

Ordonnancement des cuves de décroissance dans un service de médecine nucléaire

F. HALLOUARD^{1,2,3}, D. MATANZA¹, A. FOUCHER¹, H. FESSI^{2,3},
M. FRAYSSE¹

(Manuscrit reçu le 16 décembre 2011, accepté le 5 mars 2012)

RÉSUMÉ En France, les effluents générés par des personnes traitées et hospitalisées en médecine nucléaire doivent être collectés dans des cuves de décroissance avant leur rejet dans le réseau d'assainissement, en accord avec les limites réglementaires définies. Un modèle utilisant une série d'exponentielle décroissante a été mis au point permettant de simuler l'évolution de l'activité volumique dans les cuves de décroissance. Ainsi son utilisation permet d'optimiser le nombre et la capacité des cuves par rapport à l'activité médicale actuelle ou future. En outre, ce modèle est très modulable puisqu'il intègre comme variables : la période physique du radioélément, le volume total de chaque cuve, l'activité excrétée par patient, le volume total d'effluents générés par patient durant son séjour en chambre blindée, le nombre de patients pris en charge lors de chaque semaine et le nombre de semaines avant la mise en décroissance de la cuve. Par ailleurs, les simulations avec ce modèle montrent qu'à activité médicale équivalente, il est possible de travailler soit avec 2 grandes cuves soit avec 3 cuves ayant une capacité réduite de 50 %. L'utilisation de plusieurs petites cuves permet en outre de maintenir la rotation des cuves de décroissance en cas de mise hors service d'une d'entre elles.

ABSTRACT Decay tank management in a nuclear medicine unit. In France, effluents from patients undergoing therapy procedures with ¹³¹I radiopharmaceuticals must be collected in decay tanks prior to releasing them into the sewer system, in accordance with the regulatory limits set. A model using a series of exponential decay was developed to simulate the evolution of the activity concentration in decay tanks. The use of this model allows one to optimize the number and capacity of tanks to the current or future medical activity. In addition, this model is very flexible since it includes as variables: the physical half-life of the radionuclide, the total volume of each tank, the activity excreted per patient, the total volume of effluent generated by the patient during his stay in a shielded room, the number of patients cared for in every week and the number of weeks prior to decay of the tank. Besides, a simulation with this model shows that at equivalent medical activity, it is possible to work either with two large tanks or with three tanks with a reduced capacity of 50%. The use of multiple small vessels also helps to maintain the rotation of these last if one of them is unusable.

Key-words: Activity assessment modeling / effluent / ¹³¹I / radiotherapy / residual radioactivity

¹ Centre Hospitalier de Lyon Sud, Centre de Responsabilité de Radiopharmacie, 145 chemin du Grand Revoyet, 69495 Pierre-Bénite, France.

² UMR/CNRS 5007, Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés, 43 boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne, France.

³ Université de Lyon, 69622 Lyon, France.

1. Introduction

L'utilisation de l'iode 131 (^{131}I) dans le traitement de l'hyperthyroïdie et autres pathologies a augmenté de manière significative ces dernières années, si bien qu'elle représente actuellement près de 70 % des actes de radiothérapies métaboliques en médecine nucléaire (UNSCEAR, 2000 ; ICPR, 2004). Le succès de la thérapie à ^{131}I dépend de la captation et de la rétention de ce dernier par la thyroïde permettant la destruction du tissu et des métastases. La fraction d' ^{131}I non captée par la thyroïde est éliminée rapidement par voie urinaire. Ainsi pour prévenir une irradiation évitable au niveau du bassin, il est conseillé aux malades de boire beaucoup d'eau facilitant ainsi l'élimination de l' ^{131}I contenu dans la vessie.

Toutefois ces urines enrichies en ^{131}I peuvent présenter un risque pour l'environnement. De ce fait, les effluents des malades traités ne peuvent être éliminés sans précaution particulière. En outre vis-à-vis de la population, les bénéficiaires de radiothérapies à l' ^{131}I avec des doses supérieures à 740 MBq générèrent à leur contact une exposition telle les premiers jours, qu'ils sont astreints à séjourner 3 jours en chambre blindée puis de limiter tout contact rapproché avec d'autres personnes pendant au moins 1 semaine.

En France, d'un point de vue réglementaire, les effluents générés par des personnes prises en charge en médecine nucléaire doivent être collectés dans des cuves de décroissance avant leur rejet dans le réseau d'assainissement, en accord avec les limites réglementaires définies (la ministre de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, 2008). Pour l' ^{131}I , cette limite est fixée à 100 Bq/L. En conséquence, l'utilisation inadaptée de cuves de décroissance a un impact important sur l'activité médicale et donc sur la capacité de prise en charge des malades. En effet, un nombre ou une capacité insuffisante de ces cuves impose des périodes d'inactivité correspondant au temps nécessaire pour que la radioactivité de ces cuves remplies soit suffisamment faible pour être rejetée.

En médecine nucléaire et en radiopharmacie, il existe plusieurs logiciels (Gera[®] de Thélème, Venus[®] de Nicesoft-Ségami et Pharma 2000[®] de Waid) destinés à faciliter la gestion de leurs différentes activités. À ce titre la gestion des déchets radioactifs est aussi prise en compte. Toutefois, ces logiciels se limitent pour les effluents radioactifs, à enregistrer les informations relatives au(x) différent(e)s mesure(s) de radioactivité réalisée(s) avant le déversement du contenu de la cuve dans le réseau sanitaire classique. En conséquence, ces logiciels ne permettent pas de prédire de délai de décroissance d'une cuve ou la capacité requise de cette dernière en fonction de l'activité médicale durant la phase de remplissage.

L'objectif de cette étude est la mise au point d'un modèle permettant de simuler de façon simple l'évolution de l'activité volumique dans les cuves de décroissance et la création d'un outil dont l'exploitation permettrait d'optimiser le nombre et la capacité des cuves par rapport à l'activité médicale actuelle ou future.

2. Matériel et méthodes

Pour l'élaboration de ce modèle, des hypothèses simples ont été formulées. Ces hypothèses sont volontairement péjoratives afin de garantir la sécurité et avoir un niveau d'activité volumique réel toujours inférieur au niveau d'activité volumique calculé. Si l'activité volumique calculée par le modèle est inférieure aux limites légales, l'activité volumique réelle dans les cuves de décroissance l'est aussi.

D'abord nous avons supposé que les patients étaient reçus à intervalles réguliers de 7 jours dans le service (les lundis par exemple). Concernant l'élimination de l'iode 131 (^{131}I), nous considérons que l'intégralité de l'activité administrée au patient se retrouve dans la cuve. Cette hypothèse s'explique par la grande variabilité (de 45 à 95 %) de la proportion d' ^{131}I éliminé chez des patients souffrant d'hyperthyroïdie dès les premiers jours (Barquero *et al.*, 2008 ; Berson *et al.*, 1952). En outre nous considérons que l'intégralité des effluents de chaque patient est émise dans la cuve dès le premier jour et que l'intégralité de l'activité est éliminée à cette occasion puisque la décroissance physique de la radioactivité de l'iode est indépendante de sa localisation (dans le patient ou dans la cuve). Pour finir, nous supposons qu'il existe une valeur moyenne d'activité administrée au patient ainsi qu'un volume moyen d'effluent généré par chaque patient afin de s'exonérer de toutes les variations inhérentes à la population de patient traitée.

Ainsi l'évolution de l'activité volumique en fonction du nombre de semaine d'activité ($A_v(n)$) peut être assimilée à une série d'exponentielles décroissantes. Cette activité volumique dépend de l'activité totale moyenne rejetée par un patient durant son séjour en chambre blindée (A_i), de la quantité d'effluents produits par chaque patient durant sa prise en charge (V_u), du nombre de patient(s) pris en charge pour chaque semaine (p_i), ainsi que bien évidemment du nombre de semaines d'activité (n). L'activité volumique présente dans la cuve lors de la n^{e} semaine après la réception des p_n patient(s) peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$A_v(n) = \frac{\sum_{i=0}^n p_i \times A_i \times e^{\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times 7 \times (n-i)\right)}}{V_u \times \sum_{i=0}^n p_i}. \quad (1)$$

De cette équation (1), il est possible de déduire le temps (en jours) de décroissance

nécessaire pour atteindre A_L , l'activité volumique maximale des effluents autorisant leur évacuation dans le réseau d'assainissement selon l'équation suivante :

$$t = -\ln\left(\frac{A_L}{A_v(n)}\right) \times \frac{T_{1/2}}{\ln(2)}.$$

En outre, il est possible de déterminer l'activité volumique résiduelle dans les cuves mises précédemment en décroissance. En effet sous réserve d'avoir pris en charge les patients selon le même rythme que pour la cuve en cours de remplissage, l'activité volumique résiduelle dans les autres cuves est évaluée selon l'équation :

$$A_1 v(n') = A_v(n) \times e^{\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times n'\right)}.$$

L'ensemble des fonctions ci-dessus intégré au logiciel Excel[®] et associé aux différents paramètres variables permet sous réserve de compatibilité avec les hypothèses utilisées, de simuler tous les cas de figure de manière simple et rapide. En effet il suffit d'entrer les valeurs des paramètres pour connaître l'activité volumique qui s'est accumulée dans la cuve après n semaines de fonctionnement.

À titre d'illustration, nous avons cherché à savoir grâce à ce modèle, dans quelle mesure il est possible de modifier notre activité médicale de radiothérapie métabolique avec les équipements à notre disposition. Les paramètres utilisés pour cet ordonnancement sont : une demi-vie de l'iode 131 (¹³¹I) de 8,02 jours, une dose moyenne administrée à chaque patient de 3850 MBq, une capacité maximale de chaque cuve de 1250 L et un volume d'effluent généré de 60 L par patient pour 3 jours en chambre blindée. Pour ce dernier paramètre, il a été considéré que le patient élimine 2 litres d'eau par jour en tirant 6 fois la chasse d'eau de 3 litres de la chambre blindée soit 20 litres d'effluents par jour pendant ces 3 jours d'hospitalisation.

Parallèlement à cet ordonnancement sous Excel[®], nous avons réalisé une simulation sur le logiciel MatLab[®]. Tout en conservant les mêmes hypothèses utilisées que sous Excel[®], il a été réalisé un programme qui gère de manière quotidienne l'évolution de l'activité dans les cuves. De ce fait, une courbe représentant l'évolution de l'activité volumique dans la cuve au cours du temps est obtenue.

3. Résultats et discussion

Dans un premier temps, nous avons étudié sous Matlab® l'évolution de la radioactivité dans les cuves de décroissance en considérant la prise en charge d'un malade par semaine pendant 25 semaines (Fig. 1). Cette simulation permet de mesurer l'importance de l'effet de la dilution et de la décroissance physique de la radioactivité sur la diminution de l'activité volumique.

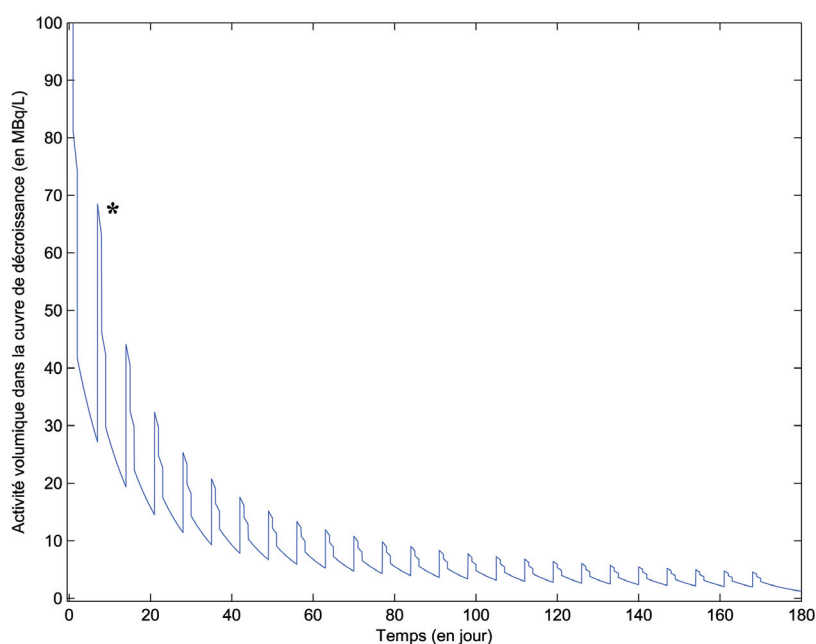


Figure 1 – Évolution de l'activité volumique dans les cuves de décroissance en considérant la radiothérapie à ^{131}I (3850 MBq) d'un malade par semaine pendant 25 semaines. * indique que le pic correspond au deuxième patient traité.

*Evolution of volume radioactivity in decay tanks during the handling of 1 patient per week for 25 weeks with ^{131}I (3850 MBq). * indicates the peak corresponding to the handling of the second patient.*

La dilution des effluents permet de réduire l'augmentation de la radioactivité dans les cuves lors de la prise en charge d'un nouveau patient. En outre, cette action de la dilution des effluents est d'autant plus forte qu'un nombre important de patients ont été déjà traités (dû au volume d'effluent déjà présent dans la cuve). En conséquence, au fil des patients, l'effet de dilution nivelle l'activité volumique (à quelques MBq/L dans notre cas). Par ailleurs, les pics correspondant au début

de la prise en charge d'un patient, présentent une forme de scalpels de plus en plus petits. Cela est la conséquence de l'effet de dilution induit par les effluents générés par le patient lors du 2^e et 3^e jours en chambre blindée.

Concernant l'effet de décroissance physique de la radioactivité, celle-ci est essentielle après la gestion du dernier patient pour atteindre l'activité volumique maximale permettant de déverser le contenu de la cuve dans les égouts. En effet dans notre cas, cela permet de diviser la capacité nécessaire de la cuve par 50 environ. Toutefois durant la phase de remplissage de la cuve de décroissance, l'importance de l'effet de la décroissance physique de la radioactivité par rapport à celle de la dilution augmente avec la diminution de la période du radioélément. L'effet de la décroissance physique est plus important par rapport à celui de la dilution lorsque la période du radioélément n'est que de quelques heures comme cela peut être le cas pour ^{99m}Tc ou ¹⁸F (Fig. 2).

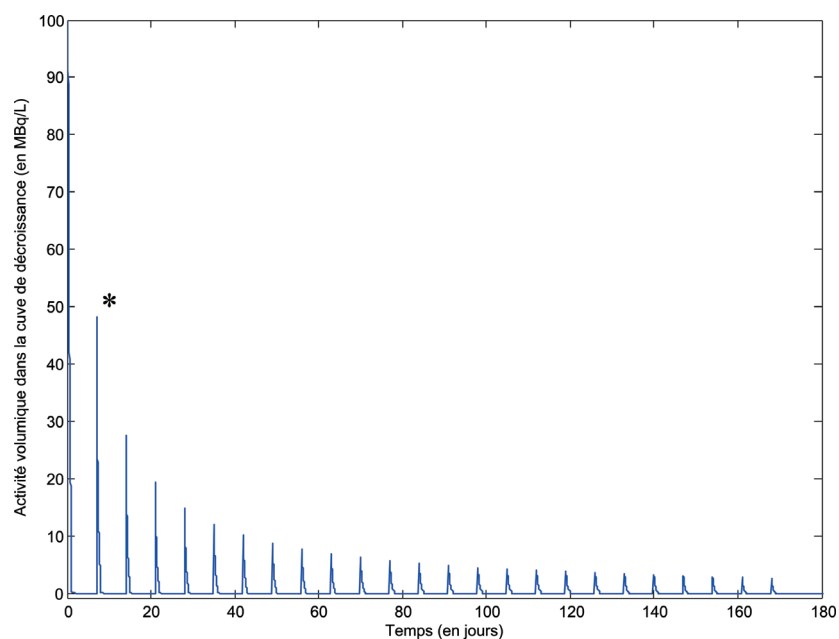


Figure 2 – Évolution de l'activité volumique dans les cuves de décroissance en considérant la prise en charge d'un malade par semaine pendant 25 semaines. Par rapport à la figure 1, le radioélément utilisé est du ^{99m}Tc. * indique que le pic correspond au deuxième patient traité.
*Evolution of volume radioactivity in decay tanks during the handling of 1 patient per week for 25 weeks with ^{99m}Tc (3850 MBq). * indicates the peak corresponding to the handling of the second patient.*

ORDONNANCEMENT DES CUVES DE DÉCROISSANCE

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une simulation de l'évolution de la radioactivité contenue dans les cuves en décroissance et de celles en cours de remplissage, en fonction du temps à l'aide du fichier de simulation sur Excel[®] (Tab. I). Les résultats de cette simulation avec l'activité médicale actuelle d'un patient par semaine, démontre la capacité suffisante de nos deux cuves soit 1 250 L, pour pouvoir gérer les effluents des patients sans induire une interruption de la prise en charge de ces derniers. La rotation des cuves se fait idéalement toutes les 19 semaines. En revanche, la simulation faite en tenant compte de l'augmentation de l'activité médicale envisagée, soit 2 patients par semaine, a démontré que nos deux cuves de 1 250 L sont incapables de faire face à la prise en charge d'autant de patients sans réaliser une période d'inactivité de 5 semaines.

Au vu de ce dernier résultat, nous avons réalisé plusieurs simulations avec la capacité des cuves de décroissance dont nous disposons dans le but de connaître la prise en charge moyenne maximale de patients par semaine en fonction de la durée de la période d'inactivité. Il en résulte qu'il est possible de prendre en moyenne 1,3 patient par semaine avec une période d'inactivité de 5 semaines pour 10 semaines d'activité. Toutefois, la capacité des cuves ne permettant pas de contenir les effluents de plus de 20 patients par cuve, le nombre moyen maximal de patients pris en charge par semaine diminue avec la réduction de la période d'inactivité. Par exemple, il n'est possible de soigner en moyenne que 1,2 patient par semaine avec une période de 2 semaines d'inactivité toutes les 15 semaines ou 1 patient par semaine sans période d'inactivité. Par ailleurs, la disposition des semaines où 2 patients sont traités, doit être prise en compte sous peine d'accroître la période d'inactivité. Notre outil intègre aussi cet aspect puisqu'il permet de déterminer les contraintes du rythme de prise en charge des patients. Dans notre cas par exemple, si nous souhaitons seulement que 2 semaines d'inactivité, nous devons prendre en charge les patients au plus tard selon le planning illustré dans le tableau II.

Un autre intérêt de cet outil est la détermination de la capacité minimale de 2 nouvelles cuves de décroissance ou du nombre de cuves ayant la capacité actuelle pour prendre en charge un nombre de patients déterminés par semaine sans induire de période d'inactivité.

Dans notre cas pour le traitement de 2 patients par semaine, la capacité de chaque cuve devra être augmentée à 2 400 L, soit un doublement de la capacité actuelle. Or, les difficultés d'agencement sont aussi à prendre en considération pour les structures existantes. En effet dans notre cas, la taille des cuves induite par le doublement de leur capacité, empêche leur passage à travers les ouvertures de la pièce d'entreposage. Cette solution nous obligerait donc à casser une partie des murs pour agrandir ces ouvertures.

TABLEAU I
Copie d'écran du fichier de simulation sur Excel[®]. Les cases orangées sont les paramètres modifiables.
Screenshot of the simulation file on Excel[®]. The orange boxes indicated the adjustable parameters.

Semaine n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nombre de patient (Ligne de calcul, à ne pas supprimer!)	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1
Activité volumique résiduelle due à la semaine considérée après le <i>n</i> ème patient (MBq)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,7	1,3	2,3	4,3
Activité résiduelle due à la semaine considérée après le <i>n</i> ème patient (MBq)	5,0	9,1	16,6	60,9	55,8	204,2	373,9	342,4	626,9	1148,1	2102,4	3850,0

Temps de demi-vie (en j)	8,02
Nombre total de patient	15
Constante de désintégration (en j ⁻¹)	0,0654273
Nombre totale de semaine (n)	12
Volume des cuves (L)	1200
Activité volumique résiduelle après le <i>n</i> ème patient (MBq/L)	9,8
Volume total accumulé dans la cuve (L)	900
Activité volumique résiduelle après le remplissage de la seconde cuve (Bq/L)	8272
Volume de résidus rejetés (L)	60
Activité rejetée (MBq)	3850

Durée de décroissance pour obtenir une activité volumique résiduelle de 100Bq/L (en jours)	132,9
Activité volumique résiduelle après le remplissage de la troisième cuve (Bq/L)	5
Activité volumique résiduelle après le remplissage de la quatrième cuve (Bq/L)	0

Pour ajouter des patients, il suffit d'effectuer un glisser-déplacer de la deuxième colonne du tableau principal vers la droite (semaine n°2). Il suffit alors de modifier les valeurs des cellules de couleurs orangées pour adapter le planning ou changer les paramètres de la simulation (radionucléide, volume de résidus produit ou activité rejetée).

Les patients sont tous admis le même jour de la semaine orsuq'ly en a plusieurs, la même semaine, ainsi que les rejets de résidus sont effectués à des intervalles constants de 7 jours.

ORDONNANCEMENT DES CUVES DE DÉCROISSANCE

TABLEAU II

Planning illustrant la prise en charge au plus tard des patients pour n'avoir que 2 semaines d'inactivité. Cette simulation est réalisée avec les hypothèses de disposer de 2 cuves de 1250 L pour traiter 60 L par patients d'effluents contenant le premier jour, 3850 MBq d'un radioélément ayant une période de 8,02 jours.

Planning showing the later handling of patients in order to have only 2 weeks of inactivity. This simulation is made with the hypothesis to have at our disposal 2 decay tanks of 1250 L to handle 60 L of radioactive discharges per patient. These effluents contain 3850 MBq of ^{131}I the first day.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0	0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	1,0	1,0	0,0	0,0
0,2	0,4	0,8	3,0	2,7	9,9	18,2	16,6	30,4	55,8	102,1	187,0	684,7	1253,9	1148,1	0,0	0,0	0,0

Nombre total de patient	20
Nombre totale de semaine (n)	17

Activité volumique résiduelle après le <i>n</i> ème patient (MBq/L)	2,9
---------------------------------------------------------------------	-----

Durée de décroissance pour obtenir une activité volumique résiduelle de 100Bq/L (en jours)	119,0
--------------------------------------------------------------------------------------------	-------

Volume total accumulé dans la cuve (L)	1200
Activité volumique résiduelle après le remplissage de la seconde cuve (Bq/L)	100

Pour ce même taux de prise en charge de patients, cet outil de gestion démontre qu'il suffit d'ajouter seulement 1 cuve de décroissance de 1 250 L pour prendre en charge 2 patients par semaine. En outre, le fait de disposer de plusieurs petites cuves présente d'autres avantages comme une occupation du volume totale plus faible ou une possibilité de continuer à prendre des patients en charge en cas de mise hors service d'une des cuves de décroissance. Cette continuité de prise en charge est impossible lorsqu'initialement seulement 2 cuves sont disponibles car la mise en arrêt d'une des deux induit inévitablement un arrêt de la prise en charge des patients quand la seule cuve fonctionnelle est pleine.

4. Conclusions

En pratique, ce travail nous a permis de mettre au point un outil répondant à différentes questions quant à l'optimisation de la gestion des effluents liquides. En effet cet outil permet d'ajuster rapidement la prise de rendez-vous des patients en fonction du nombre et de la capacité des cuves mais aussi en fonction du nombre de patients déjà pris en charge les semaines précédentes de façon à limiter les périodes d'inactivités.

Du point de vue pratique, ce modèle prédit les nouveaux besoins pour le stockage des effluents radioactifs dans le cadre d'une augmentation pérenne de l'activité en médecine nucléaire. Ce modèle permet aussi d'évaluer l'augmentation du nombre de cuves ou de leur capacité en fonction de la configuration des locaux et de l'activité médicale.

RÉFÉRENCES

- Arrêté du 23 juillet 2008 portant homologation de la décision n° 2008-DC-0095 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 janvier 2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire l'élimination des effluents et des déchets contaminés par les radionucléides, ou susceptibles de l'être du fait d'une activité nucléaire, prise en application des dispositions de l'article R. 1333-12 du code de la santé publique. (s. d.).
- Barquero R., Basurto F., Nuñez C., Esteban R. (2008) Liquid discharges from patients undergoing ^{131}I treatments, *J. Environ. Radioact.* **99**, 1530-1534.
- Berson S.A., Yalow R.S., Sorrentino J., Roswit B. (1952) The determination of thyroidal and renal plasma I131 clearance rates as a routine diagnostic test of thyroid dysfunction, *J. Clin. Invest.* **31**, 141-158.
- ICRP (2004) Publication 94, Release of patients after therapy with unsealed radionuclides, *Ann. ICPR* **34**.
- UNSCEAR (2000). Sources and effects of ionizing radiation. Volume I Annexe D. Medical radiation exposures, United Nations, New York, 2000.