



Modélisation d'un accident nucléaire majeur hypothétique dans un réacteur de la centrale nucléaire de Cattenom (4 x 3817 MWth → 4 x 1300 MWe), analyse de la dispersion du nuage radioactif par 1'096 simulations météorologiques et analyse de l'impact sur la santé et les sols

*European Nuclear Power Risk study* → EUNUPRI-2024b/étude stratégique n°6 → Version 4, 12 mai 2024

**NOUVELLE VERSION DU 12 MAI. TEXTE ENCORE EN VOIE DE FINALISATION. NE PAS CITER A CE STADE.  
LA VERSION FINALE EST EN COURS.**

Piguet Frédéric-Paul <sup>1i</sup>, Eckert Pierre<sup>i</sup>, Knüsli Claudio<sup>ii</sup>, Helder Peixoto<sup>iii</sup>, Giuliani Gregory<sup>iii</sup>

<sup>i</sup> Institut Biosphère, Genève ; <sup>ii</sup> IPPNW (Suisse), Zürich; <sup>iii</sup> Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève.

Sponsor de l'étude : Greenpeace (Luxembourg)

---

<sup>1</sup> Auteur pour la correspondance : Frédéric-Paul Piguet, *Institut Biosphère*, CH-1226 Genève, fppiguet@institutbiosphere.ch

## RÉSUMÉ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. CONTEXTE</b> .....   | <b>4</b>  |
| 1.1 CHAMP DE L'ÉTUDE .....   | 4         |
| <i>Contexte</i> .....  | 4         |
| 1.2 DÉFINITION.....  | 4         |
| 1.3 RAYONNEMENTS IONISANTS - RISQUES POUR LA SANTÉ - IMPORTANCE DE L'ÉPIDÉMIOLOGIE, MODÈLE LINÉAIRE SANS SEUIL (LNT) ET AU-DELÀ .....  | 5         |
| 1.4 ÉTUDES EXISTANTES SUR LES SIMULATIONS DES IMPACTS DES ACCIDENTS MAJEURS DANS LES CENTRALES NUCLÉAIRES EUROPÉENNES .....  | 5         |
| (a) <i>Bilan humain d'un accident nucléaire majeur simulé en France</i> .....  | 5         |
| (b) <i>Surfaces contaminées par la déposition de Cs-137</i> .....  | 5         |
| (c) <i>Coût d'un accident nucléaire majeur, 450 Md€, ou de 760 à 5'700 Md€ ?</i> .....   | 6         |
| (d) <i>Rejets et doses</i> .....   | 7         |
| 1.5 ÉVALUATION DE L'ACCIDENT EN REGARD DE LA LÉGISLATION SUR LA RADIOPROTECTION.....   | 7         |
| (a) <i>Esquisse de la question</i> .....   | 7         |
| (b) <i>Présentation de la Directive 2013/59/EURATOM</i> .....  | 7         |
| (c) <i>Signification des doses efficaces engagées de 1 mSv, 6 mSv et 20 mSv</i> .....  | 9         |
| (d) <i>Quel respect des normes légales par les pouvoirs publics en cas d'accident nucléaire majeur ?</i> .....   | 9         |
| 1.6 EMPLACEMENT DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE CATTENOM.....  | 9         |
| 1.6.1 <i>Distances aux frontières</i> .....  | 9         |
| 1.6.2 <i>Distances à quelques villes</i> .....   | 10        |
| 1.7. DESCRIPTION DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE CATTENOM ET POINTS FAIBLES .....  | 10        |
| (a) <i>Description succincte</i> .....   | 10        |
| (b) <i>Points faibles</i> .....  | 10        |
| 1.8 PROBABILITÉ D'UN ACCIDENT NUCLÉAIRE MAJEUR APRÈS L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA .....   | 11        |
| (a) <i>Revue de la littérature</i> .....   | 11        |
| (b) <i>Discussion sur la probabilité et l'ampleur d'un accident nucléaire majeur</i> .....   | 12        |
| (c) <i>Actualisation de la probabilité d'un accident nucléaire majeur et de son ampleur supposée</i> .....   | 12        |
| <b>II. MÉTHODOLOGIE</b> .....  | <b>14</b> |
| 2.1 APERÇU DES QUESTIONS MÉTHODOLOGIQUES .....   | 14        |
| 2.2 TERME SOURCE .....   | 14        |
| (a) <i>Terme source d'un accident nucléaire majeur</i> .....   | 14        |
| (b) <i>Précisions sur le terme source</i> .....  | 15        |
| (c) <i>Nucléides parents et descendants</i> .....  | 16        |
| 2.3 DES BECQUERELS AUX SIEVERTS DE LA DOSE EFFICACE COLLECTIVE ENGAGÉE DES POPULATIONS TOUCHÉES.....   | 17        |
| (a) <i>Des Becquerels aux mSv</i> .....  | 17        |
| (b) <i>Des doses individuelles à la dose collective</i> .....  | 17        |
| (c) <i>Intervalle pris en compte dans l'estimation de l'impact sanitaire du nuage</i> .....  | 18        |
| (d) <i>Intervalle pris en compte dans l'estimation de l'impact sanitaire de la déposition</i> .....  | 18        |
| (e) <i>Comparaison avec les termes sources de Fukushima et Tchernobyl</i> .....  | 18        |
| 2.4 VITESSE DE DÉPOSITION DE DIFFÉRENTS NUCLÉIDES DANS ET SOUS LE NUAGE.....   | 19        |
| (a) <i>Cadre</i> .....   | 19        |
| (b) <i>Revue de la littérature</i> .....   | 19        |
| (c) <i>Détermination des paramètres de la vitesse de déposition sèche et de l'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage pour les aérosols et les refractories</i> ..... | 19        |
| (d) <i>Vitesse de déposition sur différents types de sols</i> .....  | 20        |
| 2.5 SIMULATIONS MÉTÉOROLOGIQUES .....  | 20        |
| (a) <i>Qu'est-ce qu'un modèle de dispersion atmosphérique ?</i> .....  | 20        |
| (b) <i>Considérations sur la résolution des champs météorologiques</i> .....   | 21        |
| (c) <i>Le modèle de dispersion Hysplit</i> .....   | 21        |
| (d) <i>Le modèle de dispersion Hysplit évalué par l'OMM dans le cas de Fukushima</i> .....   | 21        |
| (e) <i>Production des champs d'immission</i> .....   | 21        |
| 2.6 ANALYSE DE L'IMPACT PAR LE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG) .....  | 22        |
| (a) <i>Approche</i> .....  | 22        |
| (b) <i>Catégories de sols</i> .....  | 23        |
| (c) <i>Fonds de carte pour l'analyse de l'impact sur la population, et celui de la déposition sur les sols</i> .....   | 24        |
| 2.7 MÉTHODOLOGIE DE LA QUESTION DE SANTÉ .....   | 24        |
| (a) <i>Contexte</i> .....  | 24        |
| (b) <i>Estimation du nombre de victimes lors d'un accident majeur dans une centrale nucléaire - rétrospectivement et prospectivement</i> .....                                 | 25        |

|  |           |
|--|-----------|
| (c) Modèle A.....  | 26        |
| (d) Modèle B.....  | 26        |
| (e) Modèle C.....  | 27        |
| <b>III. LES RÉSULTATS.....</b>   | <b>30</b> |
| 3.1 NOMBRE DE PERSONNES IMPACTÉES PAR LE NUAGE RADIOACTIF, EN MOYENNE, SELON 1096 SIMULATIONS MÉTÉOROLOGIQUES .....        | 30        |
| (a) Dose efficace individuelle, impact potentiel sur la population européenne (Tableau 3.1.1).....                         | 30        |
| (b) Dose efficace individuelle, impact potentiel sur différentes populations.....  | 31        |
| 3.2 ESTIMATION DE L'IMPACT DU NUAGE RADIOACTIF SUR LES VILLES.....   | 32        |
| (a) Démarche.....  | 32        |
| (b) Impacts sur les localités à quelque 30 km de la centrale.....  | 32        |
| (c) Impacts sur les autres villes.....   | 33        |
| 3.3 NOMBRE D'HABITANTS À ÉVACUER DURABLEMENT APRÈS DÉPOSITION SUR LES SOLS.....  | 35        |
| (a) Perspective .....  | 35        |
| (b) Évacuation en regard de la population des pays européens.....  | 35        |
| (c) Évacuation en regard de différentes populations.....   | 36        |
| 3.4 IMPACT SANITAIRE SOUS FORME DE MALADIES GRAVES ET DE DÉCÈS RADIO-INDUITS .....   | 36        |
| a) Rappel concernant le modèle linéaire sans seuil selon le Modèle A et le Modèle B.....                                   | 36        |
| (b) Distribution de la dose collective efficace engagée (nuage $\leq 2000$ mSv et déposition $< 20$ mSv).....              | 37        |
| (c) Nombre de cancers radio-induits selon le Modèle A.....   | 37        |
| (d) Nombre de maladies graves radio-induites selon le Modèle B.....  | 37        |
| (e) Nombre de décès radio-induits selon le Modèle B.....   | 38        |
| 3.5 CATTENOM : EXPORTATION DU RISQUE D'UN ACCIDENT NUCLEAIRE MAJEUR PAR-DELA LES FRONTIERES .....                          | 39        |
| 3.6 DÉPOSITION SUR LES SOLS, DONNÉES EN KM <sup>2</sup> .....  | 39        |
| (a) Objet de ces résultats.....  | 39        |
| (b) Toutes surfaces.....   | 39        |
| (c) Surfaces agricoles.....  | 41        |
| (d) Surfaces herbacées, dont les pâtures.....  | 42        |
| <b>IV. DISCUSSION .....</b>  | <b>44</b> |
| 4.1 DES DIFFÉRENTS TERMES SOURCES AUX DOSES EFFICACES COLLECTIVES ENGAGÉES .....   | 44        |
| (a) Libération .....   | 44        |
| (b) De Bq à mSv.....   | 44        |
| (c) Vitesse de déposition des nucléides dans et sous le nuage, et simulations météorologiques.....                         | 44        |
| (d) Populations touchées : volume d'air respiré et absence de facteur indoor.....  | 44        |
| (e) Populations touchées : grande variabilité des comportements face au nuage radioactif.....                              | 44        |
| (f) Populations touchées : évaluation du nombre de personnes soumises à une dose efficace individuelle engagée en mSv..... | 46        |
| (g) Populations touchées : hypothèses sur l'évacuation des personnes résidant en zone de sols radioactifs.....             | 46        |
| (h) Système d'information géographique.....  | 47        |
| 4.2 EFFETS SUR LA SANTÉ.....   | 47        |
| (a) Estimation du nombre de victimes d'un accident nucléaire.....  | 47        |
| (b) Points forts de l'évaluation de l'impact sur la santé.....   | 48        |
| (c) Lacunes de l'évaluation de l'impact sur la santé.....  | 48        |
| 4.3 ÉVACUATION PRÉVENTIVE ET ÉVACUATION À LONG TERME.....  | 49        |
| (a) Évacuation préventive.....   | 49        |
| (b) Évacuation à long terme.....   | 49        |
| 4.4 DÉPOSITION RADIOACTIVE SUR LES SOLS ET PLUS PARTICULIÈREMENT SUR LES CULTURES ET LES PÂTURAGES .....                   | 49        |
| <b>V. ANNEXE. TERME SOURCE DE TYPE S1 D'UN RÉACTEUR DE 3817 MWTH → 1300 MWE, ET LISTE DES 'DESCENDANTS' .....</b>          | <b>50</b> |
| <b>VI. LEXIQUE.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>VII. RÉFÉRENCES .....</b>   | <b>52</b> |

# I. Contexte

## 1.1 Champ de l'étude

### Contexte

En cas d'accident nucléaire majeur, le rejet de matières radioactives pourrait impacter la santé de la population, se déposer sur les sols agricoles et les espaces de vie urbanisés, déclencher l'évacuation à long terme des habitants, voire ruiner un pays.

L'étude sur Cattenom permet de se figurer les conséquences sanitaires et socio-économiques que les différents acteurs de la région pourraient subir si le pire survenait.

Les 1096 simulations du déplacement du nuage radioactif et les 1096 simulations de la déposition radioactive sur les sols ont porté sur un accident majeur de type S1, équivalent à l'accident majeur simulé par l'*Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire* (2007). Les simulations et les résultats de notre étude sont plus nombreux et détaillés que ceux de l'IRSN, notamment parce qu'ils distinguent les territoires impactés. Ils actualisent la compréhension d'un accident majeur de type S1 ; une actualisation nécessaire pour trois raisons essentielles.

1° Les effets potentiellement délétères pour la santé des faibles doses de rayonnement ionisant sont mieux documentés, sachant qu'ils font l'objet d'un consensus scientifique plus assuré que par le passé (*infra* 1.3, 2.7).

2° Les centrales nucléaires constitueraient des *cibles potentielles* pour différentes entités non-étatiques du champ géopolitique (*infra* 1.4(d)).

3° Un accident majeur dans un réacteur nucléaire demeure certes *improbable*, mais ce niveau est plus élevé et inquiétant que le niveau *très improbable* demandé par l'Agence internationale de l'énergie atomique (au maximum 1 accident par réacteur et par million d'années de fonctionnement) (*infra* 1.4(d)).

Pour se préparer à l'impact potentiel d'un accident nucléaire majeur depuis un site donné, il est peu utile de commenter le nombre de victimes d'un accident historique ayant eu lieu ailleurs, avec une densité de population différente. La représentation de l'accident par des simulations permet de tenir compte de sa situation géographique et de la météo. Dans le cas présent, la centrale nucléaire de Cattenom se trouve au milieu de campagnes peuplées et d'une constellation de villes, à 22 km de Luxembourg, 30 km de Merzig, 32 km de Metz, 60 km de Saarbrücken, 81 km de Nancy, 142 de Coblenche, 142 de Liège, 147 km de Strasbourg, 159 km de Reims...

Afin d'être utiles, l'étude dénombre les personnes qui seraient soumises au nuage radioactif lors de son passage et les habitants qui devraient être évacués durablement *après* son passage, ainsi que les hectares de sols agricoles et les surfaces totales affectées par la déposition de matière radioactives. La focale est mise sur les pays touchés pour ce qui concerne les situations d'urgence lors du passage du nuage et le nombre d'habitants devant être déplacés de façon durable, ainsi que sur les sols contaminés. La focale est aussi mise sur les villes pour ce qui concerne les situations d'urgence lors du passage du nuage.

Les résultats devraient permettre la réouverture du débat public sur les façon de prévenir un accident nucléaire majeur au vu de sa probabilité et de ses conséquences ; et ils informent les pouvoirs publics sur l'ampleur d'une catastrophe certes improbable, mais qu'il est de leur devoir de se préparer à gérer si elle survenait malgré tout, en dimensionnant la réponse à la menace.

## 1.2 Définition

Le terme "accident nucléaire majeur" fait référence à une rupture de confinement, que son origine soit technique, géologique ou humaine (négligence et malveillance). Le terme *accident* fait référence à un événement malheureux et, si son origine est la volonté humaine, il s'agit encore d'un accident, quels que soient les motifs et la nature de l'organisation qui provoquerait une rupture de confinement dans un réacteur nucléaire.

### 1.3 Rayonnements ionisants - risques pour la santé - Importance de l'épidémiologie, modèle linéaire sans seuil (LNT) et au-delà

Les risques pour la santé des rayonnements ionisants (RI) ont été décrits pour la première fois au XIX<sup>e</sup> siècle (Edison 1896) (Doll 1995, 1339-1349). Des études sur les effets génétiques des RI ont suivi (Muller 1928, 714). Les risques pour la santé chez l'homme dus aux RI ont été analysés en radiodiagnostic (Giles 1956, 447 ; Stewart 1958, 1495-1508 ; Pearce 2012, 499-505 ; Mathews 2013, f2360, *Hauptmann M, 2023 Bosch de Basea Gomez 2023, Little 2022*), chez les survivants japonais de la bombe nucléaire (Ozasa et al. 2012, 229-243), chez les travailleurs du nucléaire (Richardson et al. 2015, h5359 ; Leuraud 2015, e276-e281 ; Gillies 2017, 276-290, *Richardson 2023*, chez les personnes exposées au radon (Darby 2005, 223).

Il a été montré par des études épidémiologiques que le rayonnement de fond a déjà des effets sur la santé des enfants (Kendall 2013, 3-9 ; Spycher et al. 2015 ; Mazzei-Abba 2021). Pour les enfants de 1 à 15 ans, par suite d'une observation moyenne de cohorte sur six années – avec une exposition médiane cumulée depuis la naissance de 8,2 mSv (intervalle : 0 – 31,2) – il apparaît que, 1 mSv de plus dans les doses cumulées accroît de 6 % les rapports de risque pour les leucémies et les cancers du système nerveux central (et de 4% pour l'ensemble des cancers) ; et un tiers des leucémies et des tumeurs du système nerveux central est statistiquement attribuable aux radiations ionisantes dites du fond (*Mazzei-Abba 2021*).

Le calcul des doses collectives s'est avéré utile dans l'estimation des risques des RI pour les populations exposées. Des études épidémiologiques approfondies (National Cancer Institute 2020 ; Linet et al. 2020 ; Schubauer-Berigan et al. 2020 ; Berrington de Gonzalez et al. 2020 ; Hauptmann et al. 2020 ; Daniels et al. 2020) sur les risques pour la santé induites par les RI ont confirmé le modèle LNT (*Linear No Threshold*) (BEIR VII 2006a ; BEIR VII 2006b, 1-4 ; Shore 2018, 1217) dans la gamme des faibles doses (inférieures à 100 millisieverts, mSv). Selon le modèle LNT, même de très faibles doses de 1 mSv ou moins entraînent des risques sanitaires élevés (cancer, maladies non cancéreuses et effets néfastes sur le processus de reproduction).

La limite juridiquement contraignante au niveau international de l'exposition aux sources artificielles est de 1 millisievert/an (mSv/a) par personne (infra 1.5(b), 2.6(c)). Cependant, les accidents de centrales nucléaires (Tchernobyl 1986, Fukushima 2011) ont conduit à des expositions individuelles aux RI principalement inférieures à 100 mSv ou supérieures à ce niveau pour plusieurs millions de résidents (Cardis 1996, 241-271 ; OMS 2013 ; IPPNW 2016).

### 1.4 Études existantes sur les simulations des impacts des accidents majeurs dans les centrales nucléaires européennes

#### (a) Bilan humain d'un accident nucléaire majeur simulé en France

Quelques années après les accidents du 11 septembre et la prise de conscience de la violence potentielle du terrorisme international, l'IRSN publiait une étude dont le bilan humain est consigné dans le tableau 1.4.1. Les causes des cancers sont simulées dans trois registres : l'ingestion d'aliments radioactifs après l'accident, le passage du panache radioactif (nuage), la sous-optimalité des mesures de protection de la population. Le nombre de décès dans les décennies après un accident majeur de type S1 est chiffré à 28'607, auxquels il faudrait ajouter 26'849 cas cancers dont l'issue n'est pas mortelle, pour un total de 55'456 cancers.

| Pour un accident de type S1 dans un réacteur de 2785 MWth -> 900 Mwe |           |         |                 |        |
|--|-----------|---------|-----------------|--------|
|  | Ingestion | Panache | Sous-optimalité | Total  |
| cancers mortels (nbr)  | 4 167     | 14 442  | 9 998           | 28 607 |
| autres cancers (nbr)   | 2 629     | 16 760  | 7 460           | 26 849 |
| total cancers (nbr)  | 6 796     | 31 202  | 17 458          | 55 456 |

Source : IRSN 2007, annexes au rapports DSR. p. 41

#### (b) Surfaces contaminées par la déposition de Cs-137

Les études IRSN de 2007 et 2013b ont estimé les surface de sols recouvertes de césium-137. Pour un montant égal ou supérieur à 37 kBq m<sup>2</sup> de césium-137, selon le tableau 1.4.2, l'étude de 2007 dénombrait 62'714 km<sup>2</sup> à la médiane de quelque cent-quarante simulations météorologiques ; celle de 2013 dénombrait 20'100 km<sup>2</sup>.

| Sources:                                   | IRSN 2007           | IRSN 2013b          |
|--|---------------------|---------------------|
| 1 réacteur (2785 MWth → 900 MWe)           | médiane             | médiane             |
| Cs-137, Intervalle (kBq m <sup>-2</sup> )  | [37, 555[ + [555, [ | [37, 555[ + [555, [ |
| Total zones contaminées (km <sup>2</sup> ) | 62 713              | 20 100              |

Sources : (IRSN 2007, Annexes au rapport DRS n°157, 58 ; IRSN 2013, 40)

Précisons que pour un montant égal ou supérieur à 555 kBq m<sup>2</sup> de césium-137, qui correspondrait à la zone d'exclusion dont les habitants seraient déplacés pour être relogés ailleurs, l'étude de 2007 dénombrait 13'575 km<sup>2</sup> ; celle de 2013 dénombrait 1'300 km<sup>2</sup>.

Lielveld et al. (2012) ont évalué l'exposition à un accident majeur INES 7, en utilisant notamment le Cs-137 comme proxy pour les retombées. Leurs résultats indiquent notamment que la surface moyenne sur laquelle ≥ 40 kBq de <sup>137</sup>Cs seraient déposés avoisinerait 165'000 km<sup>2</sup>. En utilisant un modèle global de l'atmosphère, ils ont constaté que plus de 90 % des rejets de Cs-137 seraient transportés au-delà de 50 km.

Une étude utilisant le modèle particulaire lagrangien FLEXPART a exploré de manière systématique les conséquences d'un accident nucléaire majeur dans les centrales nucléaires. Les conséquences importantes (mesures d'intervention) se produisent fréquemment sur une distance allant jusqu'à 100 km, voire jusqu'à 300 km, et que les plans d'urgence se concentrent souvent sur des zones trop petites (Seibert et al. 2013).

### (c) Coût d'un accident nucléaire majeur, 450 Md€, ou de 760 à 5'700 Md€ ?

Considérant un réacteur de 2785 MWth/900 MWe, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire chiffrait, en 2007, le coût d'un accident majeur de type S1 à 760 Md€, le coût sanitaire des cancers ne représentant qu'un septième des coûts totaux ; et dans le 5% des situations météorologiques les plus sévères, le coût total atteignait 5'800 Md€, les coûts sanitaires n'en représentant qu'un vingtième (IRSN 2007, annexes au rapport DSR n°157, 62).

| IRSN<br>2007, annexe, 62                    | IRSN<br>2007, annexe, 62<br>Accident<br>majorant, type S1<br>médiane<br>Md€ | IRSN<br>2007, annexe, 62<br>Accident<br>majorant, type S1<br>C95<br>Md€ | IRSN<br>2013b, 55<br>Accident<br>majeur, type DCH<br>médiane<br>Md€ | IRSN<br>2013b, 55                       |
|---|---|---|---|---|
| <b>Coûts sur site</b>                       | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>15</b>   | <b>Coûts sur site</b>                   |
| <b>Coûts radiologiques hors site</b>        | <b>106</b>  | <b>281</b>  | <b>54</b>   | <b>Coûts radiologiques hors site</b>    |
| Contremesures d'urgence classiques          | 3   | 3   | 3   | Contremesures d'urgence                 |
| Sous-optimalité des contremesures           | 4   | 4   | –   | –                                       |
| Évacuations sans retour                     | 45  | 163   | 10  | Coût de relogement                      |
| Effets sanitaires à long terme              | 19  | 38  | 10  | Effets sanitaires                       |
| –   | –   | –   | 17  | Effets psychologiques                   |
| Interdictions alimentaires                  | 37  | 73  | 14  | Pertes agricoles                        |
| <b>Coût des territoires contaminés</b>      | <b>393</b>  | <b>4875</b>   | <b>110</b>  | <b>Coûts des territoires contaminés</b> |
| <b>Coût d'image</b>                         | <b>130</b>  | <b>176</b>  | <b>181</b>  | <b>Coûts d'image</b>                    |
| <b>Effets sur le parc de prod. d'élect.</b> | <b>90</b>   | <b>360</b>  | <b>88</b>   | <b>Effets sur le parc de prod élect</b> |
| <b>Effets indirects</b>                     | <b>31</b>   | <b>50</b>   | –   | –                                       |
| <b>Total</b>                                | <b>760</b>  | <b>5757</b>   | <b>448</b>  | <b>Total</b>                            |

Les estimations ci-dessus prennent en compte le terme source d'un réacteur de 2785 MWth → 900 MWe

Puis en 2012, deux experts de l'RSN ont publié une étude sur une fusion du cœur d'un REP français de 900 MWe suivie (a) d'un rejet radioactif important et (b) d'un rejet radioactif massif (Pascucci-Cahen & Patrick 2012, 1-9). En moyenne, un accident majeur de cette ampleur pourrait coûter plus de 400 milliards d'euros, ce qui peut être comparé au coût d'une grande crise économique ou à celui d'une guerre régionale (*ibid.*, 1-9). Le coût serait supporté par l'ensemble de la population française et environ 100'000 personnes pourraient avoir besoin d'être relogées de façon permanente (*ibid.*, 1-9). Et en 2013, pour un même type d'accident de niveau DCH (*direct containment heating*), l'IRSN révisait le montant des coûts à 450 Md€ (IRSN 2013b, 55). Le tableau 1.4.3 résume les données de l'accident modélisé en 2013.

#### *(d) Rejets et doses*

L'*Inspection fédérale de la sécurité nucléaire* (IFSN) a publié un rapport à la suite de l'accident de Fukushima. Ce rapport présente brièvement les éléments de simulations de différents types d'accidents nucléaires en Suisse pour en comprendre les dangers (IFSN 2014b). L'objectif est de produire des chiffres illustrant la pression sanitaire exercée sur les populations pour préparer des plans d'urgence à proximité des centrales nucléaires. Concrètement, les accidents de niveau 7 selon l'échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques (INES) sont détaillés en 3 sous-catégories : A4, A5, A6. La catégorie A5 correspondrait à un accident du niveau de gravité de Fukushima et A6 au niveau de gravité de Tchernobyl. Des accidents sont simulés pour l'iode, le césium et les gaz rares.

- Accident A5 : iode, 1,0E+17 Bq ; césium (classe Rb-Cs), 1,0E+16 Bq ; gaz rares, rejet à 100 %.
- Accident A6 : iode, 1,0E+18 Bq ; césium (classe Rb-Cs), 1,0E+17 Bq ; gaz rares, rejet à 100 %.

Le rapport illustre la pression sanitaire par des graphiques montrant le nombre de millisieverts reçus pour différentes catégories de population en fonction de leur distance par rapport à la centrale nucléaire touchée. On apprend notamment qu'en cas d'accident A5, la dose effective est de 2'000 mSv pour un adulte restant sans protection pendant 48 heures à 2 km de l'accident, et de 150 mSv à 20 km (IFSN 2014b, 22-23). Le rapport quantifie également la dose à la thyroïde en fonction du niveau de l'accident, de la distance et de l'âge. Il évalue l'influence des conditions météorologiques sur les doses reçues (IFSN 2014b, 25-26).

### **1.5 Évaluation de l'accident en regard de la législation sur la radioprotection**

#### *(a) Esquisse de la question*

Il est important pour une étude sur les risques environnementaux et les rayonnements ionisants d'adopter une approche interdisciplinaire. Notamment, les textes juridiques déterminent ce qui est réellement en cause et fait écho aux catégories qui intéressent les décideurs, les fonctionnaires chargés de la protection de la population, et les personnes concernées ou susceptibles de subir les conséquences de l'irrespect des normes légales. Par suite, les données et résultats d'une étude sont plus clairs si leur présentation est structurée en regard des normes légales. Ils permettent notamment de se figurer la capacité des pouvoirs publics à gérer, dans le respect des normes légales, les conséquences d'un accident nucléaire majeur sur leur territoire.

#### *(b) Présentation de la Directive 2013/59/EURATOM*

L'article 12(2) de la Directive 2013/59/EURATOM du Conseil spécifie que les "États membres fixent la limite de dose efficace pour l'exposition du public à 1 mSv par an". Mais cette limite varie en fonction des circonstances. L'article 97(3) stipule que les plans d'urgence ont "pour but d'éviter l'apparition de réactions tissulaires produisant des effets déterministes graves sur tous les membres de la population touchés et de réduire le risque d'effets stochastiques".

La réduction des risques stochastiques est toutefois, "optimisée dans le but de maintenir l'amplitude des doses individuelles, la probabilité de l'exposition et le nombre de personnes exposées au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état actuel des connaissances techniques et des facteurs économiques et sociétaux" (Art. 5(b)). Ce qui signifie que les pouvoirs publics ont une certaine latitude pour apprécier les faits en tenant compte de l'ensemble des circonstances : "Les niveaux de référence sont déterminés en tenant compte aussi bien des exigences en matière de radioprotection que de critères sociétaux. Pour l'exposition du public, les niveaux de référence sont fixés en tenant compte des différents niveaux de référence présentés à l'annexe I." (Art. 7(2))

Le point 1 de l'annexe I précise que les "niveaux de référence exprimés en dose efficace sont fixés dans l'intervalle de 1 à 20 mSv par an pour les *situations d'exposition existantes* et de 20 à 100 mSv (*aiguës* ou *annuelles*) pour les *situations d'exposition d'urgence*."<sup>2</sup> La limite de dose déterminée par les pouvoirs publics porte sur des situations d'urgence concernant des situations *aiguës* ou *annuelles*, et elle concerne aussi bien le passage d'un nuage radioactif (risque d'exposition aiguë) que la contamination des sols qui en résulterait (risque d'exposition annuelle). L'évacuation et le relogement des populations se fait en situation d'urgence et il est envisageable, dans ce régime légal, de vivre une année en étant exposé à une dose annuelle allant

---

<sup>2</sup> Nous soulignons (*ital*)

jusqu'à 100 mSv. Autrement dit, selon la directive 2013/59/EURATOM, une *situation d'exposition d'urgence* commence et se termine par une déclaration de l'autorité compétente (Annexe XVII(a)(b)). Concrètement, cette décision n'est pas liée au moment où le nuage radioactif a fini sa course puisqu'elle peut intervenir des années après : "Pour la transition d'une *situation d'exposition d'urgence* à une *situation d'exposition existante*, des niveaux de référence appropriés sont fixés, notamment à l'expiration de contre-mesures à long terme telles que le relogement." (Annexe I, 3)

Le tableau 1.5.1 montre que les rayonnements ionisants sont sujets à des limites de dose exprimées selon la *dose efficace individuelle engagée*.<sup>3</sup> Les limites de dose sont adaptées à différentes circonstances. Elles doivent cependant être respectées : si la limite protégeant le public est fixée à 1 mSv pour une année, elle est toutefois établie entre 20 et 100 mSv dans une situation d'urgence, telle celle due à un accident nucléaire grave (Annexe I, 1).

Concernant le passage du nuage radioactif, les pouvoirs publics devraient pouvoir évacuer de façon préventive les personnes dont les habitations (porte, fenêtre, système d'aération) pourraient laisser passer une *dose efficace individuelle engagée* supérieure à 100 mSv à l'intérieur des habitations. Or, selon l'article 12 (1), la dose reçue lors du passage du nuage radioactif devra être additionnée à celle que les personnes seraient susceptibles de recevoir lors de l'année qui suit l'accident (sans parler de la dose reçue au travers des aliments et de l'eau).

| Tableau 1.5.1. Limites de la <i>dose efficace individuelle engagée</i> exprimée en mSv conformément à la directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants (Union européenne 2013).  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| (mSv)  | Exposition publique annuelle et exposit° professionnelle annuelle  | Exposition professionnelle dans des circonstances particulières  | Exposition d'urgence pour le public et les professionnels   |
| ≤ 500  |  |  | - Afin de sauver des vies dans des situations d'urgence exceptionnelle, le niveau de référence du personnel d'urgence se situe dans l'intervalle ]100, 500] mSv (article 53, §2, (b)).  |
| ≤ 100  |  |  | - Le niveau de référence pour l'exposition professionnelle en cas d'urgence est < 100 mSv (Art. 53, §2, (a)).<br>- Les pouvoirs public peuvent placer la limite d'évacuation du public entre ≥ 20 mSv et ≥ 100 mSv (Annexe I, §1) : si dose aiguë du nuage radioactif -> évacuation ponctuelle du public concerné*; si dose annuelle de la déposition sur les sols -> évacuation durable.** |
| ≤ 50   |  | - La limite est ≤ 50 mSv pour les professionnels dans des circonstances particulières si la dose annuelle moyenne sur cinq années consécutives, y compris les années pour lesquelles la limite a été dépassée, soit ≤ 20 mSv (Art. 9, §2). |   |
| ≤ 20   | - La limite est de 20 mSv par an pour les adultes exposés professionnellement. *** (Art. 9, §2)  |  |   |
| ≤ 6  | - La limite est de 6 mSv pour les étudiants ou apprentis âgés de ≥ 16 ans, ≤ 18 ans au cours de leurs études s'ils sont obligés de travailler près de sources radioactives. *** (Art. 11, §2). |  |   |
| ≤ 1  | - La limite pour le public est fixée à 1 mSv pour chaque année *** (Art. 12, §2).  | - La limite pour l'enfant à naître d'une travailleuse enceinte est ≤ 1 mSv (Art. 10). ***  |   |
| <p>* Concernant la dose aiguë lors du passage du nuage radioactif, l'autorité compétente devrait décider de l'évacuation préventive des personnes dont les habitations pourraient laisser s'infiltrer une dose efficace individuelle engagée supérieure à 100 mSv. Cet impératif concernerait les habitations à quelques dizaines de km du réacteur endommagé. Et si la priorité des priorités est d'éviter des effets déterministe graves (Art 97(3)), le niveau de référence correspondant à ces effets n'est pas précisé par la Directive...</p> <p>** La dose annuelle attendue de la pollution des sols doit être additionnée à celle reçue lors du passage du nuage (Art. 12 (1))</p> <p>*** Les limites de dose indiquées aux articles 9(2), 10, 11(2) et 12(2) ne s'appliquent pas en cas d'accident nucléaire majeur ; mais elles rappellent que les doses basses ont des effets stochastiques graves – même si rares – et que le lien de cause à effet peut être identifié par les études épidémiologiques à l'échelle d'une population, jamais d'un individu (<i>infra</i> 2.7(a)).</p> |  |  |   |

<sup>3</sup> La Directive contient aussi des limites exprimées selon la dose équivalente, par exemple sur la peau ou le cristallin, mais cet aspect n'est pas traité ici.

### *(c) Signification des doses efficaces engagées de 1 mSv, 6 mSv et 20 mSv*

Malgré le fait que les limites fixées entre 1 et 6 mSv n'ont pas de signification juridique en cas d'accident nucléaire majeur, la Directive 2013/59/EURATOM du Conseil statue néanmoins sur le fait qu'une *dose efficace individuelle engagée* supérieure à 1 mSv ne devrait pas impacter le public.

Plus généralement, les seuils expriment le besoin de protection des personnes et du public face aux effets stochastiques dont les conséquences peuvent être très graves pour chaque personne atteinte ; ces impacts sanitaires radio-induits, même si rares, existent néanmoins. Le lien de cause à effet entre une faible dose radioactive et la maladie est identifié par les études épidémiologiques, à l'échelle d'une population, et non d'une personne (*infra* 2.7(a), là sont les explications soutenues par une importante bibliographie). La personne atteinte peut souffrir d'une maladie radio-induite : cancer ; maladie du système cardiovasculaire ou altération de la reproduction telle que la mortalité ou la mort du nourrisson.<sup>4</sup>

- > Une dose efficace engagée > 20 mSv porte atteinte aux intérêts des professionnels (et au bien public) parce qu'elle augmente à la marge l'occurrence de maladies radio-induites dans la population laborieuse travaillant au voisinage d'une source radioactive (et le reste de la population soumise à cette dose en cas d'accident majeur).
- > Une dose efficace engagée > 6 mSv porte atteinte aux intérêts des étudiants et des apprentis (et au bien public) parce qu'elle augmente à la marge l'occurrence de maladies radio-induites dans la population jeune travaillant au voisinage d'une source radioactive (et le reste de la population soumise à cette dose en cas d'accident majeur).
- > Une dose efficace engagée > 1 mSv porte atteinte aux intérêts du public parce qu'elle augmente, à la marge, l'occurrence de maladies radio-induites dans la population (en s'ajoutant à la radioactivité naturelle).

Autrement dit, les limites de dose légales, relatives aux situations d'urgence, sont complétées, au moins symboliquement, par les dispositions relatives aux limites annuelles d'exposition ci-dessous.

### *(d) Quel respect des normes légales par les pouvoirs publics en cas d'accident nucléaire majeur ?*

Le respect des normes légales peut être questionné dès lors que les résultats de l'étude et les cartes des simulations météorologiques sont centrées sur les seuils suivants : 1 mSv, 6 mSv, 20 mSv, 50 mSv, 100 mSv et 500 mSv. Cette façon de faire permet de constater le nombre de personnes qui seraient, ou non, confrontées à un nuage radioactif dépassant les seuils de dose 20 mSv, 50 mSv, 100 mSv et 500 mSv en se demandant si le nombre de personnes potentiellement atteintes est gérable ; une question qui peut aussi être posée en regard des niveaux de radioactivité des sols pendant une année.

## *1.6 Emplacement de la centrale nucléaire de Cattenom*

### *1.6.1 Distances aux frontières*

Situation de Cattenom. La centrale de Cattenom est proche des frontières de la France avec la Belgique (34 km), le Luxembourg (11 km) et l'Allemagne (18 km) – les zones frontalières des deux derniers pays ayant une densité de population moyenne à élevée.

---

<sup>4</sup> A titre individuel, la personne atteinte n'aura pas de confirmation scientifique de la relation de cause à effet entre une faible dose radioactive et sa maladie, d'où un dilemme difficile à résoudre en cas d'accident nucléaire lorsque les effets ne sont que stochastiques (et non déterministes). Qui, quel entité ou quel facteur est responsable de la maladie de telle personne ayant reçu une dose radioactive estimée à tel montant en millisieverts ? La difficulté à soutenir un éventuel litige dans ces conditions s'ajoute alors au tourment de la maladie elle-même.



Carte 1. Situation géographique de la centrale nucléaire de Cattenom (4 x 3817 MWth).

### 1.6.2 Distances à quelques villes

Cattenom est à 22 km Luxembourg, 30 km Merzig, 32 km Metz, 60 km Saarbrücken, 141 km Epinal, 142 km Coblenche, 142 km Liège, 147 km Strasbourg, 159 km Reims, 178 km Cologne ; 181 km Nancy, 191 km Francfort, 209 km Brussel, 289 km Paris...

## 1.7. Description de la centrale nucléaire de Cattenom et points faibles

### (a) Description succincte

Dans le tableau 1.7.1, nous présentons les caractéristiques principales de la centrale de Cattenom en regard des centrales des études précédentes de la série Eunupri. Cattenom est plus puissante. Chacun des réacteurs possèdent une double enveloppe en béton. La première connexion au réseau remonte à 1991 ; la date de fermeture prévue est indicative.

| Nom des centrales nucléaires (nom) | Codes des centrales nucléaires (code) | Nombre de réacteurs (nbr) | Types de réacteurs Simplifié (type) | Types de réacteurs (type) | Puissance thermique 1 réacteur (MWth) | Puissance nette 1 réacteur (Mwe) | Première Connection au réseau (année) | Date de fermeture prévue (année) |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Żarnowiec (Kopalino) ('planifié')  | ZA2                                   | ( )                       | PWR III1/2                          | Westinghouse_AP1000_2LP   | 3415                                  | 1100                             | ( )                                   | ( )                              |
| Tricastin                          | TRI                                   | 4                         | PWR                                 | Framatome 3-loop CP1-Type | 2785                                  | 915                              | 1980                                  | 2040                             |
| Cattenom                           | CAT                                   | 4                         | PWR                                 | Framatome 4-loop P4-Type  | 3817                                  | 1300                             | 1991                                  | 2051                             |

Source: IAEA PRIS, Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

### (b) Points faibles

Une faiblesse importante des réacteurs de Cattenom est celle des piscines d'entreposage du combustible usagé. En 2014, l'IRSN considérait que l'intégration de dispositions complémentaires, dans l'objectif de réduire significativement le risque de découverture du combustible en piscine provoqué par certains événements initiateurs reste nécessaire" (IRSN 2014). Courant 2024, un des quatre objectifs particuliers du réexamen périodique des centrales de 1300 MWe consiste à rendre "extrêmement improbable le découverture des assemblages de combustible en cas de vidanges accidentelles et de pertes de refroidissement de la piscine d'entreposage du combustible et tirer les enseignements des études probabilistes de sûreté concernant les agressions pour la piscine d'entreposage du combustible" (EDF 2023, p.1).

L'emploi du terme *agression* dans la citation ci-dessus trouve un écho dans la suite du propos sur la probabilité d'un accident majeur et l'analyse stratégique de leur statut de cible potentielle d'une attaque terroriste.

## 1.8 Probabilité d'un accident nucléaire majeur après l'accident de Fukushima

### (a) Revue de la littérature

La plupart des réacteurs existants dans le monde appartiennent à la génération II et ont été développés et construits entre les années 1960 et 1990. Seuls les réacteurs de la génération III ont adopté des dispositifs de sécurité passifs au lieu de dispositifs actifs (nécessitant de l'énergie) (Wheatley et al. 2017, 105). Par conséquent, une approche statistique devrait tenir compte de la tendance historique dans un large éventail d'accidents et des améliorations historiques de la sécurité (Rangel & Lévêque 2012, 96). Une telle approche historique va au-delà des *analyses probabilistes de sécurité* (APS) et, bien qu'elle soit loin d'être parfaite, elle est mieux à même de protéger l'intérêt public que les APS. Nous résumons ci-dessous deux articles importants parmi d'autres, puis nous élargissons nos sources à d'autres textes.

Selon Rangel & Lévêque (2012, 92), un tel objectif nécessite d'étendre les observations aux accidents de niveau  $\geq 3$  INES et d'utiliser un modèle appelé *Poisson Exponentially Weighted Moving Average* (PEWMA) adapté à l'étude des séries temporelles. Ce modèle est plus adapté que d'autres modèles statistiques car les réacteurs nucléaires sont exploités pendant une longue durée et les innovations prennent du temps à être installées par les opérateurs (*ibid.*, 97). Par conséquent, si l'on examine les accidents avec fusion du cœur (avec ou sans rejets importants), il apparaît que la fréquence attendue peut être estimée à  $1,95E-03$  par année-réacteur<sup>5</sup>, un chiffre considérablement plus élevé que les  $2,00E-05$  déterminés par Gaertner sur les réacteurs américains par le biais de l'EPS (Gaertner et al. 2008, 3), et vingt fois plus élevé que le critère de  $1,0E-04$  de l'AIEA pour un rejet correspondant à une dose à la population de  $< 1mSv$ . Ces résultats sont corroborés par une autre étude (*infra*).

Wheatley et al. ont analysé la survenue d'un accident majeur à l'aide d'un ensemble de données plus complet et unique contenant 216 événements ; 175 d'entre eux ont des valeurs de coût (Wheatley et al. 2017, 102). L'estimation des coûts vise à englober les pertes économiques totales, y compris la remise en état de l'environnement, les demandes d'indemnisation auprès des tribunaux et des assurances, ainsi que la perte de vies humaines, estimée à 6 millions USD par décès. Cette méthode présente l'avantage d'aboutir à une mesure unique en USD combinant tous les effets négatifs possibles des accidents (même si elle n'est pas exempte d'imperfections) (*ibid.* 2017, 102). Finalement, l'analyse montre qu'en termes de coûts, il y a 50 % de chances que (a) un accident de Fukushima (ou plus) se produise une fois tous les 62 ans, et (b) un accident de Three-Mile-Island (ou plus) se produise une fois tous les 15 ans (dans l'hypothèse d'un nombre constant de centrales nucléaires) (*ibid.* 2017, 112). Si l'on considère les 448 réacteurs opérationnels dans le monde en 2017 (AIEA 2018a, 15), le risque qu'un événement de Fukushima se produise avec un rejet important est d'environ  $1,8E-05$  par année-réacteur, un chiffre 18 fois plus élevé que la probabilité maximale admissible d'un rejet radioactif important fixée par l'AIEA et d'autres organismes officiels à  $1'000'000$  d'années-réacteurs (AIEA 2009, 8 ; 2018, 45). Sur ce dernier point, voir la note du tableau 1.8.1.

| Source                                       | Probabilité d'un accident majeur pour 1 réacteur sur 1 an | Probabilité d'un accident majeur pour 1 réacteur sur 1 an (%) |
|--|---|---|
| 1.8E-05 est tiré de Wheatley et al. (2017).  | 1.8E-05   | 0.0018%   |
| La norme $\leq 1.0E-06$ provient de l'AIEA.* | $\leq 1.0E-06$  | $\leq 0.0001\%$   |

\* Selon la Directive européenne, l'AIEA et de nombreux organismes de réglementation, en cas de rejet nucléaire majeur entraînant une dose effective engagée  $\geq 100$  mSv, la fréquence attendue de l'événement déclencheur ne doit pas dépasser une probabilité de  $1,0E-06$  telle que calculée par une analyse probabiliste de sûreté (EPS).

Le rééquipement des réacteurs nucléaires du point de vue de la sûreté, depuis l'accident de Fukushima, est une réalité qui doit être rappelée lorsque l'on considère la probabilité d'un accident nucléaire de cette ampleur ; symétriquement, on pourrait se demander s'il est raisonnable d'ignorer l'insécurité croissante dans le monde du fait de la production croissante de missiles et de drones de toutes tailles et de précision croissante, et de leur détention par diverses entités, y compris non étatiques.

Dans l'ensemble, de nombreuses autres sources bibliographiques (Ha-Duong & Journé 2014 ; Sornette et al. 2013) montrent que ce type de méthodes statistiques est largement exploré par les chercheurs qui obtiennent

<sup>5</sup> (Rangel & Lévêque 2012, 96) L'article fournit quatre résultats principaux à travers quatre méthodes, (a) MLE Poisson ( $6.66 \cdot 10^{-4}$ ), (b) Bayesian Poisson-Gamma ( $4.39 \cdot 10^{-4}$ ), (c) Poisson avec tendance temporelle ( $3.2 \cdot 10^{-5}$ ), (d) PEWMA model ( $1.95 \cdot 10^{-3}$ ). Les auteurs privilégient ce dernier modèle et ce dernier résultat par rapport aux trois autres approches.

des résultats similaires. Par exemple, la probabilité par réacteur et par année d'un accident majeur évaluée à  $1,8E-05$  par Wheatley et al.

Ce chiffre était pertinent au moment de l'accident de Fukushima ; est-il encore d'actualité aujourd'hui ?

### *(b) Discussion sur la probabilité et l'ampleur d'un accident nucléaire majeur*

L'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) a discuté notre interprétation (Piguet et al. 2019) de l'étude de Wheatley et al. (2017) ; elle a notamment contesté qu'un accident de type Fukushima ait la même probabilité aujourd'hui qu'au moment de l'accident de Fukushima, car le rééquipement des réacteurs nucléaires a renforcé leur sécurité et corrélativement diminué cette probabilité (IFSN 2020, 8).

Cependant, l'IFSN n'a pas réalisé que, depuis l'accident de Fukushima, le nombre de menaces a augmenté autour de tous les réacteurs nucléaires, qu'il s'agisse d'activités terroristes ou de guerres ; et que le sujet importe (Kean and Hamilton 2004, 154, 530).

Ce type d'attaque est certes interdit par le *Protocole I* de la Convention de Genève (*Diplomatic Conference on the Reaffirmation and Development of International Humanitarian Law applicable in Armed Conflicts* 1977, Art 56.1. & 2(c)).<sup>6</sup>

Il ne fait toutefois aucun doute que le *Protocole I* a été formellement violé pendant la guerre d'Ukraine (Moore 2022; Dorfman 2023), même si aucun rejet nucléaire significatif n'a été remarqué autour des réacteurs nucléaires en activité jusqu'à présent (5.4.2024). Ce type de garde-fou pourrait ne pas suffire.

Dans notre réponse à l'IFSN,<sup>7</sup> nous avons montré que son argument du rééquipement des réacteurs nucléaires n'avait pas été contextualisé correctement ; la guerre est un processus toujours surprenant où les belligérants tentent de surprendre leur ennemi en jouant des coups impensables du point de vue des victimes (Piguet, Eckert, and Knüsli 2024a, note de bas de page 10). Notre étude courte mais approfondie est confortée par le *Message sur l'Armée 2024* qui mentionne explicitement les risques d'attaques, par différentes catégories de missiles, sur les "infrastructures critiques" de la Confédération suisse (DDPS 2024, 24, 25).

Notre réponse à l'IFSN conclut que le rééquipement civil des anciens réacteurs nucléaires n'est pas en mesure de compenser le rééquipement militaire de groupes étatiques ou non étatiques, ni, par conséquent, de diminuer la probabilité historique des accidents nucléaires majeurs tels que définie par Wheatley et al. (2017). Il n'est donc pas exagéré de dire que la probabilité d'un tel accident, pour un réacteur, est plus proche de 1 risque sur 56'000 ans de fonctionnement que de 1 risque sur un 1 million d'années ; un tel accident est *improbable* (au même titre que l'accident de Fukushima), alors qu'il devrait rester *très improbable*.

### *(c) Actualisation de la probabilité d'un accident nucléaire majeur et de son ampleur supposée*

La compréhension des risques évoluant sans cesse, la gravité potentielle des dommages mérite un réexamen, ce qui vaut mieux que ressasser le nombre de victimes de l'accident historique de Fukushima. L'actualisation des connaissances repose sur trois raisons.

1° *Risque d'attaque* ; les *infrastructures critiques* constituent des cibles stratégiques potentielles que différentes entités, étatiques et non-étatiques, mues par une intention de type terroriste, pourraient viser afin de désorganiser durablement un pays (Ramberg 1984, 1 ; Kean and Hamilton 2004, 154, 530 ; DDPS 2024, 24-25 ; Piguet et al. 2024a, 5-7). La question est loin d'être triviale ; la protection des *intérêts vitaux* d'un pays par la *dissuasion* ne fonctionne que s'il est possible de rattacher l'attaquant à un centre de pouvoir clairement établi, alors que l'attaquant pourrait être une organisation non-étatique ; autrement dit, la dissuasion par la menace d'une frappe tactique pourrait être comprise par l'attaquant d'un réacteur nucléaire comme ne fonctionnant pas s'il croit avoir suffisamment brouillé ses liens avec un territoire et le centre de pouvoir dont il dépendrait (Tertrais 2009, 29-30).

2° *Probabilité non négligeable* ; un accident majeur est certes *improbable* (Wheatley et al. 2017, 112 ; Piguet et al. 2024a, 5-7),<sup>8</sup> mais ce terme indique un risque plus élevé que le niveau *très improbable* demandé par

<sup>6</sup> 'Protocole Additionnel Aux Conventions de Genève Du 12 Août 1949 Relatif à La Protection Des Victimes Des Conflits Armés Internationaux (Protocole I), 8 Juin 1977'

<sup>7</sup> [https://institutbiosphere.ch/wa\\_files/eunupri2023a-fr.pdf](https://institutbiosphere.ch/wa_files/eunupri2023a-fr.pdf)

<sup>8</sup> L'IFSN a tenté de s'opposer au bien-fondé de notre emploi du qualificatif *improbable* – et la probabilité qui lui est associée – pour lui préférer *très improbable* au motif que le rééquipement des centrales nucléaires de conception ancienne diminuait considérablement le risque d'accident majeur (IFSN 2020, 7-8). Mais sa position est intenable parce que son analyse n'intègre pas le rééquipement – en

*l'Agence internationale de l'énergie atomique – moins d'un accident par réacteur et par million d'années de fonctionnement – IAEA (2009, 8 ; 2018, 45) ; conséquemment, vu la menace terroriste, la probabilité d'un accident nucléaire majeur est supérieure à la norme IAEA, et inacceptable.*

3° Effets potentiellement délétères des faibles doses de rayonnements ionisants ; les faibles doses font désormais l'objet d'un consensus scientifique plus assuré qu'à l'époque de Fukushima et des études IRSN de 2007 et 2013. Il faut désormais les appréhender comme plus dommageables pour la santé que par le passé (*infra* 2.7, 4.2(c)(6)) ; d'où accentuation de la sévérité des conséquences sanitaires potentielles d'un accident nucléaire majeur, et un besoin d'anticipation accru pour éviter un désastre (*infra*).

L'étude de Cattenom permet de se figurer les conséquences sanitaires et socio-économiques que les différents acteurs de la région pourraient subir si le pire survenait. Elle renouvelle la compréhension du risque d'un accident nucléaire majeur au moment où, le fonctionnement des réacteurs nucléaires est marqué par un contexte géopolitique instable, le développement d'armes nouvelles, une insécurité croissante.

---

armes plus précises et puissantes – d'armées et de groupes terroristes (SIPRI 2022), ni les tactiques permettant de saturer à moindre frais une défense aérienne sophistiquée (Boyd 2023 ; Dorfman 2023), ni les réflexions des stratèges militaires qui préconisent de désorganiser le tissu socioéconomique d'un pays pour affaiblir sa capacité d'action (Pénisson 2019, 331 ; Minic 2022). Pour conclure ce point, il a été montré qu'une destruction ciblée des installations nucléaires de Cattenom par un groupe terroriste pourrait provoquer des dommages équivalents ou plus dramatiques que les accidents les plus graves (Becker et al. 2017, 5).

## II. Méthodologie

### 2.1 Aperçu des questions méthodologiques

La présente partie de l'étude précise les questions de méthodologie essentielles. La liste des points abordés peut être résumée comme suit :

- Étude du terme source, quantité de Becquerels utilisée dans les simulations d'un accident majeur (*infra* 2.2)
  - Calcul qui permet de transformer les Becquerels en Sieverts et calculer ainsi la *dose effective individuelle engagée* qui évalue la pression sanitaire sur les individus, puis, évaluation de la *dose effective collective engagée* reçue par les populations ; comparaison des termes source étudiés avec ceux des accidents de Fukushima et de Tchernobyl (*infra* 2.3)
  - Coefficients physiques de dispersion des aérosols radioactifs dans l'atmosphère (vitesse de déposition ; paramètres d'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage) (*infra* 2.4)
  - Simulations météorologiques par un modèle de dispersion atmosphérique (*infra* 2.5)
  - Évaluation des personnes, des sols et des pays touchés à l'aide d'un *Système d'information géographique* (*infra* 2.6)
  - Évaluation de l'impact sur la santé, le nombre et le type de maladies radio-induites qui y est associé (*infra* 2.7).
- Seule une approche interdisciplinaire permet de mener à bien un tel questionnement ; c'est ce que nous avons tenté de faire.

### 2.2 Terme source

#### (a) Terme source d'un accident nucléaire majeur

Le terme "accident nucléaire majeur" fait référence à une rupture de confinement, que son origine soit technique, géologique ou humaine (négligence et malveillance) (*supra* 1.1, 1.2). La question du dimensionnement du terme source est cruciale car l'ampleur du rejet radioactif est l'un des facteurs déterminants de l'impact sur les populations.

Il s'agit de simuler l'impact d'un accident de niveau 7 selon l'échelle INES afin de fournir des données utiles aux entités officielles qui doivent limiter l'impact sanitaire d'un accident nucléaire ; le risque serait qu'elles négligent l'hypothèse d'un accident majeur et, dans le cas *improbable* où il advenait, leur impréparation pourrait aggraver l'impact de la catastrophe. Le volet simulation d'un accident majeur et la compréhension de son impact effectif inspiraient plus les chercheurs par le passé. En 2007, six ans après les attentats du 11 septembre, l'IRSN envisageait les conséquences d'un accident majeur en évaluant son impact selon la médiane et selon le centile 95 des 5% de situations les plus dommageables (IRSN 2007, annexes au rapport DSR n°157, 62).

| Codes des pays & centrales (2 codes) | Types de réacteurs Simplifié (type) | Puissance thermique 1 réacteur (MWth) | Source bibliographique du cœur du réacteur (Source) | Nuclides parents (nbr) | Données utilisées par Hysplit |                 | Données utilisées    |                          |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
|                                      |                                     |                                       |   |                        | Terme source 1 réacteur (Bq)  | Durée rejet (h) | Rejet par heure (Bq) | Demi-vie en secondes (s) |
| POL – ZA2                            | PWR III1/2                          | 3415                                  | Sholly et al. 2014, 32                              | 22                     | 2.7212.E+18                   | 3               | 9.071E+17            | 7.4E+05                  |
| FRA – TRI                            | PWR                                 | 2785                                  | EDF 2004, 16  | 59                     | 2.8533.E+18                   | 3               | 9.511E+17            | 7.7E+05                  |
| FRA – CAT                            | PWR                                 | 3817                                  | EDF 2008, 33  | 59                     | 4.2101.E+18                   | 3               | 1.403E+18            | 7.7E+05                  |

Mais en 2013, l'IRSN envisageait les conséquences d'un accident majeur dans un réacteur de 2785 MWth à partir d'un terme source presque deux fois moindres que celui de l'étude de 2007 – 1.56E+18 Becquerels pour

56 isotopes (IRSN 2013b, 57)<sup>9</sup>, tout en renonçant à documenter les conséquences des cas les plus sévères au prétexte que la médiane suffit (IRSN 2013b, 32).

En 2024, l'actualité géopolitique mène à revenir aux fondamentaux de l'étude de 2007. Aussi avons-nous utilisé les fractions d'un accident de type S1 décrites par l'*Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire* (IRSN 2013a, 77). Ce qui mène, pour Cattenom, 3817 MWth et 59 aérosols, à un terme source de 4.21E+18 Becquerels. Le terme ressource retenu ne comprend pas de gaz rares. Il est résumé dans le tableau 2.1.1 ; la liste des isotopes retenus est précisée dans le tableau 2.1.2 ; enfin, le terme source est détaillé dans l'annexe 1 en fin de document, avec sa bibliographie spécifique.

### (b) Précisions sur le terme source

Cette section vise à définir comment les aérosols du nuage radioactif ont été agrégés, en tenant compte de la demi-vie de chaque isotope (loi de la décroissance radioactive). Les nuages ont été simulés pendant 72 heures (2,59E+05 secondes). Nous avons mis à profit différentes ressources bibliographiques pour obtenir le terme source le plus complet possible. Le tableau 2.2.2 liste les nucléides du terme source pour un réacteur de 3817 MWth.

| Tableau 2.2.2. Liste de 59 nucléides du terme source d'un réacteur à eau pressurisée de 3817 MWth, tiré de EDF (2008)<br>Les gaz rares ne sont pas pris en compte dans l'étude, d'où l'absence du groupe 1 dans la liste ci-dessous.  |
|---|
| Group 2: I-129, I-131   |
| Group 3: Cs-134, Cs-135, Cs-136, Cs-137, Rb-86  |
| Group 4: Sb-124, Sb-125, Sb-126, Sb-127, Te-125m, Te-127m, Te-129m, Te-132  |
| Group 5: Ba-140, Sr-89, Sr-90   |
| Group 6: Ag-108m, Ag-110m, Ag-111, Ru-103, Ru-106, Tc-99  |
| Group 7: Am-241, Am-243, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Eu-152, Eu-154, Eu-155, Eu-156, Nb-93m, Nb-94, Nb-95, Nb-95m, Nd-147, Pm-147, Pm-148, Pm-148m, Pr-143, Sm-147, Sm-151, Y-91, Zr-93, Zr-95  |
| Group 8: Ce-141, Ce-144, Np-237, Pu-236, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, U-234, U-235, U-238  |
| Données primaires : (EDF 2008) EDF, SEPTEN. 2008. EPS N2 1300 MWe post VD2: Évaluation probabiliste des conséquences radiologiques "court terme à 7 jours" des catégories de rejets d'intérêt. Annexe 2 : Inventaire cœur et termes sources associés aux catégories de rejets. p. 33/40.<br>Voir détails du terme source dans l'annexe 1, en fin de document. |

La baisse de la radioactivité du nuage, pendant les 72h de la simulation météo, tient compte de la demi-vie de chaque radioélément 'parents'. Les calculs ont été faits sur Excel, en décomposant le nuage en 36 périodes de 2 heures pour compenser les limites du tableur.

Comme agréger plusieurs courbes de décroissance de la radioactivité ne donne pas une courbe dont l'expression mathématique puisse être utilisée par le programme de dispersion *Hysplit*, nous avons vérifié que le terme source agrégé ne s'écartait pas plus de 3% d'une courbe de référence utilisable pour la simulation météorologique du nuage ; cette dernière courbe a servi à la simulation du nuage dans *Hysplit* (*infra* 2.4 ; 2.5).

Le tableau 2.2.3 donne un premier aperçu de la radioactivité et de l'impact sanitaire du nuage radioactif ; le tableau différencie la volatilité des différents aérosols, certains d'entre eux étant qualifiés de "*refractories*" au sens de IAEA (2006, 20) pour souligner leur différence en termes de volatilité.

| Table 2.2.3. Radioactivité lors du passage du nuage et impact sanitaire calculé sur 72 heures (inhalation) ; pourcentage des aérosols et des <i>refractories</i> sous l'angle des Becquerels et des Sieverts |   |   |   |  |                                    |   |
|--|---|---|---|--|------------------------------------|---|
|  | Source bibliographique<br>du cœur du réacteur<br>(avant mise à l'échelle)<br>(Source) | Source bibliographique<br>de la fract° des nucléides<br>du terme source<br>(Source) | Bq · s m-3<br>Part des<br>aérosols<br>(%) | Bq · s m-3<br>Part des<br><i>refractories</i><br>(%) | mSv<br>Part des<br>aérosols<br>(%) | mSv<br>Part des<br><i>refractories</i><br>(%) |
| PWR III1/2 (AP 1000)   | Sholly et al. 2014, 32  | Sholly et al. 2014, 31  | 70.6%                                     | 29.4%  | 98.6%                              | 1.4%  |
| PWR de 2785 MWth   | EDF 2004, 16  | IRSN 2013A, 77  | 97.0%                                     | 3.0%   | 82.9%                              | 17.1%   |
| PWR de 3817 MWth   | EDF 2008, 33  | IRSN 2013A, 77  | 97.1%                                     | 2.9%   | 76.3%                              | 23.7%   |
| Les nucléides avec une volatilité intermédiaires, tels que Ru-103, Sr-89 et Ba-140 (IAEA 2006, 20), sont comptabilisés selon la volatilité des aérosols.   |   |   |   |  |                                    |   |

Dans le tableau 2.2.3, les chiffres contrastés de l'AP1000, dont les *refractories* constituent 29,4% du terme source en Bq, mais seulement 1,4 % du terme source en mSv, s'expliquent par une raison simple : la prise en

<sup>9</sup> Le total de 1.56E+18 Becquerels est composé de 56 aérosols. Par contraste, le terme source de l'étude 'Tricastin', pour un réacteur équivalent de 2785 MWth – 900 MWe, est de 2.85E+18 Bq pour 59 aérosols (Eunupri2021b), donc dans la ligne du terme source de l'étude de l'IRSN en 2007 (tableau 2.2.1).



Les éléments radioactifs se désintègrent en d'autres nucléides ; par exemple, le césium-137 se désintègre en baryum-137 ; la relation entre le Cs-137, "nucléide parent", et le Ba-137, "produit de filiation" ou "descendant", est connue et décrite (EPA 2019a ; AIEA 2003, 6).

La table sur la demi-vie, les produits de désintégration, le mode de désintégration et le rendement fractionnaire (EPA 2019a) donne tous les éléments indispensables au calcul des produits de filiation. Nous reproduisons les données pertinentes pour terme source de Cattenom, en annexe : *Table A.2. List of 'parent' nuclides (of the source term) and the related 'progeny' considered in this study.*

## 2.3 Des Becquerels aux Sieverts de la dose efficace collective engagée des populations touchées

### (a) Des Becquerels aux mSv

Les calculs décrits ci-dessous visent à chiffrer les personnes potentiellement impactées, lors du passage du nuage radioactifs, pendant un temps (très) inférieur à 72 heures dans la majorité des cas, pour différents niveaux de *dose efficace individuelle engagée*.

Ils visent aussi à estimer le nombre de personnes potentiellement impactées par le rayonnement de la déposition sur les sols, lors de la première année suivant l'accident, pour différents niveaux de *dose efficace individuelle engagée*.

Les différentes sources de radioactivité sont calculées par le logiciel *Hysplit* en Becquerels (Bq). L'activité en Becquerels est transformée en millisieverts (mSv). La comparaison automatisée des cartes du nuage avec les cartes de la distribution des populations permet d'estimer le nombre de personnes confrontées au nuage, puis la dose efficace collective engagée (*infra*).

→ Pour évaluer le passage du nuage radioactif et les doses potentielles qui menaceraient les populations, la part du nuage qui est prise en compte évolue dans les 100 premiers mètres au-dessus du sol ; la simulation du reste du nuage sert à réintégrer la radioactivité qui en descendrait et se rapprocherait des établissements humains ou, à l'inverse, s'élèverait. La concentration intégrée dans le temps est exprimée en  $Bq \cdot s \cdot m^{-3}$ . ; le calcul résume la décroissance radioactive globale pendant 72 heures.

Pour simuler l'impact de la radioactivité, les facteurs de dose reconnus permettent de convertir les Becquerels en *doses efficaces individuelles engagées* (millisieverts – mSv), d'une part pour l'inhalation (CIPR 2012), d'autre part pour l'exposition externe dans l'air (EPA 2019c). L'inhalation étant calculée pour des adultes en état de stress, nous avons suivi un institut officiel qui recommande de dimensionner le volume d'air inhalé à  $3.34E-04 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  (ENSI 2009, 66).

→ Pour évaluer l'impact de la déposition, le *rayonnement du sol intégré dans le temps* est exprimé en  $Bq \cdot s \cdot m^{-2}$ . Le rayonnement du sol est calculé sur une année en intégrant la décroissance radioactive spécifique à chaque radioélément.

Pour l'impact de la déposition, des facteurs de dose reconnus permettent de convertir les Becquerels pour le rayonnement du sol en *doses efficaces individuelles engagées* en millisieverts (EPA 2019b). Et l'emploi d'un facteur *indoor* de 0.4 traduit la part des activités humaines effectuées à l'intérieur, et réduit la dose théorique annuelle de 60% (IFSN 2009, 67).<sup>11</sup>

En résumé, les calculs ci-dessus permettent d'estimer le nombre de personnes potentiellement atteinte pour différents niveaux de dose. Pour estimer l'impact sanitaire potentiel, il faut calculer la dose efficace collective engagée (*infra*).

### (b) Des doses individuelles à la dose collective

L'étape suivante consiste à sommer les *doses efficaces individuelles engagées* (DEIE) impactant potentiellement les personnes répertoriées comme habitant en chacun des lieux contaminés pour estimer la *dose efficace collective engagée* (DECE) reçue par la population.

$$DECE = DEIE \cdot \text{personnes affectées}$$

<sup>11</sup> Le facteur relève de la protection d'urgence ; il est conservateur au sens où il déterminé pour les personnes dont les activités professionnelles se passent pour l'essentiel à l'extérieur.

La DECE est exprimée en personnes-Sieverts (persSv) et est déterminée à la fois par le niveau de radioactivité et par le nombre de personnes exposées à la radioactivité. Elle dépend encore du comportement des personnes prises en compte dans la modélisation (*infra*). La DECE sert ensuite au calcul de l'impact sanitaire (*infra 2.7*)

*(c) Intervalle pris en compte dans l'estimation de l'impact sanitaire du nuage*

La mesure de l'impact sanitaire dû au passage du nuage radioactif prend en compte l'intervalle [1 mSv, 2000 mSv]. Cette option limite la polémique sur les très faibles doses, et permet de se concentrer sur les effets stochastiques des radiations (*infra 2.7 ; 4.2(c)(6)*), plutôt que sur les effets déterministes des fortes doses.

*(d) Intervalle pris en compte dans l'estimation de l'impact sanitaire de la déposition*

La mesure de l'impact sanitaire des sols contaminés considère l'intervalle [1 mSv, 20 mSv]. Ce choix est conforme à l'hypothèse la plus stricte de la directive 2013/59/EURATOM du Conseil qui commande d'évacuer durablement les personnes vivant dans des zones où les doses efficaces individuelles sont supérieures à 20 mSv au cours de la première année après l'accident ; autrement dit, nous avons sorti du calcul les personnes vivant dans des zones où les doses annuelles sont égales ou supérieures à 20 mSv.

*(e) Comparaison avec les termes sources de Fukushima et Tchernobyl*

Pour donner une idée du terme source d'un hypothétique accident majeur dans un réacteur de 3817 MWth, nous l'avons comparé à ceux de Tchernobyl et de Fukushima (AIEA 2006 ; AIEA 2015). Au vu des références bibliographiques ci-dessous, seul un nombre limité de nucléides de ces deux accidents majeurs est commun aux réacteurs.

La quantité de Becquerels de la plupart des nucléides de Fukushima s'inscrit dans une fourchette plutôt large, de 1 à 200 pour trois nucléides (dont le tellurium-132 qui est très nocif), et de 1 à 5,6 si l'on considère l'ensemble des nucléides communs aux publications consultées. Et l'immédiat océan n'a pas facilité la mesure des retombées. Aussi avons-nous retenu l'estimation haute donnée par l'AIEA.

**Table 2.3.1. Comparaisons avec le terme source de Fukushima.**  
D'abord sans normalisation de leurs puissances thermiques respectives (MWth), puis avec alignement sur la puissance d'un réacteur de Fukushima.

| Codes des centrales nucléaires (code) | Source bibliographique du cœur du réacteur (avant mise à l'échelle) (Source) | Source bibliographique de la fract° des nucléides du terme source (Source) | Puissance thermique 1 réacteur (MWth) | Nombre de nucléides dispo. pour comparaison (nbr) | Puissances Non normalisées                           |   |
|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|---|--|---|
|                                       |  |  |                                       |   | Rejet réacteur étudié / Rejet Fukushima (haut) Bq/Bq | Puissances normalisées Rejet réacteur étudié / rejet Fukushima (haut) Bq/Bq |
| ZA2                                   | Sholly et al. 2014, 32   | Sholly et al. 2014, 31   | 3415                                  | 17  | 3.99   | 2.78  |
| TRI                                   | EDF 2004, 16   | IRSN 2013A, 77   | 2785                                  | 18  | 4.10   | 3.50  |
| CAT                                   | EDF 2008, 33   | IRSN 2013A, 77   | 3817                                  | 18  | 6.02   | 3.76  |

Source bibliographique du source terme de Fukushima : IAEA 2015 → estimation haute

**Table 2.3.2. Comparaisons avec le terme source de Tchernobyl**  
D'abord sans normalisation de leurs puissances thermiques respectives (MWth), puis avec alignement sur la puissance d'un réacteur de Tchernobyl

| Codes des centrales nucléaires (code) | Source bibliographique du cœur du réacteur (avant mise à l'échelle) (Source) | Source bibliographique de la fract° des nucléides du terme source (Source) | Puissance thermique 1 réacteur (MWth) | Nbr de nucléides dispo. pour comparaison (nbr) | Puissances Non normalisées                            |  |
|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|---|--|
|                                       |  |  |                                       |  | Rejet réacteur étudié / Rejet Tchernobyl (haut) Bq/Bq | Puissances normalisées Rejet réacteur étudié / rejet Tchernobyl (haut) Bq/Bq |
| ZA2                                   | Sholly et al. 2014, 32   | Sholly et al. 2014, 31   | 3415                                  | 18   | 0.63  | 0.59   |
| TRI                                   | EDF 2004, 16   | IRSN 2013A, 77   | 2785                                  | 19   | 0.65  | 0.74   |
| CAT                                   | EDF 2008, 33   | IRSN 2013A, 77   | 3817                                  | 19   | 0.96  | 0.80   |

Source bibliographique du source terme de Tchernobyl : IAEA 2006 → estimation haute  
Le nombre de nucléides comparés varie du fait de leur mention, ou non, dans les sources bibliographiques consultées.

Comme l'hypothèse actuelle d'un accident nucléaire majeur est soutenue par la possibilité, même improbable, d'une attaque à grand potentiel destructeur, il est conséquent de se préparer à affronter un terme source d'un ordre de grandeur comparable à celui du tableau 2.2.1. Autrement dit, les termes source de notre étude sont dimensionnés en fonction du niveau élevé d'insécurité qui caractérise l'époque, depuis les attentats du 11 septembre 2001, sachant que cibler une centrale nucléaire fut clairement envisagé par les terroristes (Kean and Hamilton 2004, 154, 530).

## 2.4 Vitesse de déposition de différents nucléides dans et sous le nuage<sup>12</sup>

### (a) Cadre

L'utilisateur de *Hysplit* doit spécifier la vitesse de déposition des aérosols et des particules qui sont rejetés par une source et dispersés par les vents. En outre, *Hysplit* a besoin des paramètres d'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage (Draxler et al., 2018). Comme ces paramètres dépendent en partie des conditions météorologiques, les chiffres à trouver sont indicatifs et gérés par *Hysplit* en conséquence.

### (b) Revue de la littérature

Nous donnons ci-dessous une brève revue de la littérature sur le sujet afin de préciser les valeurs adéquates et nos options.

- Césium : La vitesse de déposition sèche du césium<sup>137</sup> est donnée par le programme de dispersion *Hysplit* à 0,001 (m/s) (Stein et al. 2015). Toutefois, Guglielmelli et al. (2016) ont fixé cette vitesse à 0,002 (m/s). L'observation directe de l'accident de Fukushima conduit à considérer que le chiffre de 0,001 (m/s) est robuste pour <sup>137</sup>Cs, <sup>136</sup>Cs et <sup>134</sup>Cs (Takeyasu & Sumiya 2014). L'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage est fixée à 8,0E-05 (1/s) par *Hysplit* pour <sup>137</sup>Cs. Pour ce même isotope, l'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage est estimée à 3,5E-05 (1/s) (Guglielmelli et al. 2016) ou même à 3,36E-04 et 8,4E-05 respectivement (Leadbetter et al. 2015).
- L'iode peut être libéré sous forme de gaz, d'aérosol ou des deux. Compte tenu de l'incertitude relative à la fraction de chaque forme, le rapport Flexrisk a classé tout l'iode sous l'espèce aérosol (Seibert et al. 2013, 30). Sur ce point, nous adoptons la même approche et examinons la vitesse de déposition et l'évacuation/piégeage humide en conséquence. Pour la forme aérosol de l'iode, *Hysplit* fixe la vitesse de déposition à 0,001 (m/s) et l'évacuation/piégeage dans et sous le nuage à 4,0E-05 (1/s) (Stein et al. 2015).

L'IFSN admet néanmoins que la vitesse de déposition peut être donnée pour tous les aérosols (IFSN 2009, 64). Pour tous les aérosols, la vitesse de déposition est fixée à 0,0015 (m/s) (IFSN 2009, 64) et l'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage est fixée à 7,0E-05 (1/s) (IFSN 2009, 65). Ces derniers chiffres sont proches de ceux mentionnés ci-dessus pour le césium et l'iode. Les coefficients affectant la dispersion atmosphérique et la déposition des nucléides est présentée dans le tableau 2.4.1. Les chiffres correspondent à ceux de la littérature, principalement Sander (2015), ENSI (2009), Draxler & Rolph (2012) et Baklanov et al. (2001) (*supra*).

Guntay qui rappelle que les *refractories* de Chernobyl se sont retrouvés très loin du réacteur endommagé : les éléments peu volatils tels que le cérium, le zirconium et les actinides retenus dans les fragments du combustible de Tchernobyl ont été détectés notamment en Pologne, en Bulgarie, en Hongrie, dans les pays nordiques et en Grèce, et cela même s'ils se sont déposés plus rapidement et plus près du site du réacteur que le césium et l'iode (Guntay 1997, 190).

| Matériau (libellé)  | Vitesse de déposition sèche (m/s) | Paramètres d'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage (1/s) |
|---------------------|-----------------------------------|---|
| Aérosols            | 0.0015                            | 7.0E-05   |
| <i>Refractories</i> | 0.01                              | 7.0E-03   |

Les chiffres ci-dessus sont utilisés par *Hysplit*.

### (c) Détermination des paramètres de la vitesse de déposition sèche et de l'évacuation/piégeage humide dans et sous le nuage pour les aérosols et les *refractories*

Vu ce qui précède (*supra*), afin de ne pas minimiser artificiellement le nombre de nucléides pris en compte dans l'étude, sans compliquer les calculs de dispersion, nous avons agrégé ensemble les aérosols et les *refractories*, en utilisant les paramètres des aérosols. Cette façon mène à un terme source plus complet et réaliste que s'il était limité aux aérosols.

<sup>12</sup> Cette section est un extrait de celle publiée dans EUNUPRI\_2019.

Cette approche aurait toutefois le défaut de sous-évaluer la distribution du terme source sur les territoires se trouvant au contact de la première partie du parcours du nuage ; et de surévaluer la distribution du terme source dans la seconde partie. Le défaut serait toutefois compensé par le surcroît de réalisme qu'il y a de laisser les *refractories* dans le terme source, alors que de nombreuses études n'en tiennent pas compte (i.e., l'étude de Seibert *et al.* (2013) qui les ignore). Vu l'importance non négligeable des *refractories* dans les données d'EDF, leur intégration dans le nuage radioactif semble pertinente ; pour mémoire, voir la proportion des aérosols et des *refractories*, dans la présente étude, aux tableaux 2.2.5 et 2.2.6.

#### (d) Vitesse de déposition sur différents types de sols

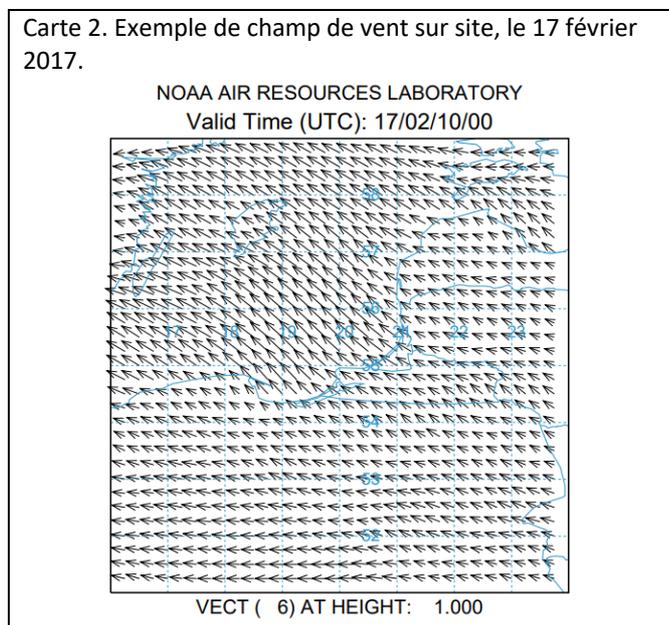
Les différents types de couverture terrestre ont des capacités différentes à capturer les particules radioactives. Par exemple, Sehmel cité par Takeyasu & Sumiya (2014) donne la vitesse de dépôt pour  $^{137}\text{Cs}$  : 0,0003 - 0,0015 m/s pour l'eau, 0,0001 - 0,0009 m/s sur le "sol", et 0,002 - 0,005 m/s sur l'herbe. Ces chiffres ne peuvent toutefois pas être généralisés. Müller & Pröhl cités par Baklanov & Sørensen (2001, 789) ont donné – pour les radionucléides liés aux aérosols – une vitesse de dépôt de 0,0005 m/s en cas de dépôt sur le "sol", de 0,0105 m/s pour la déposition sur l'herbe et de 0,0005 m/s sur les arbres, sachant que ces chiffres dépendent de la taille des particules déposées ainsi que de la taille et du développement du feuillage des arbres.

En raison de la grande complexité et de l'absence de collecte systématique de données sur cette question spécifique, nous ne détaillons pas le processus de déposition. En revanche, nous mettons à disposition tous les résultats détaillés concernant la déposition sur les sols, dans des fichiers cartographiques mis en ligne, à disposition des chercheurs intéressés à une comparaison avec des données sols plus détaillées que les nôtres.

## 2.5 Simulations météorologiques

### (a) Qu'est-ce qu'un modèle de dispersion atmosphérique ?

Les modèles de dispersion atmosphérique ont été développés dans les années 1980 pour étudier les effets des incidents chimiques et nucléaires. L'objectif n'était pas seulement de prévoir l'évolution du nuage de polluants, mais aussi de remonter à l'origine d'une pollution si un signal était observé à un point d'observation.



L'accident de Tchernobyl en 1986 a été l'un des principaux déclencheurs du développement de ce type de modèles. Il existait à l'époque des modèles de trajectoire simples qui permettaient des estimations qualitatives, mais il a fallu quelques années de plus pour que les modèles de dispersion soient en mesure d'évaluer l'événement de manière quantitative (Piedelievre *et al.* 1990 : 1205-1220).

Il existe de nombreux types de modèles de dispersion ; pour une revue, voir Leelössy *et al.* (2014, 257-278). En général, les modèles de dispersion doivent d'abord être caractérisés par le contenu (type et masse des composants) et l'émission (taux, durée, hauteur). Le transport, la diffusion et la déposition sont ensuite déterminés par les champs météorologiques, principalement les vents et les précipitations (carte 2.A.).

### *(b) Considérations sur la résolution des champs météorologiques*

Les champs de vent sont plutôt continus sur les terrains plats et les surfaces d'eau, mais peuvent devenir très complexes sur les paysages montagneux. Dans la région considérée, le terrain est plutôt plat, de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser une résolution très élevée pour la représentation du vent.

Nous avons choisi d'utiliser les vents fournis par la NOAA à une résolution de 0,25° de latitude et de longitude (NOAA 2016). Les prévisions de vent par séquences temporelles d'une heure sont disponibles jusqu'à +24 heures par une simple requête FTP (NOAA 2018a). Afin d'obtenir des modèles de dispersion sur 72 heures, nous avons concaténé 3 prévisions consécutives sur 24 heures. Les prévisions de vent sur 24 heures peuvent être considérées comme précises et suffisamment proches de l'observation. Bien que moins précises, on peut supposer qu'il en est de même pour les précipitations.

### *(c) Le modèle de dispersion Hysplit*

*Hysplit* est un modèle de trajectoire et de dispersion développé par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis. *Hysplit* a été utilisé dans diverses simulations décrivant le transport atmosphérique, la dispersion et la déposition de polluants et de matières dangereuses. Parmi les exemples d'applications, on peut citer le suivi et la prévision des émissions de matières radioactives, de la fumée des incendies de forêt, des poussières transportées par le vent, des polluants provenant de diverses sources d'émission fixes et mobiles, des allergènes et des cendres volcaniques.

La dispersion d'un polluant est calculée en supposant une dispersion par bouffées ou par particules. Une collection de particules peut être rassemblée dans ce que l'on appelle des bouffées, qui sont de petits nuages émis par la source de pollution. Ils sont transportés par le champ de vent et s'étendent en raison de la diffusion atmosphérique. La trajectoire moyenne du nuage définie par son centroïde est calculée et la croissance est modélisée par une distribution gaussienne. Dans ce modèle de bouffées, les bouffées s'étendent jusqu'à ce qu'elles dépassent la taille de la cellule de la grille météorologique (horizontalement ou verticalement) et se divisent ensuite en plusieurs nouvelles bouffées, chacune avec sa part de masse de polluant (NOAA 2018b). Dans le modèle de particules, un nombre fixe de particules est calculé par rapport au domaine du modèle "par le champ de vent moyen et réparti par une composante turbulente. La configuration par défaut du modèle suppose une distribution tridimensionnelle des particules (horizontale et verticale)"<sup>13</sup> (NOAA 2018b). Une description complète du modèle est donnée par Stein et al. (2015) (*infra* iv).

### *(d) Le modèle de dispersion Hysplit évalué par l'OMM dans le cas de Fukushima*

L'accident de Fukushima en 2011 a permis d'évaluer les différents modèles de dispersion. Contrairement au cas de Tchernobyl, les modèles ont été utilisés en temps réel afin de protéger ou d'évacuer les populations menacées. Une comparaison entre les modèles de dispersion calculés *a posteriori* – en utilisant les données de déposition et les données météorologiques pour calculer la dispersion atmosphérique jusqu'à la source du rejet – a été réalisée pour l'Organisation météorologique mondiale (OMM) (Draxler et al. 2015). Il n'y a pas eu une seule combinaison ATDM-météorologie qui ait donné les meilleurs résultats pour les prévisions de dépôt et de concentration dans l'air. En général, le modèle *Hysplit* piloté par les données météorologiques de la NOAA a donné de bons résultats par rapport aux autres modèles. Il a été constaté que l'utilisation d'analyses à mésoéchelle et à haute résolution améliorerait les performances du modèle de dispersion ; cependant, les analyses de précipitations à haute résolution n'ont pas amélioré les prévisions. L'étude de Fukushima a montré que l'utilisation de champs météorologiques avec une résolution de 20-50 km est appropriée pour notre objectif.

### *(e) Production des champs d'immission*

Techniquement, nous avons procédé à la caractérisation des radionucléides d'une centrale nucléaire. Le champ géographique de l'analyse a été défini comme étant à 50° de longitude ouest et 50° de longitude est de la centrale nucléaire et à 50° de latitude sud et 50° de latitude nord de la même centrale nucléaire respectivement. La résolution du résultat est de 0,05° en longitude et en latitude.

---

<sup>13</sup> In the particle model, a fixed number of particles are calculated in relation to the model domain "by the mean wind field and spread by a turbulent component. The model's default configuration assumes a 3-dimensional particle distribution (horizontal and vertical)" (NOAA 2018b)

Nous avons calculé la dispersion uniquement pour les aérosols. Nous avons ainsi calculé les quantités de particules radioactives dans les 100 premiers mètres de l'atmosphère (Bq/m<sup>3</sup>). Cette couche est représentative de la radioactivité à laquelle la population est exposée par inhalation et exposition externe. Pour les particules solides (aérosols), il est également possible de calculer la quantité de radioactivité (en Bq/m<sup>2</sup>) déposée sur le sol et nous l'avons fait pour les aérosols et les *refractories*.

Grâce à *Hysplit*, ces quantités sont stockées dans des fichiers binaires appelés "cdump". Les calculs ont été effectués pour tous les jours de 2017 et 2018 ainsi que pour la période 1.01.2020 - 31.12.2020, ce qui donne 3 années de simulations ou 1096 jours. Les données 2019 sont manquantes du fait de la fermeture de certaines agences fédérales pendant plusieurs jours cette année-là. Les fichiers cdump ont été stockés et peuvent être utilisés pour des analyses ultérieures.

Pour évaluer la quantité de population ou les zones géographiques potentiellement touchées par la radioactivité, nous avons utilisé deux méthodes différentes, la méthode isoline-kml et la méthode ASCII. Il s'agit de deux méthodes différentes d'interpolation à partir de la grille de 0,05° vers la grille de population plus détaillée. Dans les deux cas, nous avons d'abord converti la quantité de particules radioactives (donnée en Bq) en doses d'exposition (données en mSv) comme expliqué ci-dessus (*supra* 2.3).

*Hysplit* permet tout d'abord de produire des contours à partir des fichiers cdump, ce qui permet d'obtenir des formes pour différents seuils de dose. Ces formes sont incluses en format vectoriel sous forme de fichiers kml<sup>14</sup>. À l'aide d'un *Système d'information géographique* (SIG), il est possible de calculer la superficie et la taille de la population à l'intérieur des isolignes. Les fichiers kml sont également pratiques pour représenter les modèles de dispersion superposés sur un fond géographique en utilisant par exemple Google Earth.

La seconde méthode consiste à extraire des fichiers cdump l'exposition en format ASCII avec la résolution originale calculée par *Hysplit* (0,05°). Une interpolation bilinéaire est ensuite appliquée afin d'évaluer les doses sur la grille détaillée de la population. Cette approche est également utilisée pour évaluer la radioactivité sur différentes villes. Pour ce faire, on utilise les 9 points *Hysplit* entourant le centre de la ville et on prend le maximum de ces points.

## 2.6 Analyse de l'impact par le Système d'information géographique (SIG)

### (a) Approche

L'impact de la radioactivité sur la population et la couverture du sol a été calculé à l'aide des outils SIG du logiciel ArcGIS Pro, de l'*Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Les fichiers kml générés par le logiciel HYSPLIT ont été convertis en fichiers de forme ESRI à l'aide de l'outil "*KMLToLayer\_conversion*", afin qu'ils puissent être utilisés dans l'analyse statistique. Les fichiers de forme contiennent plusieurs polygones avec différents niveaux de concentration de rayonnement. Chaque fichier de forme a été superposé à une couche matricielle à l'aide de l'outil "*ZonalStatisticsAsTable*", qui a permis d'obtenir un tableau indiquant le nombre de personnes et les types d'occupation du sol concernés.

Les couches matricielles contenant les chiffres de population, pour les pays individuels et pour l'année 2020, ont été obtenues sur le site web *worldPop*, qui comprend des ensembles de données avec une résolution de 30 arcs (environ 1 km à l'équateur) créés avec la méthode "*top-down unconstrained*" (de haut en bas sans contrainte). Le raster de l'occupation du sol a été obtenu sur le site web de *Copernicus*, qui met les produits *Corine Land Cover* à disposition pour le téléchargement. Le raster utilisé est le jeu de données CLC2018 produit dans le cadre du *Copernicus Land Monitoring Service* et se rapportant à l'état de l'occupation et de l'utilisation des sols pour l'année 2018. Le jeu de données comprend la classification d'images satellites produites par des équipes des 39 pays membres de l'*Agence européenne pour l'environnement* (EEA39).

L'occupation des sols est représentée en 44 classes différentes avec une résolution de 100 m, qui ont été regroupées en 4 classes pour la présente étude. La projection utilisée pour l'analyse est le système de coordonnées géographiques WGS84. Les analyses ont été réalisées à l'aide de la fenêtre *Python* intégrée à *ArcGIS*, qui a permis le géotraitement de grandes quantités de données.

---

<sup>14</sup> KML signifie Keyhole Markup Language et les fichiers correspondants sont utilisés pour la cartographie géographique.

(b) Catégories de sols

Les classes originales de la CLC2018 sont dans le tableau 2.6.1 (*infra*). L'étude utilise quatre classes d'occupation du sol : cultivées (i), vignes (ii), herbacées (iii), toutes surfaces (iv). Voir détail ci-après.

| ObjectID | Value | Count     | LABEL3   | CODE_18 | CLASS_ENG* | Vcatg |
|----------|-------|-----------|--|---------|------------|-------|
| 1        | 1     | 800699    | Tissu urbain continu   | 111     | Autres     | 4     |
| 2        | 2     | 17085234  | Tissu urbain discontinu  | 112     | Autres     | 4     |
| 3        | 3     | 3210212   | Unités industrielles ou commerciales   | 121     | Autres     | 4     |
| 4        | 4     | 414626    | Réseaux routiers et ferroviaires et terrains associés  | 122     | Autres     | 4     |
| 5        | 5     | 122685    | Zones portuaires   | 123     | Autres     | 4     |
| 6        | 6     | 352020    | Aéroports  | 124     | Autres     | 4     |
| 7        | 7     | 820443    | Sites d'extraction minière   | 131     | Autres     | 4     |
| 8        | 8     | 125373    | Décharges  | 132     | Autres     | 4     |
| 9        | 9     | 201018    | Chantiers de construction  | 133     | Autres     | 4     |
| 10       | 10    | 330596    | Zones urbaines vertes  | 141     | Herbacées  | 3     |
| 11       | 11    | 1310736   | Installations sportives et de loisirs  | 142     | Herbacées  | 3     |
| 12       | 12    | 121469220 | Terres arables non irriguées   | 211     | Autres     | 4     |
| 13       | 13    | 10943399  | Terres irriguées en permanence   | 212     | Cultivé    | 1     |
| 14       | 14    | 821737    | Rizières   | 213     | Cultivé    | 1     |
| 15       | 15    | 4112102   | Vignobles  | 221     | Vignobles  | 2     |
| 16       | 16    | 4304276   | Arbres fruitiers et plantations de baies   | 222     | Cultivé    | 1     |
| 17       | 17    | 5247375   | Oliveraies   | 223     | Cultivé    | 1     |
| 18       | 18    | 43061005  | Pâturages  | 231     | Herbacées  | 3     |
| 19       | 19    | 558481    | Cultures annuelles associées à des cultures permanentes  | 241     | Cultivé    | 1     |
| 20       | 20    | 24295716  | Modes de culture complexes   | 242     | Cultivé    | 1     |
| 21       | 21    | 27014639  | Terres principalement occupées par l'agriculture avec des zones significatives de végétation naturelle | 243     | Cultivé    | 1     |
| 22       | 22    | 3312024   | Zones agro-forestières   | 244     | Cultivé    | 1     |
| 23       | 23    | 58678001  | Forêt de feuillus  | 311     | Autres     | 4     |
| 24       | 24    | 81743560  | Forêt de conifères   | 312     | Autres     | 4     |
| 25       | 25    | 31065342  | Forêt mixte  | 313     | Autres     | 4     |
| 26       | 26    | 21557169  | Prairies naturelles  | 321     | Herbacées  | 3     |
| 27       | 27    | 17478178  | Landes et bruyères   | 322     | Autres     | 4     |
| 28       | 28    | 10890506  | Végétation sclérophylle  | 323     | Autres     | 4     |
| 29       | 29    | 29721311  | Arbuste forestier de transition  | 324     | Autres     | 4     |
| 30       | 30    | 763776    | Plages, dunes, sables  | 331     | Autres     | 4     |
| 31       | 31    | 8952679   | Roches nues  | 332     | Autres     | 4     |
| 32       | 32    | 23594478  | Zones à végétation clairsemée  | 333     | Autres     | 4     |
| 33       | 33    | 226982    | Zones brûlées  | 334     | Autres     | 4     |
| 34       | 34    | 1554720   | Glaciers et neige éternelle  | 335     | Autres     | 4     |
| 35       | 35    | 1377227   | Marais intérieurs  | 411     | Autres     | 4     |
| 36       | 36    | 11566473  | Tourbières   | 412     | Autres     | 4     |
| 37       | 37    | 586549    | Marais salants   | 421     | Autres     | 4     |
| 38       | 38    | 73892     | Salines  | 422     | Autres     | 4     |
| 39       | 39    | 1218413   | Zones intertidales   | 423     | Autres     | 4     |
| 40       | 40    | 1353727   | Cours d'eau  | 511     | Autres     | 4     |
| 41       | 41    | 12964044  | Plans d'eau  | 512     | Autres     | 4     |
| 42       | 42    | 652034    | Lagunes côtières   | 521     | Autres     | 4     |
| 43       | 43    | 382221    | Estuaires  | 522     | Autres     | 4     |
| 44       | 44    | 148586809 | Mer et océan   | 523     | Sans objet | 5     |
| 45       | 48    | 40471     | NODATA   | 999     | Sans objet | 5     |

Corine by Copernicus : classes originales d'occupation du sol et leur agrégation en 4 catégories (Vcatg) (traduct° DeepI)\*

(i) La catégorie *cultivé* regroupe les libellés suivants :

Terres irriguées en permanence ; Rizières ; Arbres fruitiers et plantations de baies ; Oliveraies ; Cultures annuelles associées à des cultures permanentes ; Modes de culture complexes ; Terres principalement occupées par l'agriculture avec des zones significatives de végétation naturelle ; Zones agro-forestières.

(ii) La catégorie *vignobles* est séparée de la catégorie *cultivé* vu l'importance culturelle de chaque appellation.

(iii) La catégorie *herbacées* regroupe les libellés suivants :

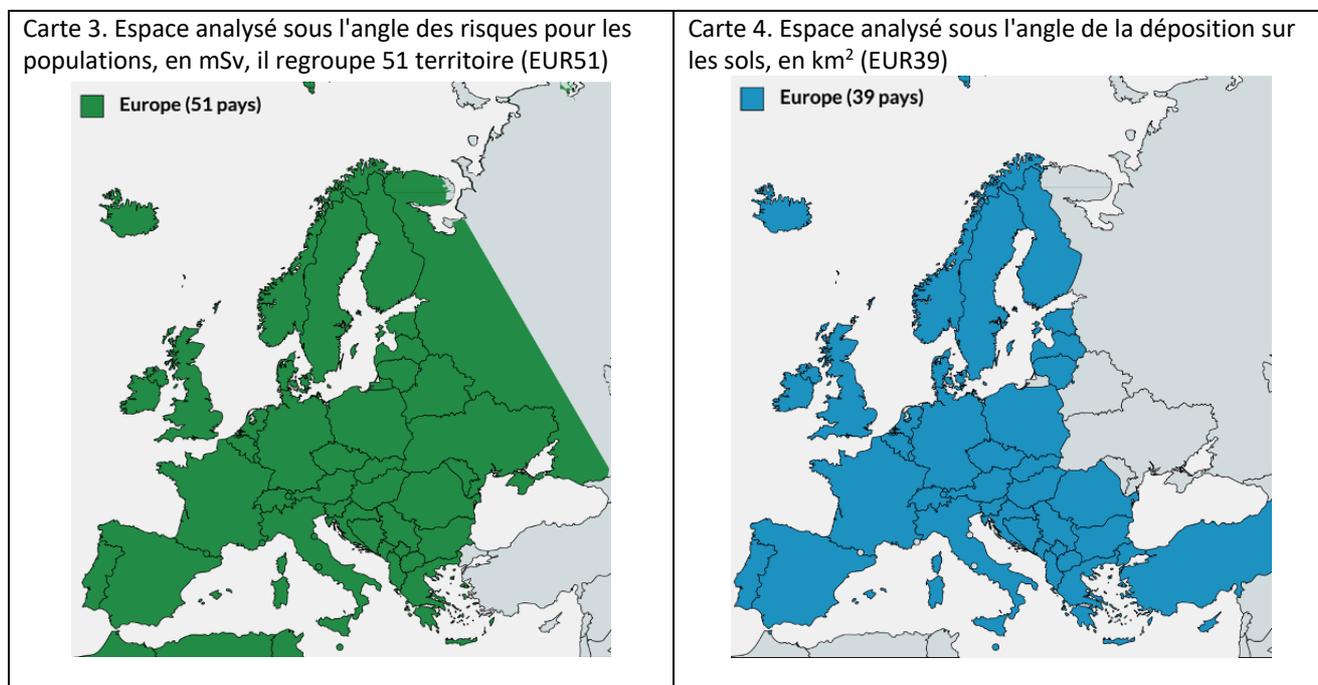
Zones urbaines vertes ; Installations sportives et de loisirs ; Pâturages ; Prairies naturelles.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Les trois premiers types de sols ont ceci en commun qu'il s'agit de terrains avec de l'herbe utilisé par les êtres humains de façon directe ou indirecte ; ce n'est pas le cas pour les prairies naturelles.

(iv) La catégorie *toutes surfaces* utilisée dans la présentation des résultats regroupe l'ensemble des catégories du tableau 2.6.1, sauf la catégorie *Mer et océan*.

(c) *Fonds de carte pour l'analyse de l'impact sur la population, et celui de la déposition sur les sols*

La Carte 3 présente le territoire total sur lequel porte l'impact sur la population, soit 51 pays ; la Carte 4 présente le territoire total sur lequel porte l'analyse de la déposition sur les sols, soit 39 pays. Le nombre différent de pays s'explique par la disponibilité des données de *Copernicus*. Les deux cartes ont un caractère maximaliste afin de ne pas manquer d'impact notable.



Carte 3: Gibraltar (GBR), l'île de Man (GBR), les îles Féroé (DNK), l'Islande (peu visible) et la Libye (non visible) sont inclus dans ces 51 pays. Les simulations pour la Russie intègrent la population et le territoire jusqu'à la longitude de Moscou.

## 2.7 Méthodologie de la question de santé

(a) *Contexte*

Les rayonnements ionisants (RI) sont omniprésents. Les RI provenant de sources naturelles sont à l'origine d'une *dose efficace collective engagée* (DECE) annuelle de la population mondiale de 18 000 000 personnes-Sievert (2,4 Sv/1000 - 7,5E+09 personnes) (Bennet 1995, -312). Les RI agissent soit de manière interne par incorporation de radionucléides (ingestion ou inhalation), soit de manière externe par pénétration cutanée de rayons bêta, gamma et neutrons (par immersion dans le rayonnement du nuage ou dans le rayonnement du sol) ou par contact direct de la peau avec des radionucléides. L'énergie des RI provoque des mutations du génome et d'autres processus cellulaires critiques tels que l'effet *bystander* qui conduit à l'instabilité génomique (Sipyagina et al. 2015, 18-22). Ainsi, les rayonnements ont le potentiel d'induire des maladies graves comme, par exemple des cancers, des malformations congénitales et des maladies génétiques qui se transmettent de génération en génération.

Notre approche est stochastique, basée sur les études épidémiologiques ; par conséquent, le calcul de la *dose efficace collective engagée* ne prend pas en compte les effets déterministes pour les doses supérieures à 2000 mSv (2 Sieverts), bien que les simulations donnent des doses individuelles supérieures à 4 Sv dans des secteurs situés à plusieurs kilomètres d'un réacteur.

L'approche stochastique et le modèle linéaire sans seuil (LNT) que nous utilisons ont toutefois fait l'objet d'une polémique aujourd'hui close, mais qu'il n'est pas inutile de retracer brièvement. Une fiche d'information de l'*Office fédéral de l'énergie* du 7 décembre 2018 affirme que "les évaluations statistiques dans des populations

plus importantes montrent qu'aucun effet sur la santé n'est détectable à des doses de rayonnement inférieures à 100 millisieverts (< 100 mSv)" (BFE 2018). Nous ne sommes pas d'accord avec cette évaluation et réfutons cette affirmation au vu des connaissances scientifiques actuelles ; de nombreuses études épidémiologiques de grande envergure démontrent l'existence de l'impact sanitaire des rayonnements ionisants inférieurs à 100 mSv (Hauptmann et al. 2020 ; Berrington de Gonzalez et al. 2020 ; Schubauer-Berigan et al. 2020 ; Daniels et al. 2020 ; Linet et al. 2020 ; National Cancer Institute 2020 ; Knüsli et al. 2022) ; non seulement le cancer est déclenché par de faibles doses de rayonnements ionisants (Hauptmann et al. 2020), mais aussi des maladies circulatoires telles que les crises cardiaques et les attaques cérébrales (Little et al. 2012 ; Little 2016 ; Little et al. 2023). Et l'épidémiologie montre encore que – parmi les enfants de 1 à 15 ans exposés aux faibles doses – une hausse de l'occurrence des cancers radio-induits est déjà discernable pour 1 mSv de plus (Mazzei-Abba 2021).

Selon l'*Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire*, le consensus scientifique est patent : « Plusieurs synthèses ou analyses conjointes réalisées par des consortiums internationaux (CIPR, NCRP, UNSCEAR, NCI) concluent qu'il existe de plus en plus de preuves des effets cancérigènes des rayonnements ionisants à faibles doses, et que l'hypothèse de l'absence d'un seuil à des fins de radioprotection semble pertinente et raisonnable. » (IRSN 2022, 57)

Signe de cette quasi-unanimité des experts, le Conseil Fédéral Suisse a désavoué – en deux temps – la fiche d'information de l'Office fédéral de l'énergie citée plus haut ; il se prononce d'abord sur le fond, ensuite sur la forme.

Sur le fond : "Les experts constatent que la question des faibles doses de radiations ionisantes traitée par l'IRSN<sup>16</sup> est toujours d'actualité." (Conseil fédéral 2023, 12) A titre de confirmation, l'IRSN écrit « que la dose de 100 mSv ne devrait plus être considérée comme une valeur limite de dose en dessous de laquelle il n'y a pas d'association scientifiquement prouvée entre l'exposition et une augmentation excessive du risque de cancer. » (IRSN 2022, 3/68). Et fort d'avis convergents (Bochud et al. 2023), le Conseil fédéral poursuit sa synthèse comme suit : Les experts "indiquent que le niveau de dose de l'ordre ou inférieur à 100 mSv entraîne un risque accru de cancer et que ce niveau de dose correspond typiquement à ce qu'une personne vivant en Suisse reçoit en moyenne sur une période d'environ 20 ans. Ils ajoutent que plusieurs organisations internationales concluent qu'il existe de plus en plus de preuves des effets cancérigènes des rayonnements ionisants à faible dose." (Conseil fédéral 2023, 12) Autrement dit, les doses annuelles dites normales ont déjà le potentiel de provoquer des effets délétères sur la santé. Puis il ajoute, toujours sur le fond, "les études épidémiologiques les plus récentes soutiennent la pertinence du modèle linéaire sans seuil comme base de la radioprotection" (Idem).

Enfin, dans un second temps, le Conseil Fédéral annonce qu'il fera réviser la fiche d'information de l'*Office fédéral de l'énergie* du 7 décembre 2018 (Conseil Fédéral 2024).

En d'autres termes, le modèle linéaire sans seuil est solide et fiable et les faibles doses ont un effet délétère sur la santé de type stochastique ; la compréhension des effets des rayonnements ionisants sur la santé est donc à jour.

### *(b) Estimation du nombre de victimes lors d'un accident majeur dans une centrale nucléaire - rétrospectivement et prospectivement*

Le nombre estimé de victimes humaines de la catastrophe de Tchernobyl varie entre 4 000 décès dus au cancer (AIEA 2006, 118-120) et plus de 1 000 000 de victimes dues à des pathologies cancéreuses et non cancéreuses (Yablokov et al. 2009, 58-160). Cet écart de plus de deux ordres de grandeur est attribuable, dans une certaine mesure, à la nature stochastique des effets nocifs des RI sur la santé, ainsi qu'aux longues périodes de latence entre l'exposition et la manifestation des pathologies radio-induites. Surtout, il existe des estimations divergentes du terme source, des populations étudiées, des périodes d'exposition variables et des facteurs de risque différents choisis par des études scientifiques publiées (Fairlie & Sumner 2006, Claussen & Rosen 2016, Lenoir 2016). Compte tenu des divergences susmentionnées dans la détermination *rétrospective* du nombre de victimes dues à l'accident de Tchernobyl, nous utilisons les trois modèles de calcul suivants (A, B, C) pour estimer *prospectivement* le nombre de victimes d'un futur accident majeur potentiel d'une centrale nucléaire

---

<sup>16</sup> Le Conseil fédéral se réfère au rapport suivant : IRSN. Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire. 2022. Valeurs limites de dose pour les installations nucléaires, les rayonnements radioactifs et la radioprotection. Report n°IRSN/DAEI/BU-DCI/2022-00044. 68. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/85126.pdf>

européenne. Le calcul est basé sur la *dose efficace collective engagée* exprimée en personne-Sievert (persSv) (*supra* 2.3 (b)).

Les modèles sont présentés de la manière la plus simple possible, puisque nous les utilisons de manière prospective, pour estimer le risque qu'un accident nucléaire majeur pourrait faire courir aux populations. Le niveau des équations est adapté aux situations d'urgence, ce qui le distingue des équations plus complexes qui seraient utilisées si notre étude estimait l'impact d'un accident nucléaire historique.

### (c) Modèle A

*Modèle A : modèle basé sur le cancer - estimations selon UNSCEAR / OMS*

Ce modèle met l'accent sur les victimes de cancers radio-induits et est basé à l'origine sur le document 103 de la CIPR (CIPR 2007). Ce dernier utilise un facteur EAR (Excess Absolute Risk) de 5,5 %/Sv (0,055/Sv) pour la mortalité par cancer, qui est appliqué à la *dose efficace collective engagée* des RI. Toutefois, les calculs de la CIPR incluent également un "facteur de réduction" ("*dose and dose rate effectiveness factor*", DDREF) ou ("*facteur d'efficacité de la dose et du débit de dose*", DDREF) de 2 qui est aujourd'hui dépassé selon l'UNSCEAR/OMS (OMS 2013, 31-32) et également selon le SSK allemand (2014, 5-16).

#### *Méthodologie sommaire Modèle A*

Le modèle A contient des estimations numériques du cancer radio-induit en utilisant un facteur de risque de 0,2/Sv pour l'incidence et de 0,1/Sv pour la mortalité. Les résultats sont présentés avec des intervalles de confiance conformément au BEIR VII (2006a).

### (d) Modèle B

*Modèle B : Estimations actualisées des risques de cancer et de maladies cardiovasculaires*

Le modèle B se réfère à des études plus récentes sur les risques de cancer radio-induits. En outre, les risques cardiovasculaires dus à un accident nucléaire majeur sont pris en compte par le modèle B.

#### *B1. Risques de cancer*

En ce qui concerne le risque de cancer radio-induit, il existe de nouvelles preuves épidémiologiques en faveur de facteurs de risque plus élevés (Cardis et al. 2005, 77-80 ; Körblein & Hoffmann 2006, 109-114 ; IPPNW 2014, 3 ; Richardson et al. 2015, h5359 ; Hoffmann et al. 2017, 6-8 ; Little et al. 2023) que ceux utilisés dans le *modèle A* (tableau 2.7.1). Ces facteurs EAR sont environ 4,5 fois plus élevés que l'EAR de 0,055 pour la mortalité par cancer radio-induit utilisé par la CIPR 103 (2007). Dans le *modèle B*, cela se traduirait par un doublement des cas de cancer estimés par rapport au *modèle A* (qui a déjà pris en compte un DDREF de 1).

| Tableau 2.7.1. Modèle B1 : Cancer radio-induit : Facteurs de risque de mortalité (adultes) selon la littérature depuis 2005  |                           |   |   |
|--|---------------------------|---|---|
| <i>Pathologie</i>  | <i>Facteur de risque*</i> | <i>Référence</i>  | <i>Remarques</i>                          |
| Cancers autres que la leucémie   | ERR 0,97/Sv               | Cardis et al. 2005<br>(Travailleurs du nucléaire)   |   |
| Le cancer  | EAR 0,24/Sv               | Körblein & Hoffmann 2006<br>(Rayonnement de fond, population de la Bavière)   |   |
| Cancer   | EAR 0,2/Sv                | IPPNW 2014<br>(Révision)  |   |
| Cancer solide  | ERR 0,48/Sv               | Richardson et al. 2015 (INWORKS)  |   |
| Cancer   |                           | Hoffmann 2017 et al.<br>(Population exposée par l'installation nucléaire de Mayak selon Krestinina 2005 et Cardis 2007) | EAR 4,4 fois plus élevé que l'ICRP 103**. |
| Cancer   |                           | Hoffmann 2017 et al.<br>(Exposition au radon à l'intérieur des bâtiments)   | EAR 4,4 fois plus élevé que l'ICRP 103**. |
| Cancer solide  |                           | Hoffmann 2017 et al.<br>(Travailleurs du nucléaire selon Richardson et al. 2015)  | EAR 4,7 x plus élevé que l'ICRP 103**.    |
| <p>* Les facteurs de risque utilisés pour le concept de dose collective décrivent la probabilité d'apparition de nouveaux cas de cancer en plus de l'incidence spontanée du cancer. L'excès de risque absolu (EAR) est normalement exprimé en unité de 1/ Sv. Ainsi, un EAR de mortalité de 0,2/Sv signifie que pour un rayonnement de 1 Sievert, le risque supplémentaire de mourir d'un cancer est de 20 % - en plus d'un risque de base de 25 %. Cela équivaut à un excès de risque relatif (ERR) de 0,2/0,25, soit 0,8/Sv (Claussen &amp; Rosen 2016, page 26).</p> <p>**Ref. CIPR 103 (2007), tableau A 4.1 page 179 ; version intégrale : BME pour la mortalité par cancer 5,5 % (4,1 % pour les cas létaux et 1,4 % pour les cas débilitants non létaux combinés)</p> |                           |   |   |

## B2. Risques cardiovasculaires

| Tableau 2.7.2. Modèle B2 : Maladies non cancéreuses radio-induites : Facteurs de risque pour la mortalité due à des diagnostics cardio-vasculaires |   |   |
|--|---|---|
| Pathologie   | Facteur de risque                             | Référence   |
| Maladies cardio-vasculaires (MCV)  | (x)*  | Nyagu 1994 ; Prysyzhnyuk et al. 2002, 188-287 ; Lazyuk 2005, 24-25. (Tchernobyl : enfants et adultes) |
| Maladies circulatoires   | ERR 0,11/Gy                                   | Ozasa et al. 2012, 229-243 (survivants de la bombe A)   |
| Maladies circulatoires combinées   | EAR de 2,5 %/Sv [France] à 8,5 %/Sv [Russie]. | Little et al. 2012, 1503-1511 (Méta-analyse)  |
| Maladie cardiaque ischémique (MCI)   | ERR 0,10/Sv                                   |   |
| Non-HIV  | ERR (0,12/Sv)**                               |   |
| Maladies cérébrovasculaires (MCV)  | ERR 0,20/Sv                                   |   |
| Maladies circulatoires autres que les maladies cardiaques et les AVC   | ERR 0,10/Sv                                   | Gillies et al. 2017, 276-290 (travailleurs du nucléaire)  |
| Maladies circulatoires   | ERR 0,22/Sv                                   |   |
| Maladie cérébrovasculaire  | ERR 0,50/Sv                                   |   |
| Cardiopathie ischémique  | ERR 0,18/Sv                                   |   |

\* Inconnu ; \*\* Non statistiquement significatif.

Selon la CIPR, des risques élevés de maladies non malignes sont connus après une exposition aux IR (Ozasa et al. 2012, 229-243). Toutefois, la suggestion de la CIPR (CIPR 2012, 1-2) d'un seuil de 500 mSv pour les maladies radio-induites autres que le cancer est dépassée (tableau 2.7.2 *Modèle méthodologique B2*). Des risques cardio-vasculaires excessifs ont été décrits chez les enfants et les adultes en raison de l'exposition aux RI après Tchernobyl (Nyagu 1994, Prysyzhnyuk et al. 2002, 188-287, Lazyuk et al. 2005, 24-25). Des études sur l'exposition à de faibles niveaux de RI ont révélé un risque élevé d'hypertension artérielle chez les travailleurs du nucléaire (Azizova et al. 2019) ainsi qu'une surmortalité significative due aux maladies cardiovasculaires (Gillies 2017) à un niveau similaire à la surmortalité due au cancer après l'exposition aux RI (Little et al. 2012, 1503-1511). En général, comme pour le cancer, les taux d'incidence sont plus élevés que les taux de mortalité, y compris pour les maladies cardiovasculaires. En Europe, le rapport entre la mortalité et l'incidence des maladies cardio-vasculaires est d'environ 1 à 3 (European Heart Network 2017).

### Méthodologie sommaire Modèle B

Le modèle B contient des estimations numériques de l'incidence du cancer en utilisant un facteur de risque de 0,4/Sv (et 0,2/Sv pour la mortalité par cancer) et en utilisant un facteur de risque de 0,15/Sv pour l'incidence des maladies cardiovasculaires (MCV) (et 0,05/Sv pour la mortalité).

Les maladies graves (cancer et MCV combinés) représentent donc 0,55/Sv pour l'incidence et 0,25/Sv pour la mortalité. Les résultats sont présentés à la fois pour des situations météorologiques moyennes et variables sans intervalles de confiance (*infra* 3.2).

### (e) Modèle C

#### Modèle C : Évaluation élargie des risques sanitaires liés aux rayonnements

Sachant que le cancer et les maladies cardiovasculaires ne représentent que la "partie émergée de l'iceberg" des effets sanitaires radio-induits observés après l'accident de la centrale de Tchernobyl (Tereshchenko et al. 2003, 283-287), les estimations des modèles A et B sous-estiment gravement la charge réelle des pathologies radio-induites. Le modèle C inclut donc les cas de cancer et de maladies cardiovasculaires mentionnés dans le modèle B et, en outre, couvre les risques d'autres maladies radio-induites ainsi que les risques pour la reproduction et le développement dus aux rayonnements ionisants. Pour ces pathologies, aucun facteur de risque EAR n'est systématiquement établi, bien que pour certaines pathologies, des ERR (excès de risque relatif) > 1/Sv soient documentés (tableau 2.7.3).

#### C1. Maladies non cancéreuses autres que les maladies cardiovasculaires

Outre les maladies cardio-vasculaires, de nombreuses autres maladies non malignes (des systèmes respiratoire, gastro-intestinal, neurologique, nerveux central, endocrinien, immunitaire et musculo-squelettique, des infections, des maladies de la peau, des troubles hématologiques non néoplasiques et des maladies du système lymphatique) sont associées à l'exposition aux RI (tableau 2.7.3).

| Tableau 2.7.3. Modèle C1 : Maladies non cancéreuses (autres que cardiovasculaires) observées après des rayonnements ionisants<br>(Entre parenthèses : non statistiquement significatif) |  |                                 |   |           |
|---|--|---------------------------------|---|-----------|
| Pathologie  | Augmentation des maladies non cancéreuses chez les victimes de Tchernobyl : populations de Gomel et d'Ukraine ; liquidateurs (Yablokov et al. 2009) comparant l'ère pré et post-Tchernobyl (première décennie) | Facteur de risque relatif (ERR) | Référence   | Remarque  |
| Maladies respiratoires  | 11 à 109 fois  |                                 | Nyagu 1994 ; Prysyzhnyuk et al. 2002, 188-287 ; Pflugbeil et al. 2006, 17, 21, 57,59 ; Yablokov et al. 2009, 58-160 ; Yablokov et al. 2016, 294. (Tchernobyl) | Morbidity |
| Maladies gastro-intestinales  | 60 à 213 fois  |                                 |   |           |
| Maladies neurologiques et psychiatriques  | 6 à 53 fois  |                                 |   |           |
| Maladies endocriniennes   | 26 à 300 fois  |                                 |   |           |
| Maladies immunologiques, infections   | 18 à 12 fois   |                                 |   |           |
| Maladies de la peau   | 16 à 51 fois   |                                 |   |           |
| Maladies musculo-squelettiques  | 80 à 97 fois   |                                 |   |           |
| Hématologie et maladies du système lymphatique  | 15 à 21 fois   |                                 |   |           |
| Maladies respiratoires  |  | 0,23/Gy                         | Ozasa et al. 2012, 229-243 (survivants de la bombe A)   | Mortality |
| Pneumonie et grippe   |  | 0,24/Gy                         |   |           |
| Maladies digestives   |  | 0,20/Gy                         |   |           |
| Maladies génito-urinaires   |  | 0,18/Gy                         |   |           |
| Maladies non néoplasiques du sang   |  | 1,7/Gy                          |   |           |
| Troubles mentaux  |  | 1,3/Sv                          | Gillies et al. 2017, 276-290 (Travailleurs du nucléaire)  | Mortality |
| Maladies respiratoires non malignes   |  | 0,13/Sv                         |   |           |
| Maladies digestives   |  | 0,11/Sv                         |   |           |

Nombre de ces maladies, en particulier les maladies endocriniennes, neurologiques et musculo-squelettiques, entraînent un affaiblissement chronique et, à terme, la mort. Elles représentent une charge énorme pour les individus, les familles et la société.

Ces maladies non malignes ont largement dépassé le nombre de maladies malignes et ont souvent évolué rapidement au cours de la première décennie qui a suivi l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl (Yablokov 2016, 294). Cela diffère clairement des cas de cancer radio-induits qui sont généralement diagnostiqués au cours des dernières décennies. Ainsi, des risques accrus de maladies non cancéreuses radio-induites ont été observés peu de temps après l'administration de quelques doses annuelles uniques, qui correspondent à des doses totales de la gamme des faibles doses.

Il est particulièrement préoccupant de constater que les enfants vivant dans les régions contaminées présentent un excès significatif de ces affections. En Ukraine, ce phénomène a été observé en particulier pour les systèmes respiratoire, cardiovasculaire et digestif, les maladies thyroïdiennes et autres maladies endocriniennes, et les troubles immunodéficients, plus de 70 % des enfants souffrant de maladies chroniques dix ans après l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl (Prysyzhnyuk et al. 2002, 188-276). Selon les données du ministère biélorusse de la santé publique, en 1985 – juste avant la catastrophe de 1986 – 90 % des enfants étaient considérés comme "pratiquement en bonne santé". En 2000, moins de 20 % d'entre eux étaient considérés comme sains, et dans la province de Gomel, la plus contaminée, moins de 10 % des enfants étaient en bonne santé (Yablokov et al. 2009, 58-160).

Une surmortalité significative liée aux maladies respiratoires et digestives et aux maladies non malignes du sang est également documentée chez les survivants japonais de la bombe atomique (Ozasa et al. 2012, 229-243). Une étude récente sur l'exposition externe des travailleurs du nucléaire à de faibles doses de RI a mis en évidence une mortalité significative associée à des troubles mentaux et une mortalité non significative associée à des maladies respiratoires et digestives (Gillies et al. 2017, 276-290) (tableau 2.7.3).

#### C2. Risques pour la reproduction et le développement dus aux rayonnements ionisants

Tout au long du processus complexe de reproduction humaine, les risques élevés liés aux rayonnements ionisants à de nombreux niveaux sont bien connus. Leur importance médicale et sociétale est évidente si l'on considère les recherches radiobiologiques et épidémiologiques approfondies menées pendant des décennies sur les conséquences de la catastrophe de Tchernobyl.

| Tableau 2.7.4. Modèle C2 : Dangers pour la reproduction et le développement dus aux rayonnements ionisants |   |
|--|---|
| Condition préalable  | Pathologie  |
| Dysfonctionnement endocrinien féminin  | Infertilité   |
| Irradiation parentale préexistante   | Stérilité<br>Avortements spontanés<br>Altérations chromosomiques / génomiques<br>Syndrome de Downs (trisomie 21)<br>Changements dans les cotes de sexe (perte de naissances de sexe féminin)<br>Faible poids à la naissance<br>Mortalité périnatale<br>Mortalité infantile<br>Malformations congénitales<br>Malignités<br>Déficit immunitaire |
| Exposition in utero aux radiations   | Malignités : Leucémie, cancer solide<br>Aberrations chromosomiques<br>Syndrome de Down (trisomie 21)<br>Avortements spontanés<br>Malformations congénitales<br>Dysfonctionnement des organes - par exemple retard mental, faible QI<br>Surmortalité périnatale  |
| (Hoffmann et al. 2017)   |   |

Les effets des RI sur la santé englobent des aspects pré-conceptuels tels que le dysfonctionnement endocrinien féminin conduisant à l'infertilité ainsi que l'irradiation parentale préexistante associée à des détriments consécutifs graves du développement et à des maladies chez la progéniture (Hoffmann et al. 2017, 12). L'exposition aux RI pendant la grossesse provoque des aberrations chromosomiques entraînant – entre autres – une incidence élevée du syndrome de Down (Sperling 1987, 1991, 1994a, 1994b) et des modifications du rapport de cotes entre les sexes (Scherb et al. 2016, 104-111). L'irradiation *in utero* a en outre des effets néfastes sur l'embryon ou le fœtus, provoquant des avortements spontanés et des malformations congénitales, des surrisques radio-induits de faible poids de naissance, de mortalité périnatale et infantile, ainsi que des risques élevés de tumeurs malignes chez l'enfant (Hoffmann et al. 2017) (tableau 2.7.4). Des détails détaillés sur les effets sanitaires non cancéreux sont donnés ailleurs (Claussen & Rosen 2016 ; Hoffmann et al. 2017, 10-3).

#### Méthodologie sommaire Modèle C

Pour conclure sur le modèle C, les estimations quantitatives pour le cancer et les maladies cardiovasculaires sont réalisées selon le modèle B. En outre, le modèle C a développé des estimations semi-quantitatives d'autres effets radio-induits non malins sur la santé selon Yablokov qui suggère que ces cas sont beaucoup plus nombreux que les cas de cancer (Yablokov et al. 2009, 58-160).

### III. Les résultats

#### 3.1 Nombre de personnes impactées par le nuage radioactif, en moyenne, selon 1096 simulations météorologiques

(a) Dose efficace individuelle, impact potentiel sur la population européenne (Tableau 3.1.1)

**1 mSv** : en moyenne, 26'301'615 personnes seraient potentiellement confrontées une dose supérieure à 1 mSv, qui est la limite d'exposition pour le public en situation de fonctionnement normal des installations nucléaires (Directive du Conseil 2013/59/EURATOM, art.12).

**6 mSv** : en moyenne, 7'840'353 personnes seraient potentiellement confrontées une dose supérieure à 6 mSv, qui est la limite d'exposition pour les apprentis et étudiants âgés de 16 à 17 ans travaillant près de sources de radioactivité (2013/59/EURATOM, Art. 11.2).

**20 mSv** : en moyenne, 2'017'499 personnes seraient potentiellement confrontées une dose égale ou supérieure à 20 mSv, qui est la limite légale annuelle pour les radiologues et les salariés du nucléaire (2013/59/EURATOM, Art. 9.2, 53.1). Toutefois, en considérant la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où le nuage s'écarte le plus des populations (au centile 10 – noté C10 dans le tableau), le nombre de personnes qui seraient confrontées à une dose égale ou supérieure à 20 mSv s'établirait à 'seulement' 462'441. Mais dans le 10% des cas où le nuage radioactif se concentrerait près du sol et impacterait davantage le public (centile 90), le nombre de personnes touchées serait égal ou supérieur à 4'542'327, un chiffre qui pourrait presque quadrupler dans la pire des situations (Max).

**100 mSv** : en moyenne, 276'960 personnes seraient potentiellement confrontées à une dose supérieure à 100 mSv, qui est la limite légale supérieure à laquelle le public peut être exposé en situation d'urgence (2013/59/EURATOM, Annexe I §1). Toutefois, en considérant la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où le nuage radioactif a tendance à s'écarter des populations (au centile 10 – noté C10), le nombre de personnes confrontées à une dose égale ou supérieure à 100 mSv serait égal ou inférieur à 61'388. Mais dans le 10% des cas où le nuage radioactif menacerait le plus le public (centile 90), ce nombre serait égal ou supérieur à 523'273 personnes, un chiffre qui ne serait pas loin de quadrupler dans la pire des situations (Max).

| Table 3.1.1. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par le nuage radioactif<br>1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020<br>Dose efficace individuelle engagée (millisievert)<br>Nom de la centrale nucléaire et puissance thermique : Cattenom 3817 MWth |                      |                      |                       |                       |                        |                        |                         |                         |
|---|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|   | Europe 51<br>≥ 1 mSv | Europe 51<br>≥ 6 mSv | Europe 51<br>≥ 20 mSv | Europe 51<br>≥ 50 mSv | Europe 51<br>≥ 100 mSv | Europe 51<br>≥ 500 mSv | Europe 51<br>≥ 1000 mSv | Europe 51<br>≥ 2000 mSv |
|   | Indiv.(nbr)          | Indiv.(nbr)          | Indiv.(nbr)           | Indiv.(nbr)           | Indiv.(nbr)            | Indiv.(nbr)            | Indiv.(nbr)             | Indiv.(nbr)             |
| Moyenne   | 26 301 615           | 7 840 353            | 2 017 499             | 603 858               | 276 960                | 80 910                 | 40 191                  | 14 635                  |
| Max   | 85 995 623           | 41 651 134           | 16 137 152            | 8 104 829             | 2 115 438              | 450 565                | 284 730                 | 176 427                 |
| C99   | 64 220 146           | 27 259 944           | 10 741 977            | 3 453 993             | 1 192 382              | 321 680                | 208 672                 | 131 476                 |
| C90   | 43 999 113           | 15 301 919           | 4 542 327             | 1 149 750             | 523 273                | 207 188                | 113 576                 | 43 943                  |
| C75   | 34 839 491           | 10 659 734           | 2 427 391             | 688 397               | 359 012                | 127 777                | 55 407                  | 17 398                  |
| C50   | 24 282 106           | 6 370 676            | 1 391 318             | 423 565               | 231 163                | 51 588                 | 18 682                  | 2 661                   |
| C25   | 16 185 967           | 3 775 788            | 732 306               | 266 539               | 123 363                | 18 284                 | 4 602                   | 0                       |
| C10   | 10 644 573           | 2 324 069            | 462 441               | 136 815               | 61 388                 | 5 183                  | 53                      | 0                       |
| C1  | 4 283 173            | 880 334              | 179 134               | 47 369                | 18 293                 | 393                    | 0                       | 0                       |
| Min   | 978 804              | 205 653              | 48 469                | 19 138                | 7 072                  | 0                      | 0                       | 0                       |

**500 mSv** : en moyenne, 80'910 personnes seraient potentiellement confrontées à une dose supérieure à 500 mSv, limite légale que les professionnels ne doivent pas dépasser même si, en la dépassant, ils seraient en situation de sauver des vies (2013/59/EURATOM, Art. 53.2(b)). Toutefois, en considérant la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où la radioactivité s'écarte le plus des populations (au centile 10 – noté C10 dans le tableau), le nombre de personnes confrontées à une dose égale ou inférieure à 500 mSv s'établirait à 'seulement' 5'183. Mais dans le 10% des cas où la radioactivité se rapprocherait le plus du public (centile 90), ce nombre serait égal ou supérieur à 207'188 personnes.

**(b) Dose efficace individuelle, impact potentiel sur différentes populations**

La distribution du *tableau 3.1.2* montre que les habitants de plusieurs pays seraient confrontés à une dose égale ou supérieure à 1 mSv. En Espagne, à 800 km de Cattenom, dès avant le centile 90. Si la France est touchée dans toutes les situations, la radioactivité impacte de nombreuses populations à l'extérieur de ses frontières.

| Tableau 3.1.2. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par le nuage radioactif $\geq 1$ mSv |  |            |   |           |  |            |   |         |  |           |   |         |  |         |            |         |
|--|--|------------|---|-----------|--|------------|---|---------|--|-----------|---|---------|--|---------|------------|---------|
| 1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020  |  |            |   |           |  |            |   |         |  |           |   |         |  |         |            |         |
| Dose efficace individuelle engagée (millisievert)  |  |            |   |           |  |            |   |         |  |           |   |         |  |         |            |         |
| Cattenom 3817 MWth   |  |            |   |           |  |            |   |         |  |           |   |         |  |         |            |         |
|  | Europe 51<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |            | France<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |           | DEU + AUT<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |            | Luxembourg<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         | BEL + NLD<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |           | Italie<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         | Espagne<br>$\geq 1$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         |            |         |
|  | Moy.   | 26 301 615 | Moy.  | 3 889 355 | Moy.   | 11 080 963 | Moy.  | 113 323 | Moy.   | 2 234 032 | Moy.  | 959 805 | Moy.   | 335 066 | Moy.       | 290 896 |
| Max  | 85 995 623                                     | Max        | 34 344 672                                  | Max       | 55 319 888                                     | Max        | 625 977   | Max     | 26 597 439                                     | Max       | 21 836 880                                  | Max     | 8 477 467                                    | Max     | 15 770 354 |         |
| C95  | 51 014 526                                     | C95        | 18 553 781                                  | C95       | 28 921 199                                     | C95        | 517 778   | C95     | 14 058 752                                     | C95       | 8 003 595                                   | C95     | 2 426 398                                    | C95     | 1 319 653  |         |
| C90  | 43 999 113                                     | C90        | 13 211 912                                  | C90       | 24 475 024                                     | C90        | 413 348   | C90     | 8 836 320                                      | C90       | 1 980 617                                   | C90     | 708 413                                      | C90     | 54 065     |         |
| C85  | 40 253 131                                     | C85        | 10 302 011                                  | C85       | 21 320 476                                     | C85        | 347 845   | C85     | 5 295 418                                      | C85       | 384 980                                     | C85     | 110 665                                      | C85     | 0          |         |
| C75  | 34 839 491                                     | C75        | 5 611 420                                   | C75       | 17 476 156                                     | C75        | 159 470   | C75     | 840 601  | C75       | 3 587                                       | C75     | 0  | C75     | 0          |         |
| C50  | 24 282 106                                     | C50        | 368 346                                     | C50       | 10 528 794                                     | C50        | 15 066  | C50     | 0  | C50       | 0   | C50     | 0  | C50     | 0          |         |
| C25  | 16 185 967                                     | C25        | 25 531                                      | C25       | 360 590  | C25        | 0   | C25     | 0  | C25       | 0   | C25     | 0  | C25     | 0          |         |
| C15  | 12 684 288                                     | C15        | 21 145                                      | C15       | 0  | C15        | 0   | C15     | 0  | C15       | 0   | C15     | 0  | C15     | 0          |         |
| C10  | 10 644 573                                     | C10        | 17 578                                      | C10       | 0  | C10        | 0   | C10     | 0  | C10       | 0   | C10     | 0  | C10     | 0          |         |
| C5   | 7 416 635                                      | C5         | 15 306                                      | C5        | 0  | C5         | 0   | C5      | 0  | C5        | 0   | C5      | 0  | C5      | 0          |         |
| Min  | 978 804  | Min        | 9 129                                       | Min       | 0  | Min        | 0   | Min     | 0  | Min       | 0   | Min     | 0  | Min     | 0          |         |

DEU+AUT = Allemagne + Autriche ; BEL + NLD = Belgique Pays-Bas

Le *tableau 3.1.3* présente les résultats pour une dose égale ou supérieure à 50 mSv. A ce niveau de dose, il est envisageable de dissocier l'impact de l'Allemagne et de l'Autriche puisque, selon contrôle des retombées sur sept villes autrichiennes, ce pays n'est associé que six fois à une dose efficace individuelle égale ou supérieure à 50 mSv sur 1461 simulations.<sup>17</sup> Si l'argument est accepté, dans le monde des simulations, l'Allemagne, voisine immédiate de la France, est plus touchée que ce pays, du centile 75 au centile 95 (20% des situations) ; quant au Luxembourg, dès le centile 95, c'est plus de la moitié de la population totale du pays qui est confrontée à une dose égale ou supérieure à 50 mSv ; pour comparaison, au centile 95, moins de 1% de la population française est impactée, cependant qu'un peu plus de 1% de la population allemande est menacée.

| Tableau 3.1.3. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par le nuage radioactif $\geq 50$ mSv |   |         |  |         |   |         |  |        |   |        |  |       |   |       |        |    |
|---|---|---------|--|---------|---|---------|--|--------|---|--------|--|-------|---|-------|--------|----|
| 1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020   |   |         |  |         |   |         |  |        |   |        |  |       |   |       |        |    |
| Dose efficace individuelle engagée (millisievert)   |   |         |  |         |   |         |  |        |   |        |  |       |   |       |        |    |
| Cattenom 3817 MWth  |   |         |  |         |   |         |  |        |   |        |  |       |   |       |        |    |
|   | Europe 51<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         | France<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         | DEU + AUT<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |         | Luxembourg<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |        | BEL + NLD<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |        | Italie<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |       | Espagne<br>$\geq 50$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |       |        |    |
|   | Moy.  | 603 858 | Moy.   | 208 865 | Moy.  | 270 550 | Moy.   | 55 898 | Moy.  | 62 873 | Moy.   | 3 512 | Moy.  | 1 926 | Moy.   | 21 |
| Max   | 8 104 829                                       | Max     | 8 104 829                                    | Max     | 5 185 888                                       | Max     | 531 178  | Max    | 5 502 372                                       | Max    | 1 053 192                                    | Max   | 657 312                                       | Max   | 20 880 |    |
| C95   | 1 735 382                                       | C95     | 651 801                                      | C95     | 1 084 605                                       | C95     | 316 679  | C95    | 229 050   | C95    | 0  | C95   | 0   | C95   | 0      |    |
| C90   | 1 149 750                                       | C90     | 487 636                                      | C90     | 798 753   | C90     | 241 245  | C90    | 85 806  | C90    | 0  | C90   | 0   | C90   | 0      |    |
| C85   | 924 095   | C85     | 405 327                                      | C85     | 576 622   | C85     | 152 438  | C85    | 19 508  | C85    | 0  | C85   | 0   | C85   | 0      |    |
| C75   | 688 397   | C75     | 314 308                                      | C75     | 383 872   | C75     | 51 423   | C75    | 0   | C75    | 0  | C75   | 0   | C75   | 0      |    |
| C50   | 423 565   | C50     | 58 055                                       | C50     | 48 083  | C50     | 3 235  | C50    | 0   | C50    | 0  | C50   | 0   | C50   | 0      |    |
| C25   | 266 539   | C25     | 21 441                                       | C25     | 0   | C25     | 0  | C25    | 0   | C25    | 0  | C25   | 0   | C25   | 0      |    |
| C15   | 180 519   | C15     | 17 051                                       | C15     | 0   | C15     | 0  | C15    | 0   | C15    | 0  | C15   | 0   | C15   | 0      |    |
| C10   | 136 815   | C10     | 14 190                                       | C10     | 0   | C10     | 0  | C10    | 0   | C10    | 0  | C10   | 0   | C10   | 0      |    |
| C5  | 86 483  | C5      | 12 903                                       | C5      | 0   | C5      | 0  | C5     | 0   | C5     | 0  | C5    | 0   | C5    | 0      |    |
| Min   | 19 138  | Min     | 6 387  | Min     | 0   | Min     | 0  | Min    | 0   | Min    | 0  | Min   | 0   | Min   | 0      |    |

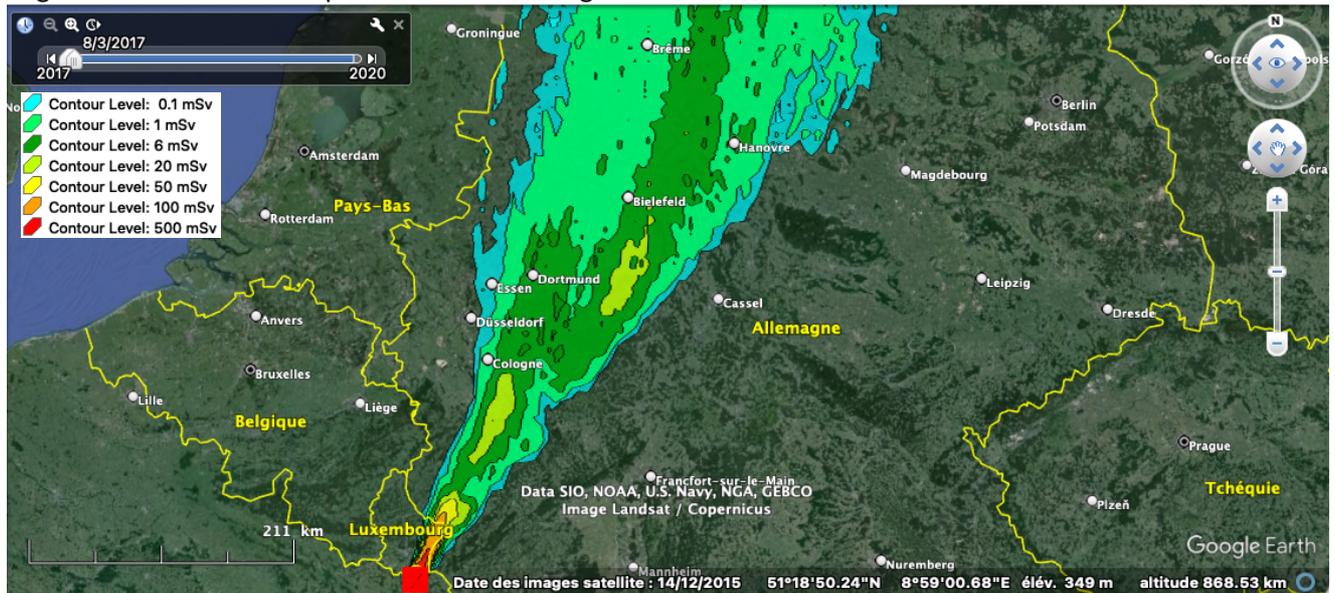
DEU+AUT = Allemagne + Autriche ; BEL + NLD = Belgique Pays-Bas

La totalité des résultats des différents pays est en ligne avec accès direct aux cartes

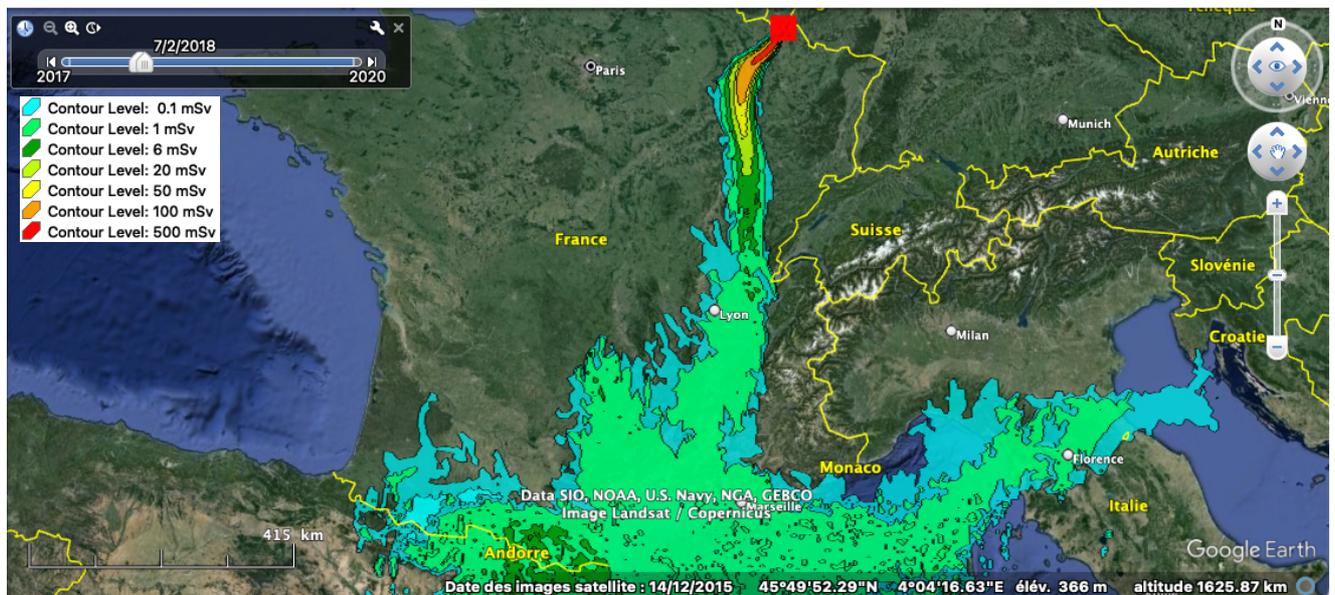
→ <https://nrisk.institutbiosphere.ch> → Cattenom / Cartes et données à disposition

<sup>17</sup> Linz et Innsbruck sont touchées à moins de 50 mSv. Salzburg, Bregenz et Wien sont touchées chacune une fois entre 57 et 53 mSv, Graz deux fois à 79 et 85 mSv ; Villach est touchée à 192 mSv, seule fois à plus de 50 mSv → et Villach est à 645 km de Cattenom.

## Page suivante : deux exemples de cartes du nuage radioactif



Situation du 8 mars 2017, la dose efficace collective engagée est de 183'889 persSv, centile 25 à l'échelle de l'Europe en considérant les 1096 simulations, et centile 21 en regard d'un impact en France (12'488 persSv). La radioactivité visualisée sur la carte évolue dans les 100 premiers mètres au-dessus du sol.



Situation du 7 février 2018, la dose efficace collective engagée est de 270'918 persSv, centile 50 à l'échelle de l'Europe en considérant les 1096 simulations, et centile 85 en regard d'un impact en France (242'445 persSv). La radioactivité visualisée sur la carte évolue dans les 100 premiers mètres au-dessus du sol.

### 3.2 Estimation de l'impact du nuage radioactif sur les villes

#### (a) Démarche

L'étude quantifie l'impact d'un accident nucléaire majeur sur plus de 300 villes de France et d'Europe. Le temps de rejet des matières radioactives étant de 3h, le nuage prend une direction et, le plus souvent, varie peu ; une caractéristique qui pourrait augmenter le niveau des *doses efficaces individuelles engagées*, mais diminuerait la probabilité qu'une ville soit touchée. L'évaluation de l'impact sur les villes a bénéficié Pour 1461 simulations, soit une par jour pendant 4 ans (une année de plus que les pays et les sols).

#### (b) Impacts sur les localités à quelque 30 km de la centrale

L'étude quantifie l'impact des localités de petites tailles situées à environ 30 km de la centrale, sur les 8 points cardinaux. Cette façon de faire permet de se figurer le besoin qu'il y aurait, en cas d'un risque de brèche de

l'enceinte de confinement, de réaliser une évacuation d'urgence des populations. Cette façon de faire permet aussi de repérer les vents dominants et leur influence éventuelle sur la direction du nuage.

| Tableau 3.2.1. Impact sur huit villes ou localités situées à environ 30 km de Cattenom et sur les huit points cardinaux  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Situat° critiques à Hivange -&gt;NW (LUX)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Hivange ->NW (km) 30<br>Pour 1461 simulat° du nuage   | <b>Situat° critiques à Junglinster -&gt;N (LUX)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Junglinster ->N (km) 33<br>Pour 1461 simulat° du nuage  | <b>Situat° critiques à Fisch -&gt;NE (DEU)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Fisch ->NE (km) 30<br>Pour 1461 simulat° du nuage  |
| Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2 065   | Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 1 638  | Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2659   |
| Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 69<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 48<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 18<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 22<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 36<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 85<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (No) 41<br>TOTAL 319   | Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 71<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 77<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 18<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 35<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 55<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 37<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 87<br>TOTAL 380 | Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 134<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 190<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 33<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 48<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 56<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 100<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 37<br>TOTAL 598      |
| <b>Situat° critiques à Ville-au-Montois -&gt;W (FRA)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Ville-au-Montois ->W (km) 31<br>Pour 1461 simulat° du nuage   | <b>CATTENOM</b>   | <b>Situat° critiques à Mechern -&gt;E (DEU)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Mechern ->E (km) 30<br>Pour 1461 simulat° du nuage  |
| Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 1 758   |   | Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2313   |
| Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 105<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 81<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 22<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 26<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 40<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 49<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 31<br>TOTAL 354 |   | Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 141<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 119<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 24<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 26<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 45<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 78<br>31<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 37<br>TOTAL 470 |
| <b>Situat° critiques à Valleroy -&gt;SW (FRA)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Valleroy ->SW (km) 31<br>Pour 1461 simulat° du nuage   | <b>Situat° critiques à Metz -&gt;S (FRA)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Metz ->S (km) 33<br>Pour 1461 simulat° du nuage  | <b>Situat° critiques à Ottonville -&gt;SE (FRA)</b><br>Accident majeur à Cattenom (3817 MWth)<br>De la centrale à Ottonville ->SE (km) 31<br>Pour 1461 simulat° du nuage  |
| Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2 544   | Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2 423  | Dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Moyenne des 15 situat° les + élevées (mSv) 2123   |
| Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 163<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 68<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 16<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 26<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 46<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 69<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 31<br>TOTAL 419 | Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 75<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 37<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 18<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 17<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 41<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 83<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 32<br>TOTAL 303 | Nbr des situat° critiques, vu 6 seuils légaux<br>1) [500,1 mSv -> situations (No) 73<br>2) [100,500] mSv -> situations (No) 49<br>3) [50, 100] mSv -> situations (No) 19<br>4) [20,50] mSv -> situations (No) 26<br>5) [6, 20] mSv -> situations (No) 43<br>6) [1, 6] mSv -> situations (No) 75<br>[0.01, 0.99] mSv -> situations (nbr) 36<br>TOTAL 321         |

Les données du tableau 3.2.1 suggèrent que le Sud-Ouest, le Nord-Est et l'Est de Cattenom sont un peu plus exposés que les cinq autres directions. Cela étant, Cattenom n'est qu'à 23 km de Luxembourg et 30 km de Merzig (voir tableau 3.2.2 pour les résultats sur ces deux villes).

### (c) Impacts sur les autres villes

De façon générale, plus une ville est éloignée de la centrale, moins elle a de risque d'être touchée ; cette règle a toutefois ses exceptions. Les habitants de Lille et de Besançon sont à une distance presque équivalente de Cattenom et, si la *dose efficace individuelle engagée* maximale est de 124 mSv à Lille, elle atteint presque le double à Besançon (228 mSv). Paris est à 289 km de Cattenom et une simulation donne jusqu'à 76 mSv, cependant que Fribourg<sup>18</sup> à 299 km compte une dose maximale de 291 mSv ; Villach<sup>19</sup> est à 645 km de Cattenom, mais une simulation sur 1461 donne une dose efficace de 192 mSv ; Aix-en-Provence est à 657 km, mais une simulation donne 107 mSv ; Marseille est à 684 km, mais une simulation est à 84 mSv.

Le réseau de villes de l'étude n'est pas suffisamment dense pour en tirer une loi statistique ; il semble néanmoins que certaines niveaux de concentration paraissent s'affranchir des distances de façon aléatoire. Ce qui laisserait entendre que, dans certains cas, même une des villes située à plus de 250 km de la source radioactive, voire 500 km, pourrait se trouver en situation d'urgence absolue.

Le tableau 3.2.2 détaille la dose efficace pour huit villes situées entre 23 à 142 km de Cattenom.

<sup>18</sup> CHE

<sup>19</sup> AUT

Tableau 3.2.2. Impact possible sur 8 villes situées entre 23 et 142 kilomètres de Cattenom.

|  |   |
|--|---|
| <b>Situations critiques à Luxembourg (LUX)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Luxembourg (km) 23<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 3 634.5<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 128<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 43<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 18<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 23<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 34<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 87<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 26<br>TOTAL 359 | <b>Situations critiques à Merzig (DEU)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Merzig (km) 30<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 2 179.9<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 131<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 167<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 27<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 31<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 47<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 80<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 33<br>TOTAL 516 |
| <b>Situations critiques à Metz (FRA)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Metz →S (km) 33<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 2 423.4<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 75<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 37<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 18<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 17<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 41<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 83<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 32<br>TOTAL 303           | <b>Situations critiques à Verdun (FRA)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Verdun (km) 69<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 642.9<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 15<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 106<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 20<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 41<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 42<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 82<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 34<br>TOTAL 340    |
| <b>Situations critiques à Saarbrücken (DEU)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de centrale nucléaire à Saarbrücken (km) 60<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 541.1<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 5<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 74<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 25<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 43<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 47<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 111<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 35<br>TOTAL 340     | <b>Situations critiques à Nancy (FRA)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Nancy (km) 81<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 253.8<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 1<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 26<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 25<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 27<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 46<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 92<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 28<br>TOTAL 245        |
| <b>Situations critiques à Koblenz (DEU)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Koblenz (km) 142<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 151.1<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 0<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 15<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 40<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 107<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 111<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 149<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 53<br>TOTAL 475       | <b>Situations critiques à Liège (BEL)</b><br>Après un accident majeur à Cattenom 3817 MWth<br>Distance de la centrale nucléaire à Liège (km) 142<br>Sur 1461 simulations du nuage (sans la déposition)<br><b>Dose efficace individuelle engagée (mSv)</b><br>Moyenne des 15 situations les plus élevées (mSv) 109.1<br>Nombre de situations critiques selon 6 seuils légaux<br>1) [500, [ mSv → situations (nbr) 0<br>2) [100,500[ mSv → situations (nbr) 5<br>3) [50, 100[ mSv → situations (nbr) 13<br>4) [20,50[ mSv → situations (nbr) 49<br>5) [6, 20[ mSv → situations (nbr) 59<br>6) [1, 6[ mSv → situations (nbr) 80<br>[0.01, 1[ mSv → situations (nbr) 36<br>TOTAL 242        |

### 3.3 Nombre d'habitants à évacuer durablement après déposition sur les sols

#### (a) Perspective

Concernant la déposition sur les sols et la relocalisation de longue durée des populations, la Directive 2013/59/Euratom du Conseil prévoit que la décision est basée sur la dose efficace engagée individuelle (calcul qui communément prend en compte un facteur *indoor* de 0.4 (IFSN 2009, 67), ce qui réduit l'exposition de la radioactivité des sols de 60% – pour tenir compte du comportement des personnes en activité à l'extérieur). Concrètement, une évacuation durable de la population peut être justifiée pour une dose efficace engagée individuelle dont l'amplitude va de 20 mSv par année à 100 mSv (2013/59/Euratom Annex I §1). Afin de saisir l'enjeu, l'analyse des résultats ne commente que les seuils suivants :  $\geq 20$  mSv ;  $\geq 50$  mSv ;  $\geq 100$  mSv.

#### (b) Évacuation en regard de la population des pays européens

**20 mSv** : En moyenne, 960'715 personnes seraient potentiellement confrontées à une dose annuelle supérieure à 20 mSv, ou pourraient être relogées si cette limite d'exposition pour le public était sélectionnée (2013/59/EURATOM, Annex I §1). Toutefois, vu la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où la radioactivité impacte le moins de personnes (au centile 10 – noté C10 dans le tableau), le nombre de personnes qui seraient confrontées à une dose égale ou supérieure à 20 mSv s'établirait à 227'137 et en-dessous. Mais dans le 10% des cas où la radioactivité impacterait le plus de personnes (centile 90), ce nombre serait égal ou supérieur à 1'974'905 personnes, un chiffre qui pourrait être multiplié par plus de 5 dans la pire des situations (Max).

**50 mSv** : en moyenne, 314'746 personnes seraient potentiellement confrontées à une dose annuelle égale ou supérieure à 50 mSv, et devraient être relogées si cette limite d'exposition pour le public était sélectionnée (2013/59/EURATOM, Annex I §1). Toutefois, vu la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où la radioactivité impacte le moins de personnes (au centile C10), le nombre de personnes qui seraient confrontées à une dose égale ou supérieure à 50 mSv seraient 70'908. Mais dans le 10% des cas où la radioactivité impacterait le plus de personnes (centile C90), ce nombre serait égal ou supérieur à 595'295 personnes, un chiffre qui pourrait être multiplié par plus de 5 dans la pire des situations (Max).

**100 mSv** : en moyenne, 177'569 personnes seraient potentiellement confrontées à une dose annuelle supérieure à 100 mSv, ou devraient être relogées si cette limite d'exposition pour le public était sélectionnée (2013/59/EURATOM, Annex I §1). Mais, vu la variabilité météorologique, si l'on regarde le 10% des situations météo où la radioactivité impacte le moins de personnes (au centile C10), le nombre de personnes qui seraient confrontées à une dose égale ou supérieure à 100 mSv s'établirait 29'309 ou en dessous. A l'opposé, dans le 10% des cas où la radioactivité impacterait le plus de personnes (centile C90), ce nombre serait égal ou supérieur à 349'883 personnes, un chiffre qui pourrait être multiplié par 3 dans la pire des situations (Max).

| Tableau 3.3.1. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par la déposition radioactive<br>1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020<br>Radiation du sol pendant une année avec un facteur indoor de 0.4, dose efficace individuelle engagée (mSv)<br>Nom de la centrale nucléaire et puissance thermique : Cattenom 3817 MWth |  |  |   |   |  |  |   |   |
|--|--|--|---|---|--|--|---|---|
|  | Europe 51<br>$\geq 1$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 6$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 20$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 50$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 100$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 500$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 1000$ mSv<br>Indiv.(nbr) | Europe 51<br>$\geq 2000$ mSv<br>Indiv.(nbr) |
| Moyenne  | 19 571 404                               | 4 421 794                                | 960 715                                   | 314 746                                   | 177 569                                    | 47 255                                     | 18 721                                      | 4 976                                       |
| Max  | 64 136 663                               | 29 032 391                               | 11 263 878                                | 3 409 749                                 | 1 066 738                                  | 307 964                                    | 195 527                                     | 108 415                                     |
| C99  | 51 078 984                               | 18 239 163                               | 5 428 095                                 | 1 525 502                                 | 596 961                                    | 228 943                                    | 144 017                                     | 64 826                                      |
| C90  | 33 823 006                               | 8 775 159                                | 1 974 905                                 | 595 275                                   | 349 883                                    | 131 513                                    | 57 786                                      | 15 164                                      |
| C75  | 25 341 356                               | 5 809 815                                | 1 127 428                                 | 389 510                                   | 254 585                                    | 67 711                                     | 22 498                                      | 2 975                                       |
| C50  | 17 703 287                               | 3 342 913                                | 629 543                                   | 256 260                                   | 153 805                                    | 23 854                                     | 5 608                                       | 0   |
| C25  | 11 214 635                               | 1 855 718                                | 370 279                                   | 138 519                                   | 70 734                                     | 6 710                                      | 0   | 0   |
| C10  | 7 679 968                                | 1 113 118                                | 227 137                                   | 70 908                                    | 29 304                                     | 642  | 0   | 0   |
| C1   | 3 301 946                                | 399 851                                  | 75 506                                    | 20 309                                    | 7 984                                      | 0  | 0   | 0   |
| Min  | 699 827                                  | 93 362                                   | 24 214                                    | 9 056                                     | 1 609                                      | 0  | 0   | 0   |

La question pendante est celle de la capacité des pouvoirs publics à reloger les personnes qui doivent l'être, et l'éventualité qu'elles n'y parviennent pas et décident de relever le seuil de dose. Une question qui se pose dans plusieurs des pays qui pourraient être impactés...

### (c) Évacuation en regard de différentes populations

Le besoin d'évacuer durablement la population pourrait se poser dans différents pays européens. Les résultats ci-dessous permettent d'appréhender la difficulté de l'effort pour les seuils de 20 mSv et 100 mSv, en regard de la directive européenne (2013/59/EURATOM, Annexe I §1).

Tableau 3.3.2. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par la déposition radioactive  $\geq 20$  mSv 1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020  
Radiation du sol pendant une année avec un facteur indoor de 0.4, dose efficace individuelle engagée (mSv)  
Cattenom 3817 MWth

|      | Europe<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | France<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | DEU + AUT<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Luxembourg<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | BEL + NLD<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Italie<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Suisse<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Espagne<br>$\geq 20$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |
|------|--|--|---|--|---|--|--|---|
| Moy. | 960 715                                      | 283 962                                      | 481 323   | 60 502   | 119 230   | 7 316  | 4 517  | 174   |
| Max  | 11 263 878                                   | 11 263 878                                   | 8 490 258                                       | 574 619  | 8 129 179                                       | 2 108 434                                    | 1 087 055                                    | 138 273                                       |
| C95  | 2 845 324                                    | 878 291                                      | 1 851 181                                       | 333 231  | 690 787   | 0  | 0  | 0   |
| C90  | 1 974 905                                    | 635 390                                      | 1 331 537                                       | 264 716  | 160 959   | 0  | 0  | 0   |
| C85  | 1 598 113                                    | 521 259                                      | 1 050 310                                       | 165 361  | 43 790  | 0  | 0  | 0   |
| C75  | 1 127 428                                    | 382 198                                      | 698 146   | 55 795   | 0   | 0  | 0  | 0   |
| C50  | 629 543                                      | 65 855                                       | 142 930   | 3 704  | 0   | 0  | 0  | 0   |
| C25  | 370 279                                      | 22 242                                       | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  | 0   |
| C15  | 293 058                                      | 17 393                                       | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  | 0   |
| C10  | 227 137                                      | 14 706                                       | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  | 0   |
| C5   | 149 028                                      | 13 275                                       | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  | 0   |
| Min  | 24 214                                       | 6 301  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  | 0   |

Tableau 3.3.3. Distribution en centiles (et moyenne) du nombre de personnes impactées par la déposition radioactive  $\geq 100$  mSv 1096 simulations météorologiques sur 3 ans (chacune de 72h), jusqu'à fin 2020  
Radiation du sol pendant une année avec un facteur indoor de 0.4, dose efficace individuelle engagée (mSv)  
Cattenom 3817 MWth

|      | Europe<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | France<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | DEU + AUT<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Luxembourg<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | BEL + NLD<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Italie<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Suisse<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) | Espagne<br>$\geq 100$ mSv<br>Individ.<br>(nbr) |
|------|---|---|--|---|--|---|---|--|
| Moy. | 177 569                                       | 92 919  | 42 019   | 37 023  | 5 057  | 370   | 171   | 0  |
| Max  | 1 066 738                                     | 623 982                                       | 952 263  | 432 284   | 608 589  | 243 474                                       | 137 502                                       | 0  |
| C95  | 426 655                                       | 311 501                                       | 220 755  | 231 442   | 33 017   | 0   | 0   | 0  |
| C90  | 349 883                                       | 240 138                                       | 146 965  | 166 794   | 3 825  | 0   | 0   | 0  |
| C85  | 307 927                                       | 201 141                                       | 97 568   | 79 739  | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C75  | 254 585                                       | 147 339                                       | 34 345   | 25 127  | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C50  | 153 805                                       | 35 367  | 0  | 370   | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C25  | 70 734  | 16 469  | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C15  | 42 682  | 12 861  | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C10  | 29 304  | 11 431  | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
| C5   | 16 955  | 9 751   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
| Min  | 1 609   | 1 609   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |

## 3.4 Impact sanitaire sous forme de maladies graves et de décès radio-induits

### a) Rappel concernant le modèle linéaire sans seuil selon le Modèle A et le Modèle B

L'impact sanitaire est uniquement calculé selon une approche stochastique, en intégrant les données lors du passage et nuage, et du rayonnement des sols pendant une année.

L'évaluation de la *dose efficace collective engagée* (DCEE) – et potentielle – lors du passage du nuage consiste à additionner les *doses efficaces individuelles engagées* (DEIE) dans l'intervalle 1 à 2000 mSv.

L'évaluation de la DCEE potentielle de la déposition sur les sols pendant une année implique d'additionner les DEIE dans l'intervalle 1 à 20 mSv (hypothèse conservatrice selon laquelle le public exposé à un niveau annuel

supérieur à 20 mSv sera évacué durablement)<sup>20</sup>. Ces deux résultats permettent de déterminer la DCCE potentielle totale exprimée en personSievert (persSv)

**(b) Distribution de la dose collective efficace engagée (nuage ≤ 2000 mSv et déposition < 20 mSv)**

Tableau 3.4.1. Dose collective efficace engagée (personSv) provenant du nuage ≤ 2000 mSv et de la déposition durant la 1<sup>re</sup> année < 20 mSv (dose moyenne potentielle et distribution pour 5 centiles)

Cattenom (3817 MWth)

| Impact : | Europe 51<br>Nua+dep<br>(persSv) | France<br>Clou+dep<br>(persSv) | DEU + AUT<br>Clou+dep<br>(persSv) | LUX<br>Clou+dep<br>(persSv) | BEL + NLD<br>Clou+dep<br>(persSv) | Italie<br>Clou+dep<br>(persSv) | Suisse<br>Clou+dep<br>(persSv) | Espagne<br>Clou+dep<br>(persSv) |
|----------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| moy      | 375 186                          | moy 123 015                    | moy 148 681                       | moy 28 705                  | moy 32 096                        | moy 4 979                      | moy 2 700                      | moy 1 161                       |
| C99      | 1 066 410                        | C99 615 748                    | C99 627 622                       | C99 291 892                 | C99 408 373                       | C99 94 133                     | C99 76 696                     | C99 39 564                      |
| C85      | 557 959                          | C85 275 991                    | C85 302 850                       | C85 53 069                  | C85 50 393                        | C85 887                        | C85 249                        | C85 0                           |
| C50      | 338 418                          | C50 51 972                     | C50 119 403                       | C50 942                     | C50 0                             | C50 0                          | C50 0                          | C50 0                           |
| C15      | 187 317                          | C15 9 484                      | C15 0                             | C15 0                       | C15 0                             | C15 0                          | C15 0                          | C15 0                           |
| C1       | 80 304                           | C1 3 060                       | C1 0                              | C1 0                        | C1 0                              | C1 0                           | C1 0                           | C1 0                            |

Résultats sur 1096 simulations météorologiques (sans les doses inférieures à 1 mSv)

Le tableau 3.4.1 présente les résultats potentiels pour la *dose collective efficace engagée*. Il apparaît que les populations voisines de la France pourraient recevoir une dose collective importante ; c’est le cas pour l’Allemagne et l’Autriche, le Luxembourg, la Belgique et les Pays-Bas. Les habitants de pays plus éloignés, considérés isolément, pourraient aussi être touchés, en Italie, Suisse et Espagne, mais selon une probabilité moindre. D’autres pays que nous n’avons pas étudié pourraient être concernés dans certains cas extrêmes, tels la Tchéquie, la Slovénie, le Danemark, le Royaume-Uni.

Pour inférer le nombre de victimes de la DCEE, la manière la plus communément admise part du modèle linéaire sans seuil de l’Organisation mondiale de la santé (*Linear No Threshold model – LNT*). ; la suite des calculs est expliquée dans les tableaux (*infra*).

**(c) Nombre de cancers radio-induits selon le Modèle A**

Le fonctionnement du Model A est exploité ci-dessous (tableau 3.4.2).

Tableau 3.4.2. Modèle Linéaire Sans Seuil (LNT) : trois variantes du Modèle A pour estimer le nombre de cas de cancers radio-induits

Cattenom (3817 MWth) -> Territoire impacté: Europe 51

| Type d'impacte                      | Facteurs de risque (EAR) -><br>Dose effective collective engagée – moyenne (personne-sievert) | 0.09  | 0.2  | 0.35  |
|-------------------------------------|---|---|--|---|
|                                     |   | Modèle A (inf.)<br>Personnes avec cancers radio-induits (Nbr) | Modèle A (moyen)<br>Personnes avec cancers radio-induits (Nbr) | Modèle A (sup.)<br>Personnes avec cancers radio-induits (Nbr) |
| Nuage ([1, 2000] mSv) -> Moyenne    | 302 347   | 27 211  | 60 469   | 105 821   |
| Déposit. ([1, 2000] mSv) -> Moyenne | 175 946   | 15 835  | 35 189   | 61 581  |
| Déposit. ([1, 20[ mSv) -> Moyenne   | 72 839  | 6 556   | 14 568   | 25 494  |

Résultats sur 1096 simulations météorologiques (sans les doses inférieures à 1 mSv)

**(d) Nombre de maladies graves radio-induites selon le Modèle B**

Le Modèle B est lui aussi basé sur le modèle linéaire sans seuil de l’OMS. Le consensus sur sa solidité fait peu doute selon la littérature épidémiologique récente (*supra* 1.3 ; 2.7 ; *infra* 4.2(c)(6)). Le Model B est illustré dans le tableau 3.4.3. Il détermine le nombre de cas de cancer radio-induits selon un *facteur de risque excessif absolu* (*Excessive Absolute Risk factor – EAR*) voisin de celui du *Modèle A-sup* (0.4 au lieu de 0.35). Le Modèle B intègre de plus les maladies cardio-vasculaires radio-induites, avec un facteur EAR de 0.15.

**(i) Nombre de vies sauvées par l'évacuation**

La seconde ligne du tableau 3.4.3 dénombre les 96'771 maladies graves radio-induites qui seraient provoquées en l'absence d'une évacuation des populations en zones contaminées. Si l'on soustrait de ce résultat les 40'062

<sup>20</sup> Concernant la déposition, l’intervalle 1-20 mSv est basé sur l’hypothèse que le public serait évacué au-dessus d’une dose individuelle annuelle de 20 mSv (selon le seuil indiqué dans la Directive 2013/59/Euratom, seuil qui peut être relevé dans certaines circonstances).

maladies radio-induites du scénario alternatif de l'évacuation – dès une dose efficace annuelle égale ou supérieure à 20 mSv – on en déduit que l'évacuation sauverait quelque 56'709 vies.

Tableau 3.4.3. Modèle *Linéaires Sans Seuil* (LNT) : détails du Modèle B pour estimer les cas de cancer et de maladies cardiovasculaires radio-induits

Cattenom (3817 MWth) -> Territoire impacté: Europe 51

| Type d'impacte                      | Facteurs de risque EAR -><br>Dose effective collective engagée - moyenne (personne-sievert) | 0.4  | 0.15   | 0.55   |
|-------------------------------------|---|--|--|--|
|                                     |   | Modèle B<br>Personnes avec cancers radio-induits (Nbr) | Modèle B<br>Personnes avec maladies cardiovasc. radio-induites (Nbr) | Modèle B<br>Personnes avec sévères maladies radio-induites (Nbr) |
| Nuage ([1, 2000] mSv) -> Moyenne    | 302 347   | 120 939  | 45 352   | 166 291  |
| Déposit. ([1, 2000] mSv) -> Moyenne | 175 946   | 70 379   | 26 392   | 96 771   |
| Déposit. ([1, 20[ mSv) -> Moyenne   | 72 839  | 29 136   | 10 926   | 40 062   |

Résultats sur 1096 simulations météorologiques (sans les doses inférieures à 1 mSv)

Dans la suite de l'étude, les résultats sont basés sur le Modèle B.

(ii) Nombre de cas de maladies sévères (cardio+cancer) selon Modèle B, pour différentes populations

Selon le tableau 3.4.4, le nombre potentiel de cancers radio-induits de maladies cardiovasculaires radio-induites avoisinerait à l'échelle des 51 pays en moyenne les 206'352 cas dans les décennies suivant l'accident. La France pourrait être gravement touchée, l'Allemagne et l'Autriche considérées ensemble aussi, ce qui s'explique en partie par une population plus nombreuse qu'en France.

Le Luxembourg, avec ses 630'000 habitants, pourrait, dans un cas extrême (C99), devoir faire face à une hausse potentielle des cancers radio-induits et des maladies cardiovasculaires avoisinant 160'540 cas ; si l'accident nucléaire était très mal géré du fait de son ampleur exceptionnelle, 25% de la population luxembourgeoise serait sujettes à des maladies graves radio-induites dans les décennies suivantes.

Tableau 3.4.4. Nombre potentiel de maladies sévères radio-induites (cardio-vasculaires & cancers) selon Modèle B, (nuage ≤ 2000 mSv et déposition durant la 1<sup>re</sup> année < 20 mSv)

Cattenom (3817 MWth)

| Impact: | Europe 51<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | France<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | DEU + AUT<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | Luxembourg<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | BEL + NLD<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | Italia<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | Suisse<br>Model B<br>Pers. (Nbr) | Espagne<br>Model B<br>Pers. (Nbr) |
|---------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| moy     | 206 352                             | 67 658                           | 81 775                              | 15 788                               | 17 653                              | 2 738                            | 1 485                            | 638                               |
| C99     | 586 526                             | 338 662                          | 345 192                             | 160 540                              | 224 605                             | 51 773                           | 42 183                           | 21 760                            |
| C85     | 306 878                             | 151 795                          | 166 567                             | 29 188                               | 27 716                              | 488                              | 137                              | 0                                 |
| C50     | 186 130                             | 28 584                           | 65 672                              | 518                                  | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |
| C15     | 103 024                             | 5 216                            | 0                                   | 0                                    | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |
| C1      | 44 167                              | 1 683                            | 0                                   | 0                                    | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |

Résultats sur 1096 simulations météorologiques (sans les doses inférieures à 1 mSv)

(e) Nombre de décès radio-induits selon le Modèle B

Selon le tableau 3.4.5, en moyenne, le nombre potentiel de décès radio-induits s'élèverait à 93'797 personnes dans les décennies suivant un accident nucléaire majeur en Europe. De nombreux pays pourraient être touchés sévèrement, séparément, ou ensemble dans certaines situations. Dans plus de la moitié des simulations, l'Allemagne et l'Autriche ensemble seraient plus touchées que la France.

Table 3.4.5. Nombre potentiel de décès radio-induits selon le Modèle B (nuage ≤ 2000 mSv et déposition 1<sup>re</sup> année < 20 mSv)

Cattenom (3817 MWth)

| Impact : | Europe 51<br>Model B<br>Décès (Nbr) | France<br>Model B<br>Décès (Nbr) | DEU + AUT<br>Model B<br>Décès (Nbr) | Luxembourg<br>Model B<br>Décès (Nbr) | BEL + NLD<br>Model B<br>Décès (Nbr) | Italie<br>Model B<br>Décès (Nbr) | Suisse<br>Model B<br>Décès (Nbr) | Espagne<br>Model B<br>Décès (Nbr) |
|----------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Moy      | 93 797                              | 30 754                           | 37 170                              | 7 176                                | 8 024                               | 1 245                            | 675                              | 290                               |
| C99      | 266 603                             | 153 937                          | 156 906                             | 72 973                               | 102 093                             | 23 533                           | 19 174                           | 9 891                             |
| C85      | 139 490                             | 68 998                           | 75 712                              | 13 267                               | 12 598                              | 222                              | 62                               | 0                                 |
| C50      | 84 605                              | 12 993                           | 29 851                              | 235                                  | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |
| C15      | 46 829                              | 2 371                            | 0                                   | 0                                    | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |
| C1       | 20 076                              | 765                              | 0                                   | 0                                    | 0                                   | 0                                | 0                                | 0                                 |

Résultats sur 1096 simulations météorologiques (sans les doses inférieures à 1 mSv)

### 3.5 Cattenom : exportation du risque d'un accident nucléaire majeur par-delà les frontières

Comparaison du potentiel de différentes centrales nucléaires à exporter le risque d'un accident nucléaire à l'étranger, fréquence d'un impact sanitaire supérieur à l'étranger

Cattenom est proche de la frontière et pourrait, en cas d'accident nucléaire majeur, avoir un impact plus important à l'extérieur des frontières de la France qu'à l'intérieur. Le tableau 3.5.1 montre qu'un accident majeur toucherait davantage l'Europe que la France dans 67% des cas. Ce potentiel d'« exportation » du risque nucléaire se confirme en regard de l'Allemagne et de l'Autriche considérées ensemble (55%). Même le Luxembourg – dont le territoire est réduit – serait plus touché que la France dans 24% des situations météorologiques, cependant que la Belgique et les Pays-Bas le seraient dans 12% des cas. L'Italie a beau être éloignée, elle serait plus touchée que la France dans 4% des simulations cependant que seules trois simulations constatent ce phénomène pour la Suisse.

|  |  | (persSv > persSv) |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Comparaison entre les territoires impactés |  | EU50 > FRA        | DAU > FRA         | LUX > FRA         | BNL > FRA         | ITA > FRA         | CHE > FRA         |
| CAT (3817 MWth)                            | 1 <sup>er</sup> territ. impact > 2 <sup>e</sup> territ. impact (Nbr) | 729               | 608               | 265               | 127               | 39                | 3                 |
| CAT (3817 MWth)                            | (Situations Nbr)/(1096 simulations Nbr) (%)                          | 67%               | 55%               | 24%               | 12%               | 4%                | 0%                |

DAU = Deutschland + Austria; BNL = Belgium + Netherlands; BNL = Belgium + Netherlands; EU50 = Europe sans la France, LUX = Luxembourg, ITA = Italy, FRA = France

### 3.6 Déposition sur les sols, données en km<sup>2</sup>

#### (a) Objet de ces résultats

Trois catégories de sols font l'objet de cette présentation :

- Toutes surfaces (a) ;
- Terres cultivées – y compris le vignoble – mais sans les pâturages (b) ;
- Herbacées et pâturages (c).<sup>21</sup>

Les résultats synthétisent trente-neuf territoires de l'Europe, pour lesquels des données *Copernicus* étaient disponibles ; ce qui mène au territoire EUR39 fait de l'agrégation de 39 pays (*supra* 2.6).

La partie qui suit est en attente d'un commentaire.

#### (b) Toutes surfaces

Les tableaux suivants montrent la diversité des situations quant aux atteintes aux sols.

| Dose efficace collective engagée, 1 année       | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tous les nucléides + filiation (mSv (1st yr)-1) | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)            | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)                             | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: Europe 39                        | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99   | 656 354            | 279 682  | 60 017   | 16 848   | 6 448    | 2 756    | 556      | 301      | 127      |
| C95   | 524 084            | 215 701  | 43 103   | 11 171   | 3 959    | 1 898    | 421      | 210      | 95       |
| C80   | 375 973            | 149 230  | 26 435   | 6 408    | 2 441    | 1 259    | 268      | 116      | 24       |
| C50   | 241 538            | 93 926   | 15 711   | 3 860    | 1 490    | 760      | 110      | 23       | 0        |
| C20   | 135 326            | 56 762   | 9 559    | 2 338    | 734      | 338      | 23       | 0        | 0        |
| C5  | 75 001             | 30 724   | 5 333    | 1 023    | 287      | 115      | 0        | 0        | 0        |
| C1  | 42 894             | 20 088   | 3 024    | 590      | 176      | 66       | 0        | 0        | 0        |

<sup>21</sup> Les pâtures/pâturages qui sont inclus dans la catégorie herbacée avec les prairies naturelles ; les pâtures pourraient retourner à l'état de cultures pendant une année ou davantage. Pour davantage de précision, voir tableau 2.6.1.

| Tableau 3.6.2. Toutes surfaces, nombre de kilomètres carrés radioactifs distribués par centiles (France) |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Dose efficace collective engagée, 1 année  | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
| Tous les nucléides + filiation (mSv (1st yr)-1)  | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)   | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)  | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: France  | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2 |
| C99  | 260 953            | 156 518  | 51 229   | 14 204   | 5 500    | 2 496    | 501      | 283      | 120      |     |
| C95  | 177 763            | 103 657  | 30 573   | 8 464    | 3 265    | 1 716    | 369      | 187      | 85       |     |
| C80  | 89 614             | 54 480   | 15 313   | 4 367    | 1 890    | 979      | 191      | 88       | 24       |     |
| C50  | 4 255              | 2 176    | 662      | 353      | 299      | 243      | 78       | 23       | 0        |     |
| C20  | 169                | 157      | 144      | 132      | 115      | 98       | 22       | 0        | 0        |     |
| C5   | 105                | 103      | 93       | 84       | 78       | 67       | 0        | 0        | 0        |     |
| C1   | 68                 | 68       | 66       | 64       | 59       | 50       | 0        | 0        | 0        |     |

| Tableau 3.6.3. Toutes surfaces, nombre de kilomètres carrés radioactifs distribués par centiles (Allemagne) |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Dose efficace collective engagée, 1 année   | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)   | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)  | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)   | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: Germany  | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2 |
| C99   | 209 415            | 123 299  | 38 419   | 9 687    | 3 050    | 1 313    | 165      | 40       | 1        |     |
| C95   | 156 604            | 89 799   | 25 176   | 5 363    | 1 884    | 806      | 74       | 6        | 0        |     |
| C80   | 102 667            | 59 896   | 13 695   | 3 179    | 934      | 301      | 0        | 0        | 0        |     |
| C50   | 54 653             | 30 950   | 5 371    | 787      | 72       | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C20   | 293                | 10       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |

| Tableau 3.6.4. Toutes surfaces, nombre de kilomètres carrés radioactifs distribués par centiles (Luxembourg) |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Dose efficace collective engagée, 1 année  | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)  | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)   | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)  | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: Luxembourg  | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2 |
| C99  | 2 584              | 2 577    | 2 170    | 1 667    | 1 267    | 940      | 258      | 117      | 26       |     |
| C95  | 2 295              | 1 906    | 1 586    | 1 209    | 840      | 581      | 152      | 53       | 4        |     |
| C80  | 1 095              | 755      | 512      | 404      | 292      | 196      | 22       | 0        | 0        |     |
| C50  | 87                 | 49       | 28       | 23       | 12       | 6        | 0        | 0        | 0        |     |
| C20  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C5   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C1   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |

| Tableau 3.6.5. Toutes surfaces, nombre de kilomètres carrés radioactifs distribués par centiles (Belgique + Pays-Bas) |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Dose efficace collective engagée, 1 année   | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)   | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)  | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)   | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: BEL + NLD  | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2 |
| C99   | 55 736             | 42 557   | 19 364   | 7 138    | 2 503    | 932      | 38       | 0        | 0        |     |
| C95   | 41 264             | 27 519   | 11 241   | 3 099    | 819      | 274      | 0        | 0        | 0        |     |
| C80   | 15 111             | 6 158    | 993      | 61       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C50   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C20   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |

(c) Surfaces agricoles

**Tableau 3.6.6. Surfaces agricoles y compris vignoble, sans les pâturages, nbr de kilomètres carrés avec déposition (EUR39)**

| Dose efficace collective engagée, 1 année | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Tous les nucléides (mSv (1st yr)-1)       | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Parents' Becquerels(t1) (Bq m-2)          | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)                       | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Zone impactée EUR39                       | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2 |
| C99                                       | 97 703             | 38 387   | 8 049    | 2 263    | 855      | 358      | 77       | 33       | 10       |     |
| C95                                       | 70 426             | 26 293   | 4 847    | 1 253    | 446      | 185      | 39       | 17       | 4        |     |
| C80                                       | 38 971             | 13 831   | 2 402    | 480      | 147      | 79       | 14       | 5        | 1        |     |
| C50                                       | 17 550             | 6 369    | 814      | 159      | 62       | 30       | 5        | 1        | 0        |     |
| C20                                       | 8 703              | 2 695    | 243      | 65       | 25       | 12       | 1        | 0        | 0        |     |
| C5  | 3 892              | 973      | 120      | 27       | 10       | 5        | 0        | 0        | 0        |     |
| C1  | 2 080              | 491      | 60       | 13       | 6        | 3        | 0        | 0        | 0        |     |

**Tableau 3.6.7. Surfaces agricoles y compris vignoble, sans les pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition (France)**

| Dose efficace collective engagée, 1 année | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tous les nucléides (mSv (1st yr)-1)       | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |          |
| Parents' Becquerels(t1) (Bq m-2)          | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |          |
|   | 8.85E+06           | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: France                     | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99                                       | 47 935             | 27 107   | 7 777    | 1 086    | 269      | 112      | 24       | 12       | 5        |          |
| C95                                       | 30 556             | 16 135   | 2 910    | 451      | 120      | 60       | 15       | 7        | 3        |          |
| C80                                       | 10 593             | 5 159    | 742      | 157      | 64       | 32       | 7        | 3        | 1        |          |
| C50                                       | 252                | 111      | 35       | 20       | 12       | 9        | 3        | 1        | 0        |          |
| C20                                       | 7                  | 7        | 6        | 6        | 6        | 5        | 1        | 0        | 0        |          |
| C5  | 5                  | 5        | 4        | 4        | 3        | 3        | 0        | 0        | 0        |          |
| C1  | 3                  | 3        | 3        | 3        | 3        | 2        | 0        | 0        | 0        |          |

**Tableau 3.6.8. Surfaces agricoles y compris vignoble, sans les pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition (Allemagne)**

| Dose efficace collective engagée, 1 année | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tous les nucléides (mSv (1st yr)-1)       | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |          |
| Parents' Becquerels(t1) (Bq m-2)          | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |          |
|   | 8.85E+06           | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: Germany                    | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99                                       | 3 320              | 2 367    | 1 219    | 488      | 164      | 71       | 10       | 2        | 0        |          |
| C95                                       | 2 564              | 1 631    | 710      | 274      | 89       | 27       | 3        | 0        | 0        |          |
| C80                                       | 1 418              | 919      | 381      | 138      | 20       | 6        | 0        | 0        | 0        |          |
| C50                                       | 626                | 390      | 82       | 7        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C20                                       | 3                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |

Les chiffres de l'Allemagne semblent trop peu élevés. Nous les avons vérifiés et n'avons pas d'explication à ce stade. Il vaut mieux ne pas en tirer de conclusion.

**Tableau 3.6.9. Surfaces agricoles y compris vignoble, sans les pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition (Luxembourg)**

| Dose efficace collective engagée, 1 année | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tous les nucléides (mSv (1st yr)-1)       | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |          |
| Parents' Becquerels(t1) (Bq m-2)          | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |          |
|   | 8.85E+06           | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: Luxembourg                 | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99                                       | 514                | 513      | 419      | 353      | 267      | 203      | 67       | 27       | 6        |          |
| C95                                       | 448                | 377      | 328      | 252      | 166      | 120      | 32       | 12       | 0        |          |
| C80                                       | 220                | 153      | 111      | 94       | 64       | 40       | 2        | 0        | 0        |          |
| C50                                       | 15                 | 7        | 2        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C20                                       | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |

Tableau 3.6.10. Surfaces agricoles y compris vignoble, sans les pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition (Belgique + Pays-Bas)

| Dose efficace collective engagée, 1 année Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Tous les nucléides (mSv (1st yr)-1)                          | ≥0.1     | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Parents' Becquerels(t1) (Bq m-2)                             | 9.96E+04 | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| 8.85E+06   | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: BEL + NLD                                     | km2      | km2 |
| C99  | 12 172   | 9 460    | 4 522    | 1 617    | 493      | 180      | 5        | 0        | 0        | 0   |
| C95  | 9 172    | 6 262    | 2 668    | 627      | 149      | 42       | 0        | 0        | 0        | 0   |
| C80  | 3 155    | 1 391    | 149      | 9        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0   |
| C50  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0   |
| C20  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0   |
| C5   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0   |
| C1   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0   |

(d) Surfaces herbacées, dont les pâtures

Tableau 3.6.11. Herbacées et pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition distribués par centiles (EUR39)

| Dose efficace collective engagée, 1 année Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)                          | ≥0.1     | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)                         | 9.96E+04 | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)  | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: Europe 39                                     | km2      | km2 |
| C99  | 88 183   | 43 442   | 12 270   | 3 058    | 1 348    | 633      | 106      | 57       | 28       |     |
| C95  | 64 680   | 30 586   | 7 801    | 2 009    | 809      | 402      | 79       | 40       | 18       |     |
| C80  | 48 228   | 22 154   | 4 434    | 1 130    | 469      | 241      | 46       | 21       | 4        |     |
| C50  | 31 518   | 14 352   | 2 495    | 658      | 284      | 141      | 20       | 4        | 0        |     |
| C20  | 19 917   | 8 585    | 1 463    | 410      | 141      | 64       | 4        | 0        | 0        |     |
| C5   | 10 963   | 4 817    | 790      | 199      | 61       | 26       | 0        | 0        | 0        |     |
| C1   | 6 206    | 3 163    | 481      | 126      | 39       | 15       | 0        | 0        | 0        |     |

Tableau 3.6.12. Herbacées et pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition distribués par centiles (France)

| Dose efficace collective engagée, 1 année Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)                          | ≥0.1     | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)                         | 9.96E+04 | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)  | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: France  | km2      | km2 |
| C99  | 52 742   | 31 428   | 9 758    | 2 619    | 1 143    | 529      | 80       | 45       | 24       |     |
| C95  | 36 817   | 22 136   | 5 216    | 1 520    | 610      | 311      | 55       | 32       | 17       |     |
| C80  | 14 611   | 7 881    | 2 195    | 657      | 313      | 162      | 33       | 18       | 4        |     |
| C50  | 712      | 342      | 108      | 70       | 60       | 46       | 17       | 4        | 0        |     |
| C20  | 43       | 41       | 38       | 35       | 31       | 27       | 4        | 0        | 0        |     |
| C5   | 31       | 29       | 28       | 27       | 24       | 20       | 0        | 0        | 0        |     |
| C1   | 25       | 24       | 24       | 23       | 19       | 13       | 0        | 0        | 0        |     |

Tableau 3.6.13. Herbacées et pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition distribués par centiles (Allemagne)

| Dose efficace collective engagée, 1 année Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)                          | ≥0.1     | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |     |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)                         | 9.96E+04 | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |     |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)  | 3.54E+03 | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |     |
| Impacted area: Germany                                       | km2      | km2 |
| C99  | 37 430   | 21 370   | 7 053    | 1 908    | 717      | 334      | 40       | 10       | 1        |     |
| C95  | 27 750   | 16 476   | 4 696    | 1 105    | 458      | 190      | 16       | 1        | 0        |     |
| C80  | 18 404   | 10 677   | 2 436    | 608      | 209      | 72       | 0        | 0        | 0        |     |
| C50  | 9 975    | 5 364    | 922      | 162      | 15       | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C20  | 57       | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C5   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |
| C1   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |     |

| Tableau 3.6.14. Herbacées et pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition distribués par centiles |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Dose efficace collective engagée, 1 année   | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)   | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)  | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)   | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: Luxembourg   | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99   | 412                | 411      | 348      | 269      | 201      | 152      | 51       | 23       | 6        |
| C95   | 368                | 298      | 247      | 191      | 148      | 110      | 28       | 10       | 1        |
| C80   | 190                | 137      | 92       | 70       | 47       | 29       | 3        | 0        | 0        |
| C50   | 11                 | 5        | 3        | 2        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C20   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

| Tableau 3.6.15. Herbacées et pâturages, nombre de kilomètres carrés avec déposition distribués par centiles |                    |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Dose efficace collective engagée, 1 année   | Cattenom 3817 MWth |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Parent + filiation (mSv (1st yr)-1)   | ≥0.1               | ≥1       | ≥6       | ≥20      | ≥50      | ≥100     | ≥500     | ≥1000    | ≥2000    |
| Becquerels des parents (t1) (Bq m-2)  | 9.96E+04           | 9.96E+05 | 5.98E+06 | 1.99E+07 | 4.98E+07 | 9.96E+07 | 4.98E+08 | 9.96E+08 | 1.99E+09 |
| Cs-137(t1) (Bq m-2)   | 3.54E+03           | 3.54E+04 | 2.12E+05 | 7.08E+05 | 1.77E+06 | 3.54E+06 | 1.77E+07 | 3.54E+07 | 7.08E+07 |
| Impacted area: BEL + NLD  | km2                | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      | km2      |
| C99   | 13 221             | 10 296   | 4 630    | 958      | 367      | 177      | 9        | 0        | 0        |
| C95   | 10 327             | 6 843    | 1 521    | 553      | 176      | 54       | 0        | 0        | 0        |
| C80   | 2 461              | 1 236    | 229      | 19       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C50   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C20   | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C5  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| C1  | 0                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

## IV. Discussion

### 4.1 Des différents termes sources aux doses efficaces collectives engagées

#### (a) Libération

L'ampleur des rejets radioactifs est basée sur la littérature officielle et sur une étude de Scholly et al. ; les termes source sont clairement identifiés à leurs sources bibliographiques.

Pour donner une idée des rejets radioactifs et de leur cohérence, nous les avons comparés entre eux, plus précisément à celui dont nous disposons pour l'AP1000 de génération III1/2 (*supra* tableau 2.3.1) et à celui du REP de 900 MWe et 2785 MWth de génération II (*supra* tableau 2.3.2). Les deux premiers tableaux ont confirmé la cohérence globale des termes source, notamment en regard des différentes générations de réacteurs ; une validation certes intuitive qui vaut mieux qu'une invalidation du même ordre. Les termes source ont aussi été comparés à ceux de Fukushima et de Tchernobyl (*supra*, tableaux 2.3.3 ; 2.3.4).

Cela étant, les accident majeurs simulés sont de niveau 7 sur l'échelle INES, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'une attaque terroriste massive, qu'elle soit le fait d'un État ou d'une organisation non étatique (Dorfman 2023; Piguet, Eckert, and Knüsli 2024).

#### (b) De Bq à mSv

Nous avons utilisé différentes listes de facteurs de dose pour évaluer l'impact sanitaire de radioéléments, via l'inhalation (CIPR 2012), l'exposition externe dans l'air (EPA 2019c), le rayonnement de la surface du sol (EPA 2019b). Le calcul pour passer de la dose efficace individuelle engagée à la dose efficace collective engagée a été expliquée. Les calculs ont été faits avec les facteurs de dose utilisés pour les adultes, en sachant toutefois que, si les facteurs de dose adaptés aux enfants existent, il ne nous a pas été possible, faute de moyens, de faire des calculs pour cette population spécifique.

#### (c) Vitesse de déposition des nucléides dans et sous le nuage, et simulations météorologiques

Nous avons identifié la vitesse de déposition et les paramètres complémentaires à partir de la littérature. Il est aussi précisé pourquoi nous avons décidé de ne pas prendre en compte les caractéristiques de la couverture terrestre qui influencent la déposition (*supra* 2.4). Le modèle de dispersion Hysplit a été expliqué ainsi que les paramètres principaux qui dimensionnent les simulations.

Si l'intégration des *refractories* dans le nuage confère plus de réalisme à l'estimation de l'impact global de la radioactivité, nous n'avons toutefois pas été en mesure d'estimer l'influence de leur regroupement avec les aérosols pour les simulations dans Hysplit. Il est vraisemblable que les *refractories* retombent plus souvent au sol dans la première partie du parcours du nuage que dans sa seconde partie. Ce fait a pu augmenter notre estimation du nombre de personnes atteintes par des basses doses et, à l'inverse, limiter le nombre de celles touchées par des doses plus élevées ; une compensation de l'un par l'autre ne peut pas être démontrée. Il est néanmoins évident que les *refractories* peuvent franchir une grande distance après avoir été éjectés d'un réacteur nucléaire par un panache exceptionnellement énergétique (Güntay et al. 1997, 185). Il aurait donc été erroné de ne pas les inclure dans le nuage radioactif simulé dans Hysplit.

#### (d) Populations touchées : volume d'air respiré et absence de facteur indoor

Pour estimer le nombre de personnes potentiellement exposées au passage du nuage radioactif (inhalation et exposition externe), nous avons suivi les recommandations officielles, qui supposent que les adultes respirent dans un état de stress – d'où un volume respiré accru (*supra* 2.3 (c)) – pendant plusieurs heures l'air du nuage radioactif – comme s'ils n'étaient pas informés du risque. L'évaluation est utile à la protection d'urgence en ceci qu'elle quantifie *l'impact potentiel maximal que les pouvoirs publics ont la charge de minimiser*. Il n'y a donc pas de facteur *indoor* intérieur prenant en compte une mise à l'abri dans un logement fermé retenant la plus grande partie de la radioactivité à l'extérieur.

#### (e) Populations touchées : grande variabilité des comportements face au nuage radioactif

L'évaluation de l'impact sanitaire, en nombre de maladies graves et de décès, est soutenue par des hypothèses qui influencent les résultats et qu'il convient de commenter plus précisément. Ci-après, un premier ensemble

d'hypothèses sur la question du passage du nuage, puis des sols (*infra (f)*) ; enfin, un panorama des hypothèses entrant dans le calcul de l'impact sanitaire global (*infra (g)*).

a) Pendant le passage du nuage radioactif, les populations à proximité immédiate du réacteur *et* dans l'axe principal du nuage seraient invitées à une évacuation.

b) Pendant le passage du nuage radioactif, les populations plus éloignées du réacteur *et* menacées par le nuage seraient invitées à se cloîtrer chez elles pour se protéger, plutôt que paniquer et de fuir en bloquant les routes et de risquer de s'exposer au nuage radioactif du fait de l'inconfort radical de la situation. Pour la deuxième catégorie de population, se confiner chez soi est possible et est encouragé puisque cela permet de diminuer considérablement la dose inhalée lors du passage du nuage, le logement ayant un volume d'air propre suffisant pour tenir en minimisant considérablement l'inhalation d'air radioactif. La solution pour diminuer drastiquement l'impact sanitaire paraît simple. Mais y aurait-il des facteurs qui pousseraient certaines populations à se comporter autrement au gré des circonstances ?

c) Il semble que le comportement des populations ne peut pas être modélisé à l'avance avec des hypothèses optimistes sur le respect des consignes ; il faut tenir compte de la variabilité, et des conditions météorologiques, et de la saison, et du moment où les habitants seraient surpris dans leurs activités (ou leur sommeil), et de la forme et de l'agressivité du nuage radioactif (longe-t-il le sol ou s'élève-t-il au-dessus des territoires ?).

d) A la diversité des conditions météorologiques et des heures envisageables de l'alerte, il faut ajouter la diversité des situations particulières. En cas d'accident majeur, que feraient les personnes qui travaillent à l'extérieur, ou qui sont en courses, ou prises dans un embouteillage, ou dont les enfants sont à l'école, ou en centre aéré, ou en chemin, ou chez des amis, et que l'on ne peut s'empêcher d'aller chercher malgré les consignes ? Que vaudraient les consignes recommandant de rester chez soi dans ces circonstances, et que valent-elles pour les personnes dont le logement laisse passer les courants d'air, du fait de lacunes d'isolation ou d'un système d'aération non maîtrisé ?

e) Les messages scintillants dans les téléphones au moment de l'arrivée du nuage pourraient donner des réponses contradictoires aux questions suivantes : quels habitants de la campagne, d'une ville petite, moyenne ou grande auraient les nerfs de se calfeutrer chez eux pendant les heures du passage d'un nuage radioactif sévère, pour se retrouver ensuite au milieu d'un territoire de milliers de kilomètres carrés recouvert de matières radioactives susceptibles d'être remises en suspension lors d'un déplacement d'air un peu rapide ? Pendant l'attente, qui fournit les denrées nécessaires aux centaines de milliers de personnes dans la même situation ? Et qui est prioritaire dans la distribution ? Comment, quand et dans quelle direction peuvent aller les habitants dont la décision est de partir ? La direction à prendre en évitant les lieux les plus contaminés est-elle identique ou à l'opposé des personnes chez qui ils souhaiteraient se rendre ? Les réponses à quelques-unes de ces questions pourraient les amener à ne pas respecter les consignes des pouvoirs publics.

f) A ce propos, quelle est la capacité des pouvoirs publics à faire des arbitrages sensés de façon ordonnée et rapide ? Les consignes des responsables sur le terrain seront-elles désavouées par les centres de décision ? Les consignes des maires et des préfets seront-elles cohérentes ou, contradictoire ? Si évacuer en urgence une petite partie de la population s'avère indispensable, le reste de la population pourrait-elle se méfier des consignes lui enjoignant de se cloîtrer et fuir pour suivre les personnes en évacuation prioritaire ? Quelle est la crédibilité des pouvoirs publics lorsque le chaos s'installe et revêt le caractère de la faillite et de la colère ?

Au vu des remarques de bon sens ci-dessus, les comportements lors du passage du nuage sont sujets à une incertitude d'autant plus grande que l'accident majeur est sévère. Nous considérons qu'il est prudent – dans la restitution des résultats – d'écrire et de dire que les "personnes sont confrontées à" un nuage dont la radioactivité dépasse le seuil de *dose efficace individuelle engagée* qui est commenté. Elles doivent se comporter du mieux qu'elles peuvent – en suivant les recommandations des pouvoirs publiques – pour que l'impact sanitaire effectif sur leur personne soit inférieur à la dose indiquée ; un grand nombre d'entre elles peuvent s'y conformer, d'autres pas, et il semble vain de faire un pronostic plus précis lorsque les sentiments de faillite, de peur et de colère menacent de se liguier en force du chaos.

*(f) Populations touchées : évaluation du nombre de personnes soumises à une dose efficace individuelle engagée en mSv*

Concernant la prise en compte de la radioactivité des sols contaminés, l'estimation de la *dose efficace individuelle engagée* prend en compte l'exposition externe au rayonnement du sol et est limitée à une année, en intégrant la décroissance de la radioactivité durant cette période. Nous avons suivi la recommandation de l'ENSI qui préconise un facteur *indoor* (intérieur) de 0,4 (IFSN 2009, 67). Le facteur est pertinent pour les adultes qui passent l'essentiel de leur temps à l'extérieur pour raison professionnelle, ou pour un motif personnel. Ce choix méthodologique aurait tendance à *surévaluer* le nombre de personnes contaminées parmi celles qui transitent du domicile au lieu de travail en voiture, d'un garage sous-terrain à l'autre. Mais il reste pertinent pour informer le public des dangers d'une exposition prolongée à l'extérieur, dont les enfants pour qui il est naturel de jouer à même le sol.

Comme l'évaluation de la contamination des sols est limitée à une année – alors qu'elle se poursuit au-delà – il n'est pas certain que le nombre de "*personnes potentiellement confrontées*" à une dose égale ou supérieure à la dose individuelle indiquée est surévalué pour ce qui concerne les sols.

*(g) Populations touchées : hypothèses sur l'évacuation des personnes résidant en zone de sols radioactifs*

Les seuils de dose pour la

Les seuils de dose européens pour une exposition prolongées sont établis entre 20 mSv et 100 mSv, pour donner une marge d'appréciation de la gravité de la situation au pouvoirs publics vraisemblablement.

*(g) Populations touchées : les autres hypothèses quant au calcul de la radioactivité*

D'autres hypothèses sont à prendre en compte dans le calcul de la *dose efficace collective engagée*, puis de l'impact sanitaire exprimé en nombres de maladies graves et de décès radio-induits. Outre le passage du nuage, il faut considérer plusieurs risques, sachant que certains pèsent sur le résultat en sens contraires. Nous énumérons ci-dessous les deux classes d'hypothèses qui sous-tendent le calcul de l'impact sanitaire ; la première catégorie mènerait à surévaluer l'impact sanitaire (1°), cependant que la deuxième tendrait à le sous-évaluer (2°).

- 1° Une surévaluation de l'impact sanitaire par la méthode de la planification de la radioprotection peut être due aux hypothèses suivantes : non-prise en compte des comportements permettant aux individus confrontés à un nuage radioactif de se mettre à l'abri lors de son passage et d'en diminuer considérablement l'impact sanitaire par des mesures simples ; non-prise en compte du lessivage des éléments radioactifs déposés sur les surfaces étanches des centres urbains.
- 2° Les hypothèses suivantes peuvent mener à une sous-évaluation de l'impact sanitaire : les doses efficaces individuelles engagées supérieures à 2000 mSv qui seraient reçues lors du passage du nuage radioactif ne sont pas prises en compte dans le calcul de la dose efficace collective engagée, alors qu'elles pourraient être importantes à plus de 15 km des réacteurs endommagés ; le calcul des doses efficaces individuelles engagées dues à la déposition fait l'hypothèse de l'évacuation durable des populations situées sur des zones où la dose individuelle annuelle n'excède pas 20 mSv (après intégration d'un facteur indoor de 0.4), alors que le seuil pourrait être repoussé à 50 ou 100 mSv par des autorités décidant de limiter le nombre de personnes à reloger dans une autre partie du pays (2013/59/EURATOM, annexe 1, §1) ; la simulation de l'impact de la radioactivité des sols sur la population a été limitée à une année, alors qu'elle se poursuit bien au-delà ; l'inhalation de matières radioactives soulevées du sol par les vents n'est pas calculée ; enfin, l'ingestion de matières radioactives contaminant eau et aliments ne sont pas intégrées dans nos calculs, alors qu'elles pourraient être importantes, voire très importante en cas de hausse des prix des aliments provoquées par les effets des changements climatiques sur les activités agricoles ou tout autre facteur exogène que les politiques publiques ne parviennent pas à anticiper.

Qu'elle serait la résultante des deux classes d'hypothèses ci-dessus ? Les plus et moins se compensent-ils ? Cette question est traitée au point suivant.

#### *(g) Populations touchées : conclusion sur l'influence des comportements*

Malgré l'incertitude incompressible qui entoure plusieurs des hypothèses ci-dessus, le nombre de maladies graves et de décès radio-induits publiés se trouverait dans la zone de vraisemblance des dommages qui seraient causés aux populations par un accident nucléaire majeur

Peut-être ce chiffre devrait-il être réduit d'un quart ou d'un tiers dans une partie des simulations, notamment celles où le nuage radioactif a tendance à s'éloigner du sol et des habitations, ce qui réduit considérablement l'ampleur de l'accident et limite la probabilité d'une réponse comportementale de type chaotique.

En tous les cas, prévenir la survenue d'un pareil événement implique de figurer, par un ordre de grandeur documenté, l'événement que l'on souhaite éviter, et c'est ce que nous avons faits.

#### *(h) Système d'information géographique*

La gestion des cartes n'a pas posé de problèmes significatifs. Toutefois, comme nous y avons observé un nombre peu vraisemblable d'habitants dans le voisinage immédiats de certaines centrales nucléaires, le risque d'un biais nous a poussé à limiter, dans le calcul de l'impact sanitaire, les niveaux de la dose individuelle à  $\leq 2000$  mSv ; cette mesure évite en grande partie le problème et elle est cohérente avec le calcul de l'impact sanitaire selon une approche stochastique.

## **4.2 Effets sur la santé**

#### *(a) Estimation du nombre de victimes d'un accident nucléaire*

Les estimations du nombre de victimes sont sujettes à controverse, dans le cas d'accidents majeurs de centrales nucléaires déjà établis, comme à Tchernobyl (Claussen & Rosen 2016). Mais elles pourraient s'avérer vraies dans les situations hypothétiques telles que décrites dans la présente étude.

Outre les difficultés liées à la caractérisation du terme source, aux conditions météorologiques variables et aux conditions géographiques complexes, les grandes incertitudes proviennent des perceptions diamétralement opposées des effets sanitaires non cancéreux induits par les rayonnements. Les politiciens et les économistes ont des points de vue différents de ceux des médecins sur les questions de santé. Cependant, les aspects liés à la sécurité de la population doivent avant tout reposer sur des connaissances médicales scientifiquement fondées. Au cours des trente années qui se sont écoulées depuis l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl – soit plus d'une génération humaine – l'OMS n'a pas procédé à une évaluation systématique et adéquate de la santé des millions d'habitants des régions radio-contaminées. C'est pourquoi les milliers de rapports établis au niveau des communautés, des districts ou des pays, ainsi que leurs analyses détaillées (Yablokov et al. 2009 : 58-160), sont d'autant plus importants. Si l'OMS adopte ensuite une position rétrospective sur les innombrables effets non cancéreux sur la santé après la catastrophe de Tchernobyl, cela ne peut pas satisfaire aux critères scientifiques (OMS 2006). La prétendue amélioration des rapports, invoquée pour expliquer l'augmentation massive et évidente des problèmes de santé, n'est pas une explication suffisamment valable.

L'UNSCEAR adopte une position similaire pour les effets sanitaires radio-induits en général et même pour les cancers radio-induits (pour lesquels des BME sont établis), arguant que l'excès futur de cancers dus aux rayonnements après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima ne serait pas statistiquement discernable (UNSCEAR 2013, 77-79)<sup>22</sup>.

Selon la perspective du code d'éthique des médecins, il est injuste d'écarter un grand nombre de victimes en se basant sur l'argument que leur occurrence semble être diluée à grande échelle (en comparant le nombre de personnes affectées aux millions de personnes radio-contaminées). En outre, la "dilution" n'est pas un argument puisque les personnes proches de la source d'un accident nucléaire majeur auront entre 10 %, 20 %, voire un pourcentage de risque plus élevé de contracter une maladie maligne ou cardiovasculaire.

Il est bien connu qu'un cas de cancer individuel ne peut pas être lié directement aux rayonnements ionisants en tant que facteur causal lorsque les effets sont stochastiques. Cependant, cela n'invalide pas l'observation

---

<sup>22</sup> "On ne s'attend pas à ce qu'une augmentation générale, liée aux rayonnements, de l'incidence des effets sur la santé parmi la population exposée soit perceptible par rapport au niveau de référence" UNSCEAR 2013, 77-79.

d'un lien statistique à l'échelle d'une population radio-contaminée. C'est certainement le cas pour les patients atteints de cancer dans la cohorte des survivants de la bombe nucléaire (Ozasa et al. 2012, 229-243) au Japon, qui représente l'épine dorsale des concepts actuels de calcul du risque de rayonnement – selon des observations récentes, même dans la gamme des faibles doses (Grant 2017, 515-537).

#### *(b) Points forts de l'évaluation de l'impact sur la santé*

- 1° La présentation de trois modèles de risque différents concernant les effets radio-induits sur la santé pourrait permettre de mieux comprendre les différents points de vue. Toutefois, les estimations de l'OMS/UNSCEAR portant uniquement sur le cancer radio-induit montrent déjà les effets dévastateurs sur la santé de dizaines de milliers de personnes affectées par un éventuel accident majeur dans une centrale nucléaire. Ces estimations pourraient déjà alerter les autorités responsables et les inciter à réviser rapidement les mesures de radioprotection très insuffisantes.
- 2° L'intégration des maladies cardiovasculaires dans l'évaluation des risques permet une évaluation un peu plus large de l'incidence des effets sanitaires non malins radio-induits mettant en jeu le pronostic vital.
- 3° D'un point de vue médical, il est impératif de prendre en compte non seulement le cancer, mais aussi d'autres effets sanitaires non cancéreux, tels que les risques pour la reproduction, dans les estimations des risques, même si seule une approche semi-quantitative semble possible. Cela se justifie par le nombre considérable de systèmes et de fonctions du corps humain affectés par les rayonnements ionisants. Il semble utile d'avertir les autorités non médicales et la population générale des risques liés aux rayonnements, bien connus des médecins depuis plus de 60 ans (Stewart et al. 1956, 447).

#### *(c) Lacunes de l'évaluation de l'impact sur la santé*

- 1° L'ingestion par la nutrition et l'ingestion d'eau ainsi que la remise en suspension par inhalation et irradiation externe n'ont pas été prises en compte.
- 2° Cette étude n'a pas pris en compte un éventuel scénario "optimal" de gestion des urgences qui aurait clairement un effet individuel de réduction des doses. Toutefois, une estimation significative du nombre de victimes avec prise en compte de l'évacuation correspond vraisemblablement à un scénario "chaotique" en cas d'accident nucléaire majeur en France.
- 3° L'objectif de cette étude étant de donner une estimation de l'ordre de grandeur des victimes radio-induites à la suite d'un accident nucléaire majeur, des entités distinctes telles que le cancer de la thyroïde ou la leucémie n'ont pas été traitées.
- 4° Cette étude ne tient pas compte des aspects liés au sexe, ni ne calcule spécifiquement les risques pour les enfants, qui sont beaucoup plus radiosensibles que les adultes.
- 5° En outre, les effets sur la santé couverts par l'étude s'expliquent par les effets directs des rayonnements ionisants. D'autres aspects sanitaires importants tels que la radiophobie, les effets sociaux, les avortements provoqués, les difficultés d'adaptation psychologique aux énormes changements économiques et sociétaux provoqués par un accident nucléaire majeur n'ont pas pu être évalués dans cette étude car ils sont tous une conséquence indirecte de la propriété spécifique d'un accident nucléaire : La radio-contamination extrêmement intrusive, presque illimitée dans le temps et dans l'espace.
- 6° Depuis la publication de la première version de cette étude (Piguet 2019), une mise à jour de l'étude INWORK (Richardson 2015) a été publiée (Richardson 2023). Celle-ci confirme pleinement les résultats obtenus jusqu'à présent. Mais en plus, la mise à jour conclut de manière remarquable que le risque par unité de dose de rayonnement pour le cancer solide était plus important dans les analyses limitées à la gamme des faibles doses (0-100 mGy). L'étude trouvait que « *l'estimation sommaire de l'excès de taux relatif de mortalité par cancer solide par Gy est plus importante que les estimations actuellement utilisées pour la radioprotection, et certaines données suggèrent une pente plus raide pour l'association dose-réponse dans l'intervalle des faibles doses que dans l'intervalle des doses totales.* » Selon les auteurs de l'update de l'étude INWORK (Richardson 2023), ces résultats « *peuvent contribuer à renforcer la protection contre les rayonnements, en particulier pour les expositions à faible dose qui sont d'un intérêt primordial dans les contextes médicaux, professionnels et environnementaux actuels.* ». En raison de cette mise à jour nous devons également partir du principe que les facteurs de risque appliqués (EAR, EER) sont probablement sous-estimés dans notre étude présente.

### 4.3 Évacuation préventive et évacuation à long terme

#### (a) Évacuation préventive

L'évacuation préventive vise à empêcher les personnes de recevoir une dose efficace individuelle engagée  $\geq 100$  mSv. Elle doit protéger les personnes les plus fragiles qui ne pourraient pas rester en dessous de ce seuil en restant à leur domicile par exemple. En d'autres termes, une telle mesure doit être sélective. Le problème est qu'une situation d'alerte pour un accident nucléaire majeur potentiellement à venir pourrait dégénérer en un vaste embouteillage car les différents comportements de panique, par exemple des parents qui se précipiteraient à l'école de leurs enfants pour les mettre en sécurité, ont le potentiel de créer un chaos indescriptible.

#### (b) Évacuation à long terme

Pour évaluer le nombre de personnes à évacuer, nous nous sommes basés sur le critère d'une déposition radioactive conduisant à trois limites/scénarios possibles, tels que définis dans la directive 2013/59/EURATOM du Conseil : 20 mSv, 50 mSv et 100 mSv par an. Nous avons montré que dans de nombreuses situations, plusieurs centaines de milliers de personnes devraient être relogées, toutes devant être hébergées en dehors de la zone d'évacuation pendant au moins un an.

Cependant, pour mieux quantifier les personnes à reloger, des recherches complémentaires sont nécessaires pour simuler plus précisément le devenir de la déposition radioactive après un accident INES de niveau 7. Le type de couverture du sol, les phénomènes de lixiviation, l'impact de la lixiviation sur les aquifères et les habitants qui en dépendent, ainsi que l'infiltration de la radioactivité dans les habitations et les lieux de travail devraient être pris en compte.

### 4.4 Déposition radioactive sur les sols et plus particulièrement sur les cultures et les pâturages

Selon Lelieveld et al. (2012, p. 4251), la déposition de  $3,7E+04$  Bq/m<sup>2</sup> de Cs-137 provenant de simulations sur plusieurs centrales nucléaires européennes recouvrait en moyenne 165 000 km<sup>2</sup>. Les résultats d'Eunupri2024b sont moindres, à 105'032 km<sup>2</sup> en moyenne, bien que le seuil soit déterminé légèrement en-dessous de celui l'IRSN,  $3,5E+04$  Bq/m<sup>2</sup> au lieu de  $3,75E+04$ .

La comparaison avec l'étude de l'IRSN de 2007 est instructive.

| Tableau . Surface de la zone d'exclusion et surface de la zone de contamination<br>Selon le critère de l'intervalle en kBq m-2, pour le césium-137 |                       |                      |                          |
|--|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| Sources:   | IRSN 2007,<br>médiane | IRSN 2013<br>médiane | Eunupri 2024b<br>médiane |
| Cs-137, Intervalle (kBq m-2)   | [555, [               | [555, [              | [708, [                  |
| Zone d'exclusion (km^2)  | 13 575                | 1 300                | 3 860                    |
| Cs-137, Intervalle (kBq m-2)   | [37, 555[             | [37, 555[            | [35, 708[                |
| Zone de contaminat° (km^2)   | 49 138                | 18 800               | 90 065                   |
| Cs-137, Intervalle (kBq m-2)   | [37, 555[ + [555, [   | [37, 555[ + [555, [  | [37, 555[ + [555, [      |
| Total zones contaminées (km^2)   | 62 713                | 20 100               | 93 926                   |

Sources : (IRSN 2007, Annexes au rapport DRS n°157, 58 ; IRSN 2013, 40) pour deux rejets distincts d'un même réacteur (2785 MWth) → 900 MWe)  
Les critères de délimitation des zones ne sont pas identiques dans la 3<sup>e</sup> colonne par rapport aux 2 premières colonnes.

Fin provisoire.

V. Annexe. Terme source de type S1 d'un réacteur de 3817 MWth → 1300 MWe, et liste des 'descendants'

| Parent nuclides   | Group | Fraction of the core inventory | Source term Bq  | Half-Life T1/2 s |
|-------------------|-------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| I-129             | 2     | 6.00E-01                       | 6.54E+10        | 4.95E+14         |
| I-131             | 2     | 6.00E-01                       | 2.41E+18        | 6.95E+05         |
| Cs-134            | 3     | 4.00E-01                       | 2.24E+17        | 6.51E+07         |
| Cs-135            | 3     | 4.00E-01                       | 6.08E+11        | 7.26E+13         |
| Cs-136            | 3     | 4.00E-01                       | 9.28E+16        | 1.13E+06         |
| Cs-137            | 3     | 4.00E-01                       | 1.50E+17        | 9.47E+08         |
| Rb-86             | 3     | 4.00E-01                       | 2.26E+15        | 1.61E+06         |
| Sb-124            | 4     | 8.00E-02                       | 2.19E+14        | 5.20E+06         |
| Sb-125            | 4     | 8.00E-02                       | 2.29E+15        | 8.74E+07         |
| Sb-126            | 4     | 8.00E-02                       | 1.66E+14        | 1.07E+06         |
| Sb-127            | 4     | 8.00E-02                       | 2.78E+16        | 3.33E+05         |
| Te-125m           | 4     | 8.00E-02                       | 3.57E+14        | 5.10E+06         |
| Te-127m           | 4     | 8.00E-02                       | 3.58E+15        | 9.42E+06         |
| Te-129m           | 4     | 8.00E-02                       | 2.26E+16        | 2.90E+06         |
| Te-132            | 4     | 8.00E-02                       | 4.50E+17        | 2.82E+05         |
| Ba-140            | 5     | 5.00E-02                       | 3.46E+17        | 1.10E+06         |
| Sr-89             | 5     | 5.00E-02                       | 1.91E+17        | 4.36E+06         |
| Sr-90             | 5     | 5.00E-02                       | 1.32E+16        | 9.19E+08         |
| Ag-108m           | 6     | 2.00E-02                       | 1.42E+08        | 4.04E+09         |
| Ag-110m           | 6     | 2.00E-02                       | 3.10E+14        | 2.16E+07         |
| Ag-111            | 6     | 2.00E-02                       | 4.38E+15        | 6.44E+05         |
| Ru-103            | 6     | 2.00E-02                       | 1.20E+17        | 3.39E+06         |
| Ru-106            | 6     | 2.00E-02                       | 2.97E+16        | 3.18E+07         |
| Tc-99             | 6     | 2.00E-02                       | 9.48E+11        | 6.72E+12         |
| Am-241            | 7     | 3.00E-03                       | 1.23E+12        | 1.36E+10         |
| Am-243            | 7     | 3.00E-03                       | 2.25E+11        | 2.33E+11         |
| Cm-242            | 7     | 3.00E-03                       | 4.59E+14        | 1.41E+07         |
| Cm-243            | 7     | 3.00E-03                       | 4.11E+11        | 8.99E+08         |
| Cm-244            | 7     | 3.00E-03                       | 3.60E+13        | 5.72E+08         |
| Eu-152            | 7     | 3.00E-03                       | 4.41E+10        | 4.21E+08         |
| Eu-154            | 7     | 3.00E-03                       | 1.04E+14        | 2.78E+08         |
| Eu-155            | 7     | 3.00E-03                       | 3.96E+13        | 1.57E+08         |
| Eu-156            | 7     | 3.00E-03                       | 2.18E+15        | 1.31E+06         |
| Nb-93m            | 7     | 3.00E-03                       | 1.20E+09        | 4.29E+08         |
| Nb-94             | 7     | 3.00E-03                       | 6.89E+06        | 6.41E+11         |
| Nb-95             | 7     | 3.00E-03                       | 2.01E+16        | 3.04E+06         |
| Nb-95m            | 7     | 3.00E-03                       | 4.38E+11        | 3.12E+05         |
| Nd-147            | 7     | 3.00E-03                       | 7.89E+15        | 9.49E+05         |
| Pm-147            | 7     | 3.00E-03                       | 1.90E+15        | 8.28E+07         |
| Pm-148            | 7     | 3.00E-03                       | 1.95E+15        | 4.64E+05         |
| Pm-148m           | 7     | 3.00E-03                       | 4.08E+14        | 3.57E+06         |
| Pr-143            | 7     | 3.00E-03                       | 1.85E+16        | 1.17E+06         |
| Sm-147            | 7     | 3.00E-03                       | 1.16E+04        | 3.35E+18         |
| Sm-151            | 7     | 3.00E-03                       | 3.52E+12        | 2.87E+09         |
| Y-91              | 7     | 3.00E-03                       | 1.49E+16        | 5.06E+06         |
| Zr-93             | 7     | 3.00E-03                       | 1.98E+10        | 4.83E+13         |
| Zr-95             | 7     | 3.00E-03                       | 2.01E+16        | 5.52E+06         |
| Ce-141            | 8     | 3.00E-03                       | 1.98E+16        | 2.81E+06         |
| Ce-144            | 8     | 3.00E-03                       | 1.40E+16        | 2.45E+07         |
| Np-237            | 8     | 3.00E-03                       | 3.45E+09        | 6.75E+13         |
| Pu-236            | 8     | 3.00E-03                       | 2.96E+10        | 9.00E+07         |
| Pu-238            | 8     | 3.00E-03                       | 3.12E+13        | 2.77E+09         |
| Pu-239            | 8     | 3.00E-03                       | 3.87E+12        | 7.59E+11         |
| Pu-240            | 8     | 3.00E-03                       | 4.95E+12        | 2.06E+11         |
| Pu-241            | 8     | 3.00E-03                       | 1.33E+15        | 4.54E+08         |
| Pu-242            | 8     | 3.00E-03                       | 2.06E+10        | 1.19E+13         |
| U-234             | 8     | 3.00E-03                       | 1.20E+08        | 7.72E+12         |
| U-235             | 8     | 3.00E-03                       | 3.39E+08        | 2.22E+16         |
| U-238             | 8     | 3.00E-03                       | 3.66E+09        | 1.41E+17         |
| <b>TOTAL (Bq)</b> |       |                                | <b>4.21E+18</b> |                  |

1\* Fractions are published by IRSN (2013a, 77) and the core inventory is edited by (EDF 2008).

2\* The present study doesn't care for parent rare gas.

| Parent nuclides | Progeny | Progeny's T1/2 (s) | Progeny's yield |
|-----------------|---------|--------------------|-----------------|
| I-131           | Xe-131m | 1.02E+06           | 1.18E-02        |
| CS-137          | Ba-137m | 1.53E+02           | 9.44E-01        |
| SB-125          | Te-125m | 4.96E+06           | 2.31E-01        |
| SB-127          | Te-127  | 3.37E+04           | 8.23E-01        |
| SB-127          | Te-127m | 9.42E+06           | 1.77E-01        |
| TE-127M         | Te-127  | 3.37E+04           | 9.76E-01        |
| TE-129M         | Te-129  | 4.18E+03           | 6.30E-01        |
| TE-129M         | I-129   | 4.96E+14           | 3.70E-01        |
| TE-132          | I-132   | 8.26E+03           | 1.00E+00        |
| BA-140          | La-140  | 1.45E+05           | 1.00E+00        |
| SR-90           | Y-90    | 2.31E+05           | 1.00E+00        |
| Ag-108m         | Ag-108  | 1.42E+02           | 8.70E-02        |
| Ag-110m         | Ag-110  | 2.46E+01           | 1.36E-02        |
| RU-103          | Rh-103m | 3.37E+03           | 9.88E-01        |
| RU-106          | Rh-106  | 2.98E+01           | 1.00E+00        |
| AM-241          | Np-237  | 6.77E+13           | 1.00E+00        |
| AM-243          | Np-239  | 2.04E+05           | 1.00E+00        |
| CM-242          | Pu-238  | 2.77E+09           | 1.00E+00        |
| CM-243          | Pu-239  | 7.61E+11           | 9.98E-01        |
| CM-243          | Am-243  | 2.33E+11           | 2.40E-03        |
| CM-244          | Pu-240  | 2.07E+11           | 1.00E+00        |
| Eu-152          | Gd-152  | 3.41E+21           | 2.79E-01        |
| NB-95M          | Nb-95   | 3.02E+06           | 9.44E-01        |
| ND-147          | Pm-147  | 8.28E+07           | 1.00E+00        |
| Pm-147          | Sm-147  | 3.35E+18           | 1.00E+00        |
| Pm-148          | Sm-148  | 2.21E+23           | 1.00E+00        |
| Pm-148m         | Sm-148  | 2.21E+23           | 9.58E-01        |
| Pm-148m         | Pm-148  | 4.64E+05           | 4.20E-02        |
| ZR-93           | Nb-93m  | 5.09E+08           | 9.75E-01        |
| ZR-95           | Nb-95   | 3.02E+06           | 9.89E-01        |
| ZR-95           | Nb-95m  | 3.12E+05           | 1.08E-02        |
| CE-144          | Pr-144  | 1.04E+03           | 9.90E-01        |
| CE-144          | Pr-144m | 4.32E+02           | 9.77E-03        |
| NP-237          | Pa-233  | 2.33E+06           | 1.00E+00        |
| PU-236          | U-232   | 2.18E+09           | 1.00E+00        |
| PU-238          | U-234   | 7.75E+12           | 1.00E+00        |
| PU-239          | U-235m  | 1.56E+03           | 9.99E-01        |
| PU-239          | U-235   | 2.22E+16           | 6.00E-04        |
| PU-240          | U-236   | 7.40E+14           | 1.00E+00        |
| PU-241          | Am-241  | 1.36E+10           | 1.00E+00        |
| PU-241          | U-237   | 5.83E+05           | 2.45E-05        |
| PU-242          | U-238   | 1.41E+17           | 1.00E+00        |
| U-234           | Th-230  | 2.38E+12           | 1.00E+00        |
| U-235           | Th-231  | 9.19E+04           | 1.00E+00        |
| U-238           | Th-234  | 2.08E+06           | 1.00E+00        |

Source: (EPA 2019a, Table A-1. Nuclides of ICRP Publication 107 ordered by atomic number)

Source of Table A.1.: (EDF 2008) EDF, SEPTEN. 2008. EPS N2 1300 MWe post VD2: Évaluation probabiliste des conséquences radiologiques "court terme" à 7 jours des catégories de rejets d'intérêt. Annexe 2 : Inventaire cœur et termes sources associés aux catégories de rejets. p. 33.

## VI. Lexique

|                |   |
|----------------|---|
| Bq - Becquerel | Activité d'une matière radioactive, nombre de noyaux se désintégrant par seconde  |
| DCE            | Dose efficace engagée   |
| DEIE           | Dose efficace individuelle engagée (calculée en mSv)  |
| DECE           | Dose efficace collective engagée (calculée en persSv)   |
| MCV            | Maladie cardiovasculaire  |
| IRSN           | Institut de radioprotection et sécurité nucléaire (France)  |
| IFSN           | Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (Suisse)   |
| EAR            | Acronyme anglais désignant un facteur : Excès de risque absolu  |
| ERR            | Acronyme anglais désignant un facteur : Risque relatif excédentaire   |
| Gy - Gray      | Dose d'énergie émise par le rayonnement, 1 Gy = 1 J/kg-1  |
| RI             | Rayonnement ionisant  |
| AIEA           | Agence internationale de l'énergie atomique   |
| IAEA           | International Atomic Energy Agency  |
| CIPR           | Commission internationale de protection radiologique  |
| persSv         | Unité de compte pour le calcul de la dose efficace collective engagée ; elle se calcule comme suit : nombre de personnes (nbr) x DEIE (mSv) / 1000 = persSv |
| Sv - Sievert   | Unité de mesure de la dose de rayonnement ; la limite officiellement considérée sans risque est : 0,001 Sv (1 mSv) par an                                   |
| UNSCEAR        | Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants  |
| OMS            | Organisation mondiale de la santé   |

## VII. Références

- Azizova, T., Briks, K., Bannikova, M., Grigoryeva, E. 2019. Hypertension Incidence Risk in a Cohort of Russian Workers Exposed to Radiation at the Mayak Production Association Over Prolonged Periods. *Hypertension* (2019;73: 1174–1184)  
<https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/HYPERTENSIONAHA.118.11719>
- Baklanov, A. Sørensen, J.H. 2001. Parameterisation of Radionuclide Deposition in Atmospheric Long-Range Transport Modelling. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 26 (10): 787–799.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464190901000879>
- Becker O., Besnard M., Boilley D., Lyman E., MacKerron G., Marignac Y., Zerbib J-C. 2017. La sécurité des réacteurs nucléaires et des piscines d’entreposage du combustible en France et en Belgique, et les mesures de renforcement associées, Communiqué de presse du Rapport confidentiel commandité par Greenpeace, octobre 2017. 5 p.  
[https://cdn.greenpeace.fr/site/uploads/2017/10/Dossier-de-presse\\_octobre2017.pdf](https://cdn.greenpeace.fr/site/uploads/2017/10/Dossier-de-presse_octobre2017.pdf)
- BEIR VII, National Research Council. 2006a. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: Phase 2. The National Academies Press. ISBN 978-0-309-09156-5.  
[http://www.philrutherford.com/Radiation\\_Risk/BEIR/BEIR\\_VII.pdf](http://www.philrutherford.com/Radiation_Risk/BEIR/BEIR_VII.pdf)
- BEIR VII. National Research Council 2006b. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR VII Phase 2. Report in brief, p. 1-4.  
[http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/beir\\_vii\\_final.pdf](http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/beir_vii_final.pdf)
- Bennett, B.G. 1995. Exposures from Worldwide Releases of Radionuclides. [In:] Proceedings of an International Atomic Energy Agency Symposium on the Environmental Impact of Radioactive Releases. Vienna, May 1995. IAEA-SM-339/185: 117–126.  
[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/035/27035333.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/035/27035333.pdf)
- Bennett, B.G. 1996. Assessment by Unsear of worldwide doses from the Chernobyl accident. [In:] One decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the accident. European Commission, IAEA, WHO, p. 3-12.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1001\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1001_web.pdf)
- Berrington de Gonzalez, A., Daniels, R. D., et al. 2020. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Rationale and Framework for the Monograph and Overview of Eligible Studies. *JNCI Monographs*, Volume 2020, Issue 56, Oxford, July 2020, Pages 97–113,  
<https://academic.oup.com/jncimono/article/2020/56/97/5869935?searchresult=1>
- BFE. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie. 2018. Faktenblatt zu den Teilrevisionen der Kernenergieverordnung. 7. Dezember 2018. 5 p.  
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/55026.pdf>
- Bosch de Basea Gomez M., Thierry-Chef I., Harbron R et al. 2023. Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults. *Nature Medicine* 29, pages 3111–3119.  
<https://doi.org/10.1038/s41591-023-02620-0>
- Bochud François, Gavillet Didier, Majerus Patrick. 2023. Rapport d’accompagnement : Postulat 18.4107 : Valeurs limites de dose pour les installations nucléaires, le rayonnements radioactif et la radioprotection. Traduction de l’Office fédéral de l’énergie à partir du texte original anglais faisant foi. Version : 01.06 2023. 4 p.  
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/85125.pdf>
- Cardis, E., Anspaugh, L., Ivanov, V.K., Likhtarev, K., Mabuchi, A.E., Okeanov, A.E., Prisyazhniuk, K. 1996. One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident. Proceedings of an International Conference Vienna. 8-12 April 1996, p.241-271.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1001\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1001_web.pdf)

- Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M. et al. 2005. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. IARC Lyon, BMJ 9 July 2005: Vol. 331; p.77-80.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC558612/>
- CNTRL. Centre national des ressources textuelles et lexicales. 2024. Consulté février 2024.  
<https://www.cnrtl.fr/etymologie/accident>
- Claussen A., Rosen, A. 2016. Report of International Physicians for the Prevention of Nuclear War and Physicians for social responsibility: 30 years living with Chernobyl, 5 years living with Fukushima: Health effects of the nuclear disasters in Chernobyl and Fukushima.  
[https://ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Tschernobyl/Report\\_TF\\_3005\\_en\\_17\\_screen.pdf](https://ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Tschernobyl/Report_TF_3005_en_17_screen.pdf)
- Conseil fédéral. 2023. Analyses des défaillances dans les installations nucléaires et rayonnements ionisants à faibles doses : Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.4107 de la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil des États. Réponse du 8 décembre 2023. Confédération Suisse. 13 p.  
<https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/85124.pdf>  
<https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2018/20184107/Bericht%20BR%20F.pdf>
- Conseil fédéral. 2024. Avis du Conseil fédéral à l'interpellation Kälin 23.4377 du Conseil National : Risques liés aux rayonnements ionisants de faible intensité. Nouvelles connaissances scientifiques. Travail parlementaire. Recherche Curia Vista. 31 janvier 2024. Avis sur la question 2.  
<https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20234377>
- Copernicus. Corine Land Cover, CLC 2018.  
<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>
- Daniels, R. D., Kendall, G. M., Thierry-Chef, I. et al. Strengths and Weaknesses of Dosimetry Used in Studies of Low-Dose Radiation Exposure and Cancer. JNCI Monographs, Volume 2020, Issue 56, Oxford, July 2020, Pages 114–132.  
<https://academic.oup.com/jncimono/article/2020/56/114/5869933?searchresult=1>
- Darby, S., Hill, D. Auvinen, A. et al. 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Brit Med J. 2005 Jan 29, 330:223.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15613366>
- DDPS. Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports. 2024. 'Message Sur l'armée 2024'. Confédération suisse. 14 février 2024. réf 24.025. 90 p.  
<https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2024/563/fr>
- Diplomatic Conference on the Reaffirmation and Development of International Humanitarian Law applicable in Armed Conflicts. 1977. 'Protocole Additionnel Aux Conventions de Genève Du 12 Août 1949 Relatif à La Protection Des Victimes Des Conflits Armés Internationaux (Protocole I), 8 Juin 1977.' n.d. Accessed 20 February 2024.  
<https://ihl-databases.icrc.org/fr/ihl-treaties/api-1977>
- Doll, R. 1995. Hazards of ionising radiation: 100 years of observations on man. British Journal of Cancer. 1995 Dec, 72(6), p.1339–1349.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2034083/>
- Dorfman, Paul. 2023. 'Civil Nuclear Security Risk in an Increasingly Unstable World - NCT CBNW'. 24 July 2023.  
<https://nct-cbnw.com/civil-nuclear-security-risk-in-an-increasingly-unstable-world/>
- Draxler, R., Rolph, G.D. 2012. Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. Journal of Geophysical Research (Atmospheres). VOL. 117, D05107.  
[https://www.researchgate.net/publication/258662914\\_Evaluation\\_of\\_the\\_Transfer\\_Coefficient\\_Matrix\\_TCM\\_approach\\_to\\_model\\_the\\_atmospheric\\_radionuclide\\_air\\_concentrations\\_from\\_Fukushima](https://www.researchgate.net/publication/258662914_Evaluation_of_the_Transfer_Coefficient_Matrix_TCM_approach_to_model_the_atmospheric_radionuclide_air_concentrations_from_Fukushima)

- Draxler, R., Arnold, D., Chino, et al. 2015. World Meteorological Organization's Model Simulations of the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 139 (January), p.172–184.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X13002142>
- Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A. et al. 2018. HYSPLIT4 User's Guide. Air Resources Laboratory.  
[https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit\\_user\\_guide.pdf](https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf)
- EDF, SEPTEN. 2004a. Étude des conséquences radiologiques « court terme » et « long terme » en accident grave pour les termes sources réévalués S'4 et S'3 - palier 900 MWe, Note d'étude ENTEAG040273, A1, 34 p. (Non publié)
- EDF, SEPTEN. 2008. EPS N2 1300 MWe post VD2: Évaluation probabiliste des conséquences radiologiques “court terme” à 7 jours” des catégories de rejets d'intérêt. Annexe 2 : Inventaire cœur et termes sources associés aux catégories de rejets. p. 40 p. (Non publié)
- EDF. 2023. 4e réexamen périodique des centrales de 1300 MWe: Synthèse de la note de réponse aux objectifs. Octobre 2023. 18 p.  
<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-43308-note-reponse-objectifs-edf-rp4-1300-mw.pdf>
- Edison, T. A., 1896. 'Effect of X-rays upon the eye', *Nature* Vol. 53, p. 421.
- ENSI, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate. 2009. G14 Calcul de l'exposition aux radiations ionisantes dans l'environnement due à l'émission de substances radioactives par les installations nucléaires. ENSI FR, Swiss Confederation. 21 December 2009, 21 december 2009.  
<https://www.ensi.ch/fr/documents/directive-ifs-n-g14-francais/>.
- ENSI, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate. 2020. Stellungnahme des ENSI zur Studie “Modeling of a Major Accident in Five Nuclear Power Plants From 365 Meteorological Situations in Western Europe and Analysis of the Potential Impacts on Populations, Soils and Affected Countries” des Institut Biosphère. Bern. 18 p.  
<https://www.ensi.ch/de/dokumente/stellungnahme-des-ensi-zur-studie-des-instituts-biosphere/>
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2019a. Table A-1. Nuclides of ICRP Publication 107 ordered by atomic number. Federal Guidance Report No. 15: External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Bellamy, Dewji, Leggett, Hiller, Veinot, Manger, Eckerman, Ryman, Easterly, Hertel, Stewart.  
<https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-15-external-exposure-radionuclides-air-water-and-soil>
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2019b. Table 4-1. Reference person effective dose rate coefficients for ground surface. Federal Guidance Report No. 15: External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Bellamy, Dewji, Leggett, Hiller, Veinot, Manger, Eckerman, Ryman, Easterly, Hertel, Stewart.  
<https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-15-external-exposure-radionuclides-air-water-and-soil>
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2019c. Table 4-6. Reference person effective dose rate coefficients for air submersion. Federal Guidance Report No. 15: External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Bellamy, Dewji, Leggett, Hiller, Veinot, Manger, Eckerman, Ryman, Easterly, Hertel, Stewart.  
<https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-15-external-exposure-radionuclides-air-water-and-soil>
- European Heart Network. European Cardiovascular Disease Statistics. 2017.  
<http://www.ehnheart.org/cvd-statistics/cvd-statistics-2017.html>
- European Union. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom  
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>

- Fairlie, I., Sumner, D. 2006. The Other Report On Chernobyl - an independent scientific evaluation of the health-related effects of the Chernobyl nuclear disaster with critical analyses of recent IAEA/WHO report. April 6, 2005, p. 5.  
<http://cricket.biol.sc.edu/chernobyl/papers/torch.pdf>
- Gaertner, J., Canavan, K. True, D. 2008. Safety and Operational Benefits of Risk-Informed Initiatives. An EPRI White Paper, Electric Power Research Institute. February 2008.  
[http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/SectorPages/Portfolio/Nuclear/Safety\\_and\\_Operational\\_Benefits\\_1016308.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/SectorPages/Portfolio/Nuclear/Safety_and_Operational_Benefits_1016308.pdf)
- Giles, D., Hewitt, D., Stewart, A. et al. 1956. Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in Utero. Preliminary Communication, Volume 268, ISSUE 6940, P447, September 01, 1956.  
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(56\)91923-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(56)91923-7/fulltext)
- Gillies, M., Richardson, D.B., Cardis, E. et al. 2017. Mortality from Circulatory Diseases and other Non-Cancer Outcomes among Nuclear Workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS). *Radiat Res.* 2017; 188(3), p: 276–290.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28692406>
- Grant, E.J., Brenner, A. Sugiyama, et al. 2017. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. *Radiation Research*, 187(5), p.513–537.  
<https://bioone.org/journals/radiation-research/volume-187/issue-5/RR14492.1/Solid-Cancer-Incidence-among-the-Life-Span-Study-of-Atomic/10.1667/RR14492.1.full>
- Guglielmelli, A., Castelluccio, D.M., Rocchi, F. 2016. Methodological Aspects for the Evaluation of the Radiological Impact of Severe Nuclear Accidents: Codes, Numerical Examples and Countermeasures. September 2016.  
[https://www.researchgate.net/publication/309391537\\_Methodological\\_aspects\\_for\\_the\\_evaluation\\_of\\_the\\_radiological\\_impact\\_of\\_severe\\_nuclear\\_accidents\\_codes\\_numerical\\_examples\\_and\\_countermeasures](https://www.researchgate.net/publication/309391537_Methodological_aspects_for_the_evaluation_of_the_radiological_impact_of_severe_nuclear_accidents_codes_numerical_examples_and_countermeasures)
- Guntay, S., Powers, D.A., Devell, L. 1997. "The Chernobyl reactor accident source term: Development of a consensus view", in: *One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident – Volume 2*. International Conference held in Vienna, 8-12 April 1996, pp 183-193.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_964v2\\_prn.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_964v2_prn.pdf)
- Ha-Duong, M., Journé, V. 2014. Calculating Nuclear Accident Probabilities from Empirical Frequencies. *Environment Systems and Decisions* 34 (2), p.249–58.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01018478/document>
- Hauptmann, M., Daniels, R. D., Cardis, E., et al. 2020. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis, *JNCI Monographs*, Volume 2020, Issue 56, July 2020, Pages 188–200.  
<https://academic.oup.com/jncimono/article/2020/56/188/5869934?searchresult=1>
- Hauptmann M., Byrnes G., Cardis E. et al. 2023. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. *Lancet Oncol*; 24(1):45-53.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36493793/>
- Hoffmann W., Schmitz-Feuerhake, I., Hinrichsen K. et al. BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes : Deutscher Bundestag, Ausschussdrucksache. March 24, 2017.  
[https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/atomkraft/atomkraft\\_strahlenschutzgesetz\\_stellungnahme.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/atomkraft_strahlenschutzgesetz_stellungnahme.pdf)
- IAEA, International Atomic Energy Agency. 2006. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment", 166 p.  
<https://www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/7382/Environmental-Consequences-of-the-Chernobyl-Accident-and-their-Remediation-Twenty-Years-of-Experience>

IAEA. International Atomic Energy Agency. (year not specified) Global Cycle. Chapter 6: Equations of radioactive decays and growth, pp. 75-88.  
[http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global\\_cycle/vol%20I/cht\\_i\\_06.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/vol%20I/cht_i_06.pdf)

IAEA. International Atomic Energy Agency. 2003. Derivation of Exclusion Levels. Vienna. 45 p.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML0427/ML042710133.pdf>

IAEA, International Atomic Energy Agency. 2009. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment: Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power. Specific Safety Guide, No. SSG-2.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1428\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1428_web.pdf)

IAEA, International Atomic Energy Agency. 2015. The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 4/5, Radiological Consequences.  
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV4-Web.pdf>

IAEA, International Atomic Energy Agency. 2018. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment: Radiation Protection of the Public and the Environment. General Safety Guide, No. GSG-8.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf)

ICRP, International Commission on Radiological Protection. 2012. ICRP Publication 119, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41  
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20119>

ICRP, International Commission on Radiological Protection. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37, p.2-4.  
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>

ICRP, International Commission on Radiological Protection. 2012. CRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41, p.1-2.  
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>

IPPNW, International Physicians for the Prevention of Nuclear War. 2014. Health effects of ionising radiation: Summary of expert meeting in Ulm, Germany, October 19th, 2013.  
[https://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Health\\_effects\\_of\\_ionising\\_radiation.pdf](https://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Health_effects_of_ionising_radiation.pdf)

IPPNW, International Physicians for the Prevention of Nuclear War. 2016. 30 years living with Chernobyl 5 years living with Fukushima Health effects of the nuclear disasters in Chernobyl and Fukushima.  
[https://ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Tschernobyl/Report\\_TF\\_3005\\_en\\_17\\_screen.pdf](https://ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Tschernobyl/Report_TF_3005_en_17_screen.pdf)

IRSN, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. 2007. Examen de la méthode d'analyse coût-bénéfice pour la sûreté. Annexe du Rapport DSR N°157, Réunion du Groupe permanent chargé des réacteurs nucléaires du 5 juillet 2007.  
[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/089/44089309.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/089/44089309.pdf)

IRSN, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. 2013a. Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance : État des connaissances. Jacquemain Didier, Ahmed Bentaïb, Hervé Bonneville, Gérard Cénérimo, Bernard Clément, François Corenwinder, Michel Cranga, Gérard Ducros, Florian Fichot, Christophe Journeau, Vincent Koundy, Denis Leteinturier, Daniel Magallon, Renaud Meignen, Frédérique Monroig, Georges Nahas, Frédérique Pichereau, Emmanuel Raimond, Jean-Marie Seiler, Bruno Tourniaire, Jean-Pierre Van-Dorsselaere. EDP sciences. 444 p.  
[https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-IRSN/Documents/IRSN\\_Livre-Accidents-fusion-coeur\\_2013.pdf](https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-IRSN/Documents/IRSN_Livre-Accidents-fusion-coeur_2013.pdf)

IRSN, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. 2013b. *Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France*. Pôle radioprotection, environnement, déchets et crise. Service des Situations d'Urgence et d'organisation de Crise. Rapport PRP-CRI/SESUC/2013-00261. 68 p.  
[https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports\\_expertise/IRSN-PRP-CRI-SESUC-2013-00261\\_methodologie-cout-accident.pdf](https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/IRSN-PRP-CRI-SESUC-2013-00261_methodologie-cout-accident.pdf)

- IRSN. 2014. Avis de l'IRSN sur les études associées au réexamen de sûreté VD3-1300 - Pertinence et suffisance des études de risques pour la piscine du bâtiment combustible. Avis IRSN 2014-00143 du 9 avril 2014. <https://www.irsn.fr/avis-aux-autorites/avis-de-lirsn-sur-les-etudes-associees-au-reexamen-de-surete-vd3-1300-8>
- IRSN. Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire. 2022. Valeurs limites de dose pour les installations nucléaires, les rayonnements radioactifs et la radioprotection. Billarand Y., Chambon J.L., Cordelle A., Laurier D., Matahri N., Mathieu A., Wattelle E. Direction des Affaires Européennes et Internationales. Business Unit. Fontenay-aux-Roses. Report n°IRSN/DAEI/BU-DCI/2022-00044. 68 p. <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/85126.pdf>
- Kean, Thomas H, and Lee H Hamilton. 2004. 'Public Statement Release of the 9/11 Commission Report'. National Commission on Terrorist Attacks Upon the United States. <https://govinfo.library.unt.edu/911/report/911Report.pdf>.
- Kendall, G.M., Little, M.P., Wakeford, R. et al. 2013. A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980–2006. *Leukemia*. 2013; 27, p. 3–9. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3998763/>
- Knüsli C., Walter M., Nidecker A., Savary-Borioli B, Franco Cavalli F., Rüegg U. 2022. Risiken ionisierender Niedrigstrahlung ernst nehmen. *Schweizerische Ärztezg*. 103(36). p. 37-39 <https://www.ipnw.ch/wp-content/uploads/2022/11/Risiken-ionisierender-Niedrigstrahlung-SAEZ-2022-103-36-37-39.pdf>
- Körblein, A., Hoffmann, W. 2006. Background Radiation and Cancer Mortality in Bavaria: An Ecological Analysis May 2006 *Archives of Environmental and Occupational Health* 61(3), p.109-114. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17672352>
- Lazyuk, D., Gaiduk, V., Petrovskaya, F. et al. 2005. Cardiovascular diseases among liquidators and populations of Belarus. [In:] *Health of Liquidators (Clean-up Workers), 20 years after the Chernobyl Explosion*. PSR/IPPNW Switzerland. p. 24 -25. <https://www.ipnw.org/pdf/chernobyl-health-of-clean-up-workers.pdf>
- Leadbetter, S.J., Hort, M.C., Jones, A.R. et al. 2015. Sensitivity of the Modelled Deposition of Caesium-137 from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant to the Wet Deposition Parameterisation in NAME. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015 Jan; 139, p. 200-211. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24745690>
- Leelösy, A., Molnar, F., Izsák F., et al. 2014. Dispersion Modeling of Air Pollutants in the Atmosphere: A Review. 2014. *Central European Journal of Geosciences*, September 2014, Volume 6, Issue 3, p. 257–278. <https://link.springer.com/article/10.2478/s13533-012-0188-6>
- Lelieveld, J., Kunkel, D., Lawrence, M. G. 2012. Global Risk of Radioactive Fallout after Major Nuclear Reactor Accidents. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (9), p. 4245. <https://www.atmos-chem-phys.net/12/4245/2012/acp-12-4245-2012.pdf>
- Lenoir, Y. 2016. *La Comédie Atomique – l'histoire occultée des dangers des radiations*. La Découverte, p. 26 - 30 (ISBN – 978-2-7071-8844-1). [https://editions-ladecouverte.fr/catalogue/index-La\\_com\\_\\_die\\_atomique-9782707188441.html](https://editions-ladecouverte.fr/catalogue/index-La_com__die_atomique-9782707188441.html)
- Leuraud, K., Richardson, D.B., Cardis, E. et al. 2015. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematol* 2015; 2, p. 276–281 [http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lanhae/PIIS2352-3026\(15\)00094-0.pdf](http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lanhae/PIIS2352-3026(15)00094-0.pdf)
- Linnet, M. S., Schubauer-Berigan, M. K., Berrington de González, A. 2020. Outcome Assessment in Epidemiological Studies of Low-Dose Radiation Exposure and Cancer Risks: Sources, Level of Ascertainment, and Misclassification. *JNCI Monographs*, Volume 2020, Issue 56, Oxford, July 2020, p.154–175. <https://academic.oup.com/jncimono/article/2020/56/154/5869937?searchresult=1>

Little, M.P., Azizova, T.V., Bazyka, D., et al. 2012. Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks. *Environ Health Perspectives*. 2012; 120: p.1503–1511.  
<https://ehp.niehs.nih.gov/1204982/>

Little M.P. 2016. Radiation and circulatory disease. *Mutation Research*. 2016;770(Pt B). p.299-318.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27919337/>

Little M.P., Wakeford R., Bouffler S.D. et al. 2022. Review of the risk of cancer following low and moderate doses of sparsely ionising radiation received in early life in groups with individually estimated doses. *Environment International* 159. 106983  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106983>

Little M.P., Azizova T.V., Richardson D.B. 2023. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis *BMJ*; 380:e072924  
<https://www.bmj.com/content/380/bmj-2022-072924>

Marignac Y., Besnard M. 2018. *Centrale nucléaire du Bugey: Lacunes et défaillances de la sûreté et risque d'accident associé*. WISE; World Information Service on Energy. Paris. 42 p.

Mathews, J.D. Forsythe, A.V., Brady, Z. et al. 2013. Risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *Brit Med J*. 2013; 346: f2360.  
<http://www.bmj.com/content/346/bmj.f2360>

Mazzei-Abba A., Folly C.L., Kreis C., et al. 2021. External background ionizing radiation and childhood cancer: Update of a nationwide cohort analysis. *J Environ Radioactivity Vol 238–239, 2021, 106734*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X2100206X>

Mazur A. 2019. Hypothetical Accident in Polish nuclear power plant. Worst case scenario for main polish cities. *Scienco. Ecol Chem ENG S*. 2019; 26(1):9-28. DOI: 10.1515/eces-2019-0001.  
<https://content.scienco.com/view/journals/eces/26/1/article-p9.xml?language=en>

Ministry of Energy. 2018. Extract from draft: Energy policy of Poland until 2040 (EPP2040). 8 p.  
[https://www.gov.pl/documents/33372/436746/EN\\_Extract\\_EPP2040.pdf](https://www.gov.pl/documents/33372/436746/EN_Extract_EPP2040.pdf)

Monitor Polski. 2020. Dziennik urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej (Polish Monitor. Official Journal of the Republic of Poland). Poz. 946. 2020-10-16. 68 p.  
<https://monitorpolski.gov.pl/MP/rok/2020>

Moore, George M. 2022. 'How International Law Applies to Attacks on Nuclear and Associated Facilities in Ukraine'. *The Bulletin of the Atomic Scientists*, March.  
<https://thebulletin.org/2022/03/how-international-law-applies-to-attacks-on-nuclear-and-associated-facilities-in-ukraine/>

Muller, H.J. 1928. The Production of Mutations by X-rays. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1928 Septembre, 14(9), p. 714–726.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1085688/pdf/pnas01821-0038.pdf>

National Cancer Institute. 2020. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: Summary bias assessment and meta-analysis, *JNCI Monographs*, Volume 2020, Issue 56, Oxford, July 2020.  
<https://dceg.cancer.gov/news-events/news/2020/low-dose-monograph?s=09>

NEI. 2020. *Nuclear Engineering International*. "Poland signs nuclear deal with USA". 2020-10-26.  
<https://www.neimagazine.com/news/newspoland-signs-nuclear-deal-with-usa-8201218>

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. 2016. Archive of Concatenated Short-Term NCEP Global Forecast System.  
<Ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gfs0p25/>

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018a. FTP Forecast Index.  
<Ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/archives/gfs0p25> (consulted Autumn 2018)

- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018b. Air Resources Laboratory, "Hysplit". <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/> (consulted June 2018)
- Nyagu, A.I. 1994. Medizinische Folgen der Tschernobyl-Havarie in der Ukraine, Chernobyl Ministry of Ukraine, Scientific Center for Radiation Medicine, Academy of Medical Sciences of Ukraine, Pripjat scientific-industrial association, Scientific-Technical Center, Kiev – Chernobyl (Russian).
- Ozasa, K. Shimizu, Y., Suyama, A., et al. 2012. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 2012, Mar; 177(3), p.229-243. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22171960>
- Pascucci-Cahen, L. Patrick, M. 2012. Les rejets radiologiques massifs sont très différents des rejets contrôlés. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), p. 1–9. [https://www.sortirdunucleaire.org/IMG/pdf/IRSN-Eurosafe-FR-cout-accident-nucle\\_aire.pdf](https://www.sortirdunucleaire.org/IMG/pdf/IRSN-Eurosafe-FR-cout-accident-nucle_aire.pdf)
- Pearce, M.S., Salotti, J.A., Little, M.P. et al. 2012. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet* 2012; 380, p. 499–505. [http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(12\)60815-0.pdf](http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(12)60815-0.pdf)
- PGE Group. 2015. The First Polish Nuclear Power Plant Environmental Scoping Report. (PGE\_SCN\_DES\_0001\_EN\_2.0) PGE EJ 1 sp. z o.o: pp. 220. (Consulted December 2020) [https://www.envir.ee/sites/default/files/poola\\_tuumaelektrijaama\\_kmh\\_scoping\\_report\\_2015.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/poola_tuumaelektrijaama_kmh_scoping_report_2015.pdf)
- Piedelievre, J.P., Musson-Genon, L., Bompay, F. 1990. MEDIA—An Eulerian Model of Atmospheric Dispersion: First Validation on the Chernobyl Release. *Journal of Applied Meteorology* 29 (12), p. 1205–1220. [https://www.jstor.org/stable/pdf/26185536.pdf?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/pdf/26185536.pdf?seq=1#page_scan_tab_contents)
- Piguet, Frédéric-Paul. Eckert, Pierre. Knüsli, Claudio. Deriaz, Bastien. Wildi, Walter. Giuliani, Gregory. 2019. "Modeling of a Major Accident in Five Nuclear Power Plants From 365 Meteorological Situations in Western Europe and Analysis of the Potential Impacts on Populations, Soils and Affected Countries". Institut Biosphère. Strategic Study n°2. Final version B, 27 August 2019. 42 p. (EUNUPRI\_2019) [https://institutbiosphere.ch/wa\\_files/EUNUPRI-2019v01.pdf](https://institutbiosphere.ch/wa_files/EUNUPRI-2019v01.pdf)
- Piguet, Frédéric-Paul, Pierre Eckert, and Claudio Knüsli. 2024. 'Réponse de l'Institut Biosphère aux critiques de l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN/ENSI)', Étude stratégique n°5, 10. [https://institutbiosphere.ch/wa\\_files/eunupri2023a-fr.pdf](https://institutbiosphere.ch/wa_files/eunupri2023a-fr.pdf)
- Piguet, Frédéric-Paul, Pierre Eckert, Claudio Knüsli, Hélder Peixoto, and Gregory Giuliani. 2021a. 'Modeling of a Hypothetical Major Nuclear Accident at Tricastin Nuclear Power Plant under 1 096 Meteorological Simulations and Analysis of Its Health Impact'. Institut Biosphère, no. Étude stratégique n°4: 29. [https://institutbiosphere.ch/wa\\_files/Eunupri2021b\\_TRI-en.pdf](https://institutbiosphere.ch/wa_files/Eunupri2021b_TRI-en.pdf)
- Piguet, Frédéric-Paul, Pierre Eckert, Claudio Knüsli, Hélder Peixoto, and Gregory Giuliani. 2021b. 'Modeling of a Hypothetical Major Nuclear Accident in Poland from 1 096 Meteorological Situations and Analysis of Transboundary Environmental Impacts for European Countries and Their Inhabitants'. Institut Biosphère, no. Étude stratégique n°3: 28. [https://institutbiosphere.ch/wa\\_files/eunupri2021a.pdf](https://institutbiosphere.ch/wa_files/eunupri2021a.pdf)
- Pryszazhnyuk, A.Y., Grishtshenko, V.G., Fedorenko, Z.P. et al. 2002. Review of epidemiological finding in the study of medical consequences of the Chernobyl accident in Ukrainian population. [In:] Imanaka T (Ed.), Recent Research Activities on the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia, KURRI-KR-79 (Kyoto University, Kyoto), p. 188–287. <https://pdfs.semanticscholar.org/04ba/3b7994ca15da3f9cce0eb83fe84832b31446.pdf>
- Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.8. <https://www.python.org>
- Rangel, L.E., Lévêque, F. 2012. How Fukushima Dai-ichi core meltdown changed the probability of nuclear accidents? CERNA, MINES ParisTech, Working Paper 12-ME-06, p. 1–17. <http://www.cerna.mines-paristech.fr/Donnees/data07/735-Fukushimal3.pdf>

- Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D. et al. 2015. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* 2015; 351:h5359.  
<http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359>
- Richardson D.B., Leuraud K., Laurier D. et al. 2023. *Brit Med J*. Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): cohort study.  
<https://www.bmj.com/content/382/bmj-2022-074520>
- Sailer, M., Küppers C., Rehm U., Schmidt G. 1990. Ausgewählte Sicherheitsprobleme und Auswirkungen von schweren Unfällen des Kernkraftwerks Mühleberg/Schweiz. Verein Mühleberg unter der Lupe.  
<https://1drv.ms/f/s!AIHpZwGF5Z4AiKVFFMe7cmzslmLKLg>
- Sander, R. 2015. Compilation of Henry's Law Constants (Version 4.0) for Water as Solvent. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, p. 4399–4981.  
<https://www.atmos-chem-phys.net/15/4399/2015/>
- Scherb, H., Kusmierz, R., Voigt, K. 2016. Human sex ratio at birth and residential proximity to nuclear facilities in France. *Reprod Toxicol*, 2016 April, 60, p. 104-111.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26880420>
- Schubauer-Berigan, M. K., Berrington de González, A., Cardis, E. et al. 2020. Evaluation of Confounding and Selection Bias in Epidemiological Studies of Populations Exposed to Low-Dose, High-Energy Photon Radiation. *JNCI Monographs*, Volume 2020, Issue 56, Oxford, July 2020, Pages 133–153.  
<https://academic.oup.com/jncimono/article/2020/56/133/5869936?searchresult=1>
- Seibert, P., Arnold, D., Arnold, N., Gufler, K. et al. 2013. Flexrisk-Flexible Tools for Assessment of Nuclear Risk in Europe: Final Report. BOKU-Met Report 23, p. 116.  
[https://meteo.boku.ac.at/report/BOKU-Met\\_Report\\_23\\_PRELIMv2\\_online.pdf](https://meteo.boku.ac.at/report/BOKU-Met_Report_23_PRELIMv2_online.pdf)
- Seibert P., Hofman R., Philipp A. 2014. Possible Consequences of Severe Accidents at the Proposed Nuclear Power Plant Site Lubiatowo near Gdańsk, Poland. Final Report from March 4, 2014. 2nd edition, July 2014. University of Vienna, Department of Meteorology and Geophysics, Vienna, Austria. 33 p.  
[http://www.univie.ac.at/theoret-met/flexrisk\\_pl/en/flexrisk\\_pl\\_report\\_v2.pdf](http://www.univie.ac.at/theoret-met/flexrisk_pl/en/flexrisk_pl_report_v2.pdf)
- Sholly S., Müllner N., Arnold N., Gufler K. 2014. Source Terms for Potential NPPs at the Lubiatowo Site, Poland. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna. 34 p.  
[http://www.risk.boku.ac.at/download/pub/2014/ISR\\_report\\_source\\_terms\\_poland.pdf](http://www.risk.boku.ac.at/download/pub/2014/ISR_report_source_terms_poland.pdf)
- Shore, R.E, Beck, H.L., Boice, J.D. et al. 2018. Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *Journal of Radiological Protection*, Volume 38, Number 3.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/aad348/meta>
- Sipyagina, A.E., Baleva, L.S., Karakhan, N.M. et al. 2015. Role of Postradiation Genome Instability in Evaluating the Development of Radiation-Determined Pathology in Children After the Chernobyl. *AASCIT Journal of Medicine* 2015; 1(2), p. 18-22.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/1641/89f2913af6572c94e7e0647b10e1b1fea274.pdf>
- Sornette, D., Maillart, T., Kröger, W. 2013. Exploring the Limits of Safety Analysis in Complex Technological Systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 6, December 2013, p. 59-66.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420913000253>
- Sperling, K, et al. 1987. Gemeinschaftsstudie zur saisonalen und regionalen Häufigkeit pränatal diagnostizierter Chromosomenanomalien für die Bundesrepublik Deutschland einschl. Berlins im Jahre 1986. *Ann. Univ. Sarah. Med. Suppl.* 7 (1987) 307-313.
- Sperling, K., J Pelz, J., Wegner, R.D. et al. 1991. Frequency of trisomy 21 in Germany before and after the Chernobyl accident. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, Volume 45, Issue 6, 1991, p, 255-262.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/075333229190026P>

- Sperling, K., Pelz, J., Wegner, R.D., Dörries, A. et al. 1994a. Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? *BMJ*. 1994 Jul 16; 309(6948), p.158–162.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2540705/>
- Sperling, K., Pelz, J., Wegner, R.D., Dörries, A. et al. 1994b. Bewertung eines Trisomie 21 Clusters. *Med. Genetik* 6, p. 378-385.
- Spycher, B.D, Lupatsch, J.E., Zwahlen, M. et al. 2015. For the Swiss Pediatric Oncology Group and the Swiss National Cohort Study Group. Background Ionizing Radiation and the Risk of Childhood Cancer: A Census-Based Nationwide Cohort Study. *Environ Health Perspect* 123, p. 622–628.  
<https://ehp.niehs.nih.gov/1408548/>
- SSK, Strahlenschutzkommission. 2014. Dose and dose-rate effectiveness factor (DDREF): Recommendation by German Commission on Radiological Protection, with scientific grounds. p. 5 – 16.  
[https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2014/DDREF\\_e.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2014/DDREF_e.pdf?__blob=publicationFile)
- Stein, A. F., Draxler, R.R., Rolph, G., D., et al. 2015. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (12), p. 2059–2077.  
<https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stewart, A., Webb, J., Giles, B.D., Heitt, D. 1956. Preliminary communication: malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. *Lancet*. 1956 Septembre 1; 271(6940), p.447.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13358242>
- Stewart, A., Webb, J. Hewitt, D. 1958. A survey of childhood malignancies. *Br Med J*. 1958 Jun 28; 1(5086), p. 1495–1508.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2029590/>
- Syryjczyk T. 1999. Przesłanki decyzji w przedmiocie likwidacji Elektrowni Jądrowej Żarnowiec. (Consulted December 2020)  
[http://www.syryjczyk.krakow.pl/Elektrownia%20Jadrowa\\_T.htm](http://www.syryjczyk.krakow.pl/Elektrownia%20Jadrowa_T.htm)
- Takeyasu, M., Sumiya, S. 2014. Estimation of Dry Deposition Velocities of Radionuclides Released by the Accident at the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant. *Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4*, p. 64-67.  
[http://www.aesj.or.jp/publication/pnst004/data/064\\_067.pdf](http://www.aesj.or.jp/publication/pnst004/data/064_067.pdf)
- Tereshchenko, V.M., et al. 2003. Epidemiologic research on non-neo plastic morbidity in Chernobyl NPP accident liquidation participants in 1986-87. *Hygiene of population aggregates*. Issue 41, p. 283-287 (quoted from Greenpeace report 2006, p. 125  
[http://hps.org/documents/greenpeace\\_chernobyl\\_health\\_report.pdf](http://hps.org/documents/greenpeace_chernobyl_health_report.pdf) )
- Tertrais, Bruno. 2009. Les limites de la dissuasion. *Recherches & document n°3*. 22 janvier 2009. Fondation pour la recherche stratégique. 35 p.  
<https://www.frstrategie.org/web/documents/publications/recherches-et-documents/2009/200903.pdf>
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2013. Volume I, report to the General Assembly, Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. *UNSCEAR Report 2013*, p. 77 – 79.  
[http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR\\_2013\\_Report\\_Vol.I.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR_2013_Report_Vol.I.pdf)
- U.S.NRC. 2007. United States Nuclear Regulatory Commission. AP1000 Design Control Document, Revision 16. 42 p.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML0715/ML071580898.pdf>
- Wheatley, S., Sovacool, B., Sornette, D. 2017. Of Disasters and Dragon Kings: A Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents and Accidents’. *Risk Anal*. 2017 Jan; 37(1), p. 99-115.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27002746>

- WHO, World Health Organization. 2006. Health effects of the Chernobyl accident: an overview. April 2006. (accessed on 3rd May 2019)  
[https://www.who.int/ionizing\\_radiation/chernobyl/background/en/](https://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/background/en/)
- WHO, World Health Organization. 2013. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. ISBN 978 92 4 150513 0.  
[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78218/9789241505130\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78218/9789241505130_eng.pdf?sequence=1)
- WorldPop, Unconstrained individual countries 2000-2020 UN adjusted (1km resolution),  
<https://www.worldpop.org/geodata/listing?id=75>
- Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., Nesterenko, A.V. 2009. Chernobyl – Consequences of the Catastrophe for People and Environment, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 1181, Boston, Massachusetts. 327 p.  
<http://www.foejapan.org/energy/evt/pdf/121214.pdf>
- Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., Nesterenko, A.V., Preobrashenskaya, N.E. 2016. Posledstviya Katastrofy dlya Cheloveka y prirody Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK. Moskva, 2016, ISBN 978-5-9908165-2-7.  
[https://www.yabloko.ru/files/chern\\_8\\_vsya\\_kniga\\_25\\_marta.pdf](https://www.yabloko.ru/files/chern_8_vsya_kniga_25_marta.pdf)