



Rapport d'expertise dosimétrique concernant l'incident survenu à la centrale nucléaire de Leibstadt impliquant la surexposition d'un collaborateur

Auteurs: Sébastien Baechler, Jean-Pascal Laedermann, Claude Bailat, François Bochud
Version finale: 10 décembre 2010

Table des matières

1. Préambule	1
2. Description de la situation d'exposition	2
3. Données dosimétriques de base.....	2
3.1. Mesures d'équivalent de dose individuel	2
3.2. Mesures d'équivalent de dose ambiant dans l'eau	3
4. Description de la source d'irradiation	5
4.1. Description générale de la source d'irradiation.....	5
4.2. Caractérisation de l'objet.....	5
4.2.1. Composition nucléidique	5
4.2.2. Evaluation des activités	6
5. Evaluation des doses individuelles	11
5.1. Evaluation de la dose aux mains	11
5.1.1. Dose à la main droite	11
5.1.2. Dose à la main gauche.....	14
5.2. Evaluation de la dose au corps entier	14
5.2.1. Estimation de la dose effective à partir des valeurs $H_p(10)$ de la surveillance de routine	14
5.2.2. Estimation de la dose effective à partir des mesures de $H^*(10)$ réalisées après l'incident	15
5.2.3. Estimation de la dose effective à partir de simulation Monte Carlo	16
5.2.4. Estimation de la dose par dosimétrie biologique.....	19
6. Conclusions	19
7. Références	19

1. Préambule

Le 31.8.2010, lors de la période de révision annuelle de la centrale nucléaire de Leibstadt (KKL), un plongeur a effectué des travaux de maintenance dans le bassin de transfert des éléments combustibles. Après avoir terminé le travail prévu et obtenu l'accord d'un collaborateur en contact avec lui, le plongeur a récupéré un objet métallique déposé au fond du bassin. Le plongeur a eu l'objet en main pendant moins d'une minute. Il l'a ensuite déposé dans un récipient (panier) destiné à transporter des outils et autres objets entre la surface et le fond du bassin. Avant que le récipient atteigne la surface, l'alarme du moniteur de dose ambiant de la zone s'est subitement déclenchée. Les collaborateurs de KKL ont alors immédiatement replongé le récipient au fond du bassin.

La manipulation de l'objet métallique par le plongeur a conduit à une irradiation localisée élevée de sa main droite. La bague dosimétrique placée à l'annulaire avec la pastille TLD orientée à l'intérieur de la main droite a indiqué une dose $H_p(0.07)$ de 1123 mSv. Le plongeur portait également des dosimètres individuels TLD pour le corps entier, positionnés sur différentes parties de son corps, et indiquant les doses $H_p(10)$ suivantes : 15

mSv à gauche au niveau de l'abdomen, 306 mSv au poignet gauche et 11.2 mSv à la cheville gauche. Par ailleurs, le dosimètre électronique actif placé au niveau du thorax, à gauche, indiquait une dose cumulée $H_p(10)$ de 40.1 mSv.

L'Institut de radiophysique du CHUV à Lausanne a été mandaté par l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) pour effectuer l'expertise dosimétrique de cet incident. Le premier but de ce rapport est d'examiner la cohérence des doses mesurées à la main droite, au niveau du tronc, au poignet gauche et à la cheville gauche afin d'estimer la dose maximale à la peau du plongeur. Deuxièmement, cette étude doit permettre de proposer une estimation fiable de la dose effective reçue par le plongeur. La reconstruction dosimétrique de l'incident est réalisée à l'aide de modèles de calculs simples ainsi que par des méthodes de Monte Carlo simulant le transport des photons et des électrons dans la matière.

2. Description de la situation d'exposition

Les différents documents, l'entretien avec les collaborateurs de KKL (9.9.2010) ainsi que les entretiens téléphoniques avec le plongeur (4 et 7.10.2010) ont permis d'aboutir aux faits suivants en vue de la reconstruction dosimétrique:

- Le plongeur (taille : 1.80 m) a maintenu l'objet dans sa main droite exclusivement pendant une durée de 30 à 60 secondes (45 ± 15 secondes).
- Afin de saisir l'objet, le plongeur a dû d'abord se coucher sur le ventre au fond du bassin. Il a alors pris l'objet de la main droite.
- Le plongeur a saisi l'objet en son milieu afin d'éviter d'endommager ses gants au contact avec les extrémités tranchantes de l'objet.
- L'objet dans sa main droite, le plongeur s'est alors redressé en se tenant à la structure métallique. Cette opération lui a pris 15 ± 5 secondes.
- Le plongeur a alors pivoté sur lui-même puis s'est dirigé vers le récipient en marchant au fond du bassin. Sur ce trajet, il a dû enjamber la structure du lift. Cette opération lui a pris en 20 et 40 secondes, i.e. 30 ± 10 secondes.
- Le plongeur a maintenu l'objet dans sa main. Tout en marchant, il a orienté l'objet dans différentes positions afin de le visualiser. L'objet a été maintenu à une distance de 40 ± 5 cm du tronc, au niveau de l'abdomen et de la taille.
- Le plongeur n'a jamais saisi l'objet à l'aide de la main gauche dans laquelle il tenait d'autres objets (ligatures en plastique, tuyau en plastique de 15-20 cm). La main gauche était distante de la main droite d'environ 30-40 cm, à l'exception de deux courts instants où 1) le plongeur s'est agrippé à des structures pour franchir la structure du lift et 2) le plongeur s'est redressé. Ce temps où la distance entre les deux mains était d'environ 5 cm est estimé à 10 ± 5 secondes.
- Après avoir déposé l'objet, le plongeur s'est immédiatement éloigné du récipient.

N.B. Lors de l'entretien téléphonique du lundi 5.10.2010, le plongeur nous a informés que le TLD de la bague dosimétrique avait été endommagé lors des travaux dans le bassin et que l'évaluation d'urgence de la dose à la main droite fut complexe. Suite à cette information, le service de dosimétrie de KKL a confirmé les faits.

3. Données dosimétriques de base

3.1. Mesures d'équivalent de dose individuel

Lors de l'incident, le plongeur portait trois dosimètres TLD passifs de type corps entier, un dosimètre TLD passif de type bague et un dosimètre électronique actif de type RAD-62 (RADOS). Ces dosimètres étaient positionnés sur le flanc gauche du plongeur, à l'exception du dosimètre bague porté à l'annulaire de la main droite avec la pastille TLD placée à l'intérieur de la main. Deux dosimètres, un badge TLD et un RAD-62, étaient placés au niveau du tronc, dans la poche gauche de la combinaison et distant d'environ 15 cm. Un autre dosimètre badge TLD était placé au poignet gauche, à l'intérieur, et un autre à la cheville gauche, à l'intérieur. Les doses $H_p(10)$ et $H_p(0.07)$ reçues par le plongeur sont indiquées dans le Tableau 1.

L'alarme du RAD-62 était activée car la dose cumulée dépassait la valeur seuil prédéfinie de 10 mSv. Cependant, le signal sonore était imperceptible lors de l'intervention dans le bassin à cause du bruit sonore ambiant élevé et de l'emplacement du RAD-62 sous la combinaison de plonger. Notons la valeur enregistrée

pour le débit d'équivalent de dose maximal $\dot{H}_{p,max}$ indiquait > 999.99 mSv car la gamme de mesure du RAD-62 doit être inférieure à 1000 mSv/h.

Tableau 1. Dosimètres individuels utilisés et doses mesurées lors de l'incident

Type d'instrument	Grandeur et dose	Remarques
Dosimètre TLD bague <i>Annulaire de la main droite</i>	$H_p(0.07) = 1123$ mSv	La pastille TLD a été endommagée lors des travaux dans le bassin
Dosimètre TLD badge <i>Poignet gauche</i>	$H_p(10) = 306$ mSv	--
Dosimètre TLD badge <i>Cheville gauche</i>	$H_p(10) = 11.2$ mSv	--
Dosimètre TLD badge <i>Tronc</i>	$H_p(10) = 15$ mSv *	--
RADOS RAD-62	$H_p(10) = 40.1$ mSv $\dot{H}_{p,max} > 1000$ mSv/h	Saturation du débit de dose maximale à 1000 mSv/h

* Après soustraction de 4.3 mSv correspondant à la dose accumulée pendant le mois avant l'incident et déterminée sur la base de la surveillance dosimétrique électronique par RAD-62.

Concernant la pastille TLD endommagée, le service dosimétrie de KKL indique que tous les morceaux du TLD, i.e. 4 pièces, ont pu être récupérés. Ces pièces ont alors été juxtaposées minutieusement à la loupe puis recollés à l'aide d'une colle instantanée. La pastille TLD alors pu être lue avec le système de lecture DOSACUS. La méthode a été validée en irradiant trois pastilles intactes avec une dose de 2.5 mSv. Une des pastilles a alors été artificiellement brisée en 3 morceaux puis recollée. La lecture de cette pastille a indiqué une dose de 2.3 mSv, donc très proche de la dose de référence. Le service de dosimétrie de KKL conclut que la méthode utilisée pour recoller la pastille n'a pratiquement pas modifié la sensibilité de la pastille.

La validation de la méthode de recollage de pastille appliquée par le service de dosimétrie de KKL se limite à une seule pastille, irradiée à une dose nettement inférieure à celle de l'incident. Par ailleurs, si la pastille était cassée avant l'irradiation, ce qui est fort probable, les résultats pourraient être différents (morceaux superposés ?). Dans tous les cas, une validation expérimentale exhaustive de la méthode utilisée par KKL pour évaluer une pastille cassée semble difficile à réaliser. De plus, l'incertitude liée à la mesure de 1123 mSv selon cette méthode n'est pas connue. Dans ces conditions, l'équivalent de dose $H_p(0.07)$ de 1123 mSv estimé à l'annulaire de la main droite du plongeur doit être considérée comme une valeur indicative.

3.2. Mesures d'équivalent de dose ambiant dans l'eau

Suite à l'incident, des mesures de débit d'équivalent de dose dans l'eau ont été réalisées à l'aide de la sonde Gamma-UHD (Ultrahochdosisleistung) FHZ 312 de ThermoFisher Scientific reliée à l'instrument de mesure FH 40 G par un câble d'une longueur de 20 m. La gamme de mesure pour cet instrument se situe entre 0.0001 et 100 Sv/h. Notons que cet instrument est étalonné en débit d'équivalent de dose ambiant $dH^*(10)/dt$ (donc dans l'air). La réponse en énergie de la sonde est montrée à la Figure 2. La sonde FHZ 312 a par ailleurs été étalonnée par le PSI en date du 27.7.2010 pour la mesure de $dH^*(10)/dt$ dans l'air avec un faisceau de ^{60}Co . Les écarts observés entre la valeur mesurée et la dose de référence étaient inférieurs à -5% entre 10 et 10'000 mSv/h, et de -9% à 20'000 mSv/h.

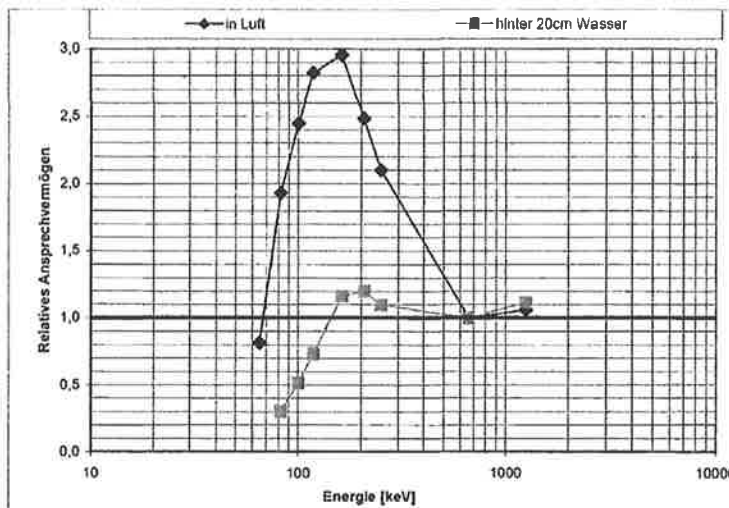


Figure 1. Réponse relative de l'équivalent de dose ambiant en fonction de l'énergie pour la sonde Gamma-UHDL FHZ 312 de ThermoFischer Scientific

La géométrie des mesures d'équivalent de dose ambiant au contact puis à différentes distances de l'objet est illustrée à la Figure 2. Les résultats des mesures sont donnés dans le Tableau 2 et représentés à la Figure 3. Notons qu'en prévision des travaux à réaliser dans la zone de travail du bassin, 5 points de mesures avaient été relevés avec des débits de dose situés entre 0.7 et 13 mSv/h. Aucun de ces 5 points ne se situait suffisamment proche de l'objet, i.e. < 1.5 m, pour avoir mesuré une contribution du rayonnement émis par cet objet.

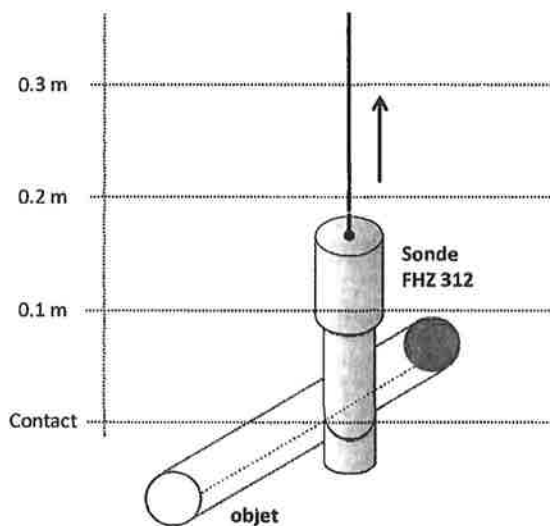


Figure 2. Description de la géométrie de mesure du débit d'équivalent de dose dans l'eau à différentes distances de l'objet.

Remarque :

Admettant que le plongeur ait maintenu l'objet dans sa main droite pendant 30 à 60 secondes avec un débit de dose au contact de l'objet mesuré > 100 Sv/h, la dose à la main sera par conséquent supérieure à 833 mSv pour une durée de 30 secondes ou supérieure à 1667 mSv pour 60 secondes. Ces résultats sont partiellement compatibles avec la dose $H_p(0.07)$ de 1123 mSv estimée à l'annulaire de la main droite.

Tableau 2. Résultats des mesures de débit de dose à différentes distances de l'objet réalisées dans le bassin par les collaborateurs de KKL.

Distance de l'objet [m]	Débit d'équivalent de dose $dH^*(10)/dt$ [mSv/h]
-------------------------	--

au contact	>100'000
à 0.1	40'000
à 0.2	10'000
à 0.3	4'000
à 0.4	1'500
à 0.5	650
à 0.6	270
à 0.7	130
à 0.8	60
à 0.9	29
à 1.0	14
à 1.1	6
à 1.2	4
à 1.3	2
à 1.4	Bruit de fond *

* Le bruit de fond ambiant était d'environ 2 mSv/h.

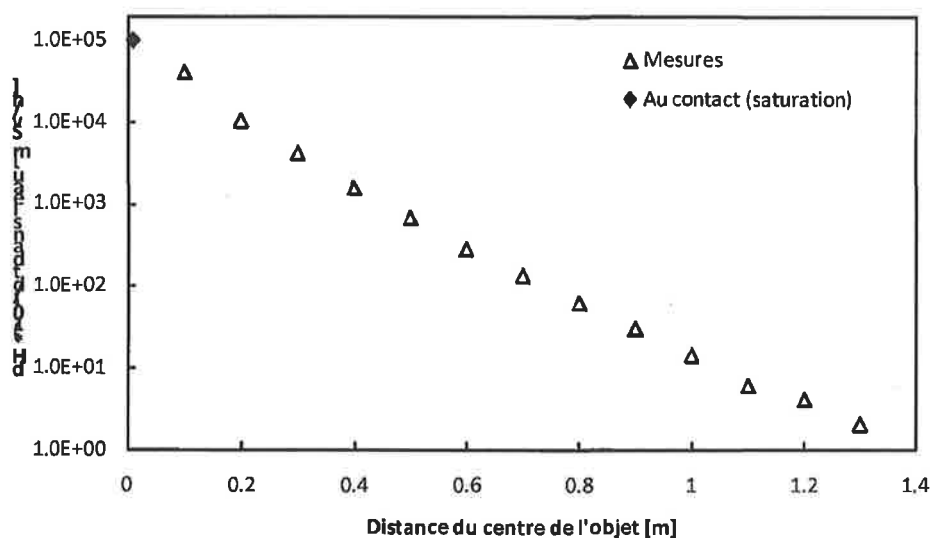


Figure 3. Débit d'équivalent de dose dans l'eau à différentes distances de l'objet. La valeur au contact correspond à un seuil inférieur car l'instrument utilisait saturait.

4. Description de la source d'irradiation

4.1. Description générale de la source d'irradiation

L'objet a été identifié comme étant l'extrémité d'un tube sec (dry tube) servant à introduire des capteurs pour réaliser des mesures (par exemples le flux de neutrons) dans le cœur du réacteur. Les dimensions exactes de l'objet sont données à l'annexe I. Il s'agit d'un objet de forme cylindrique en acier d'un diamètre de 1.5 cm et d'une longueur de 35 cm. La composition élémentaire de l'objet est parfaitement connue sur la base d'un certificat (voir annexe II). Il s'agit d'un alliage de type ASME-SA479 304 L. Cet alliage ferreux riche en Cr (18-20%) et Ni (8-12%) est utilisé pour ces capacités de résistance à la corrosion. En raison des dernières interventions réalisées sur les tubes à sec du réacteur, il est vraisemblable que l'objet repose au fond du bassin depuis 2006.

4.2. Caractérisation de l'objet

4.2.1. Composition nucléidique

Pour des raisons de radioprotection, il n'a pas été jugé acceptable de réaliser des mesures supplémentaires par spectrométrie gamma. Cependant, les produits d'activation peuvent être déterminés à partir de la composition élémentaire de l'objet. L'objet étant hors du faisceau de neutrons depuis environ 4 ans, les trois produits d'activation suivants sont généralement présents dans ce type d'alliage : ^{55}Fe ($T_{1/2} = 2.7$ a), ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.3$ a) et ^{63}Ni ($T_{1/2} = 100$ a). Le ^{55}Fe émet des rayons X de très faible énergie (6 keV à 28 %) et des électrons Auger qui sont fortement absorbés dans la couche morte externe de la peau. Le ^{63}Ni émet des β^- avec une

énergie maximale de 65.9 keV qui sont donc totalement absorbés dans la couche morte de la peau. Il est par conséquent acceptable de considérer que le ^{60}Co , provenant de l'activation ^{59}Co présent à 0.05% dans l'alliage ASME SA-479 type 304L domine très largement la composante du débit de dose à distance. L'activité en ^{60}Co de l'objet est estimée dans les sections qui suivent.

4.2.2. Evaluation des activités

4.2.2.1 Estimation de l'activité à partir des débits de dose à distance de l'objet

A. Estimation de l'activité par Microshield 5.0

Un objet simplifié constitué exclusivement de fer (densité de 7.86 g/cm^3), d'un diamètre de 1.5 cm et d'une longueur de 35 cm a été défini dans le logiciel de calcul de blindage Microshield 5.0. L'objet est entouré par un cylindre d'eau dont l'épaisseur varie entre 0.1 et 1.4 m (voir Figure 4). Le débit d'équivalent de dose ambiant $dH^*(10)/dt$ est alors déterminé au milieu de l'objet, à la surface du cylindre d'eau. Les calculs sont effectués pour un objet avec une activité nominale de 100 GBq de ^{60}Co . Les résultats sont donnés avec et sans prise compte du « Buildup » dans l'eau. L'activité de l'objet peut alors être estimée en comparant les valeurs de $dH^*(10)/dt$ calculées par Microshield à celles mesurées dans le bassin, pour une distance correspondante. Afin de pouvoir comparer ces deux grandeurs aux mieux, les mesures de $dH^*(10)/dt$ dans l'eau sont divisées par le facteur de conversion $H^*(10)/K_a$ du ^{60}Co , i.e. 1.17 Sv/Gy (ICRP 74). On admet que la contribution du rayonnement rétrodiffusé dans l'eau correspond plus ou moins à celle produite par une sphère ICRU dans l'air. Les résultats sont donnés dans le Tableau 3. La distance indiquée correspond à la distance entre la surface de l'objet et le point de mesure, i.e. la surface du cylindre d'eau. L'activité moyenne de la source estimée par cette méthode est de $2.35 \text{ TBq} \pm 0.41$ ($k=2$).

Tableau 3. Débit d'équivalent de dose ambiant calculé par Microshield et estimation de l'activité de l'objet par comparaison avec les mesures d'équivalent de dose dans l'eau.

Distance [m]	dH*(10)/dt par Microshield pour 100 GBq [mSv/h]		dH*(10)/dt mesurée dans l'eau corrigé* [mSv/h]	Activité estimée [GBq]
	avec buildup	sans buildup		
0.1	1.32E+03	6.44E+02	34'188	2'596
0.2	3.61E+02	1.29E+02	8'547	2'369
0.3	1.29E+02	3.54E+01	3'419	2'648
0.4	5.23E+01	1.14E+01	1'282	2'452
0.5	2.27E+01	4.05E+00	556	2'444
0.6	1.03E+01	1.54E+00	231	2'238
0.7	4.81E+00	6.14E-01	111	2'309
0.8	2.30E+00	2.54E-01	51	2'234
0.9	1.12E+00	1.08E-01	25	2'221
1.0	5.50E-01	4.72E-02	12	2'176
1.1	2.73E-01	2.10E-02	5.1	1'876
1.2	1.37E-01	9.48E-03	3.4	2'503
1.3	6.87E-02	4.34E-03	1.7	2'487
1.4	3.49E-02	2.01E-03	--	--
			Moyenne	2'350
			Ecart-type	206

* Mesures corrigées par le facteur de conversion $H^*(10)/K_a$ du ^{60}Co , i.e. (1.17 Sv/Gy).

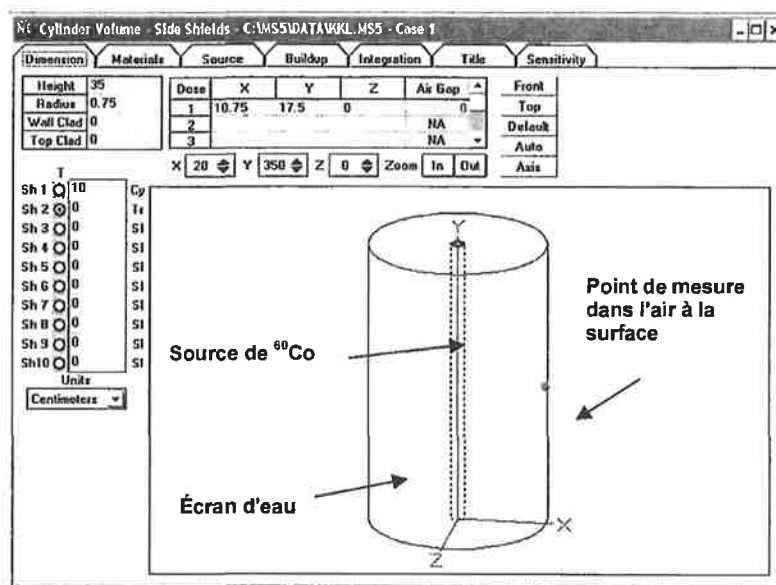


Figure 4. Géométrie des mesures de $H^*(10)$ en fonction de la distance définie dans le logiciel de calcul Microshield 5.0.

B. Estimation de l'activité par Monte Carlo

La géométrie de l'objet réel décrit à l'annexe 1 avec la composition élémentaire de l'annexe 2 a été introduite dans le fichier d'entrée (inp) de MCNPX 2.5.0. Cette géométrie est représentée à la Figure 5. Autour de l'objet, 35 « tallies » (ou accumulateurs des dépôts d'énergie) annulaires de 1 cm de hauteur et de 10 μm d'épaisseur sont définies afin de calculer le débit de dose absorbée dans l'eau à différentes distances (0.05, 0.1, 0.3, 0.5 et 0.7 m). L'activité massique (Bq/g) est considérée comme constante sur toute la partie métallique de l'objet. Le nombre d'événements simulés (trigs) varie entre 10 et 100 millions afin de garantir une incertitude statistique de l'ordre de 1%. Comme précédemment, l'activité de l'objet peut être estimée en comparant les débits de dose absorbée dans l'eau calculés par MCNPX à celles mesurées dans le bassin, pour une distance correspondante. Afin de pouvoir comparer ces deux grandeurs au mieux, les mesures de $dH^*(10)/dt$ dans l'eau sont converties en débit de dose absorbée dans l'eau en les divisant par le facteur de conversion $H^*(10)/K_a$ du ^{60}Co , i.e. 1.17 Sv/Gy (ICRP 74).

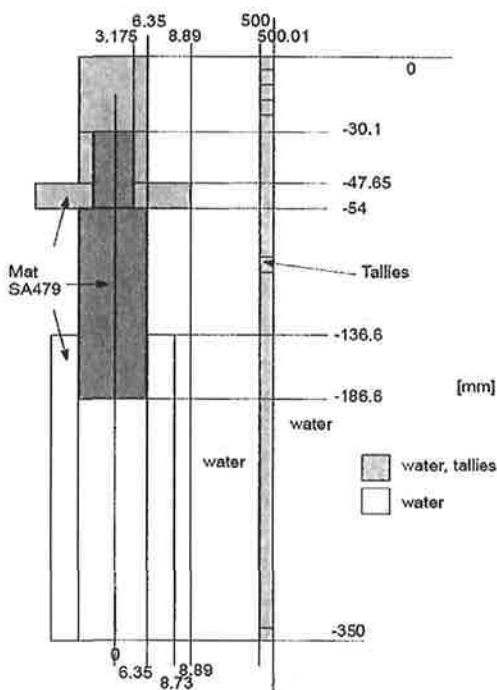


Figure 5. Géométrie de l'objet définie dans le fichier d'entrée de MCNPX.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 4. La distance définie est la distance horizontale entre l'axe de l'objet et la série de « tallies ». Pour une distance de 10 cm, le débit de dose absorbée décroît de 20 à 30% lorsque l'on s'éloigne d'environ 10 cm du milieu de l'objet. L'activité moyenne de la source estimée par cette méthode est de $2.2 \text{ TBq} \pm 0.2$ ($k=2$), donc parfaitement compatible avec l'activité obtenue par les calculs de Microshield. La Figure 6 montre l'excellent accord obtenu entre les débits d'équivalent de dose ambiant calculés par Microshield et les débits de dose absorbée dans l'eau calculés par MCNPX. On notera en particulier la nette augmentation du débit de dose pour les distances inférieures à 0.1 m, qui s'explique par la forme de l'objet. Ceci indique que le débit de dose mesuré par le débitmètre en contact (voir Tableau 2) est très clairement sous-estimé.

Sur la base des estimations réalisées à partir des débits de dose calculés par Microshield et par Monte Carlo, l'activité de l'objet est donc estimée à $2.3 \pm 0.4 \text{ TBq}$.

Remarque :

En effectuant les simulations MCNPX en remplaçant l'eau par de l'air à l'arrière des « tallies », les valeurs de débit de dose sont réduites de 20 à 30% en raison de la diminution de rayonnement rétrodiffusé par l'eau. Cette contribution de 20-30% de rayonnement rétrodiffusé est proche de celle obtenue lors du passage du kerna dans l'air à l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$: 23% à 0.5 MeV et 17% à 1 MeV (ICRP 74).

Tableau 4. Débit de dose absorbée dans l'eau calculé par MCNPX au milieu de l'objet à différentes distances et estimation de l'activité de l'objet par comparaison avec les mesures de débit d'équivalent de dose dans l'eau.

Distance [m]	Débit de dose absorbée dans l'eau pour 100 GBq [mGy/h]	dH*(10)/dt mesurée dans l'eau corrigé [mSv/h] *	Activité estimée [GBq]
0.05 m	4.680E+03	--	
0.1 m	1.625E+03	34'188	2'104
0.3 m	1.460E+02	3'419	2'342
0.5 m	2.520E+01	556	2'205
0.7 m	5.097E+00	111	2'180
		Moyenne	2'208
		Ecart-type	99

* Mesures corrigées par le facteur de conversion H*(10)/K_a du ⁶⁰Co, i.e. (1.17 Sv/Gy).

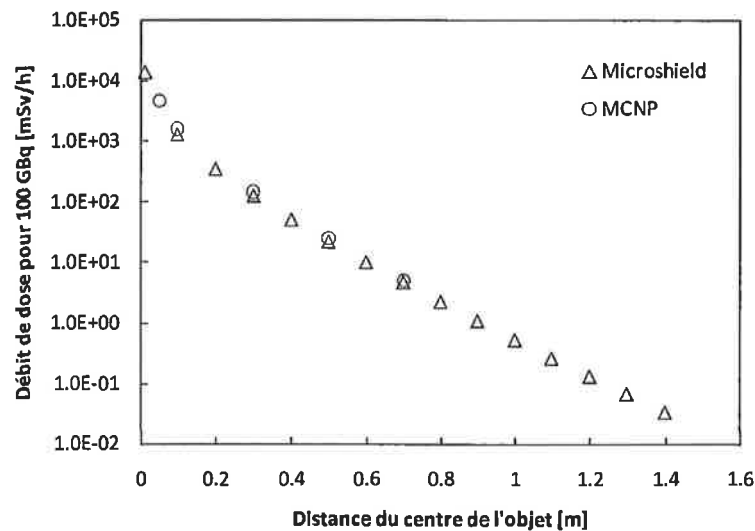


Figure 6. Comparaison entre les débits d'équivalent de dose ambiant calculés par Microshield et les débits de dose absorbée dans l'eau calculés par MCNPX pour une activité de 100 GBq.

C. Vérification sur la base d'un calcul analytique simple

Afin de vérifier l'activité estimée ci-dessus, un calcul analytique simple considérant une source ponctuelle et un point de mesure situé à 50 cm de l'objet a été réalisé. Pour une source ponctuelle, le taux de fluence par unité d'activité est donné par l'expression :

$$\frac{\phi}{A} = \frac{B(\mu x) \cdot e^{-\mu x}}{4\pi r^2} \tag{1}$$

ϕ = taux de fluence, photons/(cm²·s)

A = Activité de la source, photon/s

B = facteur de buildup dans l'eau, dépend du produit μx , i.e. le nombre de MFPs

r = distance entre la source et le point de mesure, soit 50 cm

Tableau 5. Valeur utilisés pour les calculs analytiques.

Energie [keV]	μ/ρ [cm ² /g]	μx [-]	B(μx)	H*(10)/ ϕ [Sv·cm ²]
1173	$6.53 \cdot 10^{-2}$	3.27	5.77	$5.79 \cdot 10^{-12}$
1332	$6.12 \cdot 10^{-2}$	3.06	4.96	$6.33 \cdot 10^{-12}$

A l'aide des valeurs fournies dans le

Tableau 5, le taux de fluence est déterminé pour les photons de 1173 keV et 1332 keV du ⁶⁰Co à l'aide de l'équation (1) comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\phi_{1173}}{A} &= \frac{5.77 \cdot e^{-3.27}}{4\pi 50^2} = 6.98 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \\ \frac{\phi_{1332}}{A} &= \frac{4.96 \cdot e^{-3.06}}{4\pi 50^2} = 7.40 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

Les coefficients de conversion de la fluence en équivalent de dose ambient H*(10) sont obtenus à partir de la publication ICRP 74 par extrapolation linéaire. L'intensité des deux émissions γ du ⁶⁰Co étant d'environ 100%, le débit d'équivalent de dose ambient H*(10) par unité d'activité à 50 cm d'une source ponctuelle est de :

$$\frac{H^*(10)}{A} = \left\{ \frac{\phi_{1173}}{A} \cdot [H^*(10)/\phi]_{1173} + \frac{\phi_{1332}}{A} \cdot [H^*(10)/\phi]_{1332} \right\} \cdot 3600 = 3.14 \cdot 10^{-10} \text{ mSv/h par Bq} \quad (3)$$

Le débit de dose corrigé mesuré à 50 cm étant de 556 mSv/h, (voir Tableau 2), on obtient alors une activité de 1.8 TBq. Cet écart de -22% avec les estimations précédentes s'explique par le fait que la distance moyenne à la source est plus grande pour un objet de 35 cm que pour une source ponctuelle. Ainsi, le débit d'équivalent de dose ambient H*(10) par unité d'activité calculé à l'équation (3) a été surestimé dans cette situation simplifiée. L'ordre de grandeur est cependant bien correct.

4.2.2.2 Estimation de l'activité à partir du flux neutronique

Selon le rapport fourni par KKL, le flux de neutrons thermiques incident sur l'objet positionné dans le cœur du réacteur pendant 22 ans, c'est-à-dire depuis la mise en service de la centrale jusqu'en 2006, est estimé à $20 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ avec une incertitude de 30% ($k=2$). Le flux de neutrons moyen par seconde est alors de $2.9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. L'équation générale pour le calcul de l'activité, A, par activation neutronique est définie comme suit :

$$A = N \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t_{\text{irr}}}{T_{1/2}}} \right) \cdot 2^{-\frac{t_r}{T_{1/2}}} \quad \text{avec} \quad N = N_A \cdot \frac{m}{w} \cdot \theta \quad (4)$$

N = nombre d'atomes de l'isotope cible

σ = section efficace d'activation (n, γ), barns

ϕ = flux de neutrons, $2.9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

$T_{1/2}$ = période radioactive de l'isotope

t_{irr} = temps d'irradiation, 22 ans

t_r = temps écoulé depuis la fin de l'irradiation, 4 ans

N_A = nombre d'Avogadro, $6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

m = masse de l'élément de l'objet irradié, g

w = masse atomique de l'élément, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

θ = abondance isotopique

La masse absolue des éléments d'intérêt est déterminée à partir de la composition de l'objet décrite dans l'annexe 2 et la masse totale de l'objet estimée à 380 g. Les sections efficaces sont celles publiées par le

National Nuclear Data Center du Brookhaven National Laboratory (<http://www.nndc.bnl.gov/>). Les données utilisées ainsi que les résultats obtenus pour les activités calculées à partir de l'équation (4) sont donnés au Tableau 6.

Tableau 6. Produits d'activation principaux de l'objet au moment de l'incident.

Produits d'activation	Réaction	$\sigma_{(n,\gamma)}$ [barn]	m [g]	θ [%]	Activité [GBq]
^{63}Ni	$^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$	14.5	33.06	3.59	667
^{60}Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	37	0.19	100	1'160
^{55}Fe	$^{54}\text{Fe}(n,\gamma)^{55}\text{Fe}$	2.25	268	5.8	4'040

L'activité obtenue pour le ^{60}Co est de 1.2 ± 0.3 TBq. Cette valeur n'est pas compatible avec l'activité estimée à partir des débits de dose à distance de l'objet.

Selon nos estimations, l'activité de l'objet en ^{60}Co se situe entre 0.9 et 2.7 TBq. Dans la section qui suit, une activité de 1.8 ± 0.9 TBq sera utilisée pour les calculs.

5. Evaluation des doses individuelles

5.1. Evaluation de la dose aux mains

5.1.1. Dose à la main droite

Le plongeur portait des gants en néoprène d'une épaisseur de 0.075 cm. Selon le NIST, les concentrations massiques du néoprène (densité de 1.23 g/cm³) sont les suivantes: H (5.69%), C (54.3%) et Cl (40.0%). Comme les électrons d'énergie supérieure à 70 keV sont capables de pénétrer l'épiderme, i.e. la couche protectrice de la peau épaisse de 70 μm , il est nécessaire de déterminer si le gant en néoprène suffit à stopper les électrons (β^-) émis par le ^{60}Co ($E_{\text{max}} = 318$ keV). Sur la base de la formule empirique valable pour les électrons d'énergie inférieure à 2.4 MeV, on obtient une portée maximale dans l'eau de :

$$R = 412 \cdot E_{\text{max}}^{1.265} - 0.0954 \cdot \ln(E_{\text{max}}) = 0.085 \text{ cm} \quad (4)$$

La portée des électrons du ^{60}Co dans l'eau, 0.085 cm, est par conséquent légèrement supérieure à l'épaisseur du gant néoprène. On ne peut donc pas exclure que des électrons puissent traverser le gant en néoprène. Cependant, sous ce gant, le plongeur portait un second gant en Latex d'une épaisseur de 0.020 cm. Par ailleurs, la densité du néoprène est plus élevée que celle de l'eau pour laquelle la formule (4) s'applique. On peut donc s'attendre à ce que la contribution des β^- du ^{60}Co à la dose à la peau de la main droite soit extrêmement faible.

A. Estimation de la dose à la peau par Microshield 5.0

Une première estimation très approximative de la dose à la main droite peut être réalisée sur la base du calcul de débit de dose en surface $H'(0.07)$ par Microshield derrière 1 cm d'eau depuis la surface de l'objet (géométrie analogue à celle de la Figure 4). Pour des distances < 1 cm entre la surface de la source et le point de mesure, on sort du domaine de validité de Microshield. Un calcul est tout de même réalisé à 0.1 cm d'eau de l'objet. Les résultats sont donnés dans le Tableau 7 indique pour 1 cm d'eau un débit d'équivalent de dose directionnel, $H'(0.07)$, de 15'100 mSv/h pour 100 GBq, c'est-à-dire 271'800 mSv/h pour 1.8 TBq. En remplaçant l'eau par de l'air, les débits sont plus élevés de 4%.

Tableau 7. Débit d'équivalent de dose en surface $H'(0.07)$ calculé à proximité de l'objet à l'aide de Microshield.

Distance [cm]	$H'(0.07)$ par Microshield 5.0 pour 100 GBq [mSv/h]		$H'(0.07)$ pour 1.8 TBq [mSv/h]
	avec buildup	sans buildup	avec buildup
1	1.51E+04	1.07E+04	2.72E+05
0.1	3.70E+04	2.80E+04	6.67E+05

Tableau 8. Estimation de la dose à la peau à partir des valeurs de débit d'équivalent de dose en surface à 1 cm de l'objet pour plusieurs durées de présence de l'objet dans la main.

Durée de présence dans la main [seconde]	Dose à la peau [mSv]
30''	2'270
45''	3'400
60''	4'530

Cette première estimation indique une dose à la peau de l'ordre de 2.3 à 4.5 Sv à une distance de 1 cm de l'objet. Selon le manuel du programme Microshield, ces valeurs pourraient plus que doubler au contact, c'est-à-dire à 0.1 cm.

B. Estimation de la dose à la peau par Monte Carlo

Sur la base de la géométrie de l'objet réel introduite dans MCNPX 2.5.0., 35 « tallies » annulaires de 1 cm de hauteur et de 10 µm d'épaisseur ont été définies afin de calculer le débit de dose absorbée dans un tissu à une profondeur de 70 µm. Entre l'objet et le tissu, une épaisseur de 0.75 mm de néoprène a été ajoutée ainsi que 0.20 mm de Latex afin de simuler les deux gants portés par le plongeur lors de l'incident. Cette géométrie est représentée à la Figure 7. Les résultats sont représentés à la Figure 8. Le plongeur ayant tenu l'objet au milieu, les intervalles de dose possibles en fonction de la durée de présence de l'objet dans la main ont été déterminés et sont donnés dans le Tableau 9.

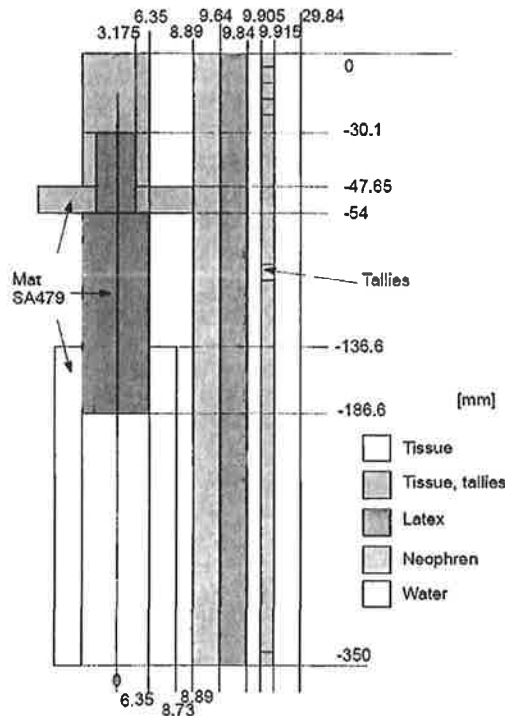


Figure 7. Géométrie de l'objet définie dans le fichier d'entrée de MCNPX pour le calcul de la dose à la main droite.

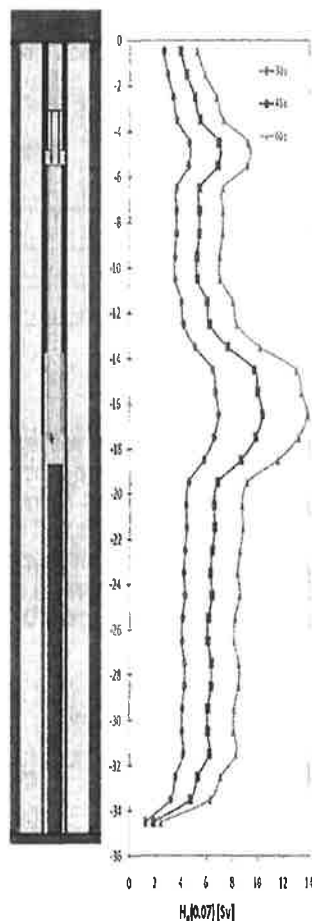


Figure 8. Résultats de MCNPX indiquant la dose à la peau, $H_p(0.07)$, à différente position le long de l'objet.

Tableau 9. Estimation de la dose à la peau à partir des calculs de $H_p(0.07)$ dans l'eau avec MCNPX.

Durée de présence dans la main [seconde]	Dose à la peau [Sv]
30''	Entre 3.5 et 6.9 Sv
45''	Entre 5.3 et 10.4 Sv
60''	Entre 7.0 et 13.9

En considérant une activité de l'objet de 1.8 TBq, les doses à la main droite calculées se situent entre 3.5 et 13.9 Sv. En considérant la durée de présence la plus probable, soit 45 secondes, la dose se situe entre 5.3 et 10.4 Sv. Ces valeurs sont incompatibles avec la dose aux extrémités de 1.123 Sv mesurée à l'aide du dosimètre bague placé à l'annulaire. C'est le cas même en considérant l'incertitude de ± 0.9 TBq et donc une activité minimale possible de 0.9 TBq : les doses sont alors de 1.75 Sv et 6.9 Sv pour 30'' et 60'', respectivement.

Il est cependant probable que l'objet n'était pas directement en contact avec la bague dosimétrique. Pour tester cette hypothèse, les calculs par Monte Carlo ont été répétés en considérant successivement une épaisseur de 1 cm et 2 cm d'eau entre la surface de l'objet et le tissu. Les intervalles de dose possibles pour une activité de l'objet de 1.8 TBq sont alors donnés dans le Tableau 10. Dans ce cas, l'intervalle de dose pour une distance objet-peau de 2 cm et une durée de présence dans la main de 30 secondes sont compatibles avec la dose aux extrémités de 1.123 Sv mesurée à l'aide du dosimètre bague placé à l'annulaire.

Tableau 10. Estimation de la dose à la peau à partir des calculs de $H_p(0.07)$ dans l'eau avec MCNPX en considérant une distance de 1 cm et 2 cm entre la surface de l'objet et la peau.

Durée de présence dans la main [seconde]	Dose à la peau	
	Distance peau – objet = 1 cm [Sv]	Distance peau – objet = 2 cm [Sv]
30''	Entre 1.6 et 2.7	Entre 1.0 et 1.7
45''	Entre 2.4 et 4.0	Entre 1.6 et 2.5
60''	Entre 3.3 et 5.4	Entre 2.1 et 3.3

5.1.2. Dose à la main gauche

La main gauche était distante de la main droite d'environ 30 à 40 cm, à l'exception de courts instants lorsque le plongeur s'est redressé de sa position couchée et lorsqu'il s'est agrippé pour enjamber la structure du lift (durée estimée à 10 secondes selon le témoignage du plongeur). On peut alors estimer une distance entre les deux mains de l'ordre de 5 cm. Les différents scénarii sont présentés dans le Tableau 11. On obtient une dose à la main gauche située entre 310 et 344 mSv avec une incertitude globale supplémentaire estimée à 50% en raison des incertitudes liées à la durée d'exposition et à la distance lorsque la main gauche était proche de la main droite. Ces valeurs sont compatibles avec la valeur de $H_p(0.07)$ de 306 mSv mesurée au niveau du poignet gauche.

Tableau 11. Dose à la main gauche en fonction de différents scénarii.

Durée totale [seconde]	Durée [seconde]	Distance [m]	Débit de dose [mSv/h]	Dose [mSv]	Dose totale [mSv]
30''	10''	0.05	104'000*	288	310
	20''	0.3	4'000	22	
45''	10''	0.05	104'000*	288	332
	40''	0.3	4'000	44	
60''	10''	0.05	104'000*	288	344
	50''	0.3	4'000	56	

* Débit de dose déterminé par MCNPX et reporté dans le Tableau 4, puis corrigé pour une activité de 2.7 TBq.

5.2. Evaluation de la dose au corps entier

5.2.1. Estimation de la dose effective à partir des valeurs $H_p(10)$ de la surveillance de routine

Rappelons que les grandeurs opérationnelles pour la surveillance dosimétrique individuelle du corps entier sont $H_p(10)$ et $H_p(0.07)$. Ces grandeurs sont mesurées à l'aide d'un dosimètre passif porté au niveau de la poitrine ou sur l'abdomen, selon l'article 11 de l'Ordonnance sur la dosimétrie individuelle (Odosim.). L'article 12 de l'Odosim. précise que les travailleurs doivent porter plusieurs dosimètres quand la valeur de dose indiquée par un seul dosimètre n'est pas représentative à cause de l'inhomogénéité du champ. C'était le cas du plongeur qui portait 3 dosimètres passifs (abdomen, poignet, cheville). En effet, les débits d'équivalent de dose ambiant mesurés en 5 points avant l'intervention dans le bassin au voisinage de la zone de travail variaient entre 0.7 et 13 mSv/h. En présence d'un champ d'irradiation inhomogène, la détermination de la dose effective se base alors sur les doses corporelles partielles (Odosim, art. 12). La dose effective ne peut de ce fait être uniquement estimée à l'aide de la valeur de $H_p(10)$ mesurée par le dosimètre porté à la poitrine.

La dose équivalente à chaque organe H_T est déterminée à l'aide d'une estimation de $H_p(10)$ dans la région du corps où se trouve l'organe. Pour ce faire, nous proposons de diviser le corps en 4 compartiments : la tête/thorax, l'abdomen/pelvis, les bras et les jambes. Pour chacun de ces compartiments, un facteur de pondération w_T global a été estimé, comme décrit à l'annexe 3. Pour chacun de ces compartiments, la dose H_T est estimée à l'aide de la valeur $H_p(10)$ mesurée la plus proche. Les résultats ainsi que la dose effective reçue par le plongeur sont donnés dans le Tableau 12. La dose effective obtenue est d'environ 28 mSv. Notons que cette estimation suppose que la dose est homogène pour chacun des compartiments. On attend cependant des doses aux organes supérieures sur le flanc droit du plongeur en raison de la position de l'objet dans la main droite du plongeur. Comme toutes les valeurs de $H_p(10)$ ont été mesurées sur le flanc gauche du plongeur, cette méthode sous-estime probablement la dose effective.

Tableau 12. Résultats de l'estimation de la dose effective reçue par le plongeur à l'aide des mesures de $H_p(10)$ en surveillance de routine.

Compartiments	$H_T = H_p(10)$ [mSv]	w_T	$H_T \cdot w_T$ [mSv]
Tête/thorax	40.1	0.436	17.5
Abdomen/Pelvis	15	0.525	7.88
Bras	306	0.007	2.14
Jambes	11.2	0.012	0.13
Dose effective			27.65

5.2.2. Estimation de la dose effective à partir des mesures de $H^*(10)$ réalisées après l'incident

A la section précédente, la dose effective a été déterminée sur la base des doses corporelles partielles car le plongeur portait plusieurs dosimètres du corps entier. L'estimation de la dose effective étant supérieure à 20 mSv, la dose effective et les doses délivrées aux organes doivent être déterminées individuellement pour le plongeur d'après les connaissances actuelles de la science et de la technique (annexe 5 de l'ORaP). La valeur ainsi déterminée permettra de confirmer si la limite de dose au corps entier de 20 mSv a effectivement été dépassée.

A l'aide des témoignages du plongeur, nous avons estimé les distances entre le milieu de l'objet et 4 points sur le tronc de l'individu: thorax gauche, thorax droite, abdomen gauche, abdomen droite (voir Tableau 13). A partir des débits d'équivalent de dose mesurés dans l'eau à différentes distances (voir Tableau 2), la dose est déterminée pour ces 4 points en fonction de différents scénari (durées du trajet avec l'objet en main de 30", 45 et 60").

Sur la base de résultats donnés dans le Tableau 13, on constate que la dose moyenne au thorax et la dose moyenne à l'abdomen sont égales. Par conséquent, la dose effective se situe entre 13 et 46 mSv. La valeur obtenue pour la partie gauche du thorax/abdomen, entre 5 et 25 mSv, est compatible avec la valeur de $H_p(10)$ mesurée par le dosimètre passif, soit 15 mSv. Par contre, la valeur de $H_p(10)$ mesurée à l'aide du dosimètre électronique RAD-62, soit 40.1 mSv, est en dehors de cet intervalle. C'est toujours le cas si l'on considère l'incertitude relative combinée de 30% estimée pour cette grandeur à partir des données du fournisseur. Un débit de dose de l'ordre de 1 Sv/h ne pose pas de problème pour le RAD-62 à l'énergie du ^{60}Co [1]. Cette différence peut s'expliquer par les mouvements de l'objet exercés par le plongeur entre le moment où il a saisi l'objet, s'est agenouillé puis s'est redressé. On ne peut en effet pas exclure que pendant un court instant l'objet se situait plus proche du thorax que de l'abdomen.

Tableau 13. Estimation de la dose pour 4 régions différentes du tronc du plongeur en fonction de la durée du parcours.

Partie du corps	Distance [cm]	Dose [mSv]		
		Durée 30 s	Durée 45 s	Durée 60 s
Thorax G	40 à 50	5-13	8-19	11-25
Thorax D	30 à 35	21-33	31-50	41-67
Thorax moyen		13-23	20-35	26-46
Abdomen G	40 à 50	5-13	8-19	11-25
Abdomen D	30 à 35	21-33	31-50	41-67
Abdomen moyen		13-23	20-35	26-46

L'estimation de la dose effective de 28 mSv dérivée des mesures $H_p(10)$ de surveillance de routine lors de l'incident est compatible avec l'intervalle de dose de 20 à 35 mSv correspondant à la durée de parcours la plus probable, soient 45 secondes.

Remarque :

Concernant le dosimètre porté à la cheville gauche indiquant une valeur de $H_p(10)$ de 11.2 mSv, il était situé à environ 1 m de l'objet lorsque le plongeur était en position debout. La dose attendue à cette distance pour une durée de 30 à 60 secondes est de l'ordre de 0.1 à 0.3 mSv. Après discussion avec le plongeur, nous faisons