



# Calcul de l'exposition moyenne annuelle aux rayonnements ionisants en Belgique: Méthodologie et Evolution

AFCN - Departement Santé et Environnement  
Service Protection de la Santé

Petra Willems, Phd  
[Petra.Willems@fanc.fgov.be](mailto:Petra.Willems@fanc.fgov.be)

Thibault Vanaudenhove, Phd  
[Thibault.Vanaudenhove@fanc.fgov.be](mailto:Thibault.Vanaudenhove@fanc.fgov.be)

# Calcul de l'exposition moyenne annuelle aux rayonnements ionisants en Belgique: Méthodologie et Evolution

---

## A. Introduction

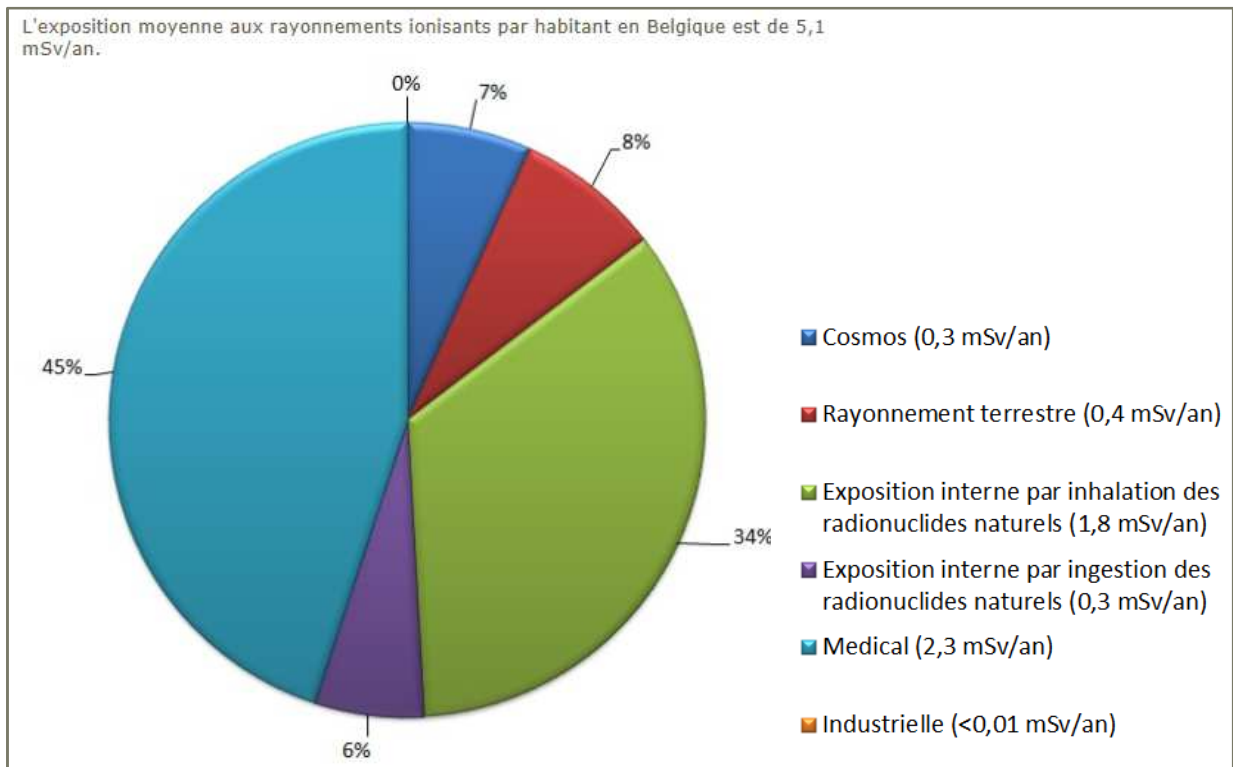
L'exposition de la population aux rayonnements ionisants englobe un large éventail de sources de rayonnements. Certains éléments chimiques, naturellement radioactifs, sont présents dans notre environnement. D'autres formes de rayonnements ionisants d'origine naturelle émanent de la terre ou proviennent du cosmos. En outre, les rayonnements ionisants sont utilisés par l'homme dans diverses applications qui constituent autant de sources d'exposition artificielles. Les applications des rayonnements ionisants concernent une large gamme d'activités, de la production électrique des centrales nucléaires à l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins de diagnostic et de traitement médical en passant par toute une série d'applications industrielles.

L'exposition de chaque membre de la population considéré individuellement varie sensiblement d'un cas à l'autre. Certaines sources, comme le rayonnement cosmique, exposent chaque membre de la population aux radiations, tandis que dans le cas des expositions médicales, seuls les individus qui subissent des examens radiologiques sont exposés aux rayonnements ionisants. La dose efficace annuelle ne reflète donc pas la dose exacte que reçoit chaque Belge. La véritable dose reçue par chaque individu varie sensiblement selon son domicile, son exposition médicale individuelle, une éventuelle exposition professionnelle, le nombre d'heures passées dans un avion au cours de l'année considérée et bien d'autres facteurs encore. Cependant, la dose efficace annuelle reçue par la population belge, appelée communément « dose population », constitue un instrument utile pour étudier l'évolution des expositions au fil des ans et l'actualisation régulière de cette dose population permet d'anticiper les tendances éventuelles qui requièrent une attention particulière.

Dans le présent document, l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire tente de passer en revue les diverses sources de rayonnements ionisants qui contribuent à l'exposition de la population belge. Lorsqu'aucune donnée belge n'était disponible, l'Agence s'est tournée vers la littérature récente la plus représentative de la situation en Belgique.

La dose mentionnée pour chaque source est en fait la dose annuelle par habitant estimée sur base des données disponibles les plus récentes. Cette dose est une valeur moyenne de la somme des doses reçues individuellement par chaque personne, divisée par le nombre d'habitants que compte la population belge totale. Les valeurs définitives représentent une estimation qui est sujette à de nombreuses incertitudes et variations et elles ne peuvent en aucun cas être individualisées sans tenir compte des caractéristiques et des facteurs environnementaux de cette personne.

L'estimation la plus récente de la dose population en Belgique a été calculée en 2012 et elle porte sur la dose reçue par un habitant moyen de Belgique en 2010. Seule la synthèse générale de cette étude a été publiée sur le site web de l'AFCN sous forme d'un diagramme (1) :



**Figure 1** : L'exposition moyenne aux rayonnements ionisants en Belgique en 2010.

## Sommaire

A. Introduction .....	2
B. Dose population : méthodologie de calcul et évolution des données.....	5
1. Exposition au rayonnement naturel .....	5
1.1. Exposition externe .....	5
1.1.1. Exposition au rayonnement cosmique.....	5
1.1.2. Exposition résultant du rayonnement terrestre .....	6
1.1.3. Exposition externe totale au rayonnement naturel.....	8
1.1.4. Validation des données.....	8
1.2. Exposition interne.....	9
1.2.1. Exposition interne au Radon et Thoron .....	9
1.2.1.1 Exposition aux produits de filiation du radon par inhalation .....	10
1.2.1.2 Exposition au radon par inhalation.....	11
1.2.1.3 Exposition au radon par ingestion.....	11
1.2.1.4 Exposition au thoron et à ses produits de filiation .....	11
1.2.1.5 Exposition totale au radon et au thoron par inhalation .....	11
1.2.2. Expositions internes aux radionucléides naturels autres que le radon et le thoron .	12
1.2.3. Exposition interne totale au rayonnement naturel.....	12
1.3. Exposition totale au rayonnement naturel : .....	12
2. Exposition au rayonnement d'origine artificielle.....	13
2.1. Installations nucléaires.....	13
2.1.1. Les installations nucléaires belges .....	13
2.1.2. Contrôle et impact des rejets radioactifs .....	13
2.2. Retombées nucléaires .....	15
2.2.1. Exposition au rayonnement provenant de Tchernobyl.....	15
2.2.2. Exposition au rayonnement provenant de Fukushima .....	16
2.3. Exposition à la radioactivité artificielle présente dans l'alimentation.....	16
2.4. Exposition totale aux applications industrielles.....	17
2.5. Exposition dans le cadre d'activités professionnelles.....	17
2.6. Expositions médicales .....	19
2.6.1. Distribution et nombres .....	20
2.6.2. Exposition due aux applications médicales .....	23
C. La dose reçue en 2015 par la population belge dans le cadre de son exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle et artificielle. ....	28
D. Evolution de la dose population en Belgique.....	29
Bibliographie.....	31
Liste des figures.....	33

## B. Dose population : méthodologie de calcul et évolution des données

### 1. Exposition au rayonnement naturel

L'exposition humaine aux sources de rayonnement naturel a toujours existé. Au niveau mondial, l'exposition au bruit de fond constitue la principale contribution à l'exposition totale aux rayonnements (2). La méthode de calcul de l'exposition au rayonnement naturel se base sur la méthode prescrite dans le rapport UNSCEAR 2000 (3).

Hormis le rayonnement cosmique, les rayonnements ionisants d'origine naturelle et, partant, l'exposition naturelle interne et externe de la population belge sont principalement issus de la désintégration de quelques radionucléides importants: l'Uranium-238, l'Uranium-235, le Thorium-232 et le Potassium-40 (4).

#### 1.1. Exposition externe

La dose reçue par le public n'est que rarement calculée par mesure directe. Ces doses sont estimées sur base de données relevées dans l'environnement et en ayant recours à des modèles et hypothèses pour simuler divers scénarios.

Ainsi, la dose que représente le rayonnement cosmique varie selon qu'on se trouve à l'intérieur d'une habitation ou à l'air libre. De manière générale, on estime qu'une personne passe 80 % de son temps à l'intérieur et 20 % à l'air libre (3). Une conversion de ce pourcentage en nombre d'heures permet d'obtenir un résultat annuel de 7.000 heures à l'intérieur (365 jours \* 24 heures \* 80%) et de 1.760 heures à l'air libre (365 jours \* 24 heures \* 20%). Les personnes dont les habitudes de vie sont différentes (qui passent moins ou plus de 80% de leur temps à l'intérieur d'une habitation) présentent donc une exposition au rayonnement d'origine naturelle qui s'écarte de celle qui est considérée ci-après.

##### 1.1.1. Exposition au rayonnement cosmique

La terre est en permanence bombardée par des particules énergétiques qui proviennent du soleil ou de l'extérieur de notre système solaire. Ces particules à haute énergie constituent ce que l'on appelle le rayonnement cosmique. Elles interagissent avec les noyaux des composants atmosphériques et sont en grande partie absorbées par notre atmosphère. Lorsqu'on parle du rayonnement cosmique, on distingue le rayonnement primaire (principalement des protons contre lesquels l'atmosphère agit comme un bouclier) du rayonnement secondaire (qui résulte de l'interaction entre le rayonnement primaire et l'atmosphère). Les interactions entre le rayonnement cosmique et l'atmosphère produisent également des particules radioactives appelées radionucléides cosmogéniques, dont le H-3 et le C-14 en sont les exemples les plus connus (4).

La contribution du rayonnement cosmique à la dose reçue varie sensiblement en fonction de l'altitude. La dose due au rayonnement cosmique que reçoit un individu lors d'un vol en avion est considérablement supérieure à celle qu'il reçoit au niveau de la mer. Dans ce second cas, le rayonnement cosmique représente environ 10 % de la dose totale du rayonnement naturel (2).

Outre l'altitude, les variations du champ magnétique terrestre modulent également l'intensité du rayonnement cosmique. Ainsi, au niveau de l'équateur (géométrique), la dose reçue sera environ 10% inférieure à celle reçue au niveau de parallèles plus éloignés (2).

Comme la Belgique est un pays dont l'altitude reste relativement proche du niveau de la mer, les facteurs de correction de l'altitude sont faibles (5):

- 1,02 pour la composante ionique et photonique directe,
- 1,1 pour la composante neutronique.

Le débit de dose efficace au niveau de la mer (altitude = 0) à une latitude de 50° (côte belge) est de (5):

- 32 nSv/h pour la composante ionique et photonique directe,
- 9 nSv/h pour la composante neutronique.

Ceci donne un débit de dose efficace à l'air libre de  $(32 * 1,02) + (9 * 1,1) = 42,5$  nSv/h.

**Tableau 1** : Débit de dose résultant du rayonnement cosmique (nSv/h).

<b>Dose rayonnement cosmique</b>	Débit de dose efficace au niveau de la mer (nSv/h) <b>(4)</b>	Facteur de correction pour la Belgique <b>(5)</b>	Débit de dose efficace moyen pour la Belgique (nSv/h)	Débit de dose efficace moyen mondial au niveau de la mer (nSv/h) <b>(4)</b>
Composante ionique et photonique	32	1,02	32,64	31
Composante neutronique	9	1,1	9,9	5,5
Total			42,54	36,5

Si l'on tient compte d'un facteur d'atténuation due à l'habitat (indoor shielding factor) de 0,8 (2) et d'un pourcentage de 80% du temps passé à l'intérieur d'une habitation, la dose efficace moyenne annuelle imputable au rayonnement cosmique (intérieur et extérieur) est la suivante :

$$42,54 * 10^{-6} \text{ mSv/h} * (1760 \text{ h/an} + 7000 \text{ h/an} * 0,8) = \mathbf{0,31 \text{ mSv/an.}}$$

L'exposition annuelle doit en outre intégrer la dose résultant des *radionucléides cosmogéniques*. Cette dose est dominée par l'incorporation de carbone 14 et équivaut à **0,012 mSv/an** (4).

De même, la dose cosmique peut varier en fonction de la dose annuelle imputable aux *vacances en avion ou vacances en altitude* (comme les sports d'hiver). Selon l'UNSCEAR, cette dose varie de 0,0 à 0,2 mSv par an (2; 4; 6). Pour le Belge moyen, la dose annuelle retenue est de 0,02 à 0,03 mSv/an (5), avec une moyenne de 0,025 mSv/an. Pour calculer la dose qui y est associée, il convient de tenir compte de l'itinéraire, la durée, la fréquence et l'altitude des vols. La règle générale consiste à considérer une exposition de 5 µSv par heure passée dans un avion de ligne. Les personnes qui voyagent fréquemment en avion, à titre professionnel ou autre, présenteront donc bien évidemment une dose supérieure à la moyenne de 0,025 mSv/an.

La dose moyenne totale annuelle due au rayonnement cosmique peut donc être résumée comme suit :

**Tableau 2** : L'exposition cosmique moyenne en Belgique

Rayonnement cosmique :	0,310	mSv
Radionucléides cosmogéniques :	0,012	mSv
Voyages en avion et vacances en altitude :	0,025	mSv
Total :	<b>0,347</b>	<b>mSv</b> (moyenne mondiale <b>(4)</b> = 0,39 mSv)

### 1.1.2. Exposition résultant du rayonnement terrestre

Des radionucléides naturels d'origine terrestre, également appelés 'radionucléides primordiaux', sont principalement responsables du rayonnement terrestre. On retrouve ceux-ci partout en quantité variable, y compris dans le corps humain. Ces radionucléides naturels sont présents dans l'écorce terrestre depuis l'apparition de la Terre.

L'exposition externe aux radionucléides naturels concerne principalement des rayons  $\gamma$  émis par le Th-232, l'U-238 (et dans une moindre mesure l'U-235) et ses produits de filiation et le K-40 (4). Ces radionucléides sont également présents, quoique de manière limitée, dans la plupart des matériaux de construction. Leur concentration (pour chacun de ces isotopes) varie sensiblement en fonction du sol. Dans les années 80, en Belgique, des centaines d'échantillons de sol ont été analysés pour déterminer la concentration des radionucléides précités (7).

Le tableau 3 présente les valeurs moyennes de ces analyses spectrométriques, les coefficients de conversion en dose du rapport UNSCEAR 2000 (4) et les débits de dose absorbée calculés. Là où des échantillons de sol avait été prélevés, des mesures directes du débit de dose absorbée avaient également été réalisées. Sans tenir compte du rayonnement cosmique, ces mesures directes ont relevé une valeur de **43 nGy/h** (7), ce qui correspond au débit de dose obtenu lors de l'analyse des échantillons de sol.

**Tableau 3:** Exposition externe calculée à partir des concentrations moyennes de radionucléides dans le sol belge (moyenne mondiale de l'UNSCEAR (4)) et du coefficient de conversion en dose utilisé dans le rapport UNSCEAR 2000 (4).

Radionucléide	Concentration dans le sol Bq/kg	Coefficient de conversion en dose (nGy/h) / (Bq/kg)	Débit de dose absorbée (nGy/h)
<sup>40</sup> K	380 (420)	0,0417	16 (18)
<sup>226</sup> Ra (dérivés uranium)	26 (33)	0,462	12 (15)
<sup>232</sup> Th	27 (45)	0,604	16 (27)
Dose absorbée externe totale mesurée à p.p.d. échantillons de sol :			44 (60)

La même étude (7) se composait de mesures du débit de dose (absorbée) à l'intérieur d'habitations, où une valeur moyenne de **60 nGy/h** a été observée. A l'intérieur d'une habitation, l'exposition au rayonnement terrestre est principalement déterminée par les matériaux de construction utilisés. De nature, cette exposition est plus élevée à l'intérieur d'une habitation qu'à l'air libre.

La dose efficace peut être estimée à partir de la dose absorbée et grâce à un facteur de conversion. En outre, ces facteurs de conversion peuvent varier selon l'âge du sujet en raison des dimensions plus petites du corps des enfants (adulte : 0,7 ; enfant de 6 à 15 ans : 0,8 ; enfant en bas âge de 0 à 5 ans : 0,9) (3).

La dose efficace annuelle moyenne résultant du rayonnement terrestre est présentée dans le tableau 4 et est de **0,35 mSv/an** pour un adulte.

**Tableau 4 :** Dose efficace annuelle moyenne résultant du rayonnement terrestre.

Dose efficace annuelle moyenne	Adulte (facteur conversion = 0,7) (3)	Enfant, 6 – 15 ans (facteur conversion = 0,8) (3)	Enfant bas âge, 0 – 5 ans (facteur conversion = 0,9) (3)
En intérieur (7000h)	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,7$ = 0,30 mSv/an	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,8$ = 0,34 mSv/an	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,9$ = 0,38 mSv/an
A l'air libre (1760h)	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,7$ = 0,05 mSv/an	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,8$ = 0,06 mSv/an	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,9$ = 0,07 mSv/an
<b>Total Belgique (niveau mondial)(4)</b>	<b>0,35 mSv/an (0,48)</b>	<b>0,40 mSv/an (0,55)</b>	<b>0,45 mSv/an (0,62)</b>

La dose efficace annuelle moyenne pour l'ensemble de la population belge (enfants inclus) résultant du rayonnement terrestre est estimée à **0,4 mSv/an** (les valeurs oscillent entre 0,2 et 0,6 mSv par an) (5).

### 1.1.3. Exposition externe totale au rayonnement naturel

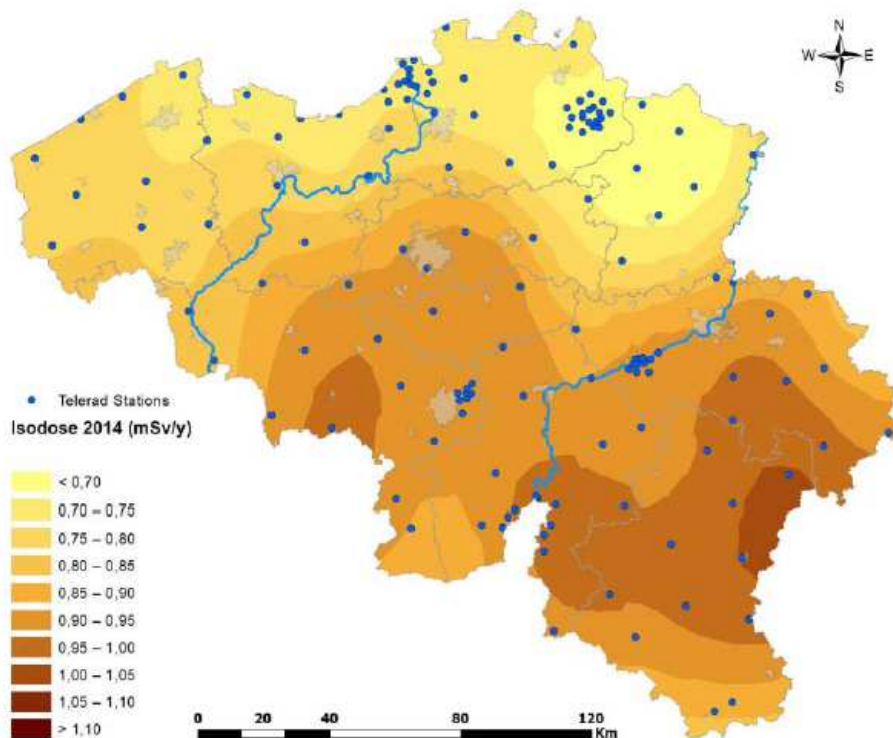
En additionnant les doses résultant du rayonnement terrestre et du rayonnement cosmique, on obtient le résultat suivant :

$$\begin{array}{rcl} \text{Rayonnement cosmique} & + & \text{Rayonnement terrestre} & = & \text{exposition externe au rayonnement naturel} \\ 0,35 \text{ mSv/an} & + & 0,4 \text{ mSv/an} & = & \mathbf{0,75 \text{ mSv/an}} \text{ (de } 0,54 \text{ à } 1,14 \text{ mSv/an)} \end{array}$$

### 1.1.4. Validation des données

Ces valeurs sont également confirmées par le réseau TELERAD (<http://telerad.fgov.be/>) de l'AFNC. Ce réseau couvre l'ensemble du territoire belge et compte 192 stations de mesure des rayonnements gamma en plein air, 8 stations de mesure des rayonnements gamma dans les cours d'eau et 7 stations de mesure des aérosols dans l'air ambiant (8) (pour une description détaillée du système Telerad, voir (9; 10)). Lorsque l'on observe les données de l'année 2014 (sensiblement comparables à celles des années précédentes), la dose moyenne de l'exposition aux rayons gamma est de 1 mSv/an en Belgique. La dose varie selon les régions : 0,7 mSv/an dans le nord du pays, environ 0,8 - 0,9 mSv/an en Flandre, prise dans sa globalité, et une moyenne de 1,1 mSv/an pour la Wallonie, plus particulièrement pour les Ardennes (10).

La figure 2 (10) exprime en isodoses les valeurs mesurées en 2014 dans les différentes zones géographiques de la Belgique.



**Figure 2:** Courbe isodoses - mesures TELERAD 2014.

On peut conclure de ces données qu'un citoyen belge (adulte) reçoit en moyenne une dose de 1 mSv \* 0,7 (facteur conversion d'un adulte) = 0,7 mSv. En y ajoutant la composante neutronique (4), qui n'est pas mesurée par le réseau Telerad, on obtient le résultat suivant :

La composante neutronique : 9 nSv/h * (1760h + 7000h*0,8 atténuation en intérieur)	= 0,06 mSv/an
La dose externe due aux rayons gamma	= 0,7 mSv/an
La dose efficace totale résultant de l'exposition externe au rayonnement naturel	= 0,76 mSv/an

La valeur annuelle de 0,76 mSv reste dans le même ordre de grandeur que la valeur calculée de 0,74 mSv/an.



## 1.2. Exposition interne

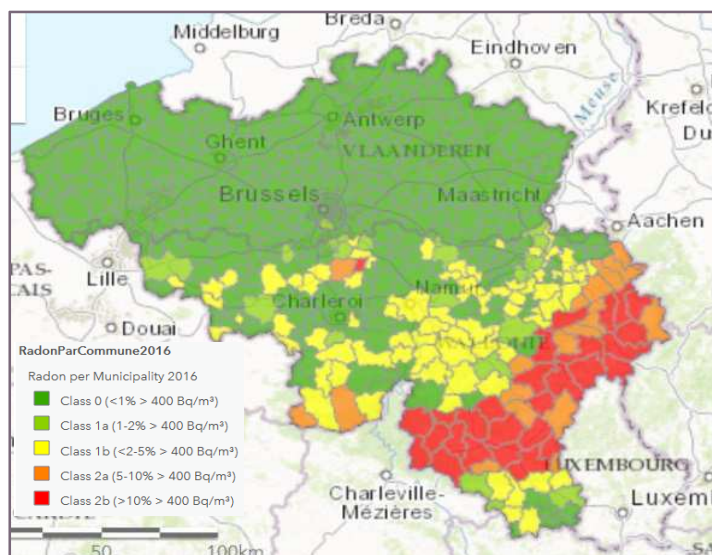
### 1.2.1. Exposition interne au Radon et Thoron

Les chaînes de désintégration de l'uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ) de l'uranium-235 ( $^{235}\text{U}$ ) et du thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) génèrent toujours du radon, un gaz radioactif chimiquement inerte. Dans chacune de ces chaînes, les différents dérivés possèdent des noms bien spécifiques : radon (Rn-222), thoron (Rn-220) et actinon (Rn-219). La demi-vie de l'actinon est très courte, ce qui explique sa rareté dans l'environnement. Comme la demi-vie du radon (3,82 jours) est beaucoup plus longue que celle du thoron (55,6 secondes), le radon contribue de manière bien plus importante à l'exposition de la population.

De par leur état gazeux, le radon (Rn-222) et le thoron (Rn-220) sont capables de cheminer dans le sol jusqu'à la surface de la terre où ils peuvent être inhalés. En outre, la différence de pression naturelle entre l'intérieur et l'extérieur des habitations fait en sorte que le gaz radon s'infiltré dans les bâtiments par les fissures et les imperfections que présentent ceux-ci. Comme ce gaz est chimiquement inerte, il ne pose à première vue aucun problème. Nous inhalons du radon, mais comme tout autre gaz noble, nous l'expirons également. Le Radon est toutefois radioactif et ses produits de filiation de courte durée de vie sont également présents dans l'air ambiant. Ces particules sont solides et, une fois inhalées, elles se déposent dans les poumons. Comme la demi-vie biologique des produits de filiation présents dans les poumons est supérieure à quelques heures, ils s'y désintègrent jusqu'au plomb-210 en émettant deux particules alpha provenant du polonium 214 et du polonium 218. Ces particules alpha endommagent les cellules basales et sécrétoires des voies respiratoires, ce qui à terme peut provoquer un cancer du poumon. Le danger de l'exposition au radon provient en fait de l'exposition à ses produits de filiation de courte durée de vie.

Des études épidémiologiques conduites sur des mineurs et des études sur la présence du radon à l'intérieur d'habitations résidentielles (11) révèlent qu'une exposition au radon et à ses produits de filiation entraîne un risque accru de développer un cancer du poumon. Lorsque des concentrations élevées s'accumulent à l'intérieur de bâtiments (domicile ou lieu de travail), elles peuvent présenter un danger pour les personnes qui les occupent régulièrement.

Les concentrations moyennes en radon dans une région déterminée dépendent de la nature du sous-sol et peuvent donc sensiblement différer d'une région à l'autre. La valeur moyenne mesurée à l'air libre en Belgique est de  $10 \text{ Bq/m}^3$  (5; 11).



**Figure 3:** La distribution géographique de l'exposition au radon en Belgique (40). Les zones sensibles sont indiquées en orange et en rouge.

Pour de plus amples renseignements sur la distribution géographique de l'exposition au radon, consultez le site [www.fanc.fgov.be](http://www.fanc.fgov.be) → [radon](#).

**Tableau 5** : L'exposition moyenne au radon dans les habitations en Belgique (données pour 2010). **(12)**.

	Population	Habitations	Moyenne arithmétique	Médiane	Moyenne géométrique
<b>Belgique</b>	10584534	3742000	57 Bq/m <sup>3</sup>	44 Bq/m <sup>3</sup>	46 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Wallonie</b>	3435879	1325000	84 Bq/m <sup>3</sup>	60 Bq/m <sup>3</sup>	75 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Flandre</b>	6117440	2191000	44 Bq/m <sup>3</sup>	37 Bq/m <sup>3</sup>	36 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Bruxelles</b>	1031215	226000	44 Bq/m <sup>3</sup>	37 Bq/m <sup>3</sup>	36 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Régions sensibles</b>	376568	130000	220 Bq/m <sup>3</sup>	127 Bq/m <sup>3</sup>	137 Bq/m <sup>3</sup>

Contrairement à la majorité des sources de rayonnement naturel, il existe des méthodes pour mieux protéger la population contre l'exposition au radon. Pour de plus amples renseignements sur le radon et les mesures de protection, consultez le site [www.fanc.fgov.be](http://www.fanc.fgov.be) → [radon](#).

### 1.2.1.1 Exposition aux produits de filiation du radon par inhalation

Au début des années 90, la Commission internationale de Protection radiologique (CIPR) a publié des recommandations visant à se protéger contre le radon-222 à domicile et sur le lieu de travail sous forme de la publication IRCP 65 'Protection against Radon-222 at Home and at Work' (13). En 2007, la CIPR a formulé de nouvelles recommandations relatives au système de radioprotection (14). A la lecture de ces nouvelles recommandations, et de récentes données scientifiques sur les conséquences sanitaires d'une exposition au radon et à ses produits de filiation, les estimations en la matière ont été actualisées dans la publication 115 de la CIPR (15). Une des principales conclusions concerne le fait que le 'detriment-adjusted nominal risk coefficient' (le coefficient de risque nominal ajusté au détriment) pour une exposition au radon a plus ou moins doublé par rapport à ce qui était jusqu'alors considéré. Cette augmentation aura bien évidemment un impact majeur sur les calculs revus de la dose efficace. Dans son « Statement on Radon » (15), la CIPR préconise un 'detriment-adjusted nominal risk coefficient' pour la population de tous âges de  $8 \cdot 10^{-10}$  par Bq·h/m<sup>2</sup> pour une exposition au radon-222 en équilibre avec ses descendants. A ce jour, la CIPR n'a toutefois pas publié de nouveaux coefficients de dose. Comme, dans ce même statement, la CIPR affirme que ses conclusions sont conformes aux estimations publiées par l'UNSCEAR en 2006 (11; 15), il a été choisi de conserver le facteur de conversion en dose décrit dans le rapport 2006 de l'UNSCEAR.

Les concentrations des descendants du radon à courte durée de vie (tels que le Po-218, le Pb-214 et le Bi-214) ne sont pas simples à quantifier par une mesure directe et ces concentrations sont dès lors estimées sur base de l'équilibre ou plutôt du déséquilibre avec leur isotope-parent. Le facteur d'équilibre (F) est le rapport entre la concentration équivalente en radon à l'équilibre (C<sub>EEC</sub>) et l'activité volumique du gaz radon (C<sub>Rn</sub>). L'UNSCEAR (11) utilise des valeurs arrondies comme facteurs d'équilibre : 0,4 en intérieur et 0,6 à l'air libre.

L'exposition aux produits de filiation du radon est calculée en utilisant la formule suivante :

$$({}^{in}C_{Rn} * {}^{in}F * 7000 + {}^{out}C_{Rn} * {}^{out}F * 1760) * R_{ndecay_{con}}$$

- ${}^{in}C_{Rn} = 46$  Bq/m<sup>3</sup> ; la concentration géométrique moyenne en radon à l'intérieur d'une habitation (12).
- ${}^{out}C_{Rn} = 10$  Bq/m<sup>3</sup> ; la concentration moyenne en radon à l'air libre (5; 11).
- ${}^{in}F = 0,4$  ; le facteur d'équilibre moyen à l'intérieur d'une habitation (11).
- ${}^{out}F = 0,6$  ; le facteur d'équilibre moyen à l'air libre (11).
- $R_{ndecay_{con}} = 9 \cdot 10^{-6}$  mSv / (Bq h/m<sup>3</sup>) ; le facteur de conversion en dose pour les produits de filiation (11; 3).

Cette formule donne une exposition moyenne aux produits de filiation du radon de :  
 $(46 * 0,4 * 7000 + 10 * 0,6 * 1760) * 9 \cdot 10^{-6} = \mathbf{1,254 \text{ mSv/an.}}$

### 1.2.1.2 Exposition au radon par inhalation

Le radon est un gaz qui est principalement inhalé et il constitue la deuxième cause du cancer du poumon. En outre, une fraction du radon se dissout dans le sang, qui le véhicule dans l'ensemble du corps humain. Les principales sources d'exposition au radon sont, dans l'ordre de croissant d'exposition, le sous-sol d'une habitation, les matériaux de construction et l'air libre. Une faible fraction du radon peut également être présente dans les eaux souterraines et, si elles sont utilisées à des fins domestiques, le radon peut se libérer dans l'air à l'intérieur de l'habitation chaque fois qu'on ouvre un robinet ou une douche (4).

La concentration en gaz radon à l'intérieur d'une habitation peut considérablement varier en fonction des caractéristiques de l'habitation et de sa situation géographique en Belgique (pour de plus amples renseignements : Dehandschutter et al. 2009 (16), [www.fanc.fgov.be](http://www.fanc.fgov.be) → [radon](#)).

L'exposition au radon par inhalation est calculé comme suit :

$$(^{in}C_{Rn} * 0,8 + ^{out}C_{Rn} * 0,2) * Rngas_{con} * 10^{-3}$$

→  $^{in}C_{Rn} = 46 \text{ Bq/m}^3$  ; la concentration géométrique moyenne en radon à l'intérieur d'une habitation (12).  
 →  $^{out}C_{Rn} = 10 \text{ Bq/m}^3$  ; la concentration moyenne en radon à l'air libre (5; 11).  
 →  $Rngas_{con} = 1,5 * 10^{-3} \text{ (mSv/an)/(Bq/m}^3)$  le facteur de conversion en dose pour le gaz radon (4; 11).

Cette formule donne une exposition moyenne pour l'inhalation du gaz radon de :  
 $(46 * 0,8 + 10 * 0,2) * 1,5 * 10^{-3} = \mathbf{0,058 \text{ mSv/an}}$

### 1.2.1.3 Exposition au radon par ingestion

Le radon présent dans l'eau de distribution conduit à une exposition suite à l'ingestion de cette eau, d'une part, et à l'inhalation du radon libéré dans l'air lors de l'utilisation de cette eau de distribution, d'autre part (4). Le radon libéré dans l'air est toutefois également mesuré et sa contribution à la dose efficace est déjà intégrée dans les calculs susmentionnés. L'exposition au radon par ingestion est estimée à **0,002 mSv** par an (4).

### 1.2.1.4 Exposition au thoron et à ses produits de filiation

La très courte demi-vie du thoron (55,6 sec) explique la contribution très limitée de cet isotope à l'exposition de la population belge. Comme sa désintégration dure moins longtemps que le temps nécessaire au gaz pour se répandre dans un local de manière homogène, l'exposition varie principalement en fonction de la distance à la source. On considère généralement une concentration équivalente en thoron à l'équilibre  $0,3 \text{ Bq/m}^3$  à l'intérieur d'une habitation et de  $0,1 \text{ Bq/m}^3$  à l'air libre, et un facteur de conversion en dose de  $40 \text{ (nSv/h)/(Bq/m}^3)$  (4).

Par conséquent, l'exposition annuelle au Thoron et à ses produits de filiation se calcule comme suit :

En intérieur :  $0,3 * 40 * 10^{-6} * 7000 = 0,084 \text{ mSv par an}$

A l'air libre :  $0,1 * 40 * 10^{-6} * 1760 = 0,007 \text{ mSv par an}$

Total :  $0,091 \text{ mSv par an}$ .

L'exposition au thoron et ses produits de filiation est donc de **0,09 mSv** par an (4).

### 1.2.1.5 Exposition totale au radon et au thoron par inhalation

Le tableau 6 présente l'exposition annuelle moyenne totale d'un citoyen belge adulte au radon et au thoron.

**Tableau 6:** Exposition annuelle totale au radon et au thoron en Belgique.

	<b>Dose efficace annuelle par habitant</b>
Exposition au radon et descendants par inhalation (par poumons) :	1,254 mSv/an
Exposition au radon par inhalation (par sang) :	0,058 mSv/an
Exposition au radon par ingestion :	0,002 mSv/an
Exposition au thoron et descendants par inhalation :	0,091 mSv/an
<b>Total :</b>	<b>1,405 mSv/an</b>

### 1.2.2. Expositions internes aux radionucléides naturels autres que le radon et le thoron

Les expositions internes au rayonnement naturel résultent de l'inhalation et de l'ingestion de radionucléides terrestres. Les doses inhalées concernent principalement des particules présentes dans l'air qui contiennent des radionucléides de la chaîne de désintégration de l'uranium-238 et du thorium-232. Les doses ingérées sont principalement dues au potassium-40 (<sup>40</sup>K) et aux produits de filiation de l'uranium-238 et du thorium-232, présents dans les aliments et dans l'eau potable (4).

En conditions normales, la répartition du potassium dans le corps est uniforme et sa concentration doit être maintenue à un niveau constant (homéostasie). Cet élément intervient notamment dans la régulation de processus physiologiques tels que la digestion ou le rythme cardiaque. Chez les adultes, environ 0,18% du corps est constitué de potassium et chez les enfants, ce taux s'élève à environ 0,2% (4). Bien qu'il existe certaines variations entre diverses personnes, la dose de potassium-40 que chacun d'entre nous reçoit est équivalente.

- Dose moyenne adultes : 0,165 mSv par an (4).
- Dose moyenne enfants : 0,185 mSv par an (4).

En ce qui concerne la dose due à l'ingestion de produits de filiation de l'uranium-238 et du thorium-232, le polonium-210 (<sup>210</sup>Po) est le principal contributeur à la dose. L'UNSCEAR (4; 2) évalue la dose efficace due à l'ingestion de produits de filiation de l'Uranium et du Thorium comme suit :

- Adultes : 0,11 mSv/an (Contribution Po-210 = 0,07 mSv/an) (4)
- Enfants : 0,20 mSv/an (Contribution Po-210 = 0,10 mSv/an) (4)
- Enfants bas âge : 0,26 mSv/an (Contribution Po-210 = 0,18 mSv/an) (4)

L'exposition interne moyenne mondial due aux radionucléides autres que le Rn et le Th est estimée à **0,29 mSv/an** (4).

### 1.2.3. Exposition interne totale au rayonnement naturel

En Belgique, l'exposition interne totale au rayonnement naturel (Rn, Th et autres radionucléides) est en moyenne de :

$$1,405 + 0,29 = \mathbf{1,695 \text{ mSv/an.}}$$

### 1.3. Exposition totale au rayonnement naturel :

L'exposition annuelle totale au rayonnement naturel est estimée à 0,75 (externe) + 1,70 (interne) = **2,45 mSv**. Au niveau mondial, cette exposition au rayonnement naturel est estimée à 2,4 mSv en moyenne par année (2; 4).

## 2. Exposition au rayonnement d'origine artificielle

### 2.1. Installations nucléaires

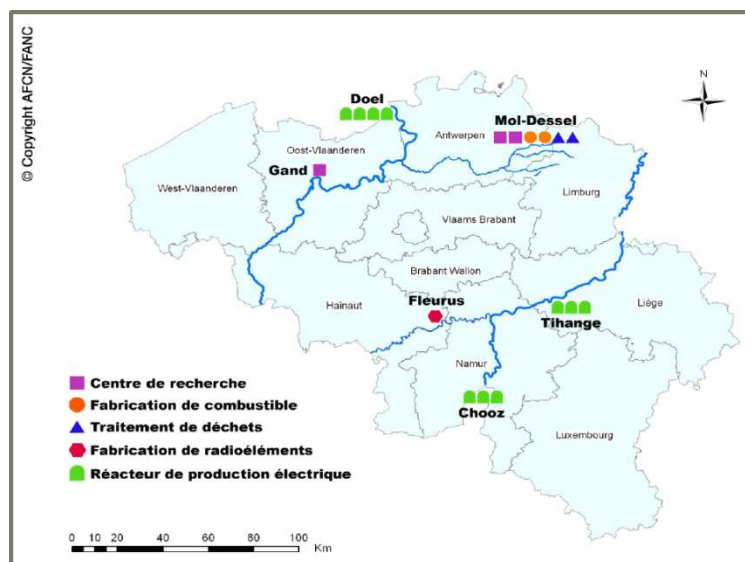
Les établissements nucléaires de classe I, tels que les centrales nucléaires, sont autorisés de sorte qu'en fonctionnement normal, ils rejettent des quantités restreintes et contrôlées de radioactivité, tant sous forme gazeuse que liquide.

En Belgique, le RGPRI fixe la limite de dose pour un individu de la population à 1 mSv sur 12 mois consécutifs (17). En vertu de ce même arrêté, les limites annuelles de rejet doivent être déterminées pour chaque installation nucléaire de telle sorte que la dose résultant de la somme des expositions de la population aux rejets de ces installations nucléaires ne dépasse pas cette limite.

Le RGPRI fixe également des contraintes de dose selon le principe ALARA, ce qui signifie que les limites de rejet autorisé doivent être suffisamment faibles pour ne représenter qu'une faible proportion de la limite légale fixée pour le public

#### 2.1.1. Les installations nucléaires belges

En Belgique, 5 sites nucléaires hébergent un établissement de classe I (voir figure 3) : Doel, Tihange, Fleurus, Mol-Dessel et le réacteur de recherche de Gand, fermé en 2003 et entièrement démantelé depuis lors. Par ailleurs, le site nucléaire français de Chooz est proche de la frontière franco-belge (8).



**Figure 4:** Les établissements nucléaires qui possèdent une autorisation de classe I en Belgique (8).

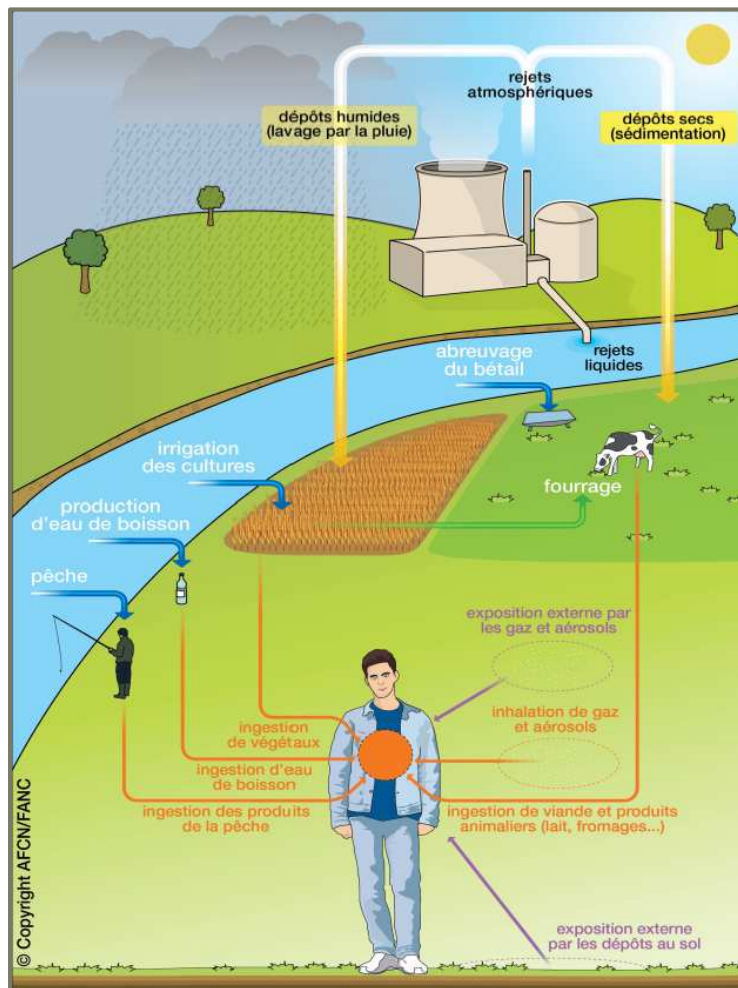
De plus amples renseignements sur ces sites sont disponibles sur le site web de l'AFCN ([www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [Dossier: établissements nucléaires et industriels](#) ou dans les dossiers informatifs relatifs aux rejets radioactifs, accessibles sur le site [www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [publications](#)) ou sur les sites web respectifs des sites nucléaires.

#### 2.1.2. Contrôle et impact des rejets radioactifs

Les rejets radioactifs sont contrôlés à plusieurs niveaux. Les exploitants sont tenus de respecter les conditions de leur autorisation relatives aux rejets et ils sont encouragés à contrôler ces rejets selon des modalités préétablies en procédant à des mesures tant avant que pendant les rejets. Ceux-ci sont en outre enregistrés et communiqués mensuellement à l'AFCN et à Bel V (la filiale technique de l'AFCN) (8). La méthode d'enregistrement des rejets radioactifs a été modifiée en 2011 à la suite d'une recommandation européenne. Auparavant, les rejets inférieurs à la limite de détection étaient assimilés à 0, tandis que depuis lors une valeur arbitraire leur est attribuée (18).

En outre, les valeurs mesurées sont également vérifiées à l'aide de mesures dans l'environnement qui sont partiellement effectuées par l'exploitant. L'AFNC procède également à ses propres mesures dans l'environnement dans le cadre de la surveillance radiologique du territoire. D'une part, les mesures sont réalisées sur différents types d'échantillons (eau, sédiments, herbe, air, légumes, viande, lait, poisson...) prélevés à proximité des installations nucléaires. En outre, l'AFSCA (Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire) opère d'autres contrôles à divers stades de la chaîne alimentaire (8). Les résultats de ces mesures sont consignés chaque année dans un rapport sur la surveillance radiologique du territoire, disponible sur [www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [publications](#). D'autre part, l'AFNC surveille en permanence l'ensemble du territoire grâce au réseau TELERAD. Les résultats de ces mesures peuvent être consultés sur le site web TELERAD (<http://telerad.fgov.be/>).

Le calcul de la dose résultant de ces rejets radioactifs intègre toutes les voies d'exposition du public, comme représenté sur la figure 5. La dose résultant de ces rejets est calculée sur base du scénario le plus pénalisant, lequel tient compte des diverses voies d'exposition, des habitudes de vie, des habitudes alimentaires et de l'usage de l'eau. Par ailleurs, six catégories d'âge ont été considérées ( $\leq 1$ an, 1-2ans, 2-7ans, 7-12ans, 12-17ans et  $> 17$ ans) afin de tenir compte également de la différence de sensibilité aux rayonnements ionisants. Ainsi, les hypothèses et paramètres considérés permettent de ne pas sous-estimer l'exposition des citoyens individuels (8).



**Figure 5:** Les voies d'exposition du public (8).

Le tableau 7 expose la dose annuelle maximale résultant des rejets radioactifs des installations nucléaires belges depuis 2011. Nous observons que cette dose est stable d'une année à l'autre et qu'elle reste largement inférieure à la limite légale fixée pour le public à 1 mSv sur 12 mois consécutifs. De plus amples renseignements à ce sujet figurent dans le dossier d'information relatif aux rejets radioactifs des établissements nucléaires de classe I ([www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [publications](#)).

La dose totale présentée dans le tableau suivant est en fait l'exposition totale que subit une personne inexistante de la population. Quel que soit le calcul retenu, en l'occurrence celui du scénario le plus pénalisant, il est impossible qu'un individu reçoive la dose annuelle combinée de tous les sites. L'exposition dépend dès lors de la région où vit cet individu. Seul un individu habitant à proximité d'un site nucléaire reçoit cette dose et la majorité de la population belge ne reçoit dès lors pas la moindre dose résultant des installations nucléaires. L'impact sur l'ensemble de la population belge est donc négligeable.

Dose annuelle maximale (mSv/an)	2011 (18)	2012 (19)	2013 (20)	2014 (21)	2015 (8)
<b>CN Doel</b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>CN Tihange</b>	0,05	0,05	0,049	0,049	0,048
<b>Site Fleurus (IRE)</b>	0,025	0,016	0,017	0,013	0,013
<b>SCK-CEN</b>	<0,001	0,0015	<0,001	<0,001	<0,001
<b>IRMM</b>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Belgonucléaire</b>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Belgoprocess</b>	0,009	0,0106	0,0105	0,0085	0,009
<b>FBFC int</b>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Total</b>	<b>0,108</b>	<b>0,1011</b>	<b>0,1005</b>	<b>0,0945</b>	<b>0,094</b>

**Tableau 7:** dose maximale résultant des rejets radioactifs des installations nucléaires belges (8).

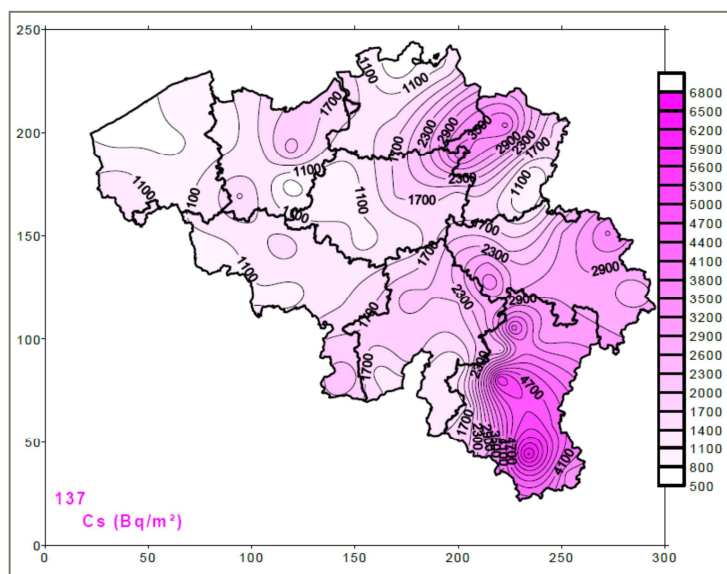
## 2.2. Retombées nucléaires

A côté des isotopes naturels présents dans notre environnement, le césium-137 constitue une source artificielle de radioactivité provenant principalement des essais d'armes nucléaires effectués dans les années '50 et '60 et de l'accident de Tchernobyl en 1986.

### 2.2.1. Exposition au rayonnement provenant de Tchernobyl

La figure 6 représente (situation en 1995) les retombées radioactives de césium-137 au niveau du sol suite à la catastrophe de Tchernobyl (avril 1986). Ces retombées sont en lien direct avec la distribution des précipitations recensées en Flandre la semaine suivant l'accident et elles correspondent actuellement à un débit de dose négligeable (22).

**Figure 6:** Dépôt de césium-137 10 ans après l'accident de Tchernobyl (1995) (22).



### 2.2.2. Exposition au rayonnement provenant de Fukushima

Le 11 mars 2011, le Japon a été frappé par un puissant séisme suivi d'un tsunami, provoquant une catastrophe nucléaire à la centrale nucléaire de la préfecture de Fukushima et libérant d'importantes quantités de radioactivité.

Pour parer à d'éventuelles retombées en Belgique, le programme de surveillance radiologique du territoire belge a été renforcé dès le 21 mars 2011 en augmentant la fréquence des prélèvements pour certaines particules présentes dans l'air ambiant et dans l'eau de pluie et en accélérant l'obtention des résultats des mesures. Ces résultats, qui ont été régulièrement publiés sur le site web et communiqués aux autorités nationales et internationales, confirment l'absence en Belgique d'une présence de radioactivité significative dès lors que les mesures des concentrations en radioactivité correspondaient de manière générale aux limites de détection. Les particules radioactives résiduelles ont parcouru une distance d'environ 10.000 km avant d'atteindre la Belgique, quelques jours après le début de l'accident. Lorsque ce nuage résiduel a atteint notre pays, sa concentration en particules radioactives avait déjà sensiblement diminué. Le nuage radioactif a en effet perdu une partie de sa radioactivité lors de son voyage (décroissance radioactive combinée aux retombées radioactives) et il s'est en outre mélangé à de l'air non contaminé. Fin mars et début avril 2011, de légères augmentations de la concentration en iode-131 ( $^{131}\text{I}$ ) ont été recensées en Belgique (de l'ordre de grandeur de 3 mBq/m<sup>3</sup> dans l'air et de 10 à 15 Bq/m<sup>2</sup> pour les retombées atmosphériques), sans le moindre impact sur la santé des travailleurs et de la population ou sur l'environnement (23).

### 2.3. Exposition à la radioactivité artificielle présente dans l'alimentation.

Dans le cadre de ses missions, l'Agence initie des programmes de surveillance radiologique du territoire belge. Un de ces programmes porte sur la surveillance des denrées alimentaires destinées à la consommation humaine. Ce programme se décline en campagnes annuelles d'échantillonnage de denrées alimentaires dont les prélèvements sont ensuite analysés pour vérifier leur niveau de radioactivité naturelle et artificielle. Une évaluation des résultats de ces prélèvements effectués entre 2000 et 2009 sont disponibles dans les rapports de synthèse des données de la chaîne alimentaire ([www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [Surveillance radiologique de la Belgique - rapport de synthèse des données de la chaîne alimentaire](#)). Depuis 2010, cette évaluation a été intégrée aux rapports de synthèse de la surveillance radiologique en Belgique ([www.afcn.fgov.be](http://www.afcn.fgov.be) → [publications](#) → [Surveillance radiologique de la Belgique](#)).

Ces rapports se concentrent sur la qualité radiologique de la chaîne alimentaire et ils traitent principalement de l'état radiologique des ingrédients, du lait et de l'eau de distribution. De nombreuses variétés de fruits et de légumes couramment consommés sont collectées à cette occasion. De même, les analyses portent sur la viande provenant des marchés et des abattoirs et sur le poisson commercialisé dans les marchés et magasins spécialisés.

La radioactivité artificielle des denrées alimentaires dépend principalement de la présence éventuelle d'isotopes dont la demi-vie est relativement longue, comme le strontium-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) et le césium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), lesquels résultent principalement des essais nucléaires atmosphériques qui remontent aux années '60.

Si un accident devait se produire (comme ceux de Tchernobyl ou de Fukushima), une augmentation de la radiocontamination sera surtout provoquée à court terme par la présence éventuelle d'iode-131 et à plus long terme par celle de césium-137, césium-134 ( $^{134}\text{Cs}$ ), de strontium-90 et éventuellement de ruthénium-103 et de ruthénium-106 ( $^{103}\text{Ru}$  et  $^{106}\text{Ru}$ ).

Depuis 2000, l'AFSCA (l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire) a décidé de renforcer ses contrôles en échantillonnant davantage de denrées alimentaires en vue de déterminer leurs niveaux de radioactivité naturelle (K-40) et artificielle (Cs-134 et Cs-137). Les produits d'importation et les denrées animales des abattoirs et des importants centres de distribution sont particulièrement concernés par ces contrôles. Les échantillons de l'AFSCA viennent compléter ceux de l'AFCN.



Globalement, le programme de contrôle démontre, après plusieurs dizaines d'années d'observations, que l'influence des installations nucléaires n'est pas perceptible sur les mesures de la radioactivité des denrées alimentaires. Il démontre également que l'état radiologique du « panier de la ménagère » est excellent en Belgique (24). L'impact radiologique de la présence de radionucléides artificiels dans notre alimentation ou dans l'eau potable est donc négligeable.

#### 2.4. Exposition totale aux applications industrielles

La dose population totale résultant des applications industrielles est la somme de la dose résultant des rejets radioactifs dans le secteur nucléaire, des radionucléides artificiels présents dans notre alimentation et de la dose résultant des retombées nucléaires. Toutefois, dans la mesure où l'impact sur la population belge entière reste de faible à négligeable, la dose résultant des établissements nucléaires est assimilée à une valeur de 0,01 mSv/an, par analogie aux valeurs publiées dans le document UNSCEAR 2008, Volume I (voir figure 17) (2).

#### 2.5. Exposition dans le cadre d'activités professionnelles

En 2013, une étude a été menée des données dosimétriques couvrant la plupart des travailleurs professionnellement exposés en Belgique (38.594) . Le tableau 8 présente pour 2013 une estimation de la répartition sectorielle des personnes professionnellement exposés en Belgique (25).

**Tableau 8:** Une étude a été menée des données dosimétriques couvrant la plupart des travailleurs professionnellement exposés en Belgique en 2013 et le répartition en fonction de leur secteur d'activité (25).

Secteur	Nbre PPE	% PPE
<b>Médical</b>	19019	49,3
<b>Industriel</b>	5808	15,0
<b>Nucléaire</b>	6545	17,0
<b>Transport</b>	98	0,3
<b>Recherche &amp; enseignement</b>	3455	9,0
<b>Sources naturelles</b>	3291	8,5
<b>Autres</b>	378	1,0
<b>Total travailleurs surveillés</b>	<b>38594</b>	<b>100,0</b>

La dose efficace annuelle moyenne ( $E_a$ ) pour les travailleurs surveillés est de 0,28 mSv. La dose mensuelle moyenne est de 0,69 mSv pour les travailleurs qui ont reçu une dose mesurable (25). Le tableau 9 présente, pour la Belgique, la distribution des doses qu'ont reçues en 2013 les personnes professionnellement exposées actives, d'une part, dans tous les secteurs combinés et, d'autre part, dans le secteur médical. Les 13 personnes qui ont reçu une dose supérieure à 10 mSv par an travaillent toutes dans le secteur médical et plus particulièrement en radiologie interventionnelle ou en cardiologie. Entre 2010 et 2015, 10 dépassements de la limite de dose légale de 20 mSv sur 12 mois glissants ont été recensés : tous concernent des radiologues interventionnels et des cardiologues (25).

**Tableau 9:** Distribution des doses reçues par les personnes professionnellement exposées en 2013 en Belgique (25).

Nbre PPE <sup>(a)</sup> (%)	$E_m^{(b)} < SD^{(c)}$	$SD \leq E_a^{(d)} < 1mSv$	$1mSv \leq E_a < 5mSv$	$5mSv \leq E_a < 10mSv$	$10mSv \leq E_a < 15mSv$	$15 \leq E_a < 20mSv$	$20mSv \leq E_a$
<b>Tous les secteurs</b>	22914 (59,37)	11864 (30,74)	3682 (9,54)	121 (0,31)	12 (0,03)	1 (0,003)	0 (0,00)
<b>Secteur médical</b>	12681 (35,92)	5709 (16,17)	550 (1,59)	66 (0,19)	12 (0,03)	1 (0,003)	0 (0,00)

<sup>(a)</sup>PPE = personnes professionnellement exposées

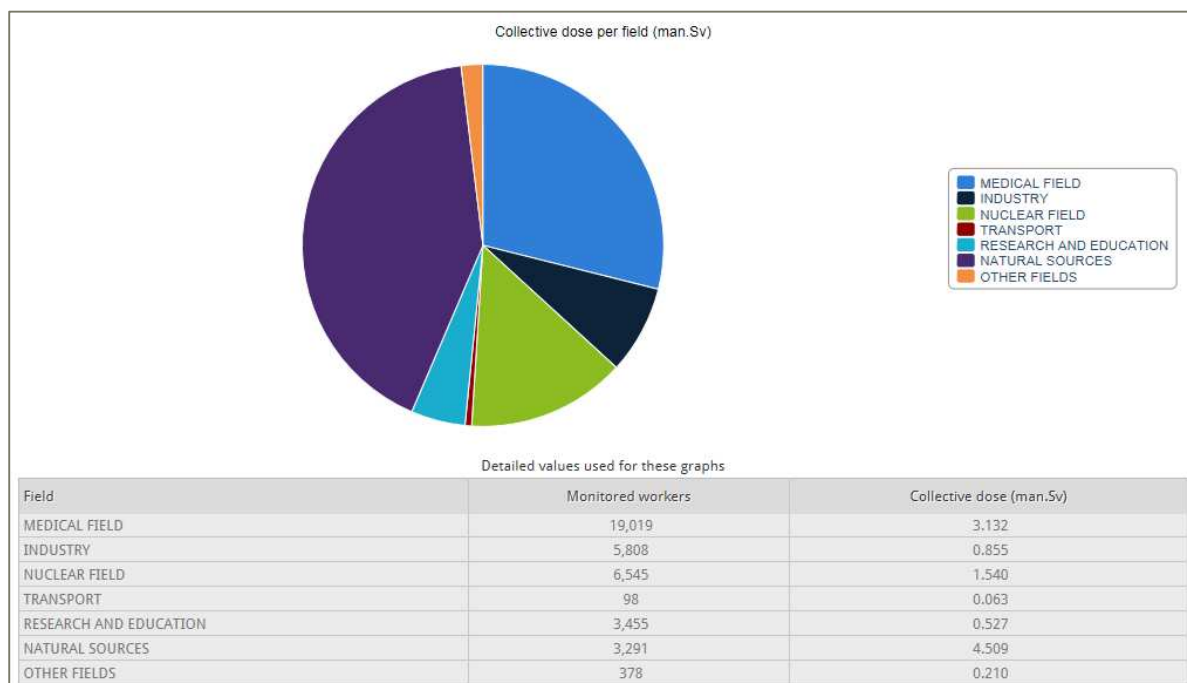
<sup>(b)</sup> $E_m$  = dose efficace mensuelle

<sup>(c)</sup>SD = seuil de détection

<sup>(d)</sup> $E_a$  = dose efficace/année

En ce qui concerne la dose reçue par toutes les catégories de travailleurs professionnellement exposés, nous observons sur la figure 7 ci-après que les travailleurs exposés aux sources naturelles de rayonnements ionisants, comme le personnel de navigation aérienne, dominent le classement (4,509 hommes.Sv), suivis des travailleurs du secteur médical (3,132 hommes.Sv) (26). La figure 8 établit une comparaison des doses reçues par les travailleurs dans différents pays européens en 2013 (26). Il en ressort que la dose reçue par les travailleurs en Belgique se trouve dans la moyenne européenne.

Cependant, seule une fraction de la population belge reçoit une dose dans le cadre professionnel. En 2013, les personnes professionnellement exposées étaient au nombre de 38.594 sur une population totale de 11.035.948 d'individus (27), ce qui ne représente que 0,3% de la population totale. Concrètement, l'impact des expositions professionnelle sur l'ensemble de la population est donc nulle.



**Figure 7 :** Distribution des doses reçues par les personnes professionnellement exposées en 2013 en Belgique (26).

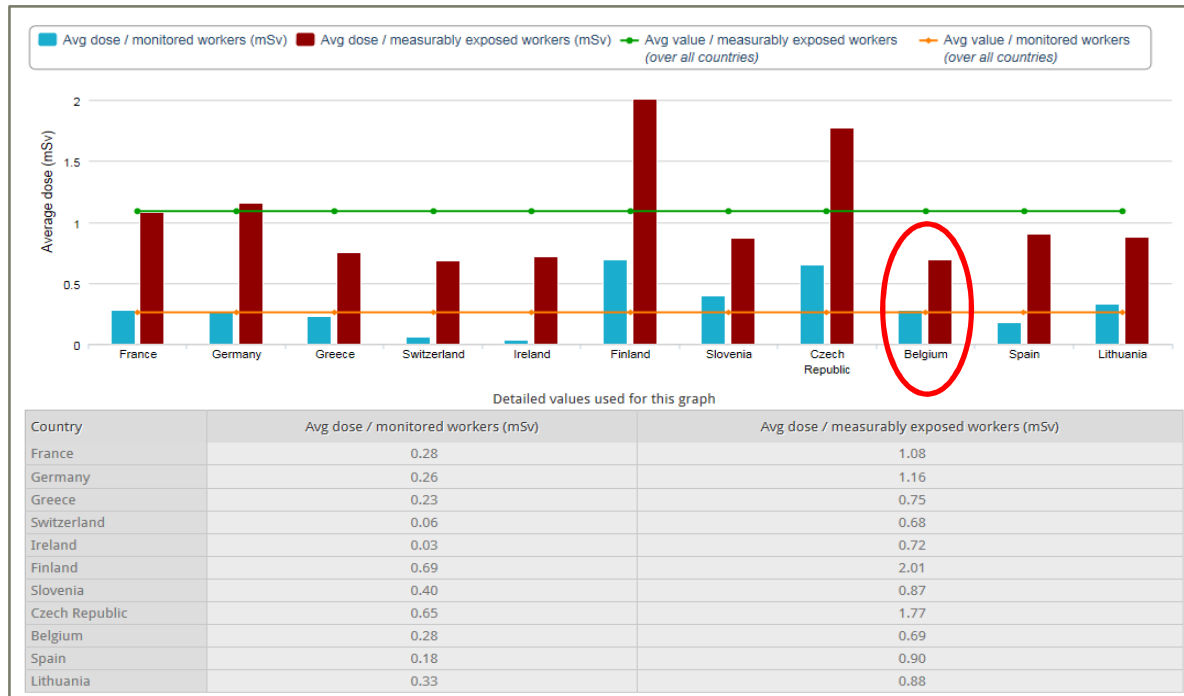


Figure 8 : Dose reçue par les travailleurs dans divers pays européens en 2013 (26).

## 2.6. Expositions médicales

Parmi toutes les sources artificielles de rayonnement ionisant auxquelles nous sommes exposés, l'exposition médicale en est la principale.

L'exposition de la population dans le cadre d'applications médicales est évaluée à partir des données de l'Institut national d'Assurance Maladie-Invalidité (INAMI ; [www.inami.fgov.be](http://www.inami.fgov.be)), basées sur le nombre de prestations imputées par numéro INAMI. A chacun de ces numéros correspond un coefficient de dose qui permet de quantifier le débit de dose.

Les données de l'INAMI ne prennent en compte que les seuls examens remboursés par les mutualités. Il ressort d'une étude de 2005 (28) que les chiffres de l'INAMI présentent une légère sous-estimation de l'ordre de quelques pourcents (0,2-3%). L'erreur sur l'estimation du nombre d'examens effectués est donc restreint.

Les données de l'INAMI présentent une autre lacune qui résulte de la définition des numéros INAMI. Certains d'entre eux correspondent à une procédure bien précise, tandis que d'autres sont décrits de manière bien plus sommaire, ce qui complique une estimation fiable de la dose. L'ancienne nomenclature INAMI des examens de médecine nucléaire, par exemple, ne permettait qu'une très vague estimation de la dose administrée. En 2015, toutefois, cette nomenclature a été modifiée de telle sorte qu'il sera désormais possible d'effectuer des estimations bien plus détaillées du débit de dose. Par ailleurs, les expositions individuelles varient sensiblement pour un même examen, ce qui amplifie d'autant plus la variation réelle du débit de dose lorsqu'on considère un groupe d'examens.

En outre, certains numéros INAMI permettent de choisir entre l'utilisation des rayonnements ionisants et une alternative. Dès lors, comme il est impossible de connaître le nombre exact d'examens ayant recours aux rayonnements ionisants, ces numéros ne sont pas pris en considération lors du calcul de la dose que reçoit la population belge.

Dès lors que les applications de la radiothérapie ont une finalité curative et que les doses élevées administrées dans ce cadre sont destinées à traiter des tumeurs, il est admis qu'il convient de ne pas inclure ces traitements dans l'estimation de la dose à la population.

Parmi les expositions diagnostiques médicales, les examens radiologiques sont le principal contributeur à la dose. L'estimation de la dose reçue par la population consiste donc principalement à répertorier les examens diagnostiques qui mettent en jeu les rayons X.

### 2.6.1. Distribution et nombres

Les données disponibles de 2013 et 2014 ont été traitées. Dans un souci de cohérence et puisque la dose résultant des expositions médicales est exprimée en nombre pour 1.000 habitants, les données relatives à la population qui ont été considérées sont celles de 2013 et 2014 (27).

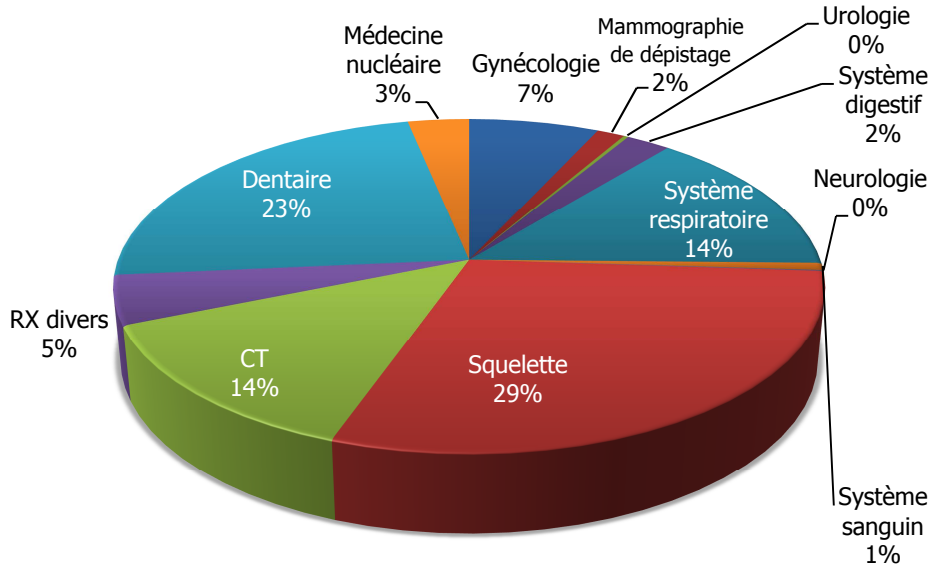
Le tableau 10 et la figure 9 présentent la distribution du nombre d'examens prescrits en 2013 et 2014. Au total, 15,6 millions de procédures diagnostiques ont été prescrites en 2013 et 15,1 millions en 2014.

Dans le document « Radiation Protection 180: Medical Radiation Exposure of the European Population » (29), la Belgique figure parmi les pays européens qui présentent le nombre le plus élevé d'examens diagnostiques radiologiques (voir figure 10). De plus, la figure 11 (29) démontre que la proportion d'examens à forte dose est relativement élevée en Belgique par rapport aux autres pays, ce qui a bien évidemment un impact sur la dose population.

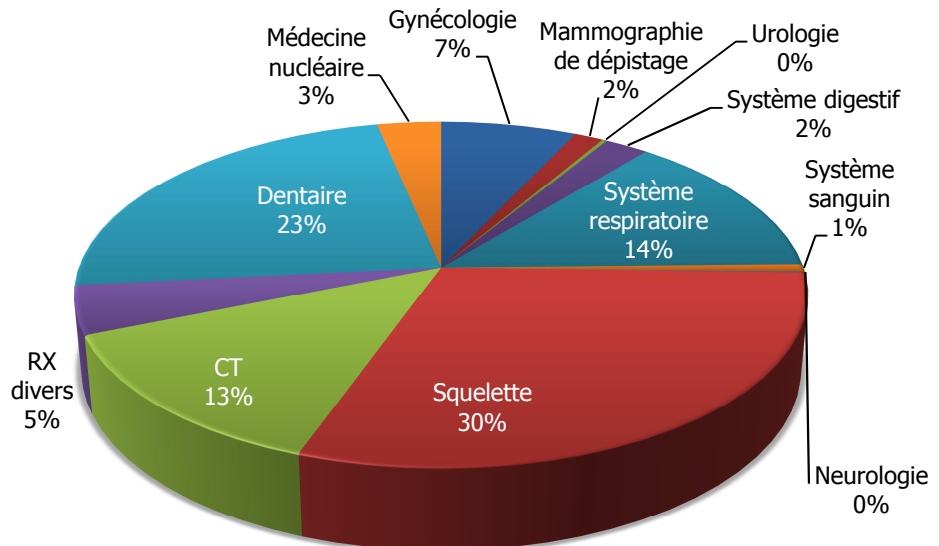
**Tableau 10 :** Distribution du nombre d'examens diagnostiques prescrits mettant en jeu les rayonnements ionisants par 1.000 habitants belges, en 2013, 2014 et 2015.

<b>Nombre d'examens prescrits</b>	<b>par 1000 en 2013</b>	<b>par 1000 en 2014</b>	<b>par 1000 en 2015</b>
<b>Gynécologie</b>	96,78	95,40	93,70
<b>Mammographie de dépistage</b>	20,56	20,43	20,94
<b>Urologie</b>	3,48	3,34	3,25
<b>Systeme digestif</b>	32,88	30,96	29,75
<b>Systeme respiratoire</b>	200,93	188,43	193,63
<b>Systeme sanguin</b>	9,80	9,45	9,89
<b>Neurologie</b>	0,88	1,08	0,64
<b>Squelette</b>	411,33	412,10	407,61
<b>CT</b>	188,11	183,46	189,57
<b>RX divers</b>	66,19	62,29	64,79
<b>Dentaire</b>	325,06	320,48	328,44
<b>Médecine nucléaire</b>	45,55	44,97	44,71
<b>Total :</b>	<b>1356,01</b>	<b>1327,43</b>	<b>1342,22</b>

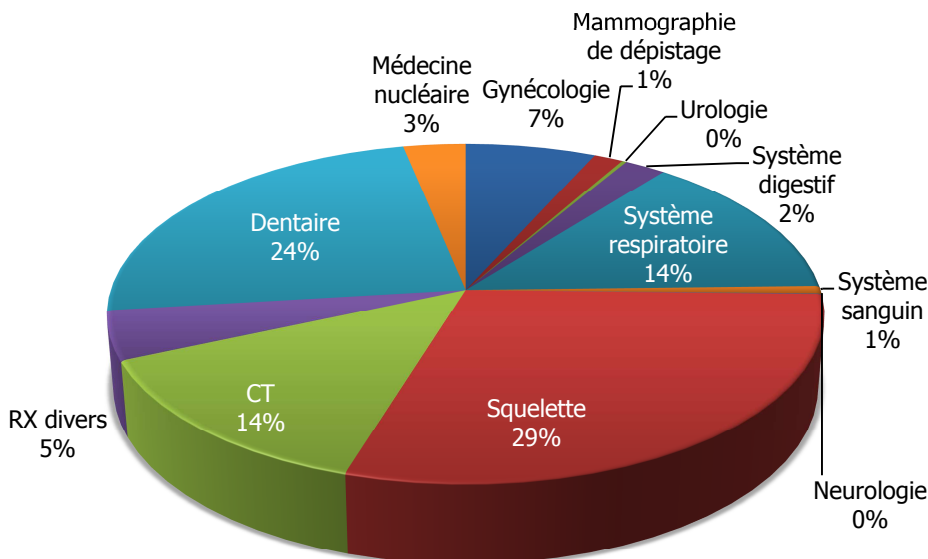
**A. Nombre d'examens par 1000 habitants en 2013**



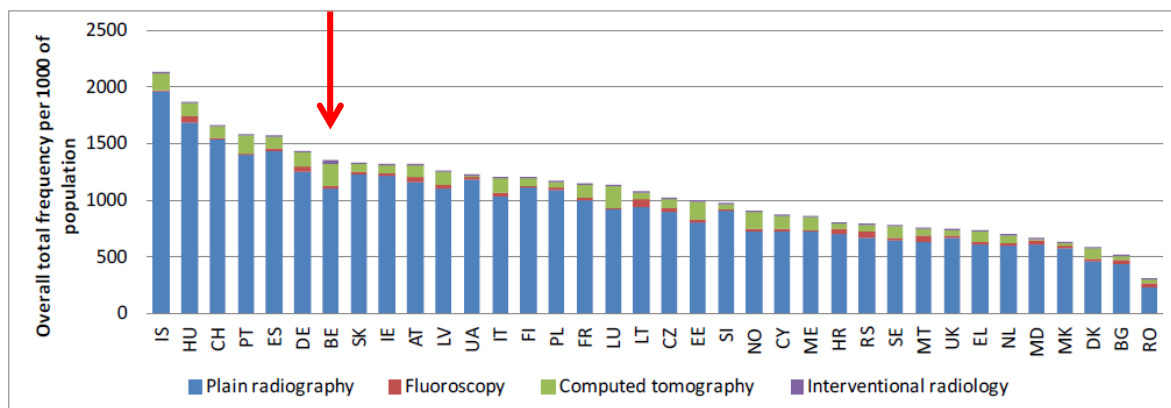
**B. Nombre d'examens par 1000 habitants en 2014**



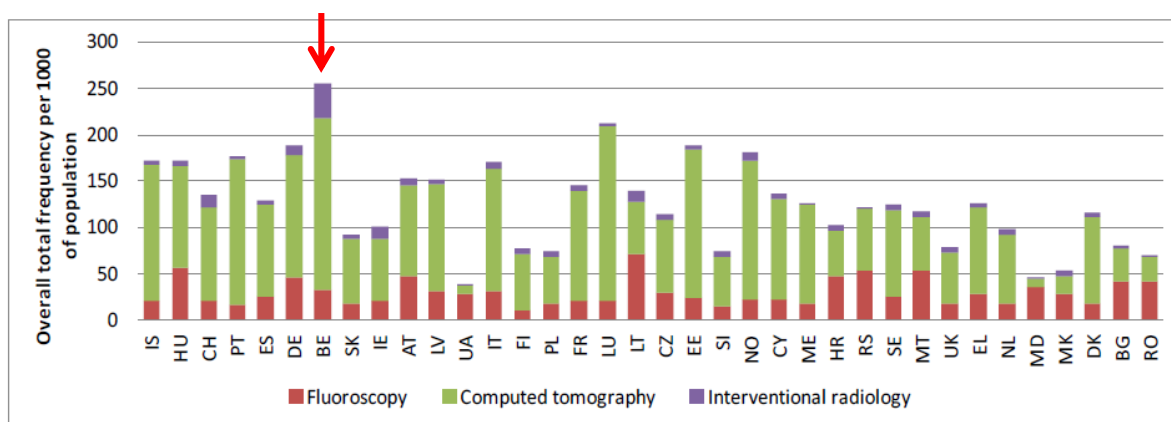
**C. Nombre d'examens par 1000 habitants en 2015**



**Figure 9** : La répartition en pourcentage du nombre d'examens diagnostiques prescrits mettant en jeu les rayonnements ionisants en 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C).

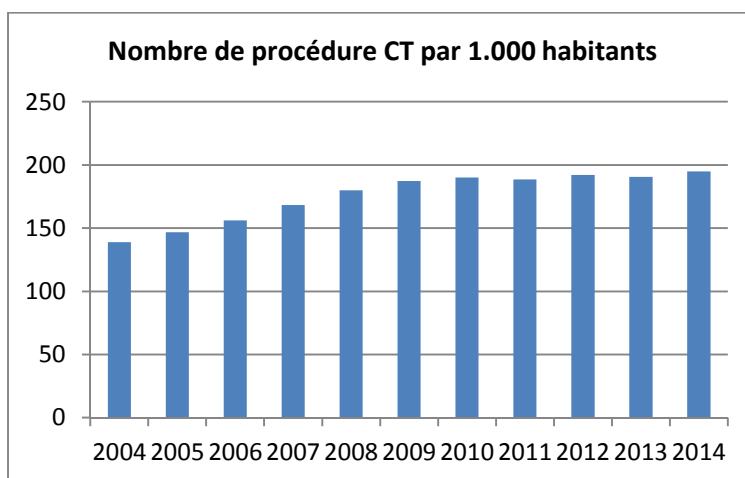


**Figure 10 :** Nombre d'examen radiologiques diagnostiques par 1.000 habitants pour différents pays, avec proportion relative des 4 principaux contributeurs (radiologie conventionnelle, médecine dentaire incluse ; fluoroscopie ; CT et radiologie interventionnelle) (29).



**Figure 11 :** Nombre d'examen par 1.000 habitants pour différents pays en ce qui concerne la fluoroscopie, la CT et la radiologie interventionnelle (29).

Au fil des ans, une augmentation du nombre de procédures CT (tomographie assistée par ordinateur) est clairement visible. Cette hausse s'est toutefois essouffée ces dernières années (voir figure 12, sur base des données de l'INAMI).



**Figure 12 :** Nombre de procédures CT par 1.000 habitants en Belgique entre 2004 et 2014.

## 2.6.2. Exposition due aux applications médicales

La dose reçue par examen a été évaluée à partir de diverses sources scientifiques, les principales étant les rapports de l'UNSCEAR de 2008 (30), la publication européenne 'Radiation Protection 180 - Part 1: Medical Radiation Exposure of the European Population' (31), le rapport environnemental Flamand 'Milieurapport Vlaanderen (MIRA) - Achtergronddocument, thema ioniserende straling' (2007) (32) et les études de l'AFCN sur la dosimétrie des patients (33). Dans la mesure du possible, les coefficients de dose ont été alignés sur les valeurs belges disponibles les plus récentes. Le tableau 11 présente les coefficients de dose pour les examens CT. Etant donné l'évolution rapide de la technologie, qui permet souvent d'obtenir une qualité d'image équivalente en réduisant la dose administrée au patient, la modernisation progressive du parc radiologique devrait conduire à une légère diminution de la dose par examen.

**Tableau 11 :** Vue d'ensemble des différents coefficients de dose (CD) de la littérature pour différents examens CT. Le coefficient de dose utilisé pour le calcul de la dose à la population est souligné. Pour 2014, le nombre de procédures prescrites et la dose annuelle individuelle sont également mentionnés.

Examen	PatDosim 2015 (33)	MIRA 2007 (32)	UNSCEAR 2008 (30)	Mettler et al. 2008 (34)	RP 180 Part 1 (29)	CD (mSv)	2014 Nombre par 1000	2014 Dose annuelle individuelle (mSv)
CT tête	<u>1,74</u>	1,5	2,4		1,3*	1,7	505594	0,079
CT rocher	...	<u>1,7</u>	...		...	1,7	50435	0,008
CT cou	<u>2,37</u>	...	...	3,0	2,9*	2,4	63833	0,014
CT vertèbres	<u>2,37</u>	5,7	5,0	...	...	2,4	9925	0,002
CT extrémités	...	<u>1,5</u>	3,8	...	...	1,5	132971	0,019
CT thorax	<u>3,61</u>	...	4,14*	...	4,2*	3,6	264161	0,086
CT abdomen	<u>8,9</u>	...	11,3*	8,0	8,6*	8,9	457781	0,365
CT cou & thorax	...	...	<u>3,8</u>	...	...	3,8	8378	0,003
CT thorax & abdomen	<u>10,16</u>	12,7	...	...	14,8	10,2	142554	0,130
CT cou, thorax & adomen	...	...	...	6,0	<u>10,1*</u>	10,1	34378	0,031

\* Données de la littérature, spécifiquement pour la Belgique

En réalité, les doses individuelles varient considérablement pour un même type d'examen spécifique. Ces variations de dose sont dues à différents facteurs tels que :

- la technologie utilisée (ex. technologie du détecteur, filtration...);
- le paramétrage des appareils (ex. dimensions de la région scannée, qualité d'image désirée...);
- les caractéristiques du patient (ex. corpulence, poids, dimensions de l'organe...)

Ci-après, le tableau 12 et la figure 13 présentent l'estimation de la dose reçue par la population belge dans le cadre des applications médicales des rayonnements ionisants, exprimée en mSv/an et par habitant, ce qui signifie la dose annuelle que reçoit le « Belge moyen ». La dose individuelle réelle que reçoit chaque Belge dépend bien évidemment des examens qu'il a subis.

Le CT-scan est clairement le principal contributeur à la dose, à hauteur respectivement de 62% en 2013 et 63% en 2014 de la dose résultant des expositions médicales (voir figure 13). Soulignons que le CT-scan ne représente toutefois que 14% (2013 et 2014) de tous les examens prescrits (voir figure 9).

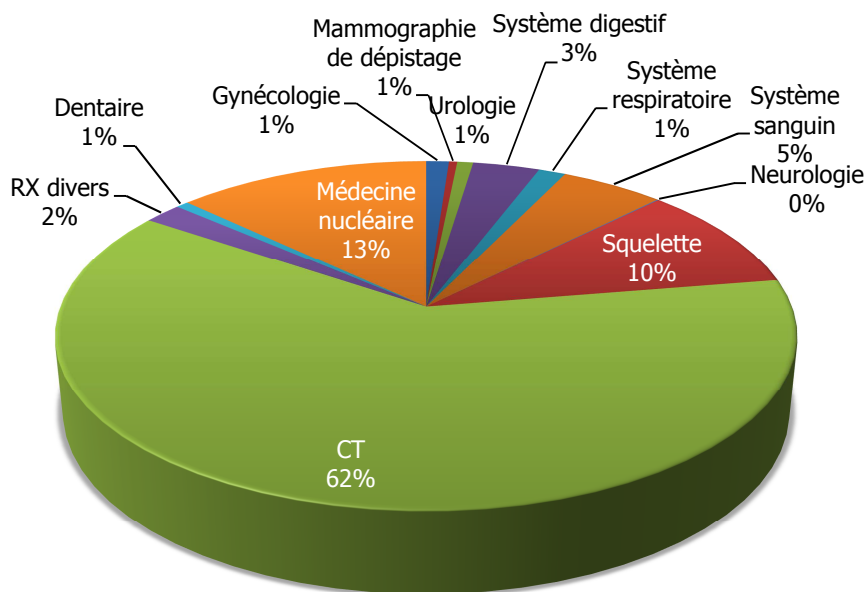
A contrario, nous constatons que les radiographies conventionnelles du squelette et de la région dentaire sont prescrites en grands nombres : 29% (2013) et 30% (2014) des examens prescrits sont des radiographies conventionnelles du squelette et 23% (2013 et 2014) de toutes les procédures sont des radiographies dentaires (voir figure 9). Toutefois, elles ne contribuent que de manière très limitée à la dose totale. Les radiographies conventionnelles du squelette représentent 10% de la dose totale, tandis que les radiographies dentaires correspondent seulement à 1% de la dose totale (voir figure 13).

**Tableau 12 :** Distribution de la dose annuelle moyenne résultant de l'exposition médicale aux rayonnements ionisants, par habitant de la population belge en 2013, 2014 et 2015.

Dose par habitant mSv/an	2013	2014	2015
<b>Gynécologie</b>	0,018	0,017	0,017
<b>Mammographie de dépistage</b>	0,006	0,006	0,006
<b>Urologie</b>	0,012	0,012	0,012
<b>Système digestif</b>	0,052	0,049	0,046
<b>Système respiratoire</b>	0,021	0,020	0,020
<b>Système sanguin</b>	0,080	0,077	0,080
<b>Neurologie</b>	0,001	0,001	0,001
<b>Squelette</b>	0,149	0,144	0,138
<b>CT</b>	0,936	0,937	0,978
<b>RX divers</b>	0,029	0,028	0,029
<b>Dentaire</b>	0,010	0,009	0,009
<b>Médecine nucléaire</b>	0,195	0,195	0,194
<b>Total :</b>	<b>1,508</b>	<b>1,494</b>	<b>1,529</b>

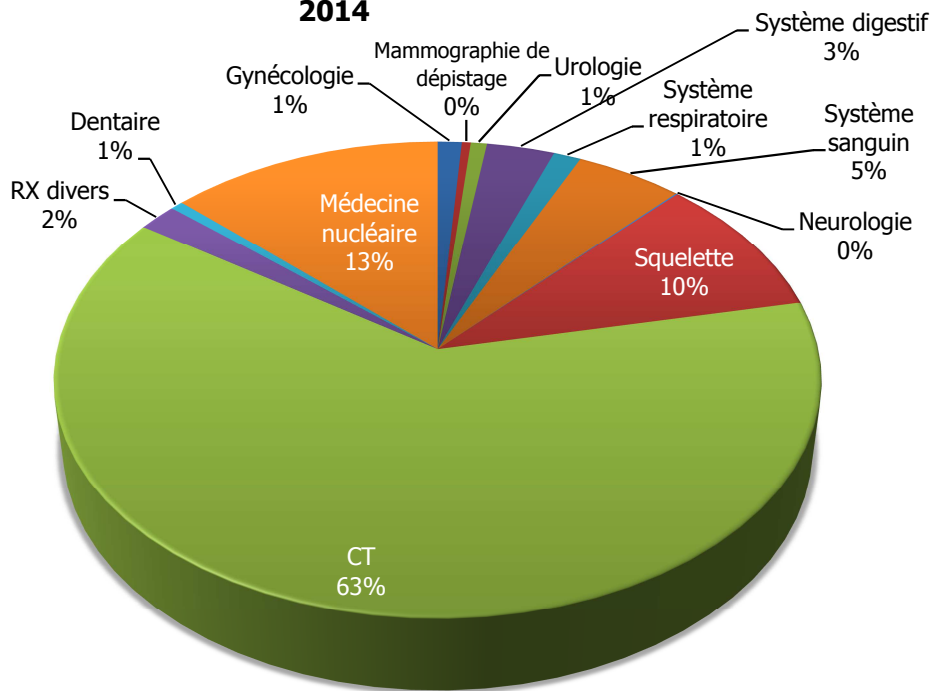
**Figure 13 :** Distribution en pourcentage de la dose résultant de l'exposition médicale aux rayonnements ionisants, par habitant de la population belge en 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C).

**A. Dose efficace individuelle moyenne en Belgique en 2013**

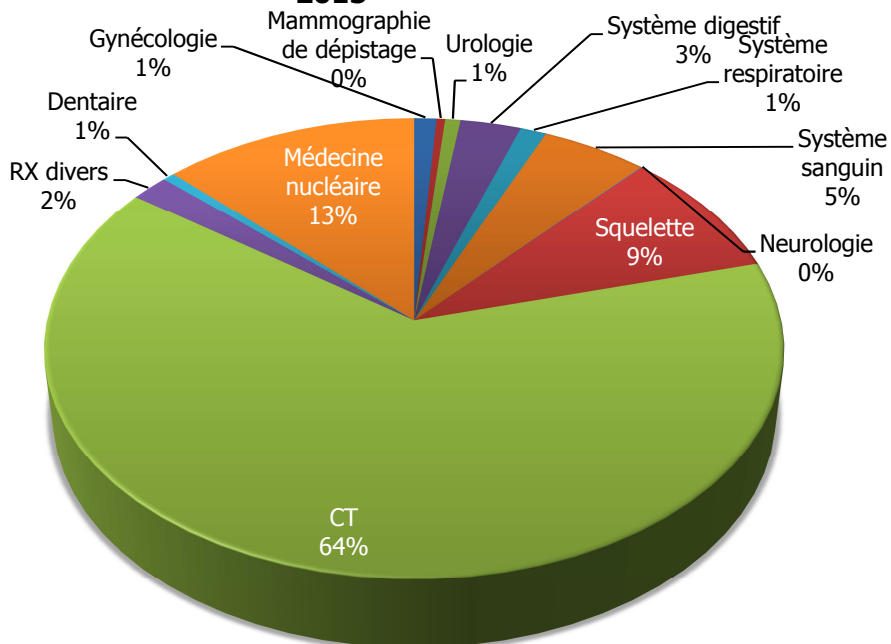




**B. Dose efficace individuelle moyenne en Belgique en 2014**



**C. Dose efficace individuelle moyenne en Belgique en 2015**



Comme indiqué précédemment, l'utilisation d'un coefficient de dose introduit une certaine variabilité et une certaine incertitude dans les calculs de dose. Différentes données provenant, d'une part, de la littérature et, d'autre part, des résultats des études de l'AFCN sur la dosimétrie des patients (33) ont permis de définir un coefficient 'best estimate', dont l'estimation est la plus plausible. Néanmoins, pour illustrer la variabilité de la dose en fonction du choix du coefficient de dose, le débit de dose total a également été calculé en utilisant le coefficient de dose le plus élevé et le coefficient de dose le moins élevé. Les valeurs obtenues donnent une idée de la complexité et de l'incertitude qui entourent l'estimation de la dose efficace que reçoit la population suite à l'exposition due aux applications médicales.

**Tableau 13 :** Dose par habitant en Belgique résultant de l'exposition médicale diagnostique, calculée sur base de divers coefficients de dose, soit le plus élevé, le moins élevé et le 'best estimate'.

Coefficient de dose (=CD)	2013 (mSv/an)	2014 (mSv/an)	2015 (mSv/an)
CD le + élevé :	1,14	1,11	1,14
CD le - élevé :	2,24	2,23	2,29
'Best estimate' :	<b>1,51</b>	<b>1,49</b>	<b>1,53</b>

En comparaison avec la dose population de 2010, l'exposition médicale est passée de 2,3 mSv/an en 2010 à environ 1,5 mSv/an en 2013-2015. Bien que cette diminution de la dose soit significative, elle résulte principalement d'une modification de la nomenclature INAMI survenue en 2010. En effet, la nomenclature des examens CT a été affinée et la description relativement générique, selon laquelle un examen CT pouvait porter sur le cou, le thorax, l'abdomen ou sur une combinaison des trois, a été remplacée par trois numéros INAMI distincts qui correspondent chacun à l'une des régions du corps qui est radiographiée. Cette modification permet évidemment d'estimer plus correctement la dose. En outre, les coefficients de dose ont été actualisés, ce qui a amené à une réduction de l'estimation de la dose.

La dernière comparaison au niveau européen (29) montre que l'exposition médicale en Belgique est élevée par rapport aux autres pays (figure 14). La figure 15 présente le dose théorique relatif résultant des applications médicales diagnostiques en Belgique. Les courbes (rouge, verte et noire) ont été tracées en utilisant un même coefficient de dose qui permet de suivre l'évolution de la dose efficace théorique au fil des ans. Cependant, cette dose théorique permet une analyse purement qualitative puisque la dose réellement administrée aux patients diminue chaque année en raison, d'une part, de l'optimisation et, d'autre part, de la modernisation progressive des appareils radiologiques.

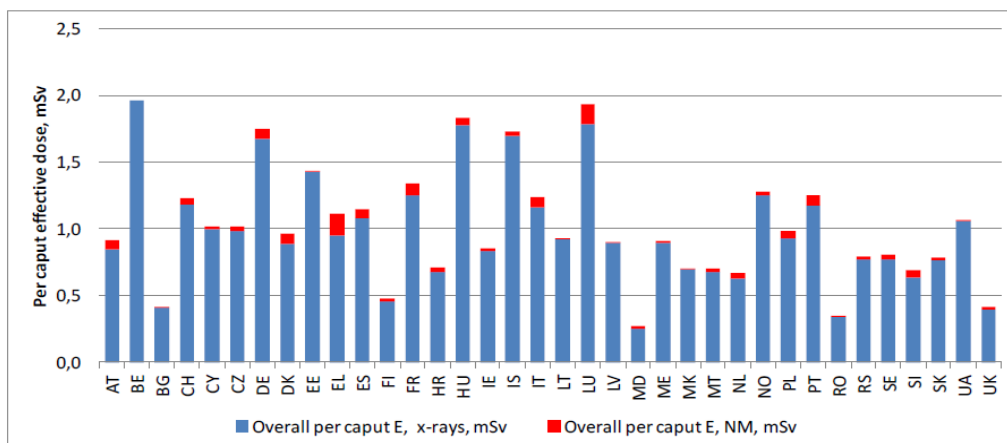
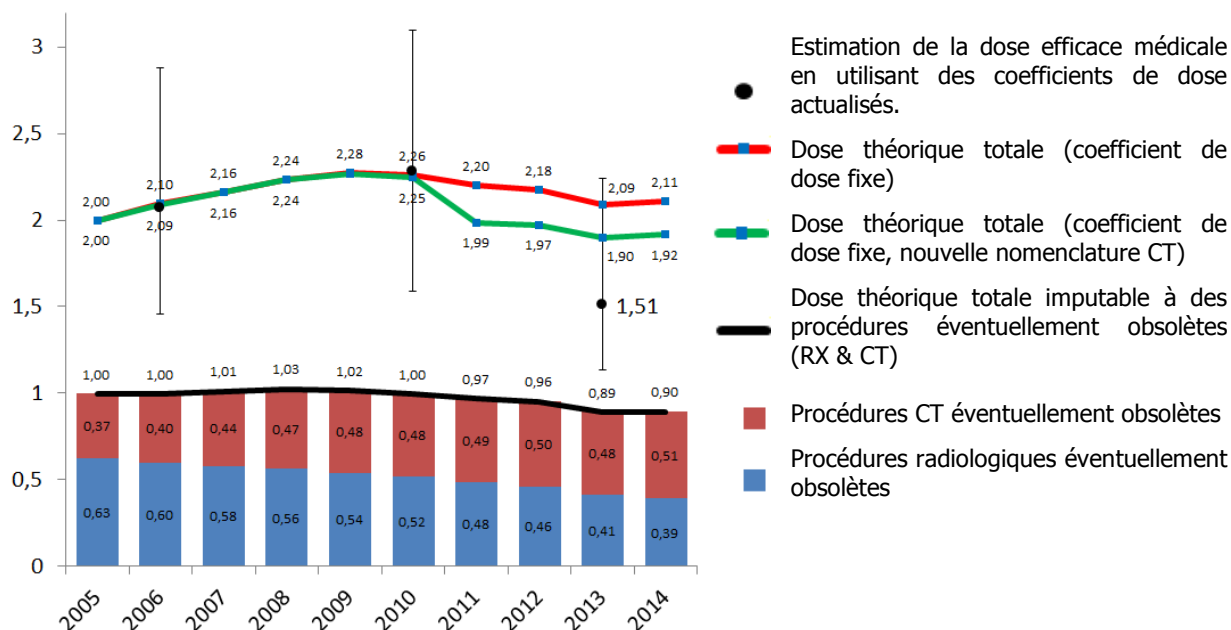


Figure 14 : Dose de la population européenne résultant de l'exposition médicale (Belgique : données de 2006) (29)

La courbe rouge représente la dose théorique totale calculée sur base de l'ancienne nomenclature, tandis que le tronçon vert représente cette même dose théorique calculée en utilisant la nouvelle nomenclature. L'introduction de la nouvelle nomenclature CT entraîne une réduction de la dose théorique de l'ordre de 10%. Les points en noir représentent les meilleurs estimations possibles du dose médical en utilisant des coefficients de dose actualisés. Les indicateurs d'erreurs ne désignent pas des erreurs statistiques, ils correspondent à la gamme de doses médicales que l'on obtient en utilisant les coefficients de dose les plus et les moins élevés (voir tableau 13).



**Figure 15 :** Evolution de la dose théorique résultant des applications diagnostiques en Belgique (mSv/an). Les indicateurs d'erreurs pour l'estimation de l'exposition médicale avec actualisation du coefficient de dose, désignent la gamme de doses médicales que l'on obtient en utilisant les coefficients de dose les plus et les moins élevés.

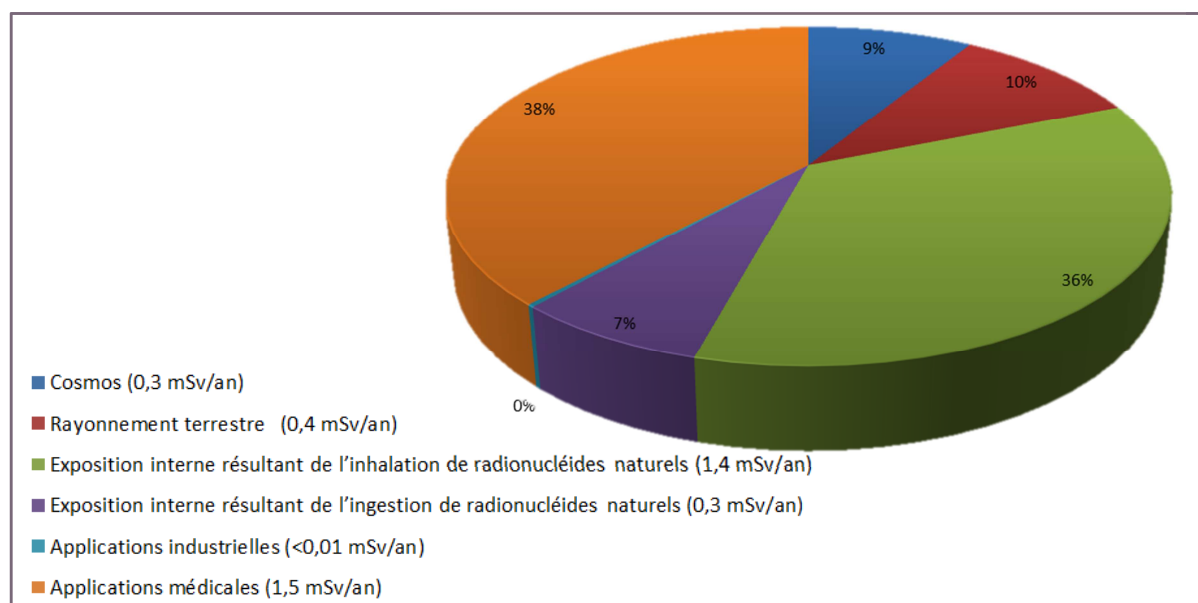
La diminution de la dose médicale telle qu'elle est observée ne signifie toutefois pas que les techniques d'imagerie sont utilisées correctement. Une campagne de sensibilisation menée par l'INAMI en 2010 sur la rationalisation des prescriptions des examens d'imagerie médicale a permis d'identifier une sélection d'examens aux indications particulièrement réduites (35). Dans la figure 14 , la courbe noire représente l'évolution décroissante de la dose théorique imputable à ces examens éventuellement obsolètes. Toutefois, la diminution observée de cette dose théorique associée à la redondance d'examens (-13%) n'est pas aussi sensible qu'initialement escomptée et présente une marge d'amélioration. De plus, nous observons notamment une diminution des examens radiologiques potentiellement obsolètes, alors que la dose à la suite des examens CT éventuellement redondants continue à augmenter.

## C. La dose reçue en 2015 par la population belge dans le cadre de son exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle et artificielle.

Les données considérées dans les paragraphes précédents donnent une dose annuelle moyenne de 4 mSv par habitant en Belgique pour 2015. On distingue les doses suivantes qui résultent des expositions aux rayonnements ionisants d'origine naturelle et artificielle.

**Tableau 14 :** Estimation du dose reçu par un habitant belge moyen suite à son exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle et artificielle en 2015.

<b>Dose par habitant en 2015 (mSv/an).</b>	
<b>Cosmos</b>	
Rayonnement cosmique :	0,310
Radionucléides cosmogéniques :	0,012
Vacances en avion et vacances en altitude :	0,025
<b>Dose totale résultant du rayonnement cosmique:</b>	<b>0,347</b>
<b>Rayonnement terrestre</b>	
<b>Exposition interne résultant de l'inhalation de radionucléides naturels</b>	
Exposition au radon et dérivés par inhalation :	1,254
Exposition au gaz radon par inhalation :	0,058
Exposition au thoron et dérivés par inhalation :	0,091
<b>Exposition totale résultant de l'inhalation de radionucléides naturels :</b>	<b>1,403</b>
<b>Exposition interne résultant de l'ingestion de radionucléides naturels</b>	
Exposition au gaz radon par ingestion :	0,002
Radionucléides naturels autres que radon et thoron	0,290
<b>Exposition totale résultant de l'ingestion de radionucléides naturels :</b>	<b>0,292</b>
<b>Applications industrielles</b>	<b>&lt;0,01</b>
<b>Applications médicales</b>	<b>1,529</b>
<b>Total :</b>	<b>3,981</b>



**Figure 16 :** Estimation de la dose de rayonnements ionisants qu'a reçue le Belge moyen en 2015 (dose totale = 4 mSv/an).

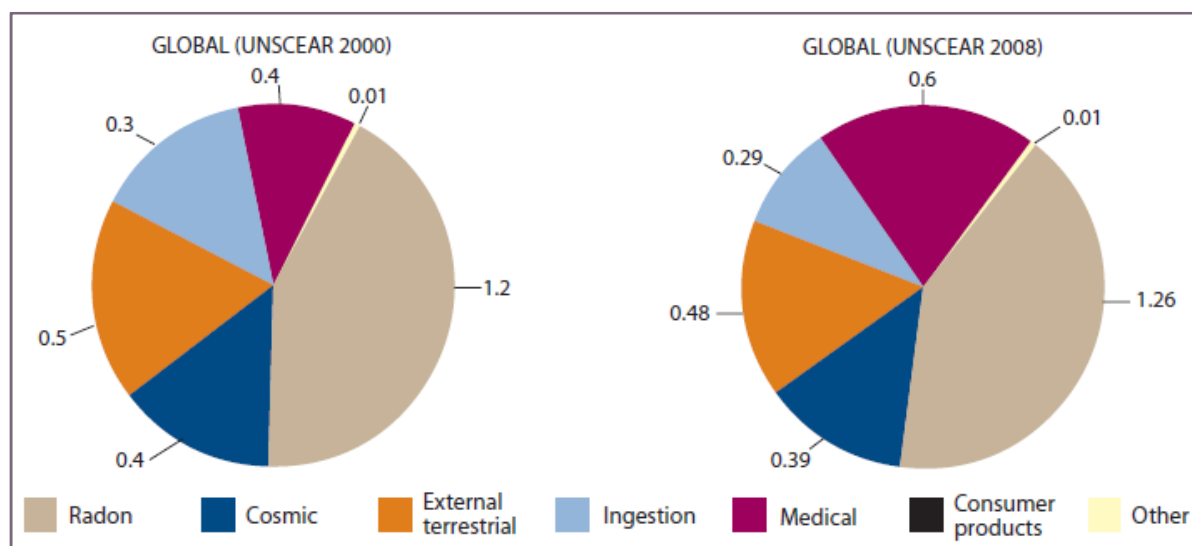
## D. Evolution de la dose population en Belgique.

Par le passé, la dose que recevait la population belge était déterminée à divers intervalles de temps (Tableau 14). En 2001 et 2006, ce calcul a eu lieu dans le cadre du rapport MIRA (rapport environnement Flandre) pour le compte de la Société flamande de l'Environnement (Vlaamse Milieumaatschappij).

Les évolutions de la dose population due aux expositions naturelles s'expliquent principalement par une actualisation des données relatives à l'exposition au radon et au thoron. Les estimations de 2001 et 2006 se basaient sur une concentration moyenne en radon de 48 Bq/m<sup>3</sup> à l'intérieur d'une habitation en Belgique (6, 37). Pour l'évaluation de 2010, une concentration moyenne de 59 Bq/m<sup>3</sup> a été considérée (36), tandis que l'évaluation de 2015 tablait sur une concentration moyenne de 46 Bq/m<sup>3</sup>, valeur pondérée par la densité de population (12).

**Tableau 15** : Dose population par habitant exprimée en mSv/an.

Dose population par habitant en mSv/an	2001 (5)	2006 (37)	2010 (1)	2015
<b>Exposition naturelle</b>				
Rayonnement cosmique	0,4	0,4	0,3	0,3
Rayonnement terrestre	0,4	0,4	0,4	0,4
Inhalation de radionucléides naturels (radon et thoron)	1,5	1,5	1,7	1,4
Ingestion de radionucléides naturels	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Total rayonnement naturel</b>	<b>2,5</b>	<b>2,5</b>	<b>2,8</b>	<b>2,4</b>
<b>Expositions artificielles</b>				
Expositions médicales	2,0	2,1	2,3	1,5
Autres expositions artificielles	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
<b>Total rayonnement artificiel</b>	<b>2,0</b>	<b>2,1</b>	<b>2,3</b>	<b>1,5</b>
<b>Total</b>	<b>4,5</b>	<b>4,6</b>	<b>5,1</b>	<b>4,0</b>



**Figure 17:** Estimation de la contribution des diverses sources de rayonnement ionisant à l'exposition moyenne du public au niveau mondial (2).

L'évolution de l'exposition artificielle est considérablement déterminée par les expositions médicales résultant de l'imagerie médicale diagnostique. La figure 17 montre l'exposition mondiale aux rayonnements ionisants en 2000 et 2008 (2). Lorsque la dose à la suite d'applications médicales est comparée à la valeur Belge, il semble que les expositions médicales soient amplement utilisées en Belgique. Jusqu'en 2010, la courbe des expositions médicales en Belgique était croissante, mais il s'est avéré en 2015 que cette tendance s'était inversée. D'une part, la nomenclature de l'INAMI pour les examens CT a été adaptée et permet depuis lors d'estimer la dose médicale plus précisément et, d'autre part, l'optimisation de la dose et la modernisation progressive du parc radiologique permettent de réduire la dose aux patients. Néanmoins, la surconsommation de l'imagerie médicale perdure (voir figures 15). Les efforts de sensibilisation et d'optimisation de la dose en médecine doivent donc se poursuivre afin de continuer à tirer vers le bas la dose population.

## Bibliographie

1. FANC, Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle. De gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België. [En ligne] <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/gemiddelde-blootstelling-aan-ioniserende-stralingen-in-belgie/963.aspx>.
2. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2008 Report to the General Assembly, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation*. Annex B, 2008.
3. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2000 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex A, Dose Assessment Methodologies, 63 pages*. Annex A, 2000.
4. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2000 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex B, Exposures from Natural Radiation Sources*. Annex B, 2000.
5. *Exposure of the Belgian population to ionizing radiation*. Vanmarcke, H, et al., et al. 2004, Proc. IRPA 11 congress May 23-28, Madrid, Spain.
6. Watson S., Jones A., Oatway W., Hughes J. *Ionising radiation exposure of the UK population: 2005 review*. 2005.
7. Gillard J., Flémal J.M., Deworm J.P., Slegers W. *Measurement of the natural radiation of the Belgian territory*. s.l. : Report of SCK•CEN, BLG 607, 1988.
8. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2015*. 2016.
9. *TELERAD: the radiological surveillance network and early warning system in Belgium*. Sonck M, Desmedt M, Claes J, Sombre L. 2008. IRPA 12 Buenos Aires (FP 0691).
10. Sombré L, Claes J, Bouchonville M. *Radiologisch toezicht in België: syntheseverslag 2014*. FANC . september 2015.
11. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2006, Report to the General Assembly - Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces*. 2006.
12. council, Superior Health. *Advisory report of the superior health council No. 8794: Indoor air quality in Belgium*. In Press.
13. ICRP, International commission on radiological protection. *ICRP Publication 65 - Protection against Radon-222 at Home and at Work*. Ann. ICRP 23 (2). 1993.
14. ICRP, International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103 - The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Ann. ICRP 37 (2-4). 2007.
15. ICRP, International commission on radiological protection. *ICRP Publication 115 - Lung cancer risk from radon and statement on radon*. Ann. ICRP 40(1), 2010.
16. *The application of radon measurements in the radon action plan in Belgium*. . Dehandschutter B., Noel E., Pépin S., Pofijn A., Sonck M. 1, 2009, Annales de l'Association belge de Radioprotection, Vol. 34, pp. 89-110.
17. ARBIS: koninklijk besluit van 20 juli 2001 houdende algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van de ioniserende stralingen.
18. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: informatiedossier voor het jaar 2011*. 2012.
19. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle.. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2012*. 2013.
20. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle.. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2013*. 2014.
21. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2014*. 2015.
22. *Survey of the 137Cs contamination in Belgium by in-situ gamma spectrometry, a decade after the Chernobyl accident*. Uyttenhove J, Pommé S, Van Wayenberge B, Hardeman F, Buysse J, Culot J-P. 4, 1997, Health Physics, Vol. 37, pp. 644-646.
23. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *FUKUSHIMA - één jaar later*. 2012.
24. FANC, Federal agency for nuclear control. *Radiologisch toezicht in België - Syntheseverslag 2014*. 2015.

25. Vanaudenhove, T. Personal communication. 2015.
26. ESOREX. ESOREX Platform: European Platform for Occupational Radiation Exposure. [En ligne] [https://esorex-platform.org/charts/g2?field\\_country\\_target\\_id=11548&field\\_year\\_value=2013&=Apply](https://esorex-platform.org/charts/g2?field_country_target_id=11548&field_year_value=2013&=Apply).
27. National Institute for Statistics - Belstat. [En ligne] 2016. <http://statbel.fgov.be>.
28. Van Dam, Bosmans, Mol, De Geest, Wambersie. *Inventaris van de bevolkingsdosis tengevolge van radiologische activiteiten, verslag werkjaar 2005*. 2005.
29. European Commission. *Radiation Protection 180: Medical Radiation Exposure of the European Population*. 2014.
30. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2008 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex A, Medical radiation exposures*. 2008.
31. Commission, European. *Radiation Protection 180 - Part 1: Medical Radiation Exposure of the European Population*. 2014.
32. milieumaatschappij, Vlaamse. *Milieurapport Vlaanderen (MIRA) - Achtergronddocument, thema ioniserende straling*. 2007.
33. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. Patiëntendosimetrie in radiologie. [En ligne] <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/patientendosimetrie-in-radiologie/1196.aspx>.
34. *Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog*. Mettler FA Jr, Huda W, Yoshizumi TT, Mahesh M. 1, 2008, Radiology, Vol. 248, pp. 254-63.
35. RIZIV, Rijksinstituut voor Ziekte- en Invaliditeitsverzekering. *Medische Beeldvorming: rationeel voorschrijven: Sensibilisering voor het blootstellingsrisico aan ioniserende straling - Een selectie van onderzoeken met zeer beperkte indicaties*. 2010.
36. *The application of radon measurements in the radon action plan in Belgium*. Dehandschutter B, Noel E, Pépin S, Poffijn A, Sonck M. 1, 2009, Annales de l'Association belge de Radioprotection, Vol. 34, pp. 89-110.
37. *Ionizing radiation exposure of the Belgian population in 2006*. Vanmarcke H., Hilde B., Gilbert E. 2010. Proceedings of the Third European IRPA congress, Helsinki, Finland, 14-18 June 2010 .
38. *Stimulating radon safe building in radon prone areas by detailed scale radon hazard mapping*. Poffijn A. Dehandschutter B., Noel E., Pépin S., Sonck M. 2009. AARST 2009 conference, St. Louis MO.
39. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. Persoonlijke communicatie op basis van verwerking van de gegevens in de database professionele blootstellingen.
40. FANC. Radon in België. [En ligne] [Citation : 21 March 2017.] <http://fanc.fgov.be/nl/page/646.aspx>.
41. *Human Population Exposure to Cosmic Radiation*. Bouville A, Lowder W.M. 1998, Radiation Protection & Dosimetry, Vol. 24, pp. 293-299.



## Liste des figures

Figure 1 : L'exposition moyenne aux rayonnements ionisants en Belgique en 2010. ....	3
Figure 2: Courbe isodoses - mesures TELERAD 2014.....	8
Figure 3: La distribution géographique de l'exposition au radon en Belgique (41). Les zones sensibles sont indiquées en orange et en rouge. ....	9
Figure 4: Les établissements nucléaires qui possèdent une autorisation de classe I en Belgique (9). 13	
Figure 5: Les voies d'exposition du public (9).....	14
Figure 6: Dépôt de césium-137 10 ans après l'accident de Tchernobyl (1995) (23). ....	15
Figure 7: Distribution des doses reçues par les personnes professionnellement exposées en 2013 en Belgique (27).....	18
Figure 8 : Dose reçue par les travailleurs dans divers pays européens en 2013 (27).....	19
Figure 9 : La répartition en pourcentage du nombre d'examens diagnostiques prescrits mettant en jeu les rayonnements ionisants en 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). ....	21
Figure 10 : Nombre d'examens radiologiques diagnostiques par 1.000 habitants pour différents pays, avec proportion relative des 4 principaux contributeurs (radiologie conventionnelle, médecine dentaire incluse ; fluoroscopie ; CT et radiologie interventionnelle) (30). ....	22
Figure 11 : Nombre d'examens par 1.000 habitants pour différents pays en ce qui concerne la fluoroscopie, la CT et la radiologie interventionnelle (30).....	22
Figure 12 : Nombre de procédures CT par 1.000 habitants en Belgique entre 2004 et 2014.....	22
Figure 13 : Distribution en pourcentage de la dose résultant de l'exposition médicale aux rayonnements ionisants, par habitant de la population belge en 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C).....	24
Figure 14 : Dose de la population européenne résultant de l'exposition médicale (Belgique : données de 2006) (30) .....	26
Figure 15 : Evolution de la dose théorique résultant des applications diagnostiques en Belgique (mSv/an). Les indicateurs d'erreurs pour l'estimation de l'exposition médicale avec actualisation du coefficient de dose, désignent la gamme de doses médicales que l'on obtient en utilisant les coefficients de dose les plus et les moins élevés. ....	27
Figure 16 : Estimation de la dose de rayonnements ionisants qu'a reçue le Belge moyen en 2015 (dose totale = 4 mSv/an). ....	28
Figure 17: Estimation de la contribution des diverses sources de rayonnement ionisant à l'exposition moyenne du public au niveau mondial (2). ....	29