4 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-5}$	-	10^{-7}	10^{-9}	0,172	8×10^{-5}
730	$2,2 \times 10^{-20}$	-	-	-	-	-	-	-	$2,6 \times 10^{-3}$	-

Les valeurs concernant l'iode ont été calculées en faisant une approximation à partir du modèle de GARNER (cf. annexe I) et non à partir de la formule du paragraphe I, basée sur une simple décroissance exponentielle dans les denrées après contamination unique.

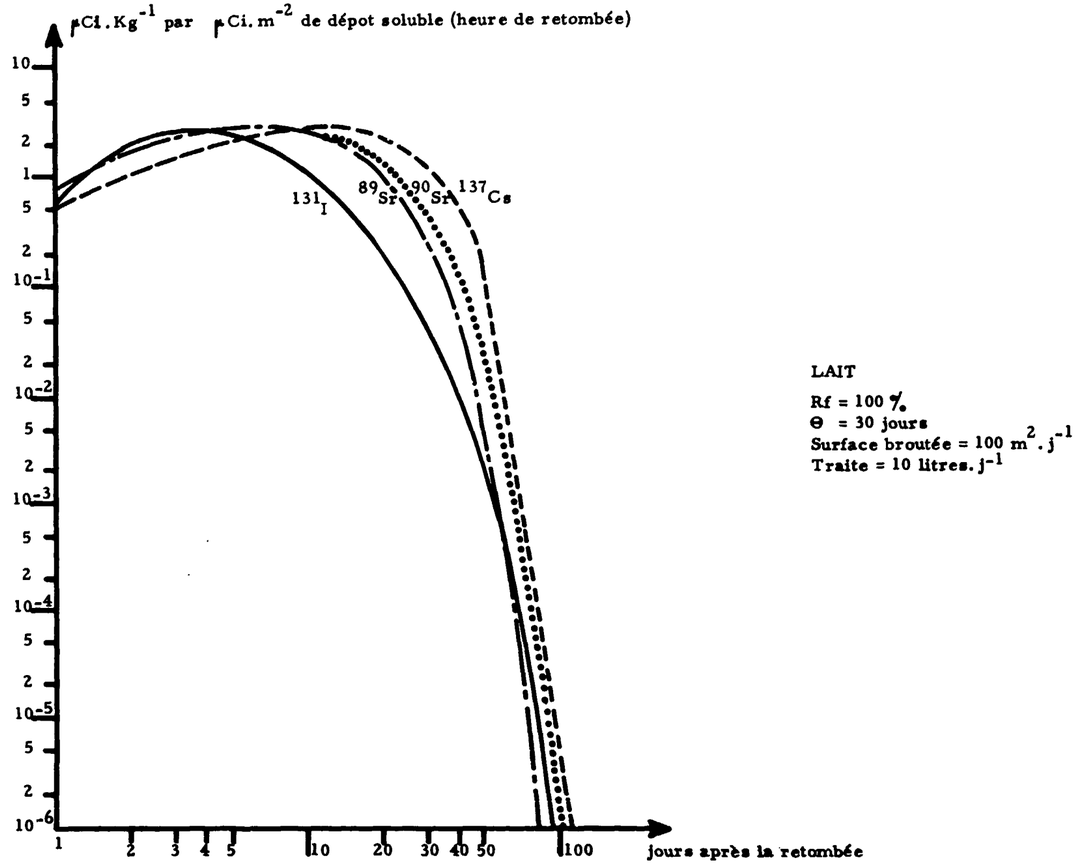
La décroissance est un peu plus rapide.

Cependant, cette hypothèse simplificatrice a été adoptée dans les calculs ultérieurs pour l'évaluation du risque humain : on admet une fonction d'entrée dans l'économie humaine (apport journalier à l'origine critique) représentée par la somme de deux exponentielles.

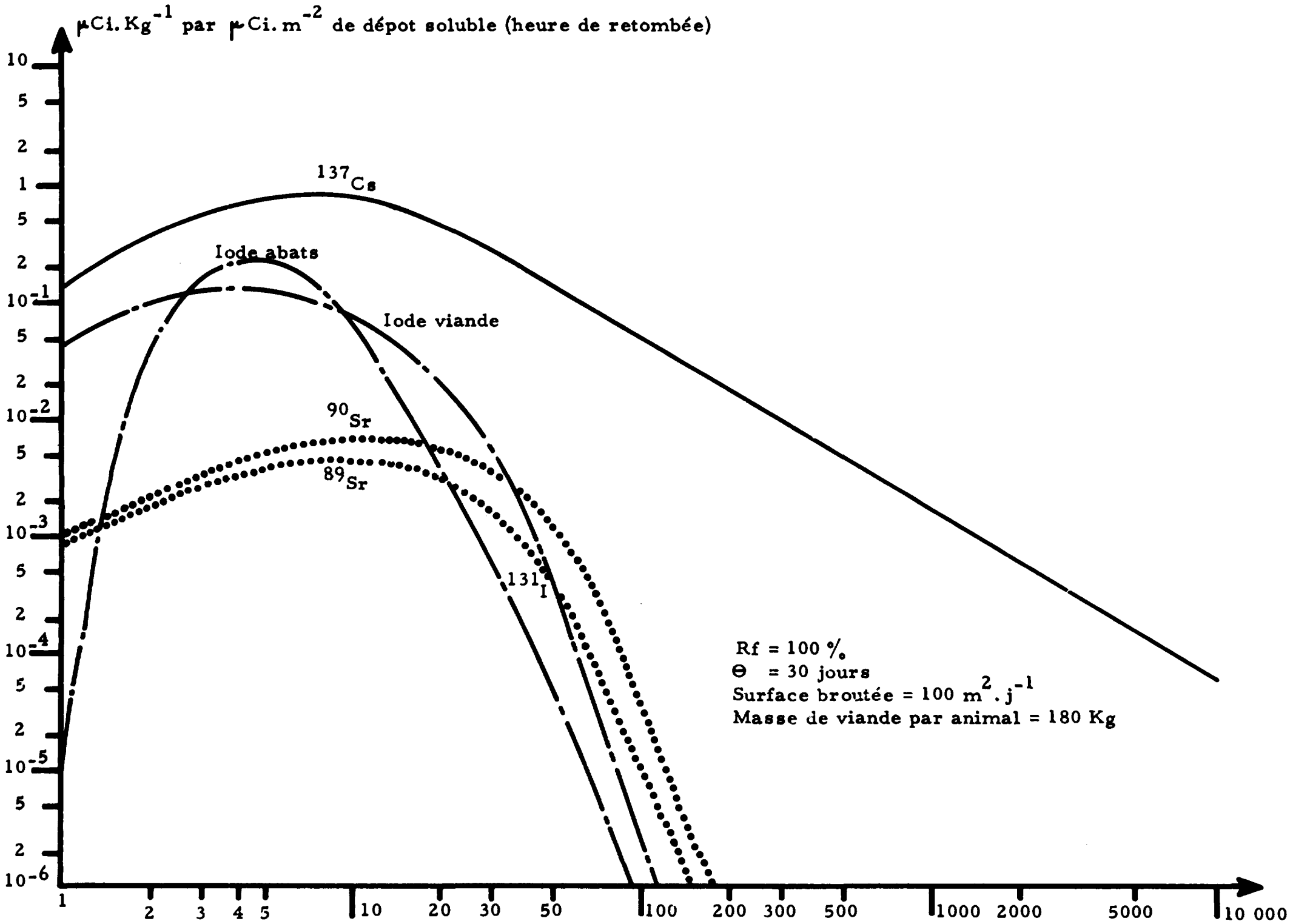
En fait, pour la plupart des denrées, la fonction d'entrée réelle est à quatre exponentielles suivant les équations de GARNER (cf. annexe I) qui tiennent compte des différents compartiments chez l'animal dans le cas où la denrée envisagée n'est pas un organe de stockage.

Ce schéma montre que, pour une durée de consommation de 30 jours en phase foliaire, le niveau maximal de contamination des denrées animales est réduit, au bout de trois mois, à la millionième partie environ pour la majorité des radioéléments et des denrées, sauf pour le Césium dans la viande où le niveau n'est réduit qu'à la dixième partie. Le niveau maximal est de l'ordre de grandeur de celui du dépôt par m^2. La viande reste longtemps contaminée.

Ces courbes peuvent guider l'interprétation du contrôle sanitaire de la chaîne alimentaire animale.



- Figure n°11 - : NIVEAUX DE CONTAMINATION DU LAIT



- Figure n°12 - : NIVEAU DE CONTAMINATION DE LA VIANDE

ANNEXE N° I : LAIT ET IODE

I – Modèle de Garner

R.J. GARNER /134/ a décrit, en fonction de ses résultats expérimentaux, le transfert des produits de fission au lait de vache. L'évaluation de la concentration dans le temps a été faite à partir d'un modèle mathématique utilisable en contamination buccale unique ou brève.

Ce modèle fournit une base à l'analyse mathématique des données expérimentales existant dans la littérature, qui peut éventuellement être étendue à des mélanges (Rb-Sr, Te-I, Cs-Ba, etc ...)

a) – Les hypothèses suivantes y sont admises :

- l'absorption et l'excrétion commencent immédiatement après l'ingestion et sont exponentielles. Cette hypothèse est simplificatrice et majore le niveau de contamination d'un faible pourcentage (ce qui joue en faveur de la sécurité).
- il n'y a pas de compartiment métabolique pour les radioéléments dans le pis de la vache qui se comporte comme un organe de stockage dont l'activité représente l'activité intégrée dans le lait.

Cette hypothèse est sûrement conforme à la réalité puisqu'on a constaté que la concentration du lait est sensiblement parallèle à celle du sang.

b) – Les équations de ce modèle sont les suivantes :

$$\frac{dQg}{dt} = -(r_1 + r_2 + \lambda)\, Qg$$

$$\frac{dQb}{dt} = r_1 Qg + r_4 Qr - (r_3 + r_5 + r_6 + r_7 + \lambda)\, Qb$$

$$\frac{dQr}{dt} = r_3 Qb - (r_4 + \lambda).\, Qr$$

$$\frac{dQm}{dt} = r_7 Qb$$

$$Qg(0) = P0$$

$$Qb(0) = Qr(0) = Qf(0) = Qk(0) = 0$$

$$Qm(0) = 0$$

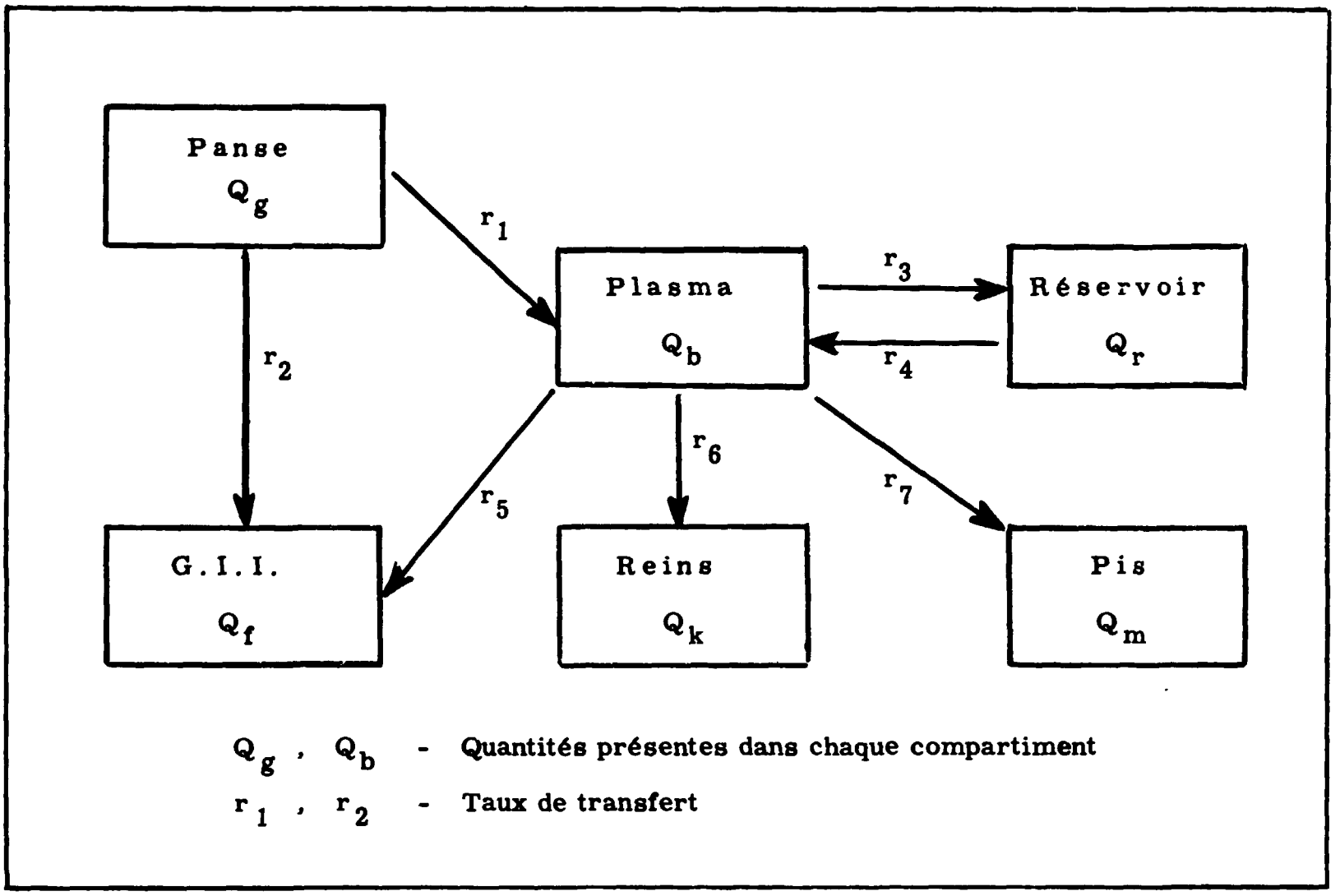
P0 est l'activité du nécléide ingéré au temps $t = 0$

λ est la constante de décroissance radioactive

Qg est l'activité dans la panse, Qf celle de l'intestin, Qb celle du plasma, Qr celle de l'organe réservoir, en l'espèce la thyroïde (pour l'iode), Qk celle des reins, Qm celle des mamelles.

r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6 et r_7 sont les constantes de transfert d'un compartiment à un autre.

Le modèle est représenté par la figure (1).



Q_g , Q_b - Quantités présentes dans chaque compartiment

r_1 , r_2 - Taux de transfert

Si la perte du radioélément dans le lait est considérée comme continue, $\frac{dQm}{dt}$ sera liée à la concentration instantanée de ce radioélément au temps t , par un facteur de proportionnalité. Ce facteur est l'inverse du volume de production laitière quotidienne d'une vache.

Cette concentration Ct est la solution du système d'équations différentielles décrivant le modèle :

$$Ct = P0A_1 \cdot e^{-(K_1 + \lambda)t} + A_2 \cdot e^{-(K_2 + \lambda)t} + (A_1 + A_2)\, e^{-(K_g + \lambda)t}$$

avec P(0) activité ingérée en une seule fois

$$K_1 + K_2 = r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7$$

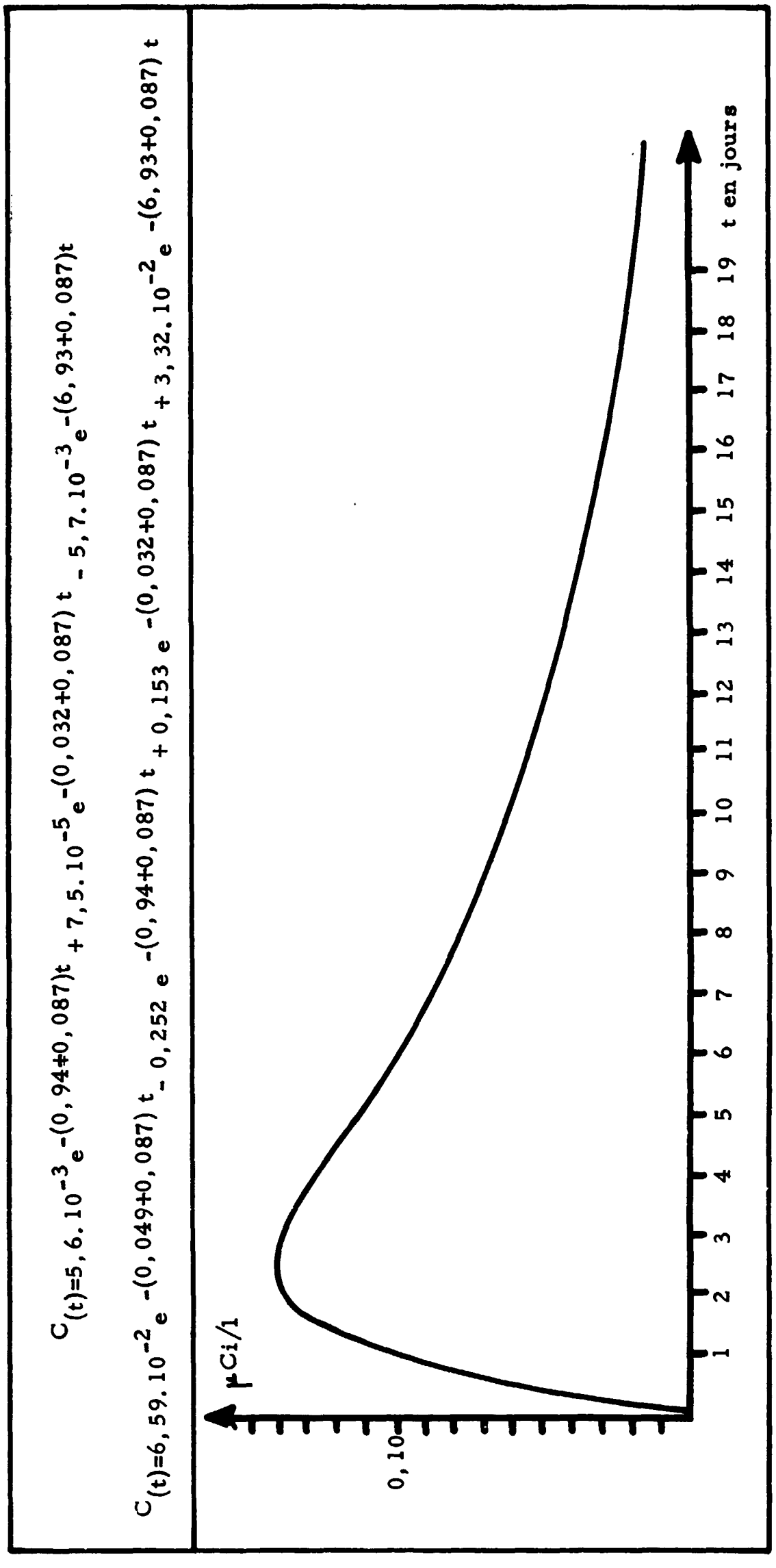
$$K_1 . K_2 = r_4 (r_5 + r_6 + r_7)$$

$$A_1 = \frac{r_1 \cdot r_7}{V} \quad \frac{K_1 - r_4}{(r_1 + r_2 - K_1) \cdot (K_1 - K_2)}$$

$$A_2 = \frac{r_1 \cdot r_7}{V} \cdot \frac{K_2 - r_4}{(r_1 + r_2 - K_2) \cdot (K_2 - K_1)}$$

$$K_g = r_1 + r_2$$

Les valeurs de F_I , lait dans les expérimentations de GARNER /134/ oscillent autour de 0,53 % et atteignent plus de 1 % dans le cas des USA. Les variations sont grandes et dépendent de la physiologie de l'animal producteur, du rendement en lait et de la phase de lactation.


$C_{(t)}=5,6.10^{-3}e^{-(0,94\pm0,087)t}+7,5.10^{-5}e^{-(0,032\pm0,087)t}-5,7.10^{-3}e^{-(6,93\pm0,087)t}$
$C_{(t)}=6,59.10^{-2}e^{-(0,049\pm0,087)t}-0,252\ e^{-(0,94\pm0,087)t}+0,153\ e^{-(0,032\pm0,087)t}+3,32.10^{-2}e^{-(6,93\pm0,087)t}$
µCi/l
0,10
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 t en jours

- Figure n° 14 - 4 -

Les valeurs des taux de transfert r, des divers compartiments ont été évaluées à l'aide des données expérimentales des contaminations buccales uniques et sont données par GARNER.

c) Application du modèle à du lait provenant du bétail paissant en permanence sur des prés contaminés accidentellement, c'est-à-dire dans les conditions des retombées locales après explosion nucléaire.

La contamination du pré est unique, l'iode décroît avec la période effective de 5 jours, combinaison de la période radioactive de 8 jours et de la période écologique de 14 jours, au niveau du fourrage.

La concentration $\mathbf{C}$ (t) du lait des vaches paissant en permanence sur un tel pré est obtenue en faisant un produit de convolution sur la concentration C (t) = $\frac{dQm}{dt}$ calculée précédemment, multipliée par la décroissance effective sur le pré de l'iode présente au moment des retombées, suivant la période effective de 5 jours.

Les paramètres agronomiques et radiologiques considérés par GARNER sont les suivants : Rf = 25 %, ration journalière du bétail = 9 kg d'herbe sèche par jour, rendement du pré = 50 $g.m^{-2}$ d'herbe sèche (soit 180 m^2 de surface broûtée par jour), dépôt d'iode initial = 1 $\mu Ci.m^{-2}$.

On avait :

$$C(t) = 5,6 \times 10^{-3} . e^{-(0,94+0,087)t} + 7,5 \times 10^{-5} . e^{-(0,032 + 0,087)t} - 5,7 \times 10^{-3} . e^{-(6,93 + 0,087)t}$$

$$\mathbf{C}(t) = \int_{\tau=o}^{\tau=t} e^{-(0,049 + 0,087)\tau} . C(t-\tau) . d\tau$$

$$\mathbf{C}(t) = 6,59 \times 10^{-2} \times e^{-(0,049 + 0,087)t} - 0,252 . e^{-(0,94 + 0,087)t} + 0,153\, e^{-(0,032 + 0,087)t} + 3,32 \times 10^{-2} . e^{-(6,93 + 0,087)t}$$

Les coefficients de l'équation C (t) sont déterminés expérimentalement par GARNER /134/ : P(0) = 1 x 0,25 x 180 $\mu Ci.j^{-1}$.

$A_1 = 5,6 \times 10^{-3}$ $\quad K_1 = 0,94\ j^{-1}$

$A_2 = 7,5 \times 10^{-5}$ $\quad K_2 = 0,032\ j^{-1}$

$\lambda = 0,087\ j^{-1}$ $\quad Kg = 6,93\ j^{-1}$

La représentation graphique de $\mathbf{C}$ (t) fait apparaître :

- un maximum vers 0,14 $\mu Ci.litre^{-1}$ pour un dépôt de 1 $\mu Ci.m^{-2}$,
- ce maximum est situé entre 2 et 3 jours après contamination des pâturages,
- la décroissance se produit après ce maximum avec une période légèrement supérieure à 5 jours.

Nos chiffres sont en accord avec ceux de GARNER, compte tenu qu'ils furent établis pour un $F_{Iode,\ lait}$ de 6×10^{-2} et d'une rétention foliaire de 100 %. Enfin, R.J. GARNER

a calculé l'ingestion totale d'iode 131 pour une personne consommant 1 litre de lait par jour pour ce dépôt d'un microcurie par m^2 d'iode 131 sur le pâturage. Il obtient 1,6 µCi, pour l'activité intégrée dans la thyroïde à la suite d'une consommation de longue durée (supérieure à 5 périodes effectives dans le lait, soit un mois environ) dans les conditions vues plus haut et dans le cas d'une consommation de 1 litre par jour.

d) La période effective de l'ordre de grandeur de 5 jours est confirmée par plusieurs auteurs, au niveau du lait et de l'herbe :

Auteurs	Booker /137/	Barth /110/	Marter /138/	Eisenbud /139/	Martin /82/	Wehmann /140/
Période (j^{-1}) (herbe)	Seascale 4,9 Sellafield 5 Corney 5	1ère ferme 5,3 2ème ferme 5,3	5 (pluie)	5	5,5	-
Période (j) lait	Seascale 4,7 Sellafield 4,7 Corney 5,5	1ère ferme 3,8 2ème ferme 4	4 à 5	-	-	8

Auteurs	Pendleton /141/	Brit. Med. J. /142/	Medic.Res. Council /136/	Hawley /143/	Lengemann /144/	Klement /145/
Période (lait) jours	3,8 à 8 moyenne 5,8	8	5	4,5	5	2 à 8
Période (herbe) jours	-	-	-	3,5 5,5	-	3,5 4,25 5,5

II - MONOGRAPHIE DE TAMPLIN /108/

Cette monographie antérieure au modèle de GARNER étudie d'une façon à peu près similaire les processus physiologiques de transfert de l'iode au lait. Il aboutit aussi à une expression mathématique de la concentration qui est une somme d'exponentielles pour l'iode 131 et l'iode 133 :

$$C\ (I^{131}) = 2,2 \times 10^{-2}\ (e^{-0,116\,t} - e^{-0,346\,t})$$

$$C\ (I^{133}) = 6 \times 10^{-2} . (e^{-0,756\,t}) - e^{-0,924\,t})$$

Ces formules étant celles à employer dans le cas de contamination unique du bétail, elles s'appliquent à la fraction de la quantité d'iode initialement ingérée, présente dans un litre de lait.

Les valeurs des $F_{Iode,\ lait}$ sont de 2,2 et $6,10^{-2}$.

Les constantes de décroissance sont de 0,116 et 0,346 j^{-1} pour l'iode 131 et de 0,756 et 0,924 j^{-1} pour l'iode 133.

Aux paramètres déjà étudiés, TAMPLIN ajoute d'autres facteurs qui influencent le niveau de contamination du lait :

- période ou phase de lactation, dépendant de l'âge et de la physiologie des laitières,
- effets d'inhibiteurs thyroïdiens qui diminuent l'excrétion lactée de l'iode.
  Ils n'agissent qu'à taux relativement élevé (2 $g.j^{-1}$ dans le cas du thiocyanate) en réduisant temporairement le niveau de contamination du lait ; le phénomène inverse se produit à l'arrêt de la médication.
- effet de la quantité d'iode stable de la ration du bétail.
  Cet effet semble peu important.

Enfin, il précise les écarts aux valeurs du pourcentage de la ration journalière retrouvé dans un litre de lait à l'équilibre pour l'iode. La valeur moyenne est de 1 % ; autour de cette valeur, il cite des valeurs extrêmes de 0,2 à 2,7 %. Ces variations sont en relation statistiquement significatives avec la race laitière, la saison et le stade de lactation. Les niveaux du lait sont plus élevés au printemps et plus bas en été, dans le rapport de 3 à 1.

Les variations du niveau de contamination de l'herbe ne sont pas en phase avec ces phénomènes. Le rôle du stade de la lactation affecte le passage d'un facteur 0,6 entre le début et la fin du cycle laitier.

Il confirme la cinétique de GARNER : passage assez rapide du rumen au sang puis de celui-ci aux mamelles où a lieu l'excrétion ; l'ordre cinétique de ces transferts est toujours de 1.

Ce modèle est plus simple ; il ne comporte que 2 exponentielles pour l'expression de C (t) au lieu de 3 chez GARNER ; il est aussi vraisemblablement moins conforme à la réalité.

ANNEXE II

En dehors des résultats de WINDSCALE, citons le cas récent d'une contamination de laiteries du Nevada, au cours d'un test souterrain, le 13 mars 1964 /100/. L'évolution du niveau de contamination a été suivie 1 mois, sur l'herbe et dans le lait.

1. Au niveau de l'herbe, la période de décroissance écologique fut de 8 jours. Pour une des fermes, la contamination du sol était de 12.000 pCi. m^{-2}, 14 jours après les retombées, et 2610 pCi. m^{-2} pour l'autre à ce moment. Les extrapolations au moment du fallout donnaient respectivement 4,3 x 10^4 p. Ci. m^{-2} et 8 x 10^3 p. Ci. m^{-2}. La contamination au niveau de l'herbe, le 14ème jour, était de 743 pCi. m^{-2} et 600 pCi. m^{-2} ; les taux de rétention foliaire étaient respectivement de 6,1 % et de 23 % ; les rendements du pâturage de 1,34 Kg. m^{-2} et 1,08 Kg. m^{-2} (herbe fraîche).

2. Les bêtes nourries exclusivement d'herbe contaminée (de niveau maximal 6 jours après les retombées de 4 700 pCi. kg^{-1} et de 1 700 pCi. kg^{-1} 8 jours après, dans la seconde ferme), ont produit du lait dont le pic fut de 420 pCi. $litre^{-1}$ pour la contamination maximale de la première ferme, 8 jours après les retombées, et de 65 pCi. $litre^{-1}$, 7 jours après, pour la seconde laiterie.

Dans les deux cas, les périodes de décroissance effectives sur l'herbe furent de 5,3 jours.

Dans le lait, les courtes périodes (avant le 6ème jour) furent de 3,8 et 4 jours.

Les taux de transfert de l'herbe au lait, pour leurs valeurs maximales, furent de 10^{-2} et de 8 x 10^{-2} dans l'une et l'autre ferme.

3. Les bêtes nourries avec du foin stocké et donné à la consommation 3 à 6 jours après les coupes, fournirent du lait à 70 pCi. $litre^{-1}$ le 3ème jour, pour la première ferme, et à 30 pCi. $litre^{-1}$, le 8ème jour, pour la seconde ferme. Les niveaux du foin au moment de l'ingestion étaient respectivement de 1300 pCi. kg^{-1} et 630 pCi. kg^{-1}, 3 et 7 jours après le fallout.

4. Ces résultats sont en accord avec nos estimations, sauf pour les périodes pour lesquelles de petites différences apparaissent. En fait, les auteurs signalent qu'elles manquent de précision du fait de la rapide variation des échantillons précoces. Leur erreur statistique atteint 50 % des valeurs expérimentales. Il s'agissait de laitières de race Jersey en phase tardive de lactation, produisant 20 à 25 litres. $jour^{-1}$ au taux de 5 % de matière grasse. L'alimentation, pour les bêtes à l'alimentation mixte, était de 15 Kg de foin sec, 20 Kg d'herbe fraîche et 10 Kg d'orge. L'hiver, l'herbe fraîche était remplacée par 20 Kg de fourrage ensilé. La hauteur d'herbe broûtée était de 30 cm ; la surface quotidiennement tondue ne dépassait pas 50 m^2 (pâturages très riches).

ANNEXE III

concernant le Ru^{106} dans le lait

Seul, le Ru^{106} sera considéré, le Ru^{103} ayant une trop courte période effective. Son métabolisme est tel que seuls les processus de secrétion le concernent.

D'après CHRUCH, LLOYD et MAYS [107], le rapport de son activité dans le lait à celle du Césium dans cet aliment est donné par la formule :

$$0,25.e^{-\lambda t} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{0,7}{T} \quad \text{et} \quad T = 1 \text{ an}.$$

Le niveau de contamination en Ru^{106} se déduira donc de celle du Cs en multipliant l'activité de celui-ci par $0,25 \times e^{-0,7\,t}$.

Ceci s'applique aussi bien en phase foliaire que racinaire.

Cet élément de période biologique 1.8 jour chez l'homme est peu assimilé ; sa principale nuisance est celle du TGI ; la faible quantité métabolisée détermine, au niveau des muscles, une charge très faible, puisque le maximum sera atteint en 8 jours. Sa nuisance est donc presque négligeable.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'EQUIVALENT DE DOSE AU NIVEAU DES ORGANES CRITIQUES DE L'HOMME

L'apport du nucléide ℓ par kg (ou litre) d'aliment consommé, à l'organe critique de l'homme, est le produit des niveaux alimentaires, calculés au chapitre précédent, par la fraction ingérée, $f_w 2$ qui parvient à cet organe. Les valeurs de $f_w 2$ sont données par la publication II de la C.I.P.R. /111/. On ramènera l'apport à 1 $\mu Ci.m^{-2}$ du radioélément soluble considéré, comme on l'a fait dans le cas des niveaux des denrées ; l'activité unitaire soluble est celle au moment des retombées.

I - CHARGE DES ORGANES CRITIQUES HUMAINS AU COURS DE LA CONSOMMATION, A L'EXCEPTION DU TGI.

Cette charge est calculée par la méthode des produits de convolution dans les trois éventualités possibles :

- charge dans le cas d'une consommation immédiate :
  On néglige les délais nécessaires à la collecte, pour simplifier, et on suppose un début d'abattage ou de traite immédiat. Le calcul sera mené différemment suivant que les animaux producteurs consomment ou non le fourrage contaminé. Soit θ la durée de cette contamination en phase foliaire ; θ est toujours inférieur (dans le cas de stabulation de prudence) ou au plus égal à la durée de la phase foliaire. La première éventualité est celle où la période de consommation humaine est comprise dans la durée θ : $0 < t^* < \theta$
- la seconde éventualité, consécutive à la première (puisque θ est limité à 30 ou 42 jours) est celle où la durée de la consommation humaine est supérieure à θ : $0 < \theta < t^*$
- la troisième éventualité est celle d'une consommation humaine différée par précaution dans le cas de niveau trop élevé de contamination, au temps t_1. Dans cette éventualité $t > t_1$; t_1 sera supérieur ou inférieur à θ.

Dans tous les cas, l'apport à l'organe critique, par kg (ou litre) d'aliment consommé quotidiennement, sera, au temps τ pendant le temps $d\tau$:

---

t^* : est le temps variable pendant l'alimentation contaminée du consommateur.

$$\frac{Rf \,.\, S.F_{\ell,\,ai}\, f_{w2}}{p_{ai}} \,.\, \frac{e^{-\lambda_{\ell,\,ai}\tau} - e^{-\lambda_{\ell,\,2}}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,\,ai}} \,.\, d\tau$$

Posons :

$$K_{\ell,\,ai} = \frac{Rf \,.\, S.F_{\ell\,ai}\, f_{w\ell}}{p_{ai}}$$

cet apport est :

$$\frac{K_{\ell,\,ai}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_{\ell,\,ai}} \left(e^{-\lambda_{\ell,\,ai}\tau} - e^{-\lambda_{\ell,\,2}\tau}\right).d\tau$$

Au bout du temps $t - \tau$ de décroissance dans l'organe critique humain, suivant la constante effective λ_ℓ /111/ de décroissance du nucléide ℓ au niveau de son organe de stockage, cet apport est devenu :

$$\frac{K_{\ell,\,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,\,ai}} \,.\, \left(e^{-\lambda_{\ell,\,ai}} - e^{-\lambda_{\ell,\,2}\tau}\right).\, e^{-\lambda_\ell (t-\tau)} \,.\, d\tau$$

1. Charge pendant la période inférieure à θ $(t < \theta)$, $q^1_{\ell\,,\,ai}$

a) Cas de consommation immédiate depuis le moment des retombées : $0 < t < \theta$

Soit $q^1_{\ell\,,\,ai}$ la charge de l'organe critique, de tropisme correspondant au radio-élément ℓ, dûe à l'aliment a_i :

$$q^1_{\ell,\,ai} = \frac{K_{\ell,\,ai}\, e^{-\lambda_\ell t}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_{\ell,\,a_i}} \int_0^t \left[e^{-(\lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell)\tau} - e^{-(\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell)\tau}\right] d\tau$$

$$q^1_{\ell,\,a_i} = \frac{K_{\ell,\,a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \left[\frac{e^{-\lambda_\ell t} - e^{-\lambda_{\ell,\,a_i} t}}{\lambda_{\ell,\,a_i} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell t} - e^{-\lambda_{\ell,\,2}\,t}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell}\right]$$

b) Cas de consommation humaine différée au temps t_1 $(t > t_1)$: $0 < t_1 < \theta$

$$q^1_{\ell,\,a_i} = \frac{K_{\ell,\,ai}\,.\, e^{-\lambda_\ell t}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_{\ell ai}} \int_{t_1}^t \left[e^{-(\lambda_{\ell,\,a_i} - \lambda_\ell)\tau} - e^{-(\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell)\tau}\right].d\tau$$

$$q^1_{\ell,\,ai} = \frac{K_{\ell,\,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell\,ai}} \left[e^{-\lambda_\ell t} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\Lambda_{\ell,\,a_i} t}}{\Lambda_{\ell,\,a_i} - \lambda_\ell} + \frac{e^{-\lambda_{\ell,\,2}\, t}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell} \right]$$

2. Evolution de la charge pour $t > \theta$

Au temps θ , la charge est $q^1_{\ell,ai}$, calculée précédemment ; cette charge accumulée de 0 à θ va décroître suivant la constante λ_ℓ pendant le temps $t - \theta$. Il s'y ajoute une charge $q^2_{\ell\ ,\ ai}$, résultant de la consommation de denrées encore contaminées, dont les niveaux décroissent suivant une exponentielle de constante $\Lambda_{\ell,\ ai}$ pendant le temps $t - \theta$, à partir des niveaux du temps θ . Si la consommation humaine débute au temps t_1, $q^1_{\ell\ ,\ ai}$ est calculée suivant la formule b du paragraphe précédent dans le cas où $t_1 < \theta$; si $t_1 > \theta$, $q^1_{\ell\ ,ai} = 0$.

a) expression de $q^1_{\ell\ ,\ ai}$ pour $t > \theta$

$$q^1_{\ell\ ,\ ai} = q^1_{\ell,\ ai\ (\theta)} \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta)}$$

- Consommation immédiate :

$$q^1_{\ell\ ,\ ai} = \frac{K_{\ell,\ ai}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}} \left[\frac{e^{-\lambda_\ell \theta} - e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}}}{\Lambda_{\ell,\ ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2}\,\theta}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell} \right] \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta)}$$

- Consommation différée :

$$t_1 = \theta \longrightarrow q^1_{\ell,\ ai} = \frac{K_{\ell\ ,\ ai}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}} \left[e^{-\lambda_\ell \theta} - \frac{e^{-(\Lambda_{\ell,\ ai} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell,\ ai} - \lambda_\ell} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\,\theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} + \frac{e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\,\theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} + \frac{e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\,\theta}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \lambda_\ell} \right]$$

$$t_1 \geqslant \theta \longrightarrow q^1_{\ell\ ,\ ai} = 0$$

b) expression de $q^2_{\ell,\ ai}$ pour $t > \theta$:

- consommation immédiate ($t_1 = 0$) :

$$q^2_{\ell,\ ai} = \int \frac{Rf\ .\ S.F_{\ell,\ ai}\ (\ e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ \theta} - e^{-\lambda_{\ell,\ 2}\ \theta}\ )}{p_{ai}\ (\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}} \ .\ e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ (\tau - \theta)} \ .\ e^{-\lambda_\ell (\ t - \tau)} \ .\ d\tau$$

On applique la formule des produits de convolution au niveau des denrées animales dont l'activité décroît en $e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ (\tau - \theta)}$, à partir du temps θ ainsi qu'au niveau de l'organe critique humain où la décroissance, à partir du même instant s'effectue en $e^{-\lambda_\ell\ (t - \tau)}$.

$$q^2_{\ell,\ ai} = \frac{K_{\ell,\ ai}\ (\ e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2}\ \theta}}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,\ ai})\ .\ (\Lambda_{\ell,\ ai} - \lambda_\ell} \ .\ e^{-\lambda_\ell (t\ -\ \theta)} \ .\ \left[\ 1 - e^{-\ (\Lambda_{\ell,\ ai}\ -\Lambda_\ell)\ .\ (\ t\ -\ \theta\ )}\ \right]$$

- consommation différée :

$t_1 \leqslant 0$, la formule précédente s'applique = $0 < t_1 \leqslant 0$

$t_1 > 0$, la charge humaine débute avec un niveau de contamination des denrées initial de :

$$\frac{q_{\ell,\ ai}\ (t_1)}{p_{ai}} = \frac{q_{\ell,ai}\ (\theta)\ e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ (\ t_1\ -\ \theta\ )}}{p_{ai}}$$

on appliquera donc la formule du produit de convolution précédente en intégrant de t_1 à t :

$$q^2_{\ell,\ ai} = \int_{t_1}^{t} \frac{Rf\ .\ S.F_{\ell,\ ai}\ (\ e^{-\lambda_{\ell,\ ai}\ \theta} - e^{-\lambda_{\ell,\ 2}\ \theta}\ )}{p_{ai}\ (\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}} \ .\ e^{-\lambda_{\ell,\ ai}\ (\tau\ -\ \theta\ )} \ .\ e^{-\lambda_\ell (t\ -\tau)} \ .\ d\tau$$

$$q^2_{\ell,\ ai} = \frac{K_{\ell,\ ai}}{\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}}\ (e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ \theta} - e^{-\lambda_{\ell,\ 2}\ \theta}\ ) \ .\ e^{-\lambda_\ell t} \int_{t_1}^{t} e^{-\Lambda_{\ell,\ ai}\ (\tau - \theta)} \ .\ e^{-\lambda_\ell \tau} \ .\ d\tau$$

$$q^2_{\ell,\ ai} = \frac{K_{\ell,\ ai} \left[\ 1 - e^{-\ (\lambda_{\ell,\ 2}\ -\Lambda_{\ell,\ ai})\ \theta}\ \right]}{\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai}} \ .\ e^{-\lambda_\ell t} \int_{t_1}^{t} e^{-\ (\Lambda_{\ell,\ ai}\ -\lambda_\ell)\ \tau} \ .\ d\tau$$

$$q^2_{\ell,\ ai} = \frac{K_{\ell,\ ai} \left[\ 1 - e^{-(\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai})\ \theta}\ \right]}{(\lambda_{\ell,\ 2} - \Lambda_{\ell,\ ai})\ .\ (\Lambda_{\ell,\ ai} - \lambda_\ell)} \ .\ e^{-\Lambda_{\ell,\ ai} t} \left[\ 1 - e^{-(\lambda_\ell\ -\Lambda_{\ell,\ ai})\ (t\ -\ t_1)}\ \right]$$

c) Expression de la charge totale, pour des périodes supérieures à θ (périodes de consommation)

Quelle que soit l'éventualité envisagée, on a toujours :

$$q_{\ell,\,ai} = q^1_{\ell,\,ai} + q^2_{\ell,\,ai}$$

α) Cas de la consommation humaine immédiate :

$$q_{\ell,\,ai} = \frac{K_{\ell,\,ai}\,.\,e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,\,ai}} \left[\frac{e^{-\lambda_\ell \theta} - e^{-\Lambda_{\ell\,ai}\,\theta}}{\Lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell\,\theta} - e^{-\lambda_{\ell,\,2}\,\theta}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell} \right] +$$

$$+ \frac{K_{\ell,\,ai}\,(e^{-\Lambda_{\ell,ai}\,\theta} - e^{-\lambda_{\ell,2}\,\theta})\,.\,e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}\,.\,e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}}{(\lambda_{\ell,\,2} - \Lambda_{\ell,\,ai})\,(\Lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell)} \cdot \left[1 - e^{-(\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)(t-\theta)} \right]$$

β) Cas de la consommation humaine différée au temps t_1 : $t_1 \leqslant \theta$

$$q_{\ell,ai} = \frac{K_{\ell,ai}\,.\,e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}}{\lambda_{\ell,\,2} - \Lambda_{\ell,\,ai}} \cdot \left[e^{-\lambda_\ell \theta} \cdot \left(\frac{e^{-(\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell,ai} - \Lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell)\,t_1}}{\lambda_{\ell,\,2} - \lambda_\ell} \right) - \frac{e^{-\Lambda_{\ell,ai}\,\theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-\lambda_{\ell,\,2}\,\theta}}{\lambda_{\ell\,2} - \lambda_\ell} \right] + \frac{K_{\ell,\,ai}\,(e^{-\Lambda_{\ell,ai}\,\theta} - e^{-\lambda_{\ell,2}\,\theta})\,.\,e^{-\Lambda_{\ell,\,ai}\,(t-\theta)}}{(\lambda_{\ell,\,2} - \Lambda_{\ell,\,ai})\,.\,(\Lambda_{\ell\,ai} - \lambda_\ell)} \cdot \left[1 - e^{-(\Lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell)(t-\theta)} \right]$$

$t_1 \geqslant 0$:

$$q^1_{\ell,\,ai} = 0$$

$$q_{\ell,\,ai} = \frac{K_{\ell,\,ai} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,\,ai})\,\theta} \right]}{(\lambda_{\ell\,ai} - \Lambda_{\ell,\,ai})\,.\,(\Lambda_{\ell,\,ai} - \lambda_\ell)} \cdot e^{-\Lambda_{\ell,\,ai}\,t} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_\ell - \Lambda_{\ell,\,ai})\,(t - t_1)} \right]$$

Si la consommation humaine s'arrête au temps θ , l'évolution ultérieure de la charge des organes critiques s'exprime ainsi :

$$q_{\ell,\,ai}\,(t \geqslant \theta') = q_{\ell,\,ai}\,(\theta')\,.\,e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$$

En effet, l'apport ayant cessé, cette charge décroît avec les périodes effectives des radioéléments au niveau des organes critiques humains.

θ' est toujours supérieur à t_1, mais il est indépendant de θ ; il peut être supérieur ou inférieur à θ . On prendra les formules convenables pour l'expression de $q_{\ell,\,ai}(\theta')$.

Après la période de consommation de denrées contaminées, on obtiendra la charge par la formule :

$$q_{\ell, ai}(\theta)\ e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$$

Ce résultat est la conséquence d'une variation discontinue de la charge. Sa loi d'évolution change suivant que l'on se trouve en période de consommation : $t_1 < t < \theta'$, avec t_1 pouvant prendre des valeurs nulles, inférieures ou supérieures à 0 et θ' étant totalement indépendant de θ , ou en période d'alimentation non contaminée $\theta' < t$.

Les formules calculées précédemment concernent le seul aliment a_i ; en fait, l'organe critique est chargé par tous les aliments contaminés. Soit a_1 , $a_2 \ldots a_i \ldots a_n$, les rations alimentaires quotidiennes en $Kg.j^{-1}$ des diverses denrées animales contaminées ; la charge de chaque organe critique en son nucléide de tropisme correspondant est :

$$q_\ell^{oc} = \sum_{a = a_1}^{a = a_n} a_i \cdot q_{\ell, a_i} \qquad ai \text{ est en } Kg.jour^{-1}$$

La représentation graphique dépend des hypothèses sur t_1, θ et θ' ; elle est très liée aux circonstances et aux modalités des consommations et constitue des cas d'espèce dans chaque situation envisagée. Toutefois, les expressions mathématiques formelles permettent de prévoir que ces charges initialement nulles passent par des valeurs maximales, puisqu'elles tendent vers 0 à l'∞ et qu'elles sont définies en tout temps et non nulles.

II – DEBIT EQUIVALENT DE DOSE AU NIVEAU DES ORGANES CRITIQUES AUTRES QUE LE T.G.I.

Soit $d = f(t)$ ce débit ; soit, d'autre part, R ($rem.semaine^{-1}$) le débit hebdomadaire maximal admissible d'équivalent de dose au niveau des organes critiques, défini par la C.I.P.R. /110/. L'expression de $d(t)$ est :

$$d_{rem.jour^{-1}.\mu Ci^{-1}} \text{ du nucléide déposé au moment des retombées, par } m^2 = \frac{R^{oc} \sum_{a = a_1}^{a = a_n} ai \cdot q_{\ell, ai}}{7\ f_{2\ell}\ [QMA]_\ell}$$

avec $f_2\ell$ = fraction du nucléide ℓ de tout l'organisme, présent dans l'organe critique,

$[QMA]_\ell$ = quantité maxima admissible (en μCi) dans l'organisme entier.

Ces deux paramètres $f_{2,\ell}$ et $[QMA]_\ell$ sont donnés pour chaque organe critique et chaque radioélément par la C.I.P.R. /111/ .

R égale 10^{-1} $rem.sem^{-1}$ pour l'organisme entier (masse musculaire), 3×10^{-1} $rem.sem^{-1}$ pour les organes internes (thyroïde) et 6×10^{-1} $rem.sem^{-1}$ pour les os, dans le cas de personnes professionnellement et directement affectées par les nuisances de nature radioactive. Ces nuisances admettent des critères dix fois inférieurs pour l'ensemble du public. La

valeur du débit reste la même puisque la Q.M.A. est proportionnelle à R.

Le débit est proportionnel à $\sum_{a = a_1}^{a = a_n} a_i \; q_{\ell, ai}$; sa variation est donc celle des $q_{\ell, ai}$ et présente les mêmes discontinuités en fonction des mêmes paramètres temporels t_1, θ et θ'.

III - CALCUL DES EQUIVALENTS DE DOSE AU NIVEAU DES ORGANES CRITIQUES AUTRES QUE LE T.G.I.

Dans tous les cas, la dose est :

$$D_\ell^{oc} = \int_{t_1}^{t} R^{oc} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \; q_{\ell, ai}}{7 \, f_{2,\ell} \, [Q M A]_\ell} \cdot dt$$

Le temps t_1 peut être égal à 0.

Ces doses sont les doses accumulées au niveau des organes critiques au cours de la vie du consommateur, c'est-à-dire pendant la durée de vie qui s'écoule depuis le début de l'ingestion jusqu'à sa mort.

Cette période peut être réduite, en vue d'établir des valeurs de référence à une période suffisamment longue : on choisit 50 ans le plus souvent.

Dans tous les cas, ce calcul est divisé en deux parties : évolution de la dose accumulée au cours de la période de consommation et évaluation de la dose accumulée ultérieurement. La dose totale est évidemment la somme de ces deux doses :

$$D_\ell^{oc} = D_{\ell \; t_1}^{oc \; \theta'} + D_{\ell \; \theta'}^{oc \; t} \qquad 0 \leqslant t_1 < \theta'$$

$$D_\ell^{oc} \text{ rem } (\mu Ci.m^{-2}) \text{ soluble à } \mathcal{E} = \frac{R \, oc}{7 \, f_{2,\ell} \, [Q M A]_\ell} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} a_i \cdot \left[\int_{t_1}^{\theta'} q_{\ell, a_i} \cdot dt + \int_{\theta'}^{t} q_{\ell, a_i} \cdot dt \right]$$

$0 \leqslant t_1 < \theta'$

θ est indépendant de t_1 et θ'.

Il convient d'effectuer les deux intégrations dans toutes les éventualités que nous avons envisagées.

Dans tous les cas, la seconde intégration dépend de la valeur de q_{ℓ, a_i} (θ')

puisque q_{ℓ, a_i} pour $t \geqslant 0'$ est exprimé par :

$$q_{\ell, ai}(\theta') \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$$

On peut donc l'effectuer une fois pour toutes ; quelles que soient les valeurs relatives de t_1, θ et θ' :

$$\int_{\theta'}^{t} q_{\ell, ai}(\theta') \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta')} \cdot dt = \frac{q_{\ell, ai}(\theta')}{\lambda_\ell} \cdot \left[1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}\right]$$

Cette intégrale, nulle en cas de consommation indéfinie et permanente (car $\theta' < t$) tend à la fin de la vie du consommateur, vers $\frac{q_{\ell, ai}(\theta')}{\lambda_\ell}$ si θ' est suffisamment court.

On majore la dose, en prenant cette limite, dans le cas des longues périodes effectives, notamment dans le cas du Sr^{90} (T = 5700 jours) où l'approximation n'est valable qu'au bout de 70 ans de cessation de consommation.

- en conséquence, pour les courtes durées de consommation, on ajoutera simplement à la dose accumulée pendant la consommation, l'expression :

$$\frac{q_{\ell, a_i}(\theta')}{\lambda_\ell}$$

$$e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$$

Le terme correctif $1 - e$ sera employé si la consommation dépasse plusieurs années.

L'expression de $q_{\ell, ai}$ dépend de la valeur relative des paramètres t_1, θ et θ', cette expression sera la même que celle sous le signe somme de la première intégrale

$$\int_{t_1}^{\theta'} q_{\ell, a_i} \cdot dt$$

1. Consommation permanente $\theta' = t$

L'expression de la dose se réduit à :

$$D_\ell^{oc} \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} [Q M A]_\ell} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} a_i \int_{t_1}^{t} q_{\ell, a_i} \cdot dt$$

La seconde intégration est nulle : $\left(\int_{\theta'}^{t} q_{\ell, ai} \cdot dt \right)$

Il convient de décomposer l'intégration entre les temps t_1 et θ, et θ et t :

$$\int_{t_1}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt = \int_{t_1}^{\theta} q_{\ell,ai} \cdot dt + \int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt \qquad t_1 < \theta$$

a) $t_1 = 0$: c'est le cas de consommation immédiate. La négligence des délais inévitables (de collecte ou d'assimilation) majore légèrement la dose.

$$\int_0^{\theta} q_{\ell,ai} \cdot dt = \int_0^{\theta} q^1_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} \cdot \int_0^{\theta} \left[\frac{e^{-\lambda_\ell t} - e^{-\Lambda_{\ell,ai} t}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell t} - e^{-\lambda_{\ell,2} t}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} \right] \cdot dt$$

$$\int_0^{\theta} q^1_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} \left[\frac{1 - e^{-\Lambda_\ell \theta}}{\lambda_\ell (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai})} + \frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell,ai} \theta}}{\Lambda_{\ell,ai} (\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)} - \right.$$

$$\left. - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2} (\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell)} - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell \theta}}{\lambda_\ell (\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)} \right] .$$

$$\int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt = \int_{\theta}^{t} (q^1_{\ell,a_i} + q^2_{\ell,a_i}) \cdot dt = \int_{\theta}^{t} \frac{K_{\ell,ai} \cdot e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} \left[A(\theta) + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-\Lambda_{\ell,ai} \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} \cdot \left(1 - e^{-(\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)(t-\theta)} \right) \right]$$

C'est-à-dire en posant :

$$A(\theta) = \frac{e^{-\lambda_\ell \theta} - e^{-\Lambda_{\ell,ai} \theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell}$$

et :

$$B(\theta) = \frac{e^{-\Lambda_{\ell,ai} \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell}$$

$$\int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \int_{\theta}^{t} e^{-\lambda_\ell (t-\theta)} \left[A(\theta) + B(\theta) \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)(t-\theta)}\right)\right]$$

$$\int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot \left[\frac{A(\theta) + B(\theta)}{\lambda_\ell} \left(1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}\right) - \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,ai}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,ai}(t-\theta)}\right)\right]$$

Posons :

$$C_{(\theta)} = \frac{1 - e^{-\lambda_\ell \theta}}{\lambda_\ell (\lambda_{\ell 2} - \lambda_{\ell,ai})} + \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,ai}\theta}}{\lambda_{\ell,ai}(\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}\theta}}{\lambda_{\ell,2} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell)} - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell \theta}}{\lambda_\ell \cdot (\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)}$$

On a :

$$\int_{0}^{\theta} q^1_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai} \cdot C(\theta)}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}}$$

Par conséquent, la dose cumulée, au niveau des organes critiques, correspondant à chacun des nucléides de la chaîne alimentaire animale, est donnée par l'expression suivante, dans le cas de consommation humaine immédiate et permanente :

$$D^{oc}_{\ell} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2\ell} [QMA]_\ell} \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot \left[C_{(\theta)} \frac{+A(\theta) + B(\theta)}{\lambda_\ell} \left(1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}\right) - \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,ai}} \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,ai}(t-\theta)}\right)\right]$$

Cette dose, nulle pour $t = 0$, car $\theta = 0 = t$ à ce moment, tend vers une limite à l'∞, c'est-à-dire après une très longue période de consommation ; cette éventualité est peu vraisemblable.

Cette limite est de la forme :

$$\frac{R^{oc}}{7 f_2 \cdot \ell \cdot [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot \left(C_\theta \frac{+A(\theta) + B(\theta)}{\lambda_\ell}\right) - \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,ai}}$$

b) $t_1 \neq 0$: c'est le cas de consommation permanente à partir du moment où elle débute, au temps t_1. Ce temps peut être inférieur ou supérieur à θ.

Si $t_1 < \theta$, la formule de $q^1_{\ell,ai}$ à employer est celle du b du paragraphe 1.
Comme précédemment, la formule est à intégrer en 2 opérations différentes :

$$\int_{t_1}^{\theta} q_{\ell,ai} \cdot dt \quad \text{et} \quad \int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot dt$$

On sait que :

$$\int_{t_1}^{\theta} q_{\ell,ai} \cdot dt = \int_{t_1}^{\theta} q^1_{\ell,ai} \cdot dt \; ; \text{ tandis que : } \int_{\theta}^{t} q_{\ell,ai} \cdot qt = \int_{\theta}^{t} \left(q^1_{\ell,ai}(t>\theta) + q^2_{\ell,ai}\right) \cdot dt$$

$$\int_{t_1}^{\theta} q_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot \left[D(t_1) \cdot \int_{t_1}^{\theta} e^{-\lambda_\ell t} \cdot dt - \int_{t_1}^{\theta} \frac{e^{-\lambda_{\ell,ai} t}}{\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} dt + \int \frac{e^{-\lambda_{\ell,ai} t}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} \cdot dt \right]$$

En posant :

$$D(t_1) = \frac{e^{-(\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell 2} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell}$$, le calcul donne :

$$\int_{t_1}^{\theta} q^1_{\ell,ai} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai} \cdot e^{-\lambda_\ell t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot \left[\frac{D(t_1) \cdot \left(1 - e^{-\lambda_\ell (0 - t_1)}\right)}{\lambda_\ell} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,ai}(\theta - t_1)}}{\lambda_{\ell,ai}(\lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)} + \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}(\theta - t_1)}}{\lambda_{\ell,2} \cdot (\lambda_{\ell 2} - \lambda_\ell)}\right]$$

En posant :

$$M(t_1\, \theta) = \left[\frac{D(t_1) \cdot (1 - e^{-\lambda_\ell (0 - t_1)})}{\lambda_\ell} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,ai}(\theta - t_1)}}{\lambda_{\ell,a_i}(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)} + \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}(\theta - t_1)}}{\lambda_{\ell,2}(\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell)}\right] \cdot \ell^{-\lambda_\ell t_1}$$

il vient :

$$\int_{t_1}^{\theta} q_{\ell,a_i} \cdot dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,ai}} \cdot M(t_1\, \theta)$$ le délai t_1 réduit la dose (terme en $e^{-\lambda_\ell t_1}$)

$$\int_{\theta}^{t} \left(q^1_{\ell,ai}(t>\theta) + q^2_{\ell,ai} \right) . dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} . \left[\left(D(t_1) . e^{-\lambda_\ell \theta} + E(\theta) \right) . \int_{\theta}^{t} e^{-\lambda_\ell (t-\theta)} . dt + \right.$$

$$\left. + B_{(\theta)} \int_{\theta}^{t} e^{-\lambda_\ell (t-\theta)} - \left(1 - e^{-\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell)(t-\theta)} \right) \right]$$

en posant :

$$E(\theta) = \frac{e^{-\lambda_{\ell,2}\theta}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\Lambda_{\ell,ai}\theta}}{\Lambda_{\ell,ai} - \lambda_\ell}$$

$$\int_{\theta}^{t} \left(q^1_{\ell,ai}(t>\theta) + q^2_{\ell,ai} \right) dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} . \left[\frac{D(t_1) . e^{-\lambda_\ell \theta} + E(\theta)}{\lambda_\ell} . (1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}) + \right.$$

$$\left. + \frac{B(\theta)}{\lambda_\ell} (1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}) - \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,ai}} (1 - e^{-\Lambda_{\ell,ai}(t-\theta)}) \right]$$

$$\int_{\theta}^{t} \left(q^1_{\ell,ai}(t>\theta) + q^2_{\ell,ai} \right) dt = \frac{K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,ai}} . \left[\frac{(D(t_1) e^{-\lambda_\ell \theta} + E(\theta) + B(\theta)) . (1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)})}{\lambda_\ell} \right.$$

$$\left. - \frac{B(\theta)}{\Lambda_{\ell,ai}} . (1 - e^{-\Lambda_{\ell,ai}(t-\theta)}) \right]$$

Par conséquent, la dose accumulée au niveau des organes critiques est exprimée, dans le cas de consommation permanente, à partir de l'instant $t_1 < \theta$, par la formule :

$$D^{oc}_{\ell} = \frac{R^{oc}}{f_{2,\ell} . [QMA]_\ell} \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i}} . \left[M(t_1, \theta) \frac{+ D(t_1) . e^{-\lambda_\ell \theta} + B(\theta) + E(\theta)}{\lambda_\ell} \right.$$

$$\left. . (1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta)}) - \frac{B(\theta)}{\Lambda_{\ell,a_i}} (1 - e^{-\Lambda_{\ell,a_i}(t-\theta)}) \right]$$

Si $t_1 > \theta$, $q^1_{\ell,a_i} = 0$

$$\int_{t_1}^{t} q_{\ell,a_i} . dt = \int_{t_1}^{t} q^2_{\ell,a_i} . dt$$

$$\int_{t_1}^{t} q_{\ell,a_i} . dt = \frac{K_{\ell,a_i} . (1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i})\theta})}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i}) . (\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)} . \int_{t_1}^{t} (e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t} - e^{-\lambda_\ell (t-t_1)} . e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t_1}) . dt$$

$$\int_{t_1}^{t} q_{\ell,a_i} . dt = \frac{K_{\ell,a_i} . (1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i})\theta}) . e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t_1}}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i}) . (\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)} . \left[\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell,a_i}(t-t_1)}}{\Lambda_{\ell,a_i}} - \right.$$

$$\left. - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell (t-t_1)}}{\lambda_\ell} \right]$$

La dose accumulée au niveau des organes critiques est exprimée, dans le cas de consommation permanente, à partir de l'instant $t_1 > 0$, par la formule :

$$D^{oc}_{\ell} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} [QMA]_\ell} \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{K_{\ell,a_i} . (1 - e^{-(\lambda_{\ell 2} - \Lambda_{\ell,a_i})\theta}) e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t_1}}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i}) . (\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)} .$$

$$. \left[\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell,a_i}(t-t_1)}}{\Lambda_{\ell,a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell (t-t_1)}}{\lambda_\ell} \right]$$

On voit facilement que ces doses tendent vers des limites finies à l'∞. Les consommations humaines ont peu de chance d'être permanentes ; il est vraisemblable qu'en fait, les problèmes pratiques concerneront des durées limitées de consommation entre les temps t_1 (t_1 pouvant être à l'origine des temps) et un instant θ' qui peut être inférieur ou supérieur à θ.

2. Consommations limitées au temps θ'

Dans ce cas, les expressions des doses accumulées s'obtiennent aisément en remplaçant dans les expressions précédemment calculées t par θ' et en leur ajoutant le terme :

$$\frac{q_{\ell,a_i}(\theta')}{\lambda_\ell} . (1 - e^{-\lambda_\ell (t-\theta')})$$

d'après ce qu'il a été dit au début du paragraphe III "Calcul des équivalents de dose".

L'expression de $q_{\ell,a_i}(\theta')$ est convenablement choisie suivant que θ' est inférieur ou supérieur à θ. On a donc, suivant les valeurs de t_1, θ et θ' :

$\boxed{t_1 = 0}$: consommation immédiate

- $\theta' > \theta$:

$$D_\ell^{oc} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[C_{(\theta)} \frac{+ A(\theta) + B(\theta)}{} (1 - e^{-\lambda_\ell (\theta' - \theta)} - \right.$$

$$\left. - \frac{B(\theta)}{\Lambda_{\ell, a_i}} (1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} (\theta' - \theta)}) \right] + \frac{a_i \, q_{\ell, a_i}(\theta')}{\lambda_\ell}$$

en négligeant le terme correctif $1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$

$$q_{\ell, a_i}(\theta') = \frac{K_{\ell, a_i} \cdot e^{-\lambda_\ell (\theta' - \theta)}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \left[A(\theta) + B(\theta) \cdot (1 - e^{-(\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell)(\theta' - \theta)}) \right]$$

- $\theta' < \theta$: la charge humaine est $q_{\ell, a_i}(t) = q^1_{\ell, a_i}(\theta')$ jusqu'au temps θ', à partir duquel elle décroît en :

$$q^1_{\ell, a_i}(\theta') \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta')} = \frac{K_{\ell, a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \left[|A(\theta') \right] \cdot e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}$$

On a donc :

$$D_\ell^{oc} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} \cdot [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \left[C_{(\theta')} \frac{+ A_{(\theta')}}{\lambda_\ell} \cdot (1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta')}) \right]$$

Il convient, en outre, de remplacer $C_{(\theta)}$ par $C_{(\theta')}$; cette formule sera utilisée pour l'éventualité la plus probable de courtes durées de consommation (inférieures à la durée d'alimentation du bétail en fourrage contaminé. $A(\theta)$ est remplacé par $A(\theta')$.

$\boxed{t_1 \neq 0}$: consommation différée

- $\theta < t < \theta'$: Si t_1 est supérieur à θ ; il en sera de même de θ' qui est nécessairement postérieur à t_1. On a immédiatement l'expression de la dose accumulée en remarquant que la charge humaine s'effectue à partir du niveau décroissant en $e^{-\Lambda_{\ell, ai} t}$ des denrées animales, durant la période $t_1 - \theta'$; donc $q^1_{\ell, a_i} = 0$ et le remplacement de t par θ' est sans difficulté :

$$D_\ell^{oc} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} \cdot [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{K_{\ell, a_i} \cdot (1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}) \theta}) \cdot e^{-\Lambda_{\ell, a_i} t_1}}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}) \cdot (\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell)} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} (\theta' - t_1)}}{\Lambda_{\ell, a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell (\theta' - t_1)}}{\lambda_\ell} \right] + \frac{a_i \, q_{\ell, a_i}(\theta')}{\lambda_\ell} \cdot (1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta')})$$

$$q_{\ell, a_i}(\theta') = \frac{K_{\ell, a_i} (1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}) \theta})}{(\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}) \cdot (\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell)} \cdot e^{-\Lambda_{\ell, a_i} \theta'} \cdot (1 - e^{-(\lambda_\ell - \Lambda_{\ell, a_i})(\theta' - t_1)})$$

- $t_1 < \theta' < \theta$: la consommation humaine cesse avant la consommation animale, le paramètre θ n'intervient pas dans les expressions des doses humaines.

$$D_\ell^{oc} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} \cdot [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[M(t_1 \, \theta') \right] \frac{+ a_i \, q_{\ell, a_i}(\theta')}{\lambda_\ell} \cdot (1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta')})$$

$$q_{\ell, a_i}(\theta') = \frac{K_{\ell, a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[e^{-\lambda_\ell \theta'} \cdot \left(\frac{e^{-(\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\Lambda_{\ell, a_i} \theta'}}{\Lambda_{\ell, a_i} - \lambda_\ell} + \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} \theta'}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} \right]$$

- $t_1 < \theta < \theta'$: la consommation humaine cesse après la consommation animale

$$D_\ell^{oc} = \frac{R^{oc}}{7 f_{2,\ell} \cdot [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, ai}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[M(t_1, \theta) \frac{+ D(t_1) \cdot e^{-\lambda_\ell \theta}}{\lambda_\ell} + B(\theta) + E(\theta) \right.$$

$$\left. (1 - e^{-\lambda_\ell (\theta' - \theta)} - \frac{B(\theta)(1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} (\theta' - \theta)})}{\Lambda_{\ell, a_i}} \right] + \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \, q_{\ell, a_i}(\theta')}{\lambda_\ell} \cdot (1 - e^{-\lambda_\ell (t - \theta)})$$

$$q_{\ell,a_i}(\theta') = \frac{K_{\ell,a_i} \cdot e^{-\lambda_\ell(\theta'-\theta)}}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left[e^{-\lambda_\ell(\theta)} \cdot \left(\frac{e^{-(\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell) t_1}}{\Lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\Lambda_{\ell,a_i}\theta}}{\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell} + \frac{e^{-\lambda_{\ell,2}\theta}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell} + B(\theta) \cdot (1 - e^{-(\Lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)(\theta' - \theta)}) \right]$$

IV - EQUIVALENTS DE DOSE AU NIVEAU DU TRACTUS GASTRO-INTESTINAL

L'apport quotidien en nucléide ℓ est au niveau du T.G.I. :

$$\sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i})} \cdot (e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t} - e^{-\lambda_{\ell,2} t})$$

Le débit d'équivalent de dose au niveau du tractus gastro-intestinal peut être calculé en utilisant les quantités maximales ingérables quotidiennement de chaque radioélément, délivrant par définition 0,3 rem. sem^{-1} à l'organe critique.

Ces quantités sont le produit de la $(CMA)^{168h}_{eau}$ par la ration hydrique quotidienne (2200 cm^3) ; soit $q_{\ell,1}$ ces quantités.

CMA^{168h}_{eau} en $\mu Ci.cm^3$	10^{-2}	4×10^{-4}	5×10^{-4}	8×10^{-3}
Nucléides	I^{131}	Sr^{89}	Sr^{90}	Cs^{137}
$q_{\ell,1}$ en μCi (Euratom)	22	0,88	1,1	17,6

Le débit total est :

$$d_{rem.sem^{-1}} = \sum_{\ell=I}^{\ell=Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i})} \cdot (e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t} - e^{-\lambda_{\ell,2} t})$$

Dans tous les cas, la dose est :

$$D^{\theta'}_{t_s} = \sum_{\ell=I}^{\ell=Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell,a_i})} \int_{t_1}^{\theta'} (e^{-\Lambda_{\ell,a_i} t} - e^{-\lambda_{\ell,2} t})\, dt$$

1. $t_1 = 0$. Consommation immédiate :

- $\underline{\theta' < \theta}$:

$$D_{t_1 = 0}^{\theta'} = \sum_{\ell = I}^{\ell = Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} \theta'}}{\Lambda_{\ell, a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta'}}{\lambda_{\ell,2}} \right)$$

- $\underline{\theta' > \theta}$:

$$D_0^{\theta} + D_{\theta}^{\theta'} = \sum_{\ell = I}^{\ell = Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{f_w^{\ell} (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i}(\theta)}}{\Lambda_{\ell, a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2}} \right] +$$

$$+ \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}\, B(\theta)}{f_w^{\ell}} \cdot \int_{\theta}^{\theta'} e^{-\Lambda_{\ell, a_i} t} \cdot dt$$

$$D_0^{\theta'} = \sum_{\ell = I}^{\ell = Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{f_w^{\ell}} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} \theta}}{\Lambda_{\ell, a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2}} \right) \right.$$

$$\left. + \frac{B(\theta)}{\Lambda_{\ell, a_i}} \cdot e^{-\Lambda_{\ell, a_i} \theta} \cdot \left(1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} (\theta' - \theta)} \right) \right]$$

2. $t_1 \neq 0$: consommation différée :

- $\underline{\theta < t_1 < \theta'}$:

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell = I}^{\ell = Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}\, B(\theta)}{f_w^{\ell}} \cdot e^{-\Lambda_{\ell, a_i} t_1} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell, a_i} (\theta' - t_1)} \right)$$

- $\underline{t_1 < \theta' < \theta}$:

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell = I}^{\ell = Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell, a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \Lambda_{\ell, a_i}} \cdot \left[e^{-\Lambda_{\ell, a_i} t_1} \cdot \frac{(1 - e^{-\Lambda_{\ell, a_i} (\theta' - t_1)})}{\Lambda_{\ell, a_i}} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} t_1} - \lambda_{\ell,2} (\theta' - t_1)}{\Lambda_{\ell,2}} \right]$$

- $t_1 < \theta < \theta'$

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell=I}^{\ell=Cs} \frac{0,3}{7\, q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} (\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i})} \cdot \left[\frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} t} e^{-\lambda_{\ell,a_i} \theta}}{} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} t} - e^{-\lambda_{\ell,2} (\theta')}}{\lambda_{\ell,2}} \right] + \sum_{\ell=I}^{\ell=Cs} \frac{0,3}{q_{\ell,1}} \cdot \sum_{\ell=I}^{\ell=Cs} \frac{a_i K_{\ell,a_i} \cdot B.(\theta)}{7 f_w^{\ell} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot e^{-\lambda_{\ell,a_i} \theta}$$

$$\cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i} (\theta' - \theta)}\right)$$

FORMULES DE DOSES DANS LE CAS DE CONSOMMATION DIFFÉRÉE.

(A) $t_1 < \theta < \theta'$

a) tous organes sauf le tube digestif:

$$D_{t_1}^{t} = k^{\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \theta(\ell,a_i) \cdot \left[M(t_1,\theta) + \frac{1 - e^{-\lambda_e(\theta'-\theta)}}{\lambda e} \cdot \left(D(t_1) \cdot e^{-\lambda_e \cdot \theta} + B(\theta) + E(\theta) \right) - F(\theta,\theta') + e^{-\lambda_e(\theta'-\theta)} \cdot \left(N(t_1,\theta) + G(\theta,\theta') \right) \right]$$

$$\theta_{\ell,a_i} = \frac{a_i . K_{\ell,a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \qquad D(t_1) = \frac{e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e}$$

$$E(\theta) = \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e} - \frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} \theta}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} \qquad F(\theta,\theta') = \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta'-\theta)}\right)$$

$$N(t_1,\theta) = e^{-\lambda_e \theta} \cdot \left(\frac{e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e} \right) - \frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot \theta}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} + \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e}$$

$$G(\theta,\theta') = B(\theta) \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e)(\theta'-\theta)}\right)$$

b) tube digestif:

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell=i}^{\ell=6} \frac{0,3}{7 q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell}} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} t_1} - e^{-\lambda_{\ell,a_i} \theta}}{\lambda_{\ell,a_i}} - \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} t_1} - e^{-\lambda_{\ell,2} \theta}}{\lambda_{\ell,2}} \right) + e^{-\lambda_{\ell,a_i} \theta} \cdot F(\theta,\theta') \right]$$

(B) $\theta < t_1 < \theta'$

a) tous organes sauf le tube digestif:

$$D_{t_1}^{\infty} = k^{\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,a_i} \left(1 - e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}) \theta}\right)}{(\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i})(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e)} \cdot \left[e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot t_1} \left\{ \frac{\left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta' - t_1)}\right)}{\lambda_{\ell,a_i}} - \frac{\left(1 - e^{-\lambda_e(\theta' - t_1)}\right)}{\lambda_e} \right\} + e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot \theta'} \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_e - \lambda_{\ell,a_i})(\theta' - t_1)}\right) \right]$$

b) tube digestif:

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell=i}^{\ell=6} \frac{0,3}{7 \cdot q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell}} \cdot B(\theta) \cdot e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot t_1} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta' - t_1)}\right)$$

(C) $t_1 < \theta' < \theta$

a) tous organes sauf le tube digestif:

$$D_{t_1}^{\infty} = k^{\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left[M(t_1,\theta') + e^{-\lambda_e \cdot \theta'} \cdot \left(\frac{e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e} \right) - \frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot \theta'}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} + \frac{e^{-\lambda_{\ell,2} \theta'}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e} \right]$$

$$M(t_1,\theta') = e^{-\lambda_e \cdot t_1} \cdot \left[\frac{1 - e^{-\lambda_e(\theta' - t_1)}}{\lambda_e} \cdot \left(\frac{e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e} - \frac{e^{-(\lambda_{\ell,2} - \lambda_e) t_1}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_e} \right) - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta' - t_1)}}{\lambda_{\ell,a_i}(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_e)} + \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}(\theta' - t_1)}}{\lambda_{\ell,2}(\lambda_{\ell,2} - \lambda_e)} \right.$$

b) tube digestif:

$$D_{t_1}^{\theta'} = \sum_{\ell=i}^{\ell=6} \frac{0,3}{7 \cdot q_{\ell,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_n} \frac{a_i . K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i})} \cdot \left[e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot t_1} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta' - t_1)}\right) - e^{-\lambda_e \cdot t_1} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,2}(\theta' - t_1)}\right) \right.$$

$$\left. \lambda_{\ell,a_i} \qquad \lambda_{\ell,2} \right.$$

FORMULES DES DOSES DANS LE CAS DE CONSOMMATION IMMEDIATE

(A) $\theta' > \theta$

a) tous organes sauf le tube digestif:

$$D_o^{\infty} = k^{\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_m} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left[C(\theta) + \frac{A(\theta) + B(\theta)}{\lambda_\ell} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_\ell(\theta' - \theta)}\right) - \frac{B(\theta)}{\lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}(\theta' - \theta)}\right) + e^{-\lambda_\ell(\theta' - \theta)} \cdot H(\theta, \theta') \right]$$

$$k^{\ell} = \frac{R^{oc}}{\eta f_{2,\ell} \cdot [QMA]_\ell}$$

$$B(\theta) = \frac{e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot \theta} - e^{-\lambda_{\ell,2}\theta}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell}$$

$$H(\theta, \theta') = A(\theta) + B(\theta) \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell) \cdot (\theta' - \theta)}\right)$$

b) tube digestif:

$$D_o^{\theta'} = \sum_{\ell=i}^{\ell=a} \frac{0{,}3}{\eta_{q,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_m} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell}} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}\theta}}{\lambda_{\ell,a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}}}{\lambda_{\ell,2}} \right) + \frac{B(\theta) \cdot e^{-\lambda_{\ell,a_i}\theta}}{\lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot (\theta' - \theta)}\right) \right]$$

(B) $\theta' < \theta$

a) tous organes sauf le tube digestif:

$$D_o^{t} = \frac{R^{oc}}{\eta f_{2,\ell} [QMA]_\ell} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_m} \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i}} \cdot \left[C(\theta') + \frac{A(\theta')}{\lambda_\ell} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_\ell(t - \theta')}\right) \right]$$

$$K_{\ell,a_i} = \frac{R_\ell \cdot S \cdot F_{\ell,a_i} \cdot f_w^{\ell}}{f^{*}_{a_i}}$$

$$C(\theta') = \frac{1 - e^{-\lambda_\ell \cdot \theta'}}{\lambda_\ell \cdot (\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i})} + \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}\theta'}}{\lambda_{\ell,a_i}(\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2}\theta'}}{\lambda_{\ell,2} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell)} - \frac{1 - e^{-\lambda_\ell \cdot \theta'}}{\lambda_\ell \cdot (\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell)}$$

$$A(\theta') = \frac{e^{-\lambda_\ell \cdot \theta'} - e^{-\lambda_{\ell,a_i} \cdot \theta'}}{\lambda_{\ell,a_i} - \lambda_\ell} - \frac{e^{-\lambda_\ell \theta'} - e^{-\lambda_{\ell,2}\theta'}}{\lambda_{\ell,2} - \lambda_\ell}$$

b) tube digestif:

$$D_o^{\theta'} = \sum_{\ell=i}^{\ell=a} \frac{0{,}3}{\eta_{q,1}} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=a_m} \cdot \frac{a_i \cdot K_{\ell,a_i}}{f_w^{\ell} \cdot (\lambda_{\ell,2} - \lambda_{\ell,a_i})} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,a_i}\theta'}}{\lambda_{\ell,a_i}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{\ell,2} \cdot \theta'}}{\lambda_{\ell,2}} \right.$$

CHAPITRE V

HYGIENE ALIMENTAIRE EN ZONE CONTAMINEE

En phase foliaire, la décontamination des denrées de la chaîne végétale peut être utile car la majeure partie de leur activité est dûe au dépôt sur les parties aériennes des végétaux. L'absorption foliaire est possible à partir de ce dépôt. La fraction absorbée échappe au lavage. L'épluchage en diminue l'importance.

Cependant, un contrôle des denrées végétales s'impose ainsi que les mesures de décontamination convenables en phase foliaire. Ce contrôle est très réduit quand les denrées végétales consommées proviennent de stocks constitués antérieurement aux retombées et préservés de celles-ci.

La détermination des valeurs de référence convenant à l'hygiène alimentaire s'effectue de façon identique pour toutes les chaînes alimentaires si l'on connaît l'expression et la valeur numérique des doses engagées du fait de l'ingestion, compte tenu de la mise en oeuvre de la décontamination.

Les résultats de la décontamination, importants pour le lait (cf. chapitre IV) et les denrées végétales (lavage et épluchage) restent modestes pour la viande (saumure et solutions échangeuses d'ions). La décroissance de l'activité est plus rapide chez les bêtes sur pied qu'après abattage.

La décision de consommer des denrées contaminées dépend de la nécessité effective de cette alimentation, compte tenu du risque couru. Les critères de cette décision vont dépendre de l'évaluation de ce risque.

I - METHODE D'EVALUATION DU RISQUE RADIOTOXICOLOGIQUE

Cette méthode s'applique aux doses engagées par l'ingestion d'aliments contaminés d'origine animale ou végétale. Soit D_{ℓ,a_i} la contribution de l'aliment a_i à la dose engagée au niveau d'un organe critique de tropisme ℓ (ℓ pouvant être le mélange des nucléides apportés par cet aliment au niveau du T.G.I., ramenée à une ingestion quotidienne de 1 kg de chaque aliment.

Le chapitre précédent a établi la formule des doses engagées de la ration alimentaire : somme des produits des rations journalières par les doses au kg, D_{ℓ,a_i} étendue à tous les nucléides de la chaîne alimentaire animale. Les doses D_{ℓ,a_i} sont donc les termes de cette somme, relatifs à l'aliment a_i, divisés par la ration a_i (en $Kg.jour^{-1}$).

L'ensemble des doses D_{ℓ,a_i} de tous les aliments et de tous les organes critiques

denrée contaminée. Supposons qu'il y ait p denrées contaminées :

$$\bar{D} = \begin{vmatrix} D_{Iode,a_1} & D_{Sr^{89},a_1} & D_{Sr^{90},a_1} & D_{Cs^{137},a_1} & D_{TGI,a_1} \\ D_{Iode,a_2} & D_{Sr^{89},a_2} & D_{Sr^{90},a_2} & D_{Cs^{137},a_2} & D_{TGI,a_2} \\ \hline D_{Iode,a_i} & D_{Sr^{89},a_i} & D_{Sr^{90},a_i} & D_{Cs^{137},a_i} & D_{TGI,a_i} \\ \hline D_{Iode,ap} & D_{Sr^{89},ap} & D_{Sr^{90},ap} & D_{Cs^{137},ap} & D_{TGI,ap} \end{vmatrix}$$

Dans un régime j , relatif à un groupe de population donné, la ration de l'aliment (a_i) est notée aji . Chaque régime est caractérisé par la valeur des rations de chaque aliment. L'ensemble des rations d'aliments contaminés forme une matrice $\bar{A}$, dite matrice alimentaire ,

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} a_1 1 & a_1 2 & \cdots & a_1 i & \cdots & a_1 p \\ a_2 1 & a_2 2 & \cdots & a_2 i & \cdots & a_2 p \\ \hline a_j 1 & a_j 2 & \cdots & a_j i & \cdots & a_j p \\ \hline a_k 1 & a_k 2 & \cdots & a_k i & \cdots & a_k p \end{vmatrix}$$

s'il y a k régimes différents ; les rations de chaque régime sont figurées par une ligne de cette matrice ; les colonnes étant les catégories d'aliments.

Chaque élément du produit des matrices $\bar{A}.\bar{D}$ représente la dose accumulée, au cours de la vie du consommateur, dans un organe critique de tropisme ℓ :

$$\mathfrak{D}_{j.\ell} = \sum_{a=a_1}^{a=ap} aji.D_{ai,\ell}$$

soit donc $\mathfrak{D}_{j,\ell}$ un élément de la matrice $\bar{\mathfrak{D}}$ produit des deux matrices $\bar{A}.\bar{D}$, on a :

$$\mathfrak{D} = \bar{A}.\bar{D}$$

La matrice $\mathfrak{D}$ s'écrit ainsi :

$$\bar{\mathfrak{D}} \begin{vmatrix} \mathfrak{D}_{1,iode} & \mathfrak{D}_{1,Sr^{89}} & \mathfrak{D}_{1,Sr^{90}} & \mathfrak{D}_{1,Cs^{137}} & \mathfrak{D}_{1,TGI} \\ \mathfrak{D}_{2,iode} & \mathfrak{D}_{2,Sr^{89}} & \mathfrak{D}_{2,Sr^{90}} & \mathfrak{D}_{2,Cs^{137}} & \mathfrak{D}_{2,TGI} \\ \mathfrak{D}_{j,iode} & \mathfrak{D}_{j,Sr^{89}} & \mathfrak{D}_{ij,Sr^{90}} & \mathfrak{D}_{j,Cs^{137}} & \mathfrak{D}_{j,TGI} \\ \mathfrak{D}_{k,iode} & \mathfrak{D}_{k,Sr^{89}} & \mathfrak{D}_{k,Sr^{90}} & \mathfrak{D}_{k,Cs^{137}} & \mathfrak{D}_{k,TGI} \end{vmatrix}$$

Chaque élément $\mathfrak{D}_{,j\ell}$ a été calculé au chapitre précédent, pour la chaîne alimentaire animale, dans les diverses hypothèses sur les modalités temporelles de la contamination animale et humaine (temps t_1, θ et θ'). Si le niveau de contamination de la chaîne végétale reste notable et si des denrées de cette chaîne sont consommées, il y a lieu d'évaluer les $\mathfrak{D}_{j,\ell}$

d'origine végétale éventuellement.

Les éléments $\mathcal{D}_{j,\ell}$ du chapitre précédent sont relatifs à une contamination de 1 µCi par m^2 du dépôt soluble de chaque élément. Les éléments $\mathcal{D}_{j,\ell}$ sont donc les évaluations des risques au niveau de chaque organe critique et la matrice $\mathcal{D}$ est la matrice des nuisances (relatives à tous les organes).

Suivant un organe donné, désigné par son nucléide (ou mélange de nucléides) de tropisme correspondant, il y a un régime le plus critique, caractérisé par la valeur maximale des $\mathcal{D}_{j,\ell}$ des différents régimes. De même, pour un régime donné, il existe un organe le plus critique, dont le $\mathcal{D}_{j,\ell}$ est maximal.

II - DETERMINATION DES CRITERES DU CHOIX DE LA DECISION DE CONSOMMATION.

La décision intéresse la valeur des rations journalières de chaque catégorie d'aliment ; cette valeur sera, en général, inférieure aux rations habituelles, elle pourra être nulle (suppression de l'aliment). L'équilibre diététique qualitatif et quantitatif sera réalisé, dans la mesure du possible, par la consommation d'aliments préservés de la contamination.

1. Décision de consommation

Cette décision vise à déterminer la valeur des rations journalières. Elle dépend de la valeur maximale adoptée pour la matrice $\overline{\mathcal{D}}$; soit $\overline{L}$ la valeur maximale de $\overline{\mathcal{D}}$ dont le choix sera examiné ultérieurement.

Cette valeur maximale $\overline{L}$ forme une matrice à 5 colonnes, dans le cas de la chaîne alimentaire animale, dont chaque colonne correspond à un organe critique : thyroïde, os chargé en Sr^{89}, os chargé en Sr^{90}, masse musculaire de l'organisme entier et T.G.I.

Les lignes de cette matrice correspondent chacune à un régime différent.

Cette matrice s'écrit :

$$\overline{L} = \begin{vmatrix} L_{1,\text{iode}} & L_{1,Sr^{89}} & L_{1,Sr^{90}} & L_{1,Cs^{137}} & L_{1,TGI} \\ L_{2,\text{iode}} & L_{2,Sr^{89}} & L_{2,Sr^{90}} & L_{2,Cs^{137}} & L_{2,TGI} \\ L_{j,\text{iode}} & L_{j,Sr^{89}} & L_{j,Sr^{90}} & L_{j,Cs^{137}} & L_{j,TGI} \\ L_{k,\text{iode}} & L_{k,Sr^{89}} & L_{k,Sr^{90}} & L_{k,Cs^{137}} & L_{k,TGI} \end{vmatrix}$$

On a, pour deux régimes quelconques k et j, $L_{j,\ell} = L_{k,\ell}$. Ce qui veut dire que pour un même organe critique, les valeurs des Lj sont les mêmes.

On peut écrire, par analogie à l'égalité $\mathcal{D} = \overline{A}.\overline{D}.$, $\overline{L} = \overline{B}.\overline{D}.$, $\overline{B}$ étant la nouvelle matrice des rations, telles que les doses engagées par leur ingestion soient égales à la limite maximale choisie des doses accumulées au niveau des organes critiques. Ce choix sera précisé ultérieurement.

La décision de consommation revient à fixer la valeur des éléments de la matrice $\overline{B}$.

Soit $D_{(-1)}$ la matrice inverse de $\overline{D}$, on a : $\overline{L}.\overline{D}_{(-1)} = \overline{B}.\overline{D}.D._{(-1)} = \overline{B}$.
On doit calculer le produit $\overline{L}.\ \overline{D}_{(-1)}$. Le calcul matriciel donne ce produit en fonction du déterminant Δ de $\overline{D}$, supposé non nul, et des mineurs $M_{ai,\ell}$, précédés du signe approprié de la matrice transposée de D obtenue en intervertissant lignes et colonnes :

$$L.D_{(-1)} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} L_{1,iode} & L_{1,Sr^{89}} & L_{1,Sr^{90}} & L_{1,Cs^{137}} & L_{1,TGI} \\ L_{2,iode} & L_{2,Sr^{89}} & L_{2,Sr^{90}} & L_{2,Cs^{137}} & L_{2,TGI} \\ L_{j,iode} & L_{j,Sr^{89}} & L_{j,Sr^{90}} & L_{j,Cs^{137}} & L_{j,TGI} \\ L_{k,iode} & L_{k,Sr^{89}} & L_{k,Sr^{90}} & L_{k,Cs^{137}} & L_{k,TGI} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} M_{a1,iode} & M_{a2,iode} \ldots . M_{ai\ iode} \ldots . & M_{ap,iode} \\ M_{a1,Sr^{39}} & M_{a2,Sr^{89}} \ldots . M_{ai,Sr^{89}} \ldots . & M_{ap,Sr^{89}} \\ M_{a1,Sr^{90}} & M_{a2,Sr^{90}} \ldots . M_{ai,Sr^{90}} \ldots . & M_{ap,Sr^{90}} \\ M_{a1,Cs^{137}} & M_{a2,Cs^{137}} \ldots . M_{ai,Cs^{137}} \ldots . & M_{ap,Cs^{137}} \\ M_{a1,TGI} & M_{a2,TGI} \ldots . M_{ai,TGI} \ldots . & M_{ap,TGI} \end{vmatrix}$$

La matrice $\overline{B} = \frac{1}{\Delta}$ .L.$D_{(-1)}$; chacun de ses éléments b_{ji} (ration de l'aliment i dans le régime j) s'écrit :

$$bji = \frac{1}{\Delta} \cdot \sum_{\ell\ =\ iode}^{\ell\ =\ \text{mélange au niveau du T.G.I.}} L_{j,\ell} \cdot Ma_{i,\ell}$$

$$bji = \frac{1}{\Delta} \left[L_{j,iode} \cdot M_{ai,iode} + L_{j,Sr^{89}} \cdot M_{ai,Sr^{89}} + L_{j,Sr^{90}} \cdot M_{ai,Sr^{90}} + \right.$$

$$\left. + L_{j,Cs^{137}} \cdot M_{ai,Cs^{137}} + L_{j,TGI} \cdot M_{ai,TGI} \right]$$

Ce calcul ajuste la valeur de la ration alimentaire de chaque aliment, non seulement en fonction de sa contribution à la dose engagée au niveau de chaque organe critique, mais encore en fonction de cette contribution au niveau de tous les organes critiques simultanément, compte tenu de celle des autres aliments.

La décision de consommation détermine donc, pour chaque régime, la valeur de la ration de chaque catégorie d'aliments bji :

$$bji\ \frac{1}{\Delta} \sum_{\ell\ =\ iode}^{\ell\ =\ \text{mélange des nucléides au niveau du TGI}} L_{j,\ell} \cdot M_{ai,\ell}$$

2. Choix de la décision de consommation

La valeur de bji dépend de la valeur de Δ , donc de la matrice $\bar{D}$ (dont dépend aussi la valeur de $M_{ai,\ell}$) et de la matrice $\bar{L}$ qui intervient par la valeur de ses éléments $L_{j,\ell}$ tous égaux pour ℓ donné.

Les critères du choix sont donc les matrices $\bar{D}$ et $\bar{L}$.

a) La matrice $\bar{D}$, déterminée par l'expression de ses éléments $D_{\ell,ai}$ (où interviennent, dans le cas de chaîne alimentaire animale, les trois paramètres temporels t_1, θ et θ' imposés par les circonstances, ne laisse de choix, en général, que pour fixer le temps t, durée de l'accumulation de la dose, servant à son calcul.

Si la possibilité de fixer les trois paramètres t_1, θ et θ' est laissée, une recherche opérationnelle à base de programmation linéaire, suivant la méthode de LEDERMAN /112/ est utile pour la détermination de ces trois paramètres et du temps t ainsi que pour celle de Rf (donc de la distance du lieu de l'explosion) et celle de l'activité déposée, (dépendant du débit de dose d'exposition à l'instant des retombées à H + 1). Ce n'est pas le cas général, aussi admettrons-nous que seule la durée t est laissée au choix des experts sanitaires. Cette durée t est en relation avec la valeur des éléments de la matrice $\bar{L}$.

b) La matrice $\bar{L}$, dont les éléments $L_{j,\ell}$ sont tous égaux est l'ensemble des valeurs maximales admises pour les doses accumulées pendant le temps t , au niveau des différents organes critiques. Il suffira, de ce fait, de fixer les valeurs de $L_{j,\ iode}$, $L_{j,Sr^{89}}$, $L_{j,Sr^{90}}$, $L_{j,Cs^{137}}$ $L_{j,TGI}$; ces valeurs seront identiques pour tous les régimes.

c) En définitive, les critères du choix de la décision de consommation sont :

- les valeurs des doses accumulées au niveau de la thyroïde, des os (par le Sr^{89} et Sr^{90}) de la masse musculaire de l'organisme entier et du TGI (tractus gastro-intestinal). Ces valeurs seront évaluées en fonction des nécessités de l'alimentation dans des circonstances exceptionnelles pour une durée d'accumulation, t .

- le débit de cet équivalent de dose.

Ces deux critères déterminent les valeurs des deux matrices $\bar{L}$ et $\bar{D}$.

Si le temps " t " est choisi relativement court, on pourra évaluer le risque d'une façon similaire à celle d'une exposition accidentelle, en particulier dans le cas des courtes périodes effectives chez l'homme (I^{131}, Sr^{89} et aussi le T.G.I. où l'exposition est limitée au temps θ'). On fixera les valeurs de $L_{j,iode}$, $L_{j,Sr^{89}}$ et $L_{j,TGI}$ d'après le double critère des seuils des effets morbides et des impératifs de survie alimentaire. Dans ce cas, on est sûr qu'au niveau des organes critiques intéressés, le débit de dose diminuera très vite à partir des valeurs maximales. La quasi totalité de la dose sera délivrée pendant un temps suffisamment court.

Pour les valeurs de $L_{j,Sr^{90}}$ et $L_{j,Cs^{137}}$ et les valeurs de t correspondantes dans la matrice $\bar{D}$ on peut choisir des valeurs plus longues et écrire que t égale 50 ans ou l'infini.

Il y a lieu de prendre des valeurs différentes pour des groupes différents, notamment en fonction de leur importance numérique (111). Cette méthode s'applique à toute durée de consommation.

En conclusion, le choix de la décision de consommation résulte d'un bilan des inconvénients de la suppression d'aliments et de ceux de la consommation fondé sur la valeur admise de $L_{j,\ell}$ qui est fonction de 2 paramètres :

- le seuil d'apparition des effets cliniques aigus de l'irradiation interne,
- la nécessité de l'alimentation contaminée d'un nombre limité de consommateurs.

3. Procédure simplifiée du choix de la décision de consommation

a) Dans le cas de courtes durées de consommation (de l'ordre d'une semaine) comprises entre le 5ème et le 20ème jour après les retombées, période pendant laquelle le niveau de contamination des denrées animales est quasi-constant, on peut, en première approximation, le considérer comme fixe (cf. courbes du chapitre III). Sa valeur est, dans ce délai, de l'ordre de grandeur de celle de l'activité du dépôt total au m^2, à l'instant des retombées. Les quantités de radioéléments ingérées par jour peuvent être exprimées en $(CMA)^{168h}_{eau} \times 2\,200\ cm^3$.

La dose au niveau de l'organe critique de tropisme ℓ est donc :

$$\mathcal{D}_{j,\ell} = \sum_{a=a_1}^{a=ap} \frac{aji.\ r\ell_i \times \theta' \times R\ell}{7\ (CMA)^{\ell}_{168} \times 2\,200}$$

si $r\ell_{,i}$ est le niveau en $Ci.Kg^{-1}$ de l'aliment a_i et si θ' est exprimé en jours.

$r\ell_{,i}$ est la valeur moyenne du niveau alimentaire durant la période θ' ou à défaut, sa valeur instantanée au moment de la mesure.

$$\mathcal{D}_{j,\ell} = \frac{\theta'.R\ell}{7(CMA)^{\ell}_{168} \times 2200} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=ap} aji.\ r\ell_{,i} = \theta'.K\ell \cdot \sum_{a=a_1}^{a=ap} aji.\ r\ell_i$$

en posant :

$$K\ell = \frac{R\ell}{7 \times 2\,200 \times (CMA)^{168}_{\ell}}$$

Chaque $\mathcal{D}_{j,\ell}$ admet la même limite $L_{j,\ell}$ que précédemment.

On a donc :

$$L_{j,\ell} = \theta' \cdot K\ell \sum_{a=a_1}^{a=ap} bji,\ r\ell_i, \qquad \text{c'est-à-dire} \sum_{a=a_1}^{a=ap} bji,\ r\ell_{,i} = \frac{L_{j,\ell}}{K\ell} \cdot \frac{1}{\theta'}$$

La matrice $\bar{L}$ est remplacée par la matrice $\frac{1}{\theta'} \cdot \bar{M}$, dont chaque élément s'écrit :

$$M_{j,\ell} = \frac{L_{j,\ell}}{R\ell} \times 2\,200\ (CMA)^{168h}_{\ell}$$

$M_{j,\ell}$ est identique pour tous les régimes.

On a : ℓ = mélange de nucléides au niveau du TGI

$$bji = \frac{1}{\theta' \Delta} \sum_{\ell = \text{iode}} M_{j,\ell} \cdot M_{ai,\ell}$$

où Δ est le déterminant de la matrice des niveaux $\bar{R}$ d'éléments $r_{\ell,ai}$ et $M_{ai,\ell}$ le mineur, précédé du signe approprié de la matrice transposée de $\bar{R}$ obtenue en intervertissant lignes et colonnes.

La matrice $\bar{R}$ s'écrit :

$$\bar{R} = \begin{vmatrix} r_{iode,a1} & r_{Sr^{89},a1} & r_{Sr^{90},a1} & r_{Cs^{137},a1} & r_{TGI,a1} \\ r_{iode,a2} & r_{Sr^{89},a2} & r_{Sr^{90},a2} & r_{Cs^{137},a2} & r_{TGI,a2} \\ r_{iode,ai} & r_{Sr^{89},a2} & r_{Sr^{90},a2} & r_{Cs^{137},ai} & r_{TGI,ai} \\ r_{iode,ap} & r_{Sr^{89},ap} & r_{Sr^{90},ap} & r_{Cs^{137}\ ap} & r_{TGI,ap} \end{vmatrix}$$

Il est évident que la valeur des rations est inversement proportionnelle à la durée θ' de consommation :

ℓ = mélange au niveau du TGI

$$bji = \frac{1}{\theta' \Delta} \cdot \sum_{\ell = \text{iode}} M_{j,\ell} \cdot M_{ai,\ell}$$

b) Cette méthode, dans ses limites de validité, résout aussi le problème de la limite maximale des niveaux de contamination pour une durée de consommation θ' au taux journalier rationaire aji . On a, en effet, en appelant $\rho_{\ell,i}$ ce niveau en nucléide dans l'alignement i :

$$M_{j,\ell} = \theta' \cdot K_{\ell} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = ap} aji \cdot \rho_{\ell,i}$$

On en tire, par un calcul analogue :

$$\rho_{\ell,i} = \frac{1}{\Delta' \theta'} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = ap} M_{j,\ell} \cdot N_{j,i}$$

où Δ est le déterminant de la matrice alimentaire $\bar{A}$, d'élément aji et $N_{j,i}$, le mineur, précédé du signe approprié, de la matrice transposée de $\bar{A}$ en intervertissant lignes et colonnes.

$$\rho_{\ell,i} = \frac{M_{j,\ell}}{\Delta' \cdot \theta'} \cdot \sum_{a = a_1}^{a = ap} Nj,i$$

Cette formule tient compte de la ration de tous les régimes, $M_{j,\ell}$ est identique pour tous les régimes.

Cette formule est analogue à :

$$\rho_{\ell,i} = \frac{L\ell \times 2\,200 \times (CMA)^{168}_{\ell}}{\frac{R\ell \times \theta'}{7} \cdot \sum_{a=a_1}^{a=ap} a_i}$$

dans le cas d'un seul régime.

S'il y a un seul aliment contaminé, on a la relation :

$$\rho_{\ell,i} - a_i = \frac{L\ell \times 2\,200 \times (CMA)^{168}_{\ell}}{\frac{R\ell}{7} \cdot e'}$$

CONCLUSION

La connaissance des transferts de la radioactivité le long de la chaîne alimentaire animale, affectée par des retombées locales et fraîches, permet une évaluation du risque radiologique de la consommation de ces denrées, en fonction du dépôt au niveau du sol et des modalités de consommation.

Les mesures d'hygiène alimentaire dépendent de ce risque, représenté par la dose "engagée par la consommation" au niveau des divers organes critiques de l'homme, et de la nécessité de son acceptation pour des collectivités restreintes, pendant des durées limitées.

La décision de consommation sera le résultat du bilan des inconvénients de la suppression d'aliments et de ceux qu'implique leur ingestion dans des circonstances exceptionnelles, de nature généralement accidentelles et non concertées.

Il n'existe donc pas de valeurs maximales que l'on puisse recommander pour les doses admises.

Parmi les inconvénients de la consommation, une attention particulière devra être apportée à celui du dépassement éventuel des doses correspondant à la probabilité statistique d'apparition des symptômes cliniques aigus d'irradiation interne.

Il en est de même de la valeur des niveaux de contamination alimentaire et des durées de consommation.

La surveillance de l'évolution des niveaux de contamination permettra de juger du moment où les mesures qui ont été prises au cours de la période d'urgence pourront être rapportées, notamment en ce qui concerne la suppression de certains aliments, si la nécessité de consommation locale persiste. Cette nécessité devra, enfin, faire l'objet d'une évaluation soigneusement réfléchie.

BIBLIOGRAPHIE

/ 1 / STROP W.J. – Survival measures, statement ... - In : Biological and environmental effects of nuclear war, hearings before the special Subcommittee on radiation of the Joint committee on atomic energy. Congress of the United States, 86th Congress, 1st session, June 22-26, 1959, Part. 1, pp. 678-696

/ 2 / RUST J.H., TRUM B.F. – Vet. Med. 1953, 48, 106

/ 3 / WASSERMAN R.H., TRUM B.F. – Effect of feeding dogs the flesh of lethally irradiated cows and sheep – Science, 1955, 121. 894-896

/ 4 / WISECUP W.G. – Fall-out livestock – Some observations on the situation as it appears to-day – J. Am. Vet. Ass. 1962, 140, 236-240

/ 5 / CALCINARDI C. – Contaminations radioactives des aliments d'origine animale – Vet. Italiana, 1962, 13, 8, 856-874

/ 6 / ETATS-UNIS. - NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, WASHINGTON – Report by the Subcommittee on livestock damage on the damage to livestock from radioactive fallout in event of nuclear war. – Rapport NAS - NRC - n° 1078, 1963, p. 17

/ 7 / Idem / 6 /, p. 6

/ 8 / Idem, / 6 /, p. 25

/ 9 / Idem, / 6 /, p. 7

/10/ Idem, / 6 /, p. 27

/11/ LEISTNER L. – Recherches sur la contamination radioactive des aliments d'origine animale. – Rapport CEA-R-2738 ; EUR. 2226 f. , 1965, p. 5

/12/ VOISIN A. – Productivité de l'herbe – Paris, Flammarion, 1957, pp. 105-133

/13/ Idem /11/, p. 14

/14/ TURNER F.B., MARTIN W.E. – Food – chain relationships of Iodine 131 in Nevada following the Sedan test of July 1962 . – Rapport américain PNE - 236 - F, 1964, 58 p.

/15/ BRINK M.F. – Implications of Iodine 131 in fallout – Public Health Reports, 1964, 79, 25-31

/16/ KNAPP H.A. – Iodine 131 in fresh milk and human thyroids, following a single deposition of nuclear test fallout — Rapport américain TID 19 226, 1963, 106 p.

/17/ KORNBERG H.A. - Transfer of radionuclides to milk - Rapport américain HW. 83613, 1964. - p. 17.

/18/ GARNER R.J. - Iodine 131 fallout in milk - Nature, 1964. 201, 4926, 1274-1275.

/19/ LAGONI H., PAAKKOLA O., PETERS K.H. - (Etudes sur la répartition quantitative de produits radioactifs dans le lait, provenant du fallout). - Milchwissensch , 1963, 18, 340-344 .

/20/ MILLER C.F. - The contamination of milk by radionuclides in fallout.- Rapport américain NP - 13432, 1963. - 37 p.

/21/ KNOOP E. - The contents of radioactive substances in milk - Landwirtsch. Forsch., 1964, 17, 23-31.

/22/ TODD F.A. - Radionuclides in foods and agricultural products - Milk production and dairy products processing - OHIO Agricultural Experimental Station, Special Rept Ser., 1963, 1, 24-30.

/23/ Idem /11/, p. 15 .

/24/ KNAPP H.A. - The effect of deposition rate and cumulative soil level on the concentration of Sr^{90} in US milk and food supplies .- Rapport américain TID 13945, 1961.- 56 p.

/25/ SHVEDOV V.P., SHIROKOV S.I., Ed. - Radioactive contamination of the external environment. - Moscou, Gosudarstvennoe, 1962 . - Trad. americaine AEC - Tr - 6049, 1963.- pp. 258-270

/26/ ETATS-UNIS. - Atomic energy commission, Health and safety laboratory . - Prediction of levels of ^{90}Sr and ^{137}Cs in food and man. Rapport TID 21239, 1963.- 20 p.

/27/ WASSERMAN R.H., COMAR C.L., TWARDOCK A.R. - Metabolic behaviour of ^{137}Cs - ^{137m}Ba in the lactating goat.- Int. J. Rad. Biol., 1961, 4, 299-310.

/28/ Idem /11/, p. 18 .

/29/ Idem /28/, p. 20.

/30/ GREITZ U., EDVARSON K. - Internal doses from fission products in milk - Rapport suédois FOA - 4 - Rapport A, 4199 - 4623, 1961. -

/31/ SHAKHIDZHANYAN L. - Level of contamination and features of distribution of radiocesium in organism of man and farm animals in natural conditions. - Leningrad, Institute of Evolution physiology , Academy of Sciences, 1962.- pp. 838-842.

/32/ Idem /11/, p. 22-28.

/33/ Idem /32/, p. 28-32.

/34/ Idem /6/ , p. 33-36.

/35/ WARD G.H., JOHNSON J.E. - The Cesium 137 content of beef from dairy and feed lot cattle.- Health physics, 1965, 11, 95-100.

/36/ Mc CLELLAN R.O., Mc KENNEY P.J.R., BUSTAD L.K. - Dosimetry of caesium 137 in sheep. - Nature, 1962, 194, 4834, 1145-1146.

/37/ Mc CLELLAN R.O., Mc KENNEY J.R., BUSTAD L.K. - Metabolism and dosimetry of 137 Cs in male sheep. - Rapport americain HW. 72511, 1962.

/38/ MONROE R.A., WASSERMANN R.H., COMAR C.L. - Comparative behaviour of Sr/Ca and Cs/K in the fowl. - Am. J. Physiol. 1961, 200, 535-538.

/39/ WASSERMANN R.H., COMAR C.L., TWARDOCK A.R. - Metabolic behaviour of ^{137}Cs Ba^{137m} in the lactating goat. - Int. J. Rad. Biol. 1961, 4, 299-310.

/40/ LENGEMANN F.W., COMAR C.L. - Métabolisme de certains produits de fission par les animaux de ferme. - In : Aspects de la contamination radioactive normale et accidentelle dans le cadre de l'agriculture et de la santé publique, Scheveningen, 11-15 décembre 1962. - Rome, FAO, 1964. - pp. 100-125.

/41/ GLASCOOK R.F. - The secretion of a single tracer dose of labelled iodide in the milk of the lactating cow. - J. Dairy Res. 1954, 21, 318.

/42/ STARA J.F. - Tissue distribution and excretion of Cs^{137} in the guinea pig following different routes of administration. 9th annual meeting of the Health Physics Society, Cincinnati, 1964. Health Physics, 1964, 10, 588, P/31.

/43/ Mc PEAK D.W., LODDE G.M., PARR W.H. - Environmental control of Cs^{137} retention Id., 589, P/32.

/44/ GARNER R.J. - Environmental contamination and grazing animal. - Health physics, 1963, 9, 597-605.

/45/ KAHN B., ROBBINS P.J., STRAUB C.P., CARTER R.W. - The effect of feeding practices on cesium concentrations in cow's milk - 9th. annual meeting of the Health Physics Society, Cincinnati, 1964. Health Physics. 1964, 10. P/129.

/46/ MICHON G., JEANMAIRE L. - Essai d'étude de la contamination du cheptel en période de retombées radioactives. - Rapport CEA n° 2323, 1963.

/47/ HUNTER H.F., BALLOU N.E. - Fission-product decay rates. - Nucleonics, 1951, 9, 5, C_2 - C_7 .

/48/ AEBERHARDT A. - Explosion nucléaire et contamination interne. - Rapport CEA n° 587, 1956.

/49/ MECHALI D., DOUSSET H., PARDO G., PENOTET H. - Dose délivrée à la glande thyroïde après inhalation de produits de fission (Fission du ^{239}Pu par des neutrons rapides). - Health Physics, 1966, 12, 15-27.

/50/ PARDO G. - Communication personnelle.

/51/ GLENDENIN L.E., CORYELL C.D., EDWARD R.R. - Distribution of nuclear charge in fission. - In : "Radiochemical studies - The fission products" - National nuclear energy series, IV. 9 - Book 1. - New-york, Mc Graw Hill, 1951, pp. 489-515.

/52/ BURRIS L., DILLON L.G. - Estimation of fission product spectra in discharged fuel from fast reactor. - Rapport américain ANL 5742, 1957.

/53/ BLOMECKE J.O., TODD M.F. - Uranium 235 fission product production as a function of thermal neutron flux, irradiation time and decay time. 1 - Atomic concentrations and gross total, 13rd ed. Rapport américain ORNL 2127, Part. 1, Vol. 1, 1957.

/54/ GREITZ U., EDVARSON K. – Internal doses from mixed fission products - Health Physics 1963, 9, 721-730.

/55/ SOLDAT J.K. – Environmental evaluation of an acute release of I^{131} to the atmosphere. - Health physics, 1955, 11, 1009-1015.

/56/ SCOTT-RUSSELL R. – Food and agricultural aspects of radiation emergencies. – In : FAO, AIEA, OMS. – Protection of the public in the event of radiation accident, Geneva, 18-22 nov. 1963 - Genève, OMS, 1965. - 55-67.

/57/ VOISIN A. – Productivité de l'herbe - Paris, Flammarion, 1957. - p. 144.

/57b/ KIRCHMANN R.J. - POULENGER R.R. - Importance de la rétention directe et de la productivité de l'herbage dans la contamination du lait par les retombées radioactives - Meded. Landbouwhogesch. Opzoeknigezssins, GENT. 1965, 30, 1227-1240.

/58/ LOUTIT J.F., SCOTT-RUSSEL R. – The entry of fission products into food chains. - Progress in nuclear energy - Series VI - Biological Sciences - Vol. 3 - Oxford, Pergamon Press, 1963, pp. 5-21.

/59/ Idem /57/, pp. 144-184.

/60/ Idem /58/, p. 23

/61/ THOMPSON R.C., STANLEY E. – Effective half-life of fallout radionuclides on plants with special emphasis on iodine – 131 .- Rapport américain UCRL 12388, 1965.

/62/ Idem /6/, p. 47

/63/ Idem /6/, p. 54

/64/ MIDDLETON L.I. – Radioactive strontium and caesium in the edible parts of crop plants after foliar contamination – Int. J. Rad. Biol. 1959, 1, 387-402.

/65/ MOEKEN P.H., ALDERHOUT I.H.Jr – The radioactivity in air and rain in relation to the radioactivity in grass. Rapport belge ETR. 105, 1961 (NP 12548), 1961. - 21 p.

/66/ PEIRSON D.H., KEANE J.R. – Characteristics of early fallout from Russian nuclear explosions of 1961 – Nature, 1962, 196, 4857, 801-807.

/67/ BARTLETT B.O., MIDDLETON L.J., MILBOURN G.M., SQUIRE H.M. – The removal of fission products from grass by rain, in surveys of radioactivity in human diet and experimental studies, report for 1960. - Rapport anglais ARCRL 5, 1960. - 51-54.

/68/ CHAMBERLAIN A.C., CHADWICK R.C. – Deposition of airborne radioiodine vapor - Nucleonics, 1953, 11, 8, 22-25.

/69/ LANE W.B. – Project Sedan – Some radiochemical and physical measurements of debris from on underground nuclear detonation. – Rapport américain PNE – 229F, 1964.

/70/ BONI A.L. – Improved techniques for environmental samples analysis. – Rapport américain DPS - PU - 63 - 30 - 6, 1963.

/71/ BOOKER D.V. – Physical measurements of activity in sample from Windscale. – Rapport anglais AERE - HP/R - 2607, 1958. - 38 p.

/72/ SPIERS F.W. – Some measurements of background gamma-radiation in Leeds during 1955 Nature, 1959, 184, 1680-1682.

/73/ MIDDLETON L.I., SQUIRE H.M. — The retention of fission products on vegetation. - Rapport anglais ARCRL. 5, 1961, 50-51.

/74/ CHAMBERLAIN A.C., EGGLETON A.J., MEGAW W.I., MORRIS I.B. - Behaviour of iodine vapor in air. - Discussions Faraday Soc. 1960, 30, 162-169.

/75/ BOLIN B. - Note on the exchange of iodine between the atmosphere, land and sea. - Int. J. Air Pollution, 1959, 2, 127-131.

/76/ MARTIN W.E. - Losses of Sr^{90}, Sr^{89} and I^{131} from fallout - contamined plants. - Radiation Botany, 1964, 4, 275-284.

/77/ HAWLEY C.A., SILL C.W., VOELZ G.L., ISLITZER N.F. - Controlled environmental radioiodine tests at the National Reactor Testing Station. - Rapport américain IDO - 12035, 1964.

/78/ FOWDEN L. - Radioactive iodine incorporation into organic compounds of various angiosperms - Physiol. Plant, 1959, 12, 657-664.

/79/ HUNGATE F.P., CLINE R.L., UHLER H., SELDERS A. - Foliar absorption of I^{131} by plants - Health physics, 1963, 9, 1159-1166.

/80/ SELDERS A., REDISKE I.H. - The uptake of iodine by higher plants. - Rapport américain HW 33681, 1954.

/81/ MARTIN W.E. - Loss of I^{131} from fallout contaminated vegetation - Health Physics 1963, 9, 1141-1148.

/82/ Idem /56/

/83/ Institut National de la Recherche Agronomique et Commissariat à l'Energie Atomique. - Compte-rendu d'expériences de plusieurs années, sur l'absorption de Strontium et de Césium radioactifs par les plantes cultivées. — Rapport CEA n° 2159, 1962. - p. 3.

/84/ FOWLER E.D. - Radioactive fallout, soils, plants, foods, man. - Amsterdam, Elsevier Publishing Co., 1965, pp. 86-87.

/85/ BORMAN F.H., SHAFER P.R., MULCAHY D. — Fallout on the vegetation of New England during 1957 atom bomb test series. - Ecology, 1958, 39, 376-379.

/86/ Idem /84/, p. 107.

/87/ Idem /84/, pp. 55 - 79 .

/88/ LARSON K.H., OLAFSON I.H., MORK H.M., HOWTON D.R. - Field observations and preliminary field data obtained by the U.C.L.A. survey group on observation Jangle, November 1951. - Rapport américain UCLA - 182, 1952, 28 p.

/89/ LINDBERG R.G., ROMNEY E.M., OLAFSON I.H., LARSON K.H. - The factors influencing the biological fate and persistence of radioactive fallout. - Rapport américain ITR, 1177, 1955 et WT 1177, 1959 . - 77 p.

/90/ SELDERS A.A., REDISKE I.H., PALMER R.F. - The absorption and translocation by plants of radioactive elements from "Jangle" soil. - Rapport américain HW 27620, 1953. - 12 p.

/91/ FOWLER E.B., Ed. – Radioactive fallout, soils, plants, foods, man. – Amsterdam, Elsevier Publishing Co. 1965. – p. 64.

/92/ Idem /91/, pp. 28 - 51.

/93/ MARTELL E.A. – The Chicaco Sunshine method, absolute assay of strontium 90 in biological materials, soils, water and air filters. – Rapport américain AECU 2262, 1956. 65 p.

/94/ BARBER D.A. – A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability - Soil Science, 1962, 93, 39.

/95/ GRANDE BRETAGNE – Agricultural Research Council Radiobiological Laboratory. Annual report 1962 - 1963 : Sr^{90} and Cs^{137} in permanent pastures. – Rapport anglais ARCRL, 10, 1963 - pp. 43-49

/96/ SQUIRE H.M., MIDDLETON L.J. – Long term behaviour of strontium 90 and caesium 137 in soils, Annual Report 1962 - 1963 – Rapport Anglais ARCRL 10, 1963 – pp. 78-82

/97/ MILBOURN G.H – Field experiments with Sr^{89} – In : Strontium 90 in milk and agricultural materials in the United Kingdom. Annual Report, 1958 - 1959. – Rapport anglais ARCRL 2, 1960. – pp. 50-52.

/98/ SCOTT RUSSEL R., SHONE M.G.T. – Movement of Sr and Cs in soils and its signifiance in studies on the contamination of food chains. – In "Colloque International sur la rétention et la migration des ions radioactifs dans les sols", Saclay, 16-18 octobre 1962. - Paris, Presses Universitaires de France, 1963. - pp. 151-159.

/99/ BARBIER C. – Prévision de l'infiltration de radioéléments à la limite de la couche labourée des sols agricoles. – Id. pp. 145-150.

/100/ BITTEL R. – Radiocontamination par voie radiculaire des végétaux cultivés. – Cahier des Ingénieurs Agronomes, 1965, n° 194.

/101/ BARBIER G., DUVAL L. – Sur l'échange de cations présents en minimes proportions – Ann. Agron. 1958, 695-712.

/102/ NISHITA H., TAYLOR P., ALEXANDER G.V., LARSON K.H. – Influence of stable Cs and K on the reaction of ^{137}Cs and ^{42}K in soils and clay minerals. - Rapport américain UCLA, 496, 1961.

/103/ MICHON G. – Les rejets d'effluents radioactifs dans les eaux destinées à l'irrigation – Health Physics Soc. 9th Ann. Meeting, Cincinnati, 1964. – Health Phys., 1964, 10, 597, P/ 61.

/104/ BITTEL R., CLEMENT J.L. – Contamination directe des végétaux et irrigation par aspersion. – Bibliographie CEA n° 53, 1965 .- pp. 26-32.

/105/ HARRISON G.E. – In : The entry of fission products into food chains. Progress in nuclear energy series 6, Biological Sciences vol. 3. - Oxford, Pergamon Press, 1961 - pp. 60-63

/106/ SIRI W.E. – Isotopic tracers and nuclear radiation. – New-York, Mc Graw Hill, 1949.- p. 427.

/107/ CHRUCH B.W., LEOYD B.D., MAYS CH.W. – Evidence for radioruthenium in milk .– Nature, 1965, 207, 4998, 775-776.

/108/ MILBOURN G.H., TAYLOR - The contamination of grass land with radioactive strontium. - I. Initial retention and loss. - Radiation Botany, 1965, 5, 337-347.

/109/ TAMPLIN A.R. - 131 I, 133 I, and cow milk. - Rapport américain UCRL 14146, 1965.

/110/ DELBERT S., VEATER I. - Daily farm radioactive study following the pike event. - Rappcrt américain TID 21764, 1964.

/111/ Commission Internationale de protection radiologique (CIPR), A. Duchêne, trad. - Rapport du Comité II sur la dose admissible en cas d'irradiation interne. Publication CIPR 2, 1959. - Paris, Gauthier-Villars, 1963.

/112/ LEDERMAN S. - Contamination radioactive des denrées alimentaires : détermination des niveaux admissibles. - Rapport CEA-R 2707, (Eur. 2177 f.), 1965.

/113/ MENZEL G.R. - Factors influencing the biological availability of radionuclides for plants. - In : Symposium on fallout, food and men, Atlantic City, April 1963. - pp. 1398-1401.

/114/ MENZEL G.R. - Transport of Sr^{90} in run off. - Science, 1960, 131, 499-500.

/115/ FRERE M.H., MENZEL R.G. - Runoff of Sr^{90} from agricultural land surfaces. - Rapport américain TID 7632, 1962. - pp. 299-305.

/116/ KULP J.L., SHUBERT A.R. - Vertical penetration and translocation of Sr^{90} in the soil. In "Sr^{90} in man and his environment". - Rapport américain NYO - 9934, Vol. 1, summary, pp. 72-73.

/117/ KULP J.L., KAUFMAN A., SLAKTER HIRSHMAN, SCHUBERT A.R. - Sr^{90} in the soil of the New-York City area. In "Sr^{90} in man and his environment". - Rapport américain NYO - 9934, 1962. - Vol. 3, pp. 248-271.

/118/ MILLER C.E., REITERMEIER R.F. - The leaching of radiostrontium and radiocesium through soils - Proc. soil. - Sc. Am. 1963. 27, 141-144.

/119/ SQUIRE H.M., MIDDLETON L.J. - Absorption of strontium 90 and caesium 137 from soil. - Annual Report 1961 - 1962. - Rapport anglais ARCRL 8, 1962. - pp. 66-69.

/120/ BURTON J.D., MIDDLETON L.J., SCOTT RUSSEL R. - Relationship between the rate of fallout and the concentration of Sr^{90} in human diet in the United Kingdom - Nature, 1960 185, 498 - 500.

/121/ KROTOSZNYNER J.P., KIRCHMANN R. - Contribution à l'étude de la rétention du Sr^{90} dans le sol - Rapport belge BLG. 103 et Pédologie, Symposium International, 1961. - pp. 44-59.

/122/ JARVIS N.L., BROWN J.R., ARNOTT R.J. - Influence of age of radioactive fallout material upon its deposition in milk and vertical distribution in soil - Dairy Sci. 1964, 47, 68-73.

/123/ YAMAGATA N., OKITA T., KODAIRA K. - The runoff of fallout Sr^{90} from a river and its application in hydrology. - In : Radioisotopes in hydrology, Tokyo, 5-9 mars 1963. - Vienne, AIEA, 1963. - pp. 417-423.

/124/ YAMAGATA N., MATSUDA S., KODAIRA K. - Runhoff of ^{137}Cs and ^{90}Sr from rivers. - Nature, 1963, 200, 4907, 668-669.

/125/ BARBIER G., TYSZKIEWICZ, HUGUET, MICHON G. - C.R. Acad. Agric. France, 1958, 1-6

/126/ FREDRIKSSON L. - Uptake by pasture and ley plants of ^{90}Sr and ^{137}Cs in swedish field experiments. - Rapport suédois FOA - 4 - Rapport A - 4322 - 4623 , 1963.

/127/ LEHR J.J. - Communication personnelle.

/128/ SCHUFFELEN A.C., KARHAUSEN L., VAN DEN HOEK J., LEHR P. - Communication personnelle.

/129/ MIYAKE Y., TSUBOTA H. - In : Radioisotopes in hydrology, Tokyo , 5-9 mars 1963. - Vienne, AIEA, 1963. - pp. 425-431.

/130/ GARNIER A. - Communication personnelle.

/131/ MARTIN W.E. - Food chain relationships of radiostrontium in the Sedan fallout field. - Rapport américain PNE - 237 F, 1965.

/132/ LACOURLY G. - Communication personnelle.

/133/ NISHITA H., LARSON K.H. - Summary of certain trends in soil plant relationship studies of the biological availability of fallout debris. - Rapport américain UCLA - 401, 1957.- p. 16.

/134/ GARNER R.J. - A mathematical analysis of the transfer of fission products to cow's milk. - Health Physics, 1967, 13, 205-212.

/135/ ETATS-UNIS. Federal Radiation Council . - Radiation protection guidance for federal agencies. - FRC Report n° 5, 1964.

/136/ GRANDE BRETAGNE. Medical Research Council. - The hasards to man of nuclear and allied radiation. - Londres, H.M.S.O., 1960. - 137 p.

/137/ BOOKER D.V. - Physical measurements of activity in samples from Windscale. - Rapport anglais AERE HP/R - 2607, 1958.

/138/ MARTER W.L. - Radioiodine release incident at the Savannah River plant. - Health Physics, 1963, 9, 1105-1109.

/139/ EISENBUD M., WRENN M.E. - Biological deposition of radioiodine. - Health Physics, 1963, 9, 1133 - 1139 .

/140/ WEHMANN G. - Comparaison of ingestion to inhalation dose to man from I^{131} . - Health Physics, 1963, 9 , 1221-1222.

/141/ PENDLETON R.C., MAYS C.W., LLOYD R.D., BROOLES A.L. - Differential accumulation of I^{131} from local fallout in people and milk. - Health physics, 1963, 9, 1253-1262

/142/ GRANDE BRETAGNE. Medical Research Council. - Maximum permissible dietary contamination after the accidental release of radioactive material from nuclear reaction, report to the Medical Research Council by its Committee on protection against ionizing radiations, Brit. Med. J. 1959, I, 967-969

/143/ HAWLEY C.A. - Controlled environmental radioiodine tests at the National Reactor Testing Station. - Rapport américain IDO 12047, 1965.

/144/ COMAR C.L., LENGEMANN F.W., WASSERMAN R.R., THOMSON J.C. Jr. - Fission product metabolism and response in laboratory and domestic animals, a planning study for evaluation of radioactive contamination of the food chain, progress report, January 1, 1964 - December 31, 1965.- Rapport américain TID, 22 626, 1965.- 155 p.

/145/ KLEMENT A.W. - Radioiodine fallout from nuclear weapons tests. - Rapport américain IDO 12047, 1965.

Manuscrit reçu le 5 juillet 1967

TABLE DES MATIERES

		Page
INTRODUCTION		3
I –	Irradiation du cheptel	4
II –	Conséquence de l'ingestion d'herbe contaminée	9
III –	Annexe. Dose délivrée au T.G.I. des ruminants	11
CHAPITRE I –	RADIOTOXICOLOGIE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE ANIMALE EN ZONE CONTAMINEE	13
I –	Les radioéléments de la chaîne alimentaire animale	13
II –	Evolution des nucléides de la chaîne après leur dépôt sur le sol	14
III –	Signification biologique du dépôt actif de chaque nucléide de la chaîne	15
IV –	Conséquence des transferts écologiques : radiotoxicité des denrées animales	18
CHAPITRE II –	DU DEPOT A L'HERBE	21
I –	La phase foliaire	21
II –	La phase racinaire	26
III –	Annexe : solubilité et rétention foliaire	27
CHAPITRE III –	DE L'HERBE AUX DENREES ANIMALES	29
I –	Expression mathématique du niveau de contamination des denrées animales	29
II –	Détermination de la fraction d'activité soluble ingérée qui parvient à chaque denrée	31
III –	Détermination des périodes et des constantes effectives dans les aliments	35
IV –	Valeurs numériques	36
V –	Annexes I et II : Iode et lait	43
VI –	Annexe III : Ru^{106} dans le lait	51
CHAPITRE IV –	EVALUATION DE L'EQUIVALENT DE DOSE AU NIVEAU DES ORGANES CRITIQUES DE L'HOMME	53
I –	Charges des organes critiques humains au cours de la consommation, à l'exception du T.G.I.	53
II –	Débits d'équivalent de dose au niveau des organes critiques autres que le T.G.I.	58

III - Calcul des équivalents de dose au niveau des organes critiques autres que le T.G.I. 59
IV - Equivalents de dose au niveau du T.G.I. 68

CHAPITRE V - HYGIENE ALIMENTAIRE EN ZONE CONTAMINEE 75

I - Méthode d'évaluation du risque radiotoxicologique 75
II - Détermination des critères du choix de la décision de consommation 77

CONCLUSION 83

BIBLIOGRAPHIE 85

FIN