Transport de substances radioactives du cycle du combustible par voie ferroviaire

Analyse de l'exposition radiologique potentielle du public dans les gares ferroviaires de voyageurs

Document Orano NPS référence NTE-25-005865-001 du 14 octobre 2025

Sommaire

Résumé **3**

1. Introduction **4**

2. Transport de substances radioactives du cycle du combustible par voie ferroviaire **5**

2.1. Le cycle du combustible 5

2.2. La sûreté des transports 5

2.3. Le transport ferroviaire des substances radioactives 7

3. Périmètre de l'étude **8**

3.1. Flux de transport concernés 8

3.2. Les transports de combustibles usés 9

3.3. Gares concernées 10

3.4. Gare de Valognes 12

3.5. Gare de Lisieux 12

4. Données radiologiques **15**

5. Exposition radiologique potentielle du public **17**

5.1. Scénarios d'exposition 17

5.2. Exposition radiologique 21

5.3. Autres considérations 23

5.4. Analyse de l'exposition radiologique 24

6. Conclusion **25**

7. Annexe 1 **27**

7.1. Objectif 27

7.2. Analyse des relevés lors de chaque transport 27

7.3. Mesures complémentaires 29

7.4. Compilation des données 33

Résumé

Les transports de substances radioactives sont essentiels pour assurer la continuité du cycle du combustible nécessaire au fonctionnement des Centres Nucléaires de production d'Electricité (centrales nucléaires). Ces substances radioactives font l'objet de transports réguliers, certains flux étant assurés de manière récurrente par voie ferroviaire. L'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants autour de ces transports est directement prise en compte par les employeurs. L'exposition du public est prise en compte par les acteurs du transport.

Figure 1 Terminal ferroviaire de Valognes, par lequel passe une partie des matières du cycle du combustible © Orano, Biplan

Ce document présente de manière synthétique l'exposition potentielle du public dans les gares de voyageurs. A partir d'une analyse des flux de transport, il en ressort que le flux le plus représentatif dans ce contexte est celui des transports de combustibles usés entre les centrales nucléaires et l'usine de traitement / recyclage des combustibles usés à la Hague.

Une analyse des différents arrêts potentiels en gares voyageurs pour ce flux de transport identifie une seule gare présentant des arrêts relativement fréquents. Les modalités concrètes de ces arrêts sont déterminées dans ce document : positionnement des wagons, plage horaire, fréquence et durée des arrêts.

En parallèle, les données radiologiques de débits de dose (rayonnement ionisant) autour des convois de combustibles usés sont analysées : des valeurs moyennes et pénalisantes, à proximité comme à distance des convois, sont présentées dans ce document.

Ces données servent à déterminer, sur la base de plusieurs scénarios allant du plus réaliste à un scénario enveloppe, des valeurs d'exposition potentielle d'une personne du public dans cette gare voyageurs.

Ces données indiquent que l'exposition calculée est inférieure aux limites réglementaires d'exposition du public. Elle est d'un ordre de grandeur assimilable aux expositions des patients dans l'imagerie médicale. Elle correspond aussi globalement aux expositions qu'une personne du public peut recevoir lors de voyages en avion long-courrier (vol aller/retour entre Paris et Tokyo par exemple).

Les estimations issues de ces scénarios concernant les transports de combustibles usés étant pénalisantes par rapport aux autres flux de transport du cycle du combustible nucléaire, l'exposition potentielle des membres du public dans les gares de voyageurs, quels que soient les flux, reste très limitée**. L'étude confirme ainsi l'absence de risque sanitaire significatif lié à l'exposition radiologique pour le public lors des arrêts en gare.**

1. Introduction

Les transports de substances radioactives sont essentiels pour assurer la continuité du cycle du combustible, et de fait, le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité. Chaque année en France, environ 1 000 tonnes d'uranium sous diverses formes transitent par les différentes installations de ce cycle, afin de garantir le niveau de production d'électricité.

En France, toutes les installations du cycle n'étant pas construites en un unique lieu, les substances radioactives associées font l'objet de transports réguliers. Si une part importante de ces transports est assurée par voie routière, certains flux sont assurés de manière récurrente par voie ferroviaire.

Figure 2 Vue aérienne du site de la Hague © Orano, C. Crespeau

Les transports ferroviaires de substances radioactives, comme tout transport de marchandise par ailleurs, empruntent le réseau ferré public. Ainsi des transports de substances radioactives peuvent transiter par des gares de triage, d'accès interdit au public, mais aussi par des gares de voyageurs.

Lors des transports de substances radioactives, il demeure une quantité de rayonnements ionisants autour des convois. Ces rayonnements sont systématiquement mesurés et contrôlés. Plusieurs séries de mesures de contrôle de la radioactivité sont effectuées à chaque étape de la préparation et de la réalisation du transport. Lors de chacune de ces séries de mesures, les valeurs des rayonnements gamma et neutrons sont mesurées et additionnées pour vérifier qu'elles sont bien inférieures aux limites.

Les transports de substances radioactives sont facilement reconnaissables parce qu'ils arborent sur les parois des moyens de transport le « trèfle radioactif » bien connu du public.

L'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants autour de ces transports est directement prise en compte et surveillée par les employeurs. L'exposition du public est prise en compte et surveillée par les acteurs du transport (par exemple l'expéditeur, le transporteur ou encore l'organisateur de transport).

Ce document présente de manière synthétique l'exposition potentielle du public dans les gares de voyageurs.

2. Transport de substances radioactives du cycle du combustible par voie ferroviaire

2.1. Le cycle du combustible

Les transports de substances radioactives sont essentiels dans le cadre du cycle du combustible nucléaire. Des transports sont ainsi réalisés régulièrement que ce soit sur l'amont du cycle (avant l'utilisation de l'uranium en réacteur) ou l'aval du cycle (après l'utilisation de l'uranium en réacteur).

Figure 3 Transport ferroviaire dans le cadre de l'aval du cycle © ORANO

Orano est un opérateur international de premier plan dans le cadre du fonctionnement du cycle du combustible. Sa filiale Orano NPS organise ou supervise les transports associés.

2.2. La sûreté des transports

Le transport de substances radioactives est régi par la réglementation nationale qui prend ses sources dans un règlement international, rédigé par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). À toutes les étapes du transport, les acteurs participent activement au respect strict de l'objectif fondamental de sûreté : protéger les biens, les personnes et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants. Cette protection est assurée par le confinement du contenu radioactif, la maîtrise du débit de dose externe (rayonnements ionisants), la prévention de la criticité (réaction en chaîne) et la prévention des dommages causés par la chaleur.

Une approche graduée est systématiquement appliquée, notamment par rapport à la robustesse des colis et la tenue aux incidents ou accidents de transport. Par exemple, dans le cas des transports de combustibles usés depuis les réacteurs nucléaires, les modèles de colis (matière radioactive confinée dans son emballage) font l'objet d'analyses et d'épreuves leur permettant de résister aux incidents et aux accidents les plus sévères (voir l'illustration ci-dessous).

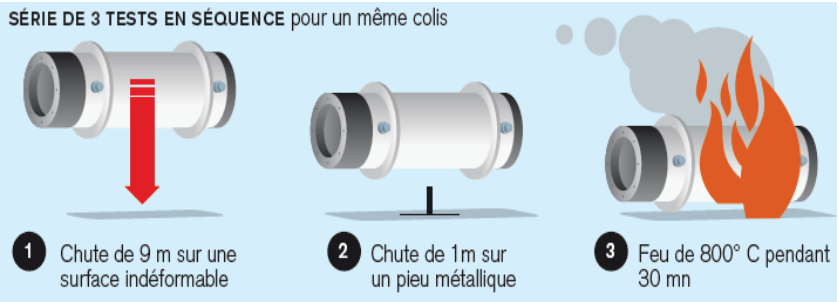


Figure 4 Exemple de série de tests pour démontrer la résistance aux conditions accidentelles de transports, applicable par exemple aux colis de transport de combustibles usés

Compte-tenu de la sensibilité de la matière transportée, la réglementation internationale de transport prévoit des limites de débits de dose, autour des colis et des moyens de transport, afin de limiter l'exposition des travailleurs et du public. Les débits de dose sont exprimés en milliSieverts par heure (mSv/h), et concernent un débit en lien avec l'exposition aux rayonnements qui est exprimée en milliSievert (mSv).

Le débit dose au contact des colis de substances radioactives est limité à 2 mSv/h.

Pour le transport ferroviaire, les critères réglementaires complémentaires suivants existent : le débit de dose est limité à 2 mSv/h au contact du wagon et à 0,1 mSv/h à 2 mètres de ce même wagon.

En pratique, ces limites réglementaires ne seront pas atteintes pour les transports qui sont concernés, comme indiqué ci-après.

En outre, la réglementation prévoit aussi que les différents intervenants du transport (expéditeur, transporteur, chargeurs, etc.) prennent en considération l'impact de ces rayonnements ionisants lors des transports, par le biais d'évaluation de doses, de surveillance de l'exposition des personnes et de mesures de protection radiologique lorsque nécessaire.

2.3. Le transport ferroviaire des substances radioactives

Certains transports sont assurés par voie ferrée, lorsque ce choix est possible réglementairement, mais aussi parce que ce type de transport présente des intérêts tels qu'une empreinte carbone plus faible ou une plus grande sécurité de déplacement.

Figure 5 Déchargement d'un conteneur chargé d'uranium naturel © ORANO

Les flux les plus récurrents, pour les transports ferroviaires du cycle du combustible nucléaire, sont les suivants :

- Le transport d'uranium naturel depuis les mines jusqu'aux usines du cycle du combustible en France : une quarantaine de convois pour environ 500 conteneurs par an,
- Le transport de tétrafluorure d'uranium entre Orano Malvési et Orano Tricastin : en moyenne une dizaine de convois par an,
- Le transport international d'hexafluorure d'uranium, vers ou depuis les ports français : une vingtaine de convois par an, comportant quelques dizaines de conteneurs chargés de colis,
- Le transport d'octaoxyde de triuranium depuis Orano Tricastin : une dizaine de convois par an, avec quelques dizaines de conteneurs,
- Le transport de combustibles usés entre les réacteurs et Orano la Hague : de 150 à 200 colis par an, en quasiment autant de convois,
- Le transport de nitrate d'uranyle entre Orano la Hague et Orano Tricastin : environ 15 convois pour 150 conteneurs-citernes par an,
- Le transport de déchets à destination de l'Andra, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs : moins d'une dizaine de convois par an.

Les dispositions réglementaires de sûreté sont identiques quels que soient les modes de transport.

3. Périmètre de l'étude

3.1. Flux de transport concernés

L'objet de cette étude est d'analyser l'éventuelle exposition des personnes du public dans le cadre du transport ferroviaire de substances radioactives pour le cycle du combustible nucléaire.

Dans ce contexte, les flux considérés sont ceux qui sont les plus réguliers, car l'exposition aux rayonnements ionisants dépend du temps (durée de positionnement à côté d'une source de rayonnements) et de la fréquence (nombre de fois où l'exposition intervient).

Les transports d'uranium naturel sont en nombre relativement limité : environ une quarantaine de convois ferroviaires par an. De plus les débits de dose autour de ces convois sont faibles comparativement aux transports de combustibles usés par exemple. En effet, l'ordre de grandeur du débit de dose à 1 mètre d'un conteneur est d'environ 0,01 mSv/h, quand celui à 1 mètre du colis de combustibles usés est d'environ 0,08 mSv/h.

Figure 7 Transport ferroviaire de conteneurs-citernes de tétrafluorure d'uranium © ORANO

Les transports de tétrafluorure d'uranium font l'objet d'un nombre restreint de convois ferroviaires, et ils présentent des débits de doses qui sont plus faibles par rapport à ce qu'on peut rencontrer sur les flux de combustibles usés. L'ordre de grandeur est notablement inférieur à 0,01 mSv/h, à 1 mètre des conteneurs-citernes chargés.

Les transports d'hexafluorure d'uranium concernent environ une vingtaine de convois ferroviaires par an. Pour les transports d'hexafluorure d'uranium appauvri, l'ordre de grandeur du débit de dose à 1 mètre d'un conteneur est d'environ 0,01 mSv/h. L'ordre de grandeur du débit de dose à 1 mètre pour les transports d'hexafluorure d'uranium enrichi est plus important, environ 0,04 mSv/h. Les débits de dose autour de ces convois sont faibles comparativement aux transports de combustibles usés, pour un nombre de convois beaucoup plus faible.

Les transports d'octaoxyde de triuranium depuis le Tricastin ne représentent qu'une dizaine de convois par an et ils présentent des débits de dose qui sont plus faibles par rapport à ce qu'on peut rencontrer sur les flux de combustibles usés. L'ordre de grandeur est notablement inférieur à 0,02 mSv/h, à 1 mètre des wagons chargés. Il en est de même pour les **transports de déchets à destination de l'Andra** (leur nombre n'est donc pas significatif sur une année).

Figure 6 Conteneur-citerne de nitrate d'uranyle en cours de manutention © ORANO

Pour les transports de nitrate d'uranyle, une analyse du retour d'expérience de l'année 2021 a mis en évidence que les débits de doses sont de l'ordre d'au maximum 0,012 mSv/h à 1 mètre des convois. La valeur moyenne est d'environ 0,008 mSv/h. Ce niveau est comparable à celui lié aux rayonnements cosmiques lors d'un vol à environ 10 000 m d'altitude. Il ne s'agit donc pas d'un niveau de rayonnement significatif.

Ainsi, **cette étude est menée sur les transports de combustibles usés**, qui présentent des débits de doses qu'il convient de considérer et qui font l'objet de transports réguliers.

3.2. Les transports de combustibles usés

Il s'agit des transports de colis chargés de combustibles nucléaires usés, issus des centres nucléaires de production d'électricité et à destination de l'usine de traitement de la Hague. Ces convois sont transportés par des modèles de colis de type B(U) ou de type B(M). Il s'agit des emballages lourds tels que présentés sur la photo ci-contre.

Figure 7 Colis de transport de combustibles usés en cours de manutention © ORANO

Les modèles de colis actuels sont appelés TN12/2, TN13/2, TN112. Ces modèles de colis font l'objet d'un certificat d'agrément par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection.

Les colis acheminent des combustibles usés qui peuvent être de deux natures différentes : des assemblages de combustibles usés à base d'uranium naturel ou de combustibles usés de type MOx (mixed oxyde), ces derniers comprenant un mélange de plutonium, issu des opérations de recyclage réalisées à la Hague, et d'uranium.

En règle générale, afin de couvrir les besoins annuels du parc nucléaire français, 150 à 200 transports de ce type de colis sont réalisés chaque année. Ces transports sont en majorité effectués par voie ferroviaire, entre les centrales nucléaires (ou leur terminal ferroviaire) et le terminal ferroviaire de Valognes (à proximité du site de la Hague). Ils sont réalisés sur des wagons dédiés, tels que visibles sur la photo ci-contre.

Figure 8 Wagon dédié au transport de colis de combustibles usés © ORANO

Dans la majorité des cas, un convoi ferroviaire ne comprend qu'un wagon chargé d'un colis. Un convoi peut également comprendre plusieurs wagons. Le nombre de convois ferroviaire est donc inférieur au nombre de transports de colis.

3.3. Gares concernées

Par principe les transports ferroviaires sont en mouvement. Les arrêts en cours de transport de substances radioactives en dehors des gares sont limités et ne peuvent avoir lieu qu'en cas d'aléa. Sauf cas exceptionnel, lors de ces arrêts il n'y a pas de personne du public à proximité.

L'étude concerne donc les arrêts des trains dans les gares. Il existe principalement deux types de gares, les gares de triage et les gares voyageurs.

Les gares de triage n'ont pas été considérées dans le périmètre de cette étude. En effet, ces gares sont sécurisées et sous gardiennage de la SNCF, l'accès aux usagers y est interdit. Par ailleurs, il est de la responsabilité de la SNCF d'assurer la protection de ses agents et de ses sous-traitants à proximité des wagons. Concrètement, une évaluation par poste de travail est réalisée dans chaque triage où sont traités les wagons concernés. Il existe aussi des voies de service, qui sont utilisées pour les besoins de la gestion des trafics et des circulations et pouvant servir aux manœuvres et au stationnement du matériel roulant des entreprises ferroviaires. Elles sont assimilables dans le présent contexte aux gares de triage.

Les gares de voyageurs sont les espaces où vont transiter les wagons voyageurs et les wagons de marchandises, dont les marchandises dangereuses incluant les substances radioactives. Ces gares sont donc accessibles au public.

Si les convois de substances radioactives peuvent potentiellement circuler dans toutes les gares, en pratique, un nombre relativement limité de gares voyageurs fait l'objet d'arrêts dans le cadre des transports de substances radioactives (voir détail dans l'encadré ci-dessous). Pour les flux considérés, il arrive que certaines gares fassent l'objet d'arrêts systématiques ou d'arrêts facultatifs. Ces derniers sont nécessaires pour assurer la régulation du trafic : il s'agit d'un stationnement possible mais qui ne sera réalisé qu'en cas de nécessité, par suite d'aléas en cours d'acheminement (par exemple des retards).

Dans ce contexte, Orano et SNCF ont analysé par retour d'expérience les temps d'arrêt des convois dans les gares. Cette analyse a été menée sur l'année 2022.

L'année 2022 a été considérée étant donné que le lancement de la présente étude a été initié en 2023. L'année 2022 ne présente pas de singularité notable pour les transports de combustibles usés, au détail que le nombre de transports à partir de cette année est relativement plus faible que sur la décennie précédente. Des données précises sont disponibles en annexe 1 dans les tableaux présentant les bilans de transports annuels.

Bilan des passages des wagons concernés, chiffres SNCF Réseau pour l'année 2022 :

- Pour 140 colis transportés, les convois ferroviaires associés passent dans de multiples gares sur leur trajet
- En cumulé ceci représente un total de 933 passages répertoriés dans des gares, majoritairement en gare de triage (ou en voie de service)

Parmi ces passages répertoriés, 34 lieux d'arrêt (correspondant à des lieux d'arrêt fixe et d'arrêt facultatif) sont identifiés :

- 19 en gare de triage
- 11 en voie de service
- 4 en proximité en gare voyageurs

Les arrêts en proximité de gare voyageurs sont situés à :

- Château du Loir (72) : 16 convois concernés, tous les arrêts d'une durée d'une minute chacun
- Le Mans (72) : 32 convois concernés, environ 4 minutes par arrêt (hors situation exceptionnelle)
- Lisieux (14) : 58 convois concernés, avec une quarantaine d'arrêts de 30 à 60 minutes
- Valognes (50) : 28 convois concernés, environ 25 minutes prévues par arrêt (arrêts de l'ordre de 10 minutes en pratique)

Il ressort de cette analyse que les arrêts qui présentent les durées les plus significatives sont :

- Les arrêts en gare de Valognes pour les transports de combustibles usés et de nitrate d'uranyle,
- Les arrêts en gare de Lisieux pour les transports de combustibles usés.

3.4. Gare de Valognes

La gare de Valognes, située dans la Manche en Normandie, est la gare à proximité du terminal ferroviaire de Valognes. Ce terminal ferroviaire, opéré par Orano, permet d'acheminer par voie ferrée les transports de combustibles usés et de nitrate d'uranyle au plus proche du site d'Orano la Hague.

Si certains trains de substances radioactives pouvaient historiquement stationner au niveau des quais voyageurs de la gare de Valognes, les modalités d'arrêt ont été revues et la position de stationnement a été déplacée en 2022 pour être éloignée des endroits accessibles au public.

Concrètement, dans cette gare l'exposition du public n'est possible qu'à très grande distance (plus de 15 mètres). L'éloignement est tel que l'exposition est négligeable et ne présente pas d'enjeu pour le public présent en gare.

Par ailleurs, l'analyse des données sur 2022 a mis en évidence que les durées de stationnement sont en pratique relativement courtes (environ 10 minutes) et le nombre de convois limité (28 convois). Ainsi, les analyses qui suivent relatives à la gare de Lisieux sont pénalisantes par rapport à celles qui seraient réalisées pour la gare de Valognes.

3.5. Gare de Lisieux

La gare de Lisieux, située dans le Calvados en Normandie, est un arrêt facultatif dans le cadre des transports de combustibles usés. La configuration physique des lieux est telle qu'il est possible que des convois de substances radioactives stationnent au niveau des quais.

Figure 9 Vue générale de la gare de Lisieux (prise de vue depuis le point ci-dessous) © ORANO

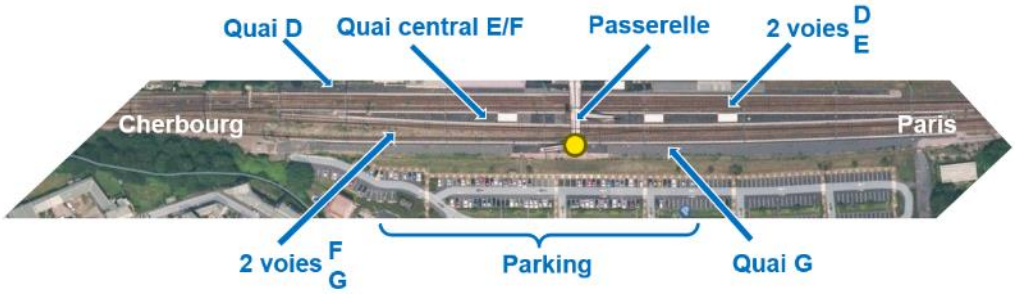
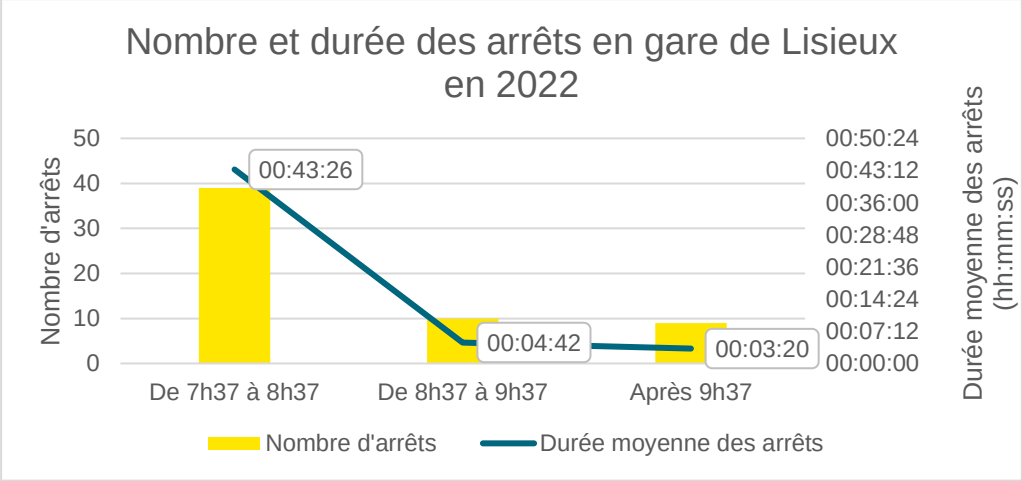


Figure 10 Vue aérienne de la gare de Lisieux

Les trains de convois de substances radioactives, lorsqu'ils stationnent, sont présents sur une voie privilégiée (sauf situation exceptionnelle), proche du parking.

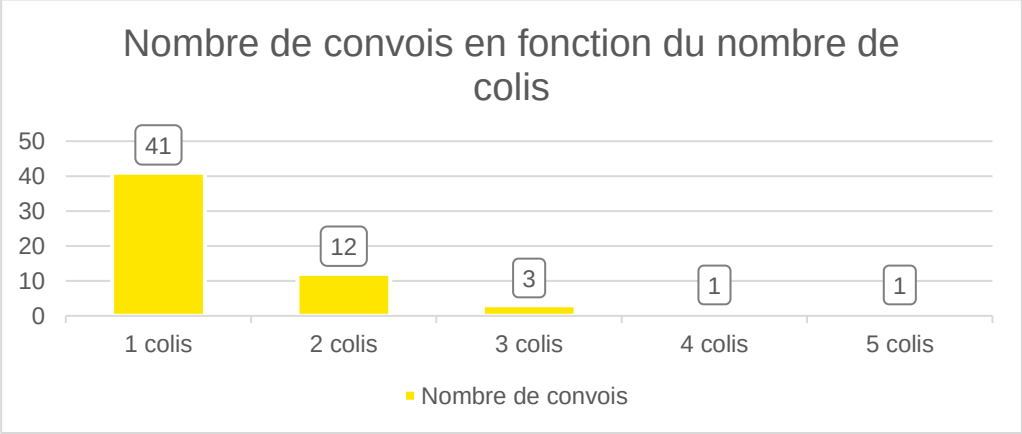
La gare, son parking et ses quais sont des zones accessibles au public. Des personnes du public peuvent être positionnées sur les quais à proximité, dans l'attente d'un train voyageur. La présente analyse estime donc l'exposition potentielle de ce public dans le cadre des arrêts de wagons chargés de combustibles usés.

Une analyse détaillée de chacun des arrêts de convois de combustibles usés en gare de Lisieux a été menée sur l'année 2022. Pour les 58 convois concernés, on note la répartition horaire suivante :



Près de deux tiers des arrêts en gare de Lisieux a lieu en début de journée, aux alentours de 8h. Ces arrêts sont ceux qui sont les plus longs, avec en moyenne une durée d'environ 45 minutes. Les arrêts en cours de journée sont notablement moins nombreux (environ un tiers) et sont beaucoup plus courts (moins de 5 minutes en moyenne).

Lors de ces arrêts, le convoi ferroviaire peut être constitué de plusieurs wagons chargés de colis de combustibles usés. Dans la plupart des cas (70%), le convoi ne contient toutefois qu'un unique wagon et colis. La figure ci-dessous en présente la répartition issue de l'exploitation des données de 2022.



Ainsi, la situation la plus couramment rencontrée concerne la présence le matin aux alentours de 8h d'un convoi avec un seul wagon de combustibles usés, pour une durée d'environ 45 minutes, en gare de Lisieux.

4. Données radiologiques

Pour analyser l'exposition potentielle du public, il faut déterminer le niveau de débit de dose réel des éléments concernés (colis, wagons).

Pour les transports de combustibles usés, les débits de dose peuvent atteindre à proximité immédiate des convois quelques dixièmes de mSv/h. Pour pouvoir estimer efficacement l'exposition potentielle du public, il est utile de connaître les niveaux à proximité immédiate mais également à distance des convois.

Une analyse a été menée sur la base des transports de combustibles usés réalisés sur plusieurs années. Afin de connaître les débits de dose autour des convois, plusieurs données ont été utilisées :

- Lors de chaque transport, des mesures de débits de dose sont réalisées sur les sites expéditeur, destinataire, ainsi qu'en cours de transport.
- Plusieurs mesures complémentaires ont été effectuées sur le terrain, lors de transports de combustibles usés, afin de déterminer des valeurs de débits de dose à distance.

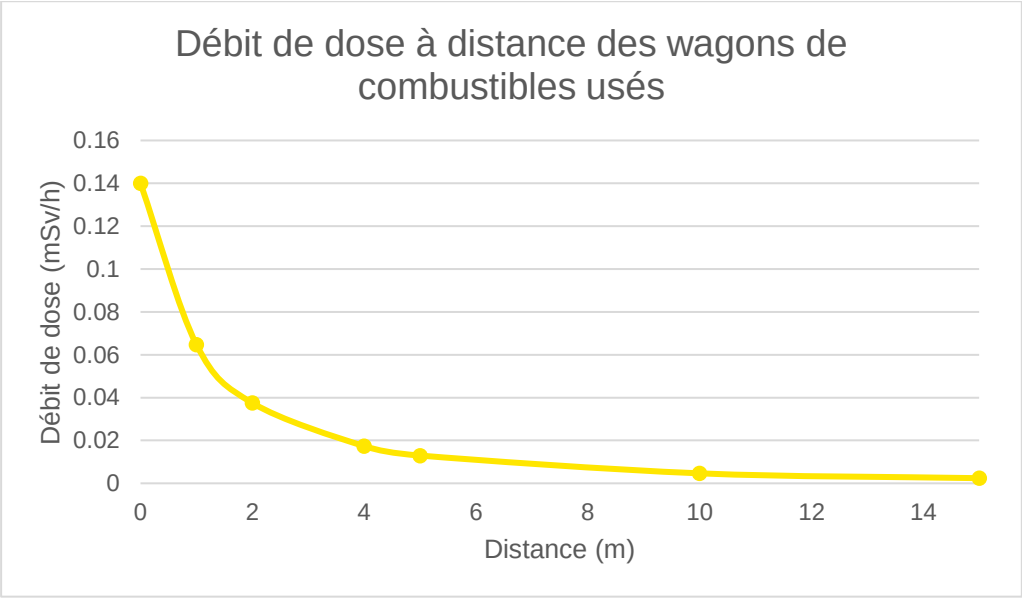
Figure 11 Mesure de débit de dose au contact d'un colis de transport de combustibles usés © ORANO

L'annexe 1 présente le détail de ces données.

La valeur moyenne de débit de dose issue de l'analyse de tous les transports réalisés est d'environ 0,08 mSv/h à 1 mètre des colis. Cette valeur est stable dans le temps, le type de transports réalisés variant peu.

Afin d'être pénalisant dans les estimations qui seront menées par la suite, la valeur moyenne de débit de dose à 1 mètre est multipliée par 2, ce qui induit un débit de dose d'environ 0,16 mSv/h à 1 mètre des colis.

L'utilisation de cette valeur permet de majorer les données associées aux mesures complémentaires effectuées sur le terrain et de déterminer des débits de dose pénalisants à distance des moyens de transport (ici, les wagons). Les données sont présentées sur la figure suivante, qui précise les débits de dose à partir des surfaces externes du wagon (le colis étant lui-même à l'intérieur du wagon, la valeur au contact du wagon est plus faible que la valeur autour du colis).



Cette figure illustre le principe de l'effet distance : le débit de dose à proximité des moyens de transport va baisser rapidement sur les premiers mètres puis de manière plus lente à distance. Les valeurs notables associées à cette figure sont les suivantes :

- Le débit de dose à 2 mètres d'un moyen de transport est de l'ordre de 0,038 mSv/h, soit un peu moins que la moitié du critère réglementaire de 0,1 mSv/h
- Le débit de dose à 5 mètres des convois est de l'ordre de 0,013 mSv/h
- Le débit de dose à 15 mètres des convois est de l'ordre de 0,002 mSv/h

5. Exposition radiologique potentielle du public

5.1. Scénarios d'exposition

Comme indiqué précédemment, la situation la plus couramment rencontrée concerne la présence le matin aux alentours de 8h d'un convoi avec un seul wagon de combustibles usés, pour une durée d'environ 45 minutes, en gare de Lisieux.

Le scénario d'exposition considéré ici correspond donc à ce cas de figure, avec de fait les hypothèses suivantes :

- La même personne prend son train tous les jours en gare de Lisieux ;
- Elle se positionne pour attendre son train systématiquement à l'extrémité du quai central, à la position la plus exposée ;

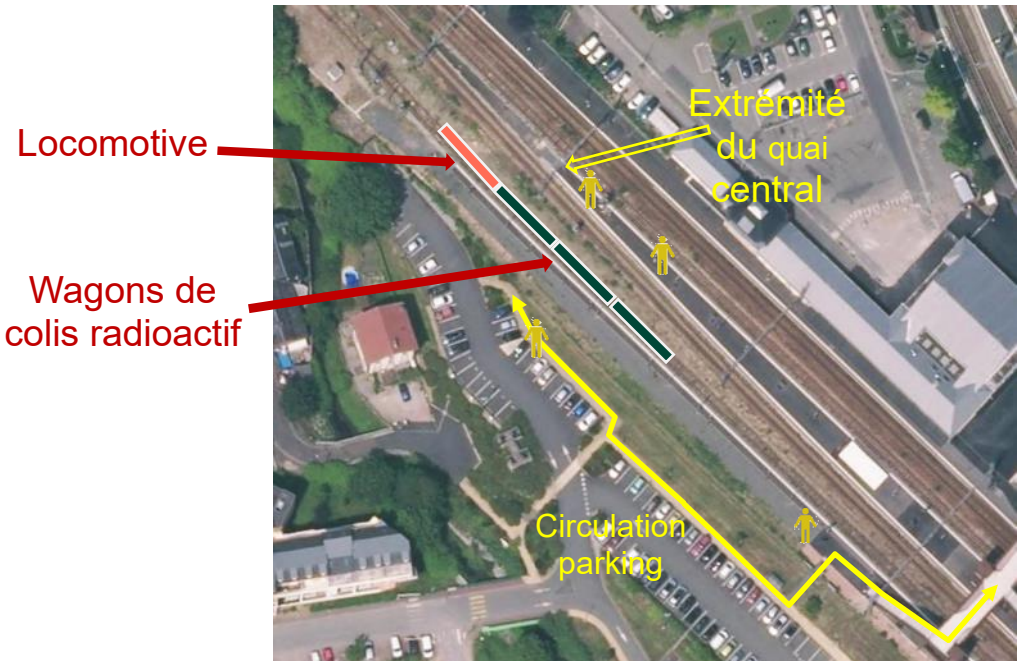
Ce positionnement au niveau du quai central est considéré étant donné qu'il est plus pénalisant que les autres positions possibles :

- Les personnes présentes sur le parking sont plus éloignées que les personnes sur le quai central ;
- Il n'est pas raisonnablement attendu de personne au niveau de la voie où se trouve le convoi de substances radioactives, car une personne attendant son train tous les matins ne va pas se positionner sur un quai où son train ne sera pas présent (il ne peut pas y avoir concomitance sur une même voie de train de marchandises et de train voyageur).

La position dite « la plus exposée » au niveau du quai central va dépendre du nombre de wagons avec des substances radioactives :

- Complètement en bout de quai, en cas de présence d'un convoi avec un seul colis.
  En effet, dans cette configuration, le wagon avec substances radioactives est environ au niveau du bout du quai. Les voies s'éloignent légèrement à ce niveau, comme ceci peut être vu sur la photographie ci-dessous (terre-plein en herbe). Dans ce cas d'exposition, la personne du public se situe à environ 15 mètres du wagon concerné.

- Directement face au colis le plus proche, dans le cas où le convoi présente plusieurs colis. Cette condition, moins fréquente, est plus pénalisante que la première parce les voies sont moins éloignées (la personne est potentiellement plus proche des convois). Ceci est visible sur la représentation ci-dessous. Dans ce cas d'exposition, la personne du public se situe à environ 5 mètres du wagon concerné.



A partir de ces données de base, plusieurs scénarios sont étudiés et présentés ci-après. Les principaux paramètres de ces scénarios sont :

- **La périodicité :**
  Il s'agit de considérer à quel moment une personne potentiellement exposée va prendre son train, en imaginant qu'elle vienne tous les jours. Deux choix sont étudiés : la personne peut venir à heure fixe, ou la personne peut venir à une heure variable (qui coïnciderait systématiquement avec la présence des convois).

- **Le nombre de convois :**
  Il s'agit du nombre de convois concernés, donc le nombre de fois où la personne est exposée. Ce paramètre dépend de la périodicité.

- **Le temps d'exposition :**
  Il s'agit de considérer plusieurs choix possibles de temps d'attente de la personne. Elle peut être présente tout au long de la présence des convois, ou sur une durée plus cohérente avec une pratique d'usager des chemins de fer.

- **Le nombre de wagons :**
  Ce paramètre dépend du nombre de convois mais prend en compte la probabilité d'être en présence d'un ou de plusieurs wagons simultanément, comme indiqué au §3.5.

- **Les débits de dose :**
  Il s'agit ici de faire varier les données d'entrée en fonction de plusieurs choix technique possibles. On peut considérer des débits de dose moyens sur l'année, qui correspondent en pratique à l'environnement dans lequel se trouvera un habitué régulier. On peut considérer des débits de dose pénalisants, en sachant que cette considération n'est pas probable car les débits de dose des convois varient. Enfin on peut considérer que les débits de dose atteignent les limites autorisées par la réglementation.

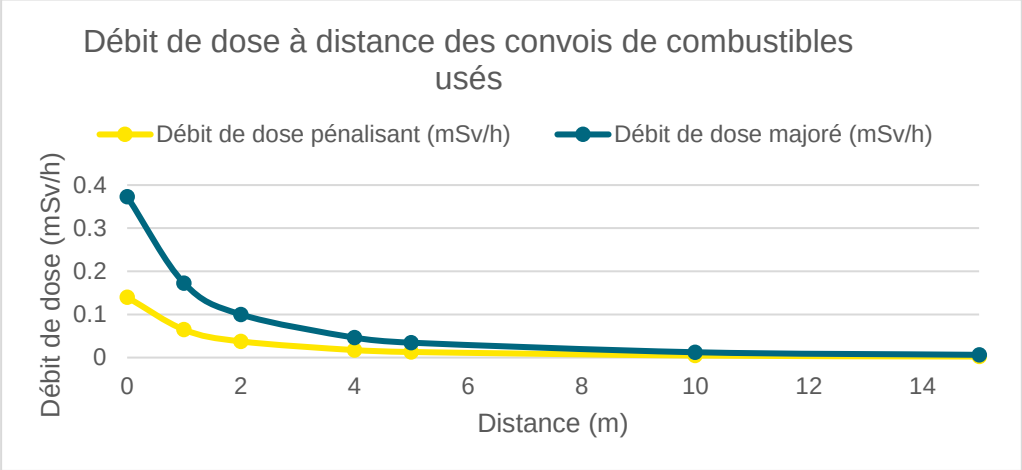
Scénario	Scénario A	Scénario B	Scénario C
Périodicité	La personne prend son train tous les matins aux alentours de 07h30	La personne prend son train tous les jours à un horaire variable	Identique au scénario B
Nombre de convois	La personne est potentiellement exposée à 39 convois	La personne est potentiellement exposée aux 58 convois (tous les convois)	La personne est potentiellement exposée à 83 convois (voir note sous tableau)
Temps d'exposition	Cette personne est exposée pendant 30 minutes, ce qui est inférieur au temps de stationnement moyen des convois mais pénalisant par rapport au temps d'attente d'un habitué en gare	Cette personne est exposée pendant 45 minutes, ce qui correspond au temps de stationnement moyen des convois aux alentours de 7h30 mais qui est pénalisant par rapport au temps de stationnement moyen (tous horaires confondus) de 30 minutes et au temps d'attente d'un habitué en gare	Identique au scénario B
Nombre de wagons (au vu des statistiques sur la présence d'un seul ou plusieurs wagons de substances radioactives)	On considère qu'elle sera en présence d'un seul wagon 27 fois et de plusieurs wagons 12 fois	On considère qu'elle sera en présence d'un seul wagon 41 fois et de plusieurs wagons 17 fois	On considère qu'elle sera en présence d'un seul wagon 59 fois et de plusieurs wagons 24 fois
Débits de dose	On considère pour ce cas les débits de dose pénalisants autour des convois	On considère pour ce cas les débits de dose pénalisants autour des convois	Les débits de dose autour des convois sont majorés pour que la valeur de débit de dose à 2 mètres corresponde au critère réglementaire

Note pour le scénario C : Le nombre de convois a été majoré pour prendre en compte le fait que le nombre de transports sur l'année 2022 était de 140 alors qu'une année pourrait atteindre de l'ordre de 200 transports (la moyenne présentée en annexe fait état de 166 transports, ceci est donc pénalisant).

5.2. Exposition radiologique

A partir des scénarios ci-dessus et des données radiologiques présentées précédemment, il est possible d'estimer les valeurs d'exposition suivantes :

Scénario	Scénario A	Scénario B	Scénario C
Nombre de fois où l'exposition intervient	• 27 fois à 15 mètres pendant 30 minutes • 12 fois à 5 mètres pendant 30 minutes	• 41 fois à 15 mètres pendant 45 minutes • 17 fois à 5 mètres pendant 45 minutes	• 59 fois à 15 mètres pendant 45 minutes • 24 fois à 5 mètres pendant 45 minutes
Origine des débits de dose	On considère pour ce cas les statistiques effectives sur les débits de dose des convois lors d'une année (les valeurs correspondent à des valeurs moyennes)	On considère pour ce cas les débits de dose pénalisants autour des convois	Les débits de dose autour des convois sont majorés pour que la valeur de débit de dose à 2 mètres corresponde au critère réglementaire (courbe donnée ci-dessous)
Valeurs de débits de dose	• Le débit de dose à 15 mètres est de l'ordre de 0,002 mSv/h • Le débit de dose à 5 mètres est de l'ordre de 0,013 mSv/h	• Le débit de dose à 15 mètres est de l'ordre de 0,002 mSv/h • Le débit de dose à 5 mètres est de l'ordre de 0,013 mSv/h	• Le débit de dose à 15 mètres est de l'ordre de 0,006 mSv/h • Le débit de dose à 5 mètres est de l'ordre de 0,035 mSv/h
Calcul de l'exposition	27 x 0,002 x (30/60) + 12 x 0,013 x (30/60)	41 x 0,002 x (45/60) + 17 x 0,013 x (45/60)	59 x 0,006 x (45/60) + 24 x 0,035 x (45/60)
Valeur d'exposition	0,105 mSv	0,239 mSv	0,896 mSv



Au-delà de ces trois scénarios techniques, il convient de considérer les éléments suivants :

- Les calculs présentés prennent en compte des temps d'exposition de 30 ou 45 minutes. En pratique, un usager habituel n'aurait pas tendance à venir systématiquement plus de 15 minutes avant de monter dans son train.
- Les calculs considèrent que la personne est statique à la position la plus pénalisante, en bordure de quai. Par ailleurs, on considère dans les calculs qu'elle se déplace pour être à la position pénalisante en fonction du nombre de wagons dans le convoi, ce qui n'est que purement théorique.

Ces éléments permettent de présenter, par principe, un scénario complémentaire, qui peut être vu comme une référence, et qui correspond à :

Scénario	**Scénario D**
Nombre de fois où l'exposition intervient	• 27 fois à 15 mètres pendant 15 minutes • 12 fois à 5 mètres pendant 5 minutes et à 15 mètres pendant 10 minutes
Origine des débits de dose	On considère pour ce cas les débits de dose pénalisants autour des convois
Valeurs de débits de dose	• Le débit de dose à 15 mètres est de l'ordre de 0,002 mSv/h • Le débit de dose à 5 mètres est de l'ordre de 0,013 mSv/h
Calcul de l'exposition	27 x 0,002 x (15/60) + 12 x ((0,013 x (5/60) + 0,002 x (10/60))
Valeur d'exposition	0,017 mSv

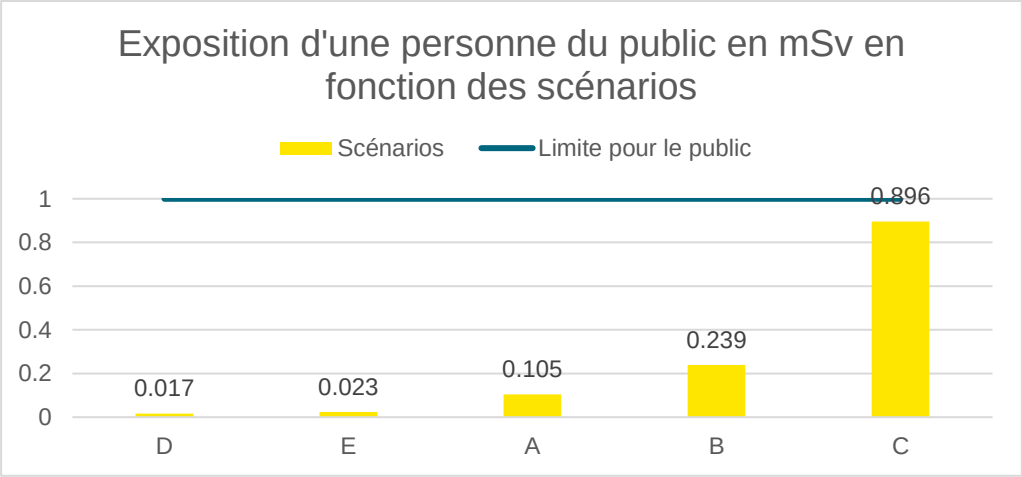
5.3. Autres considérations

Les scénarios ci-dessus considèrent le stationnement du convoi de substances radioactives sur la voie privilégiée et la présence de personnes en attente de train sur une voie à proximité. Si toutefois une personne décidait exceptionnellement d'attendre son train au niveau du quai pendant la présence du convoi, ou si exceptionnellement le convoi stationnait sur une autre voie que la voie privilégiée là où attend un usager régulier, l'exposition de cette personne dans ce cas serait la suivante.

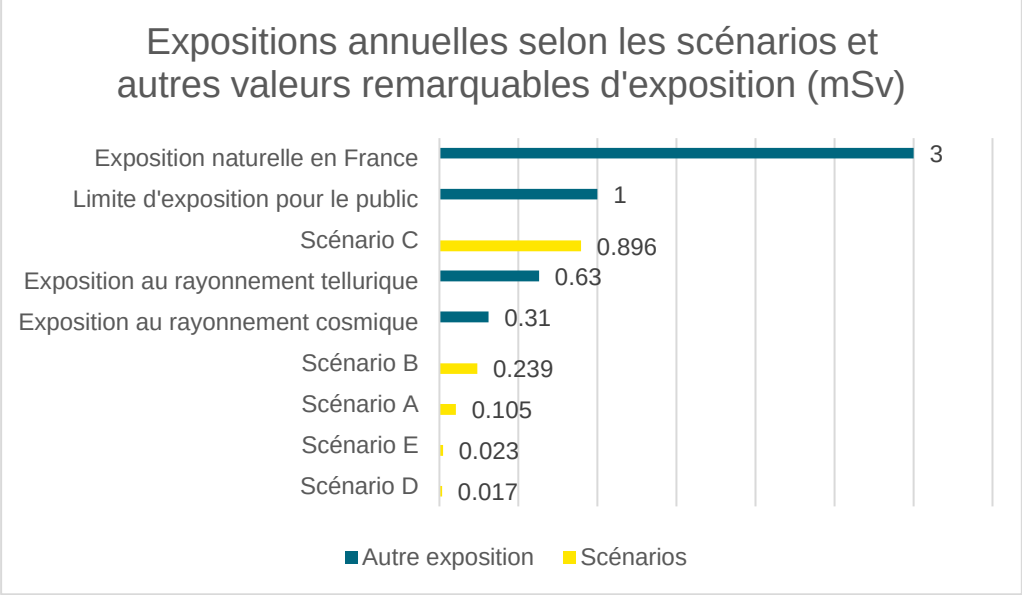
Scénario	**Scénario E**
Nombre de fois où l'exposition intervient	• 1 fois à 1 mètre pendant 15 minutes et à 5 mètres pendant 30 minutes (la personne n'est pas statique)
Origine des débits de dose	On considère pour ce cas les débits de dose pénalisants autour des convois
Valeurs de débits de dose	• Le débit de dose à 1 mètre est de l'ordre de 0,065 mSv/h • Le débit de dose à 5 mètres est de l'ordre de 0,013 mSv/h
Calcul de l'exposition	0,065 x (15/60) + 0,013 x (30/60)
Valeur d'exposition	0,023 mSv

5.4. Analyse de l'exposition radiologique

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats des estimations d'exposition d'une personne du public en gare de Lisieux, selon les scénarios définis :



Ainsi qu'on peut le constater, **tous les scénarios sont tels que l'exposition reste inférieure à la limite d'exposition définie pour le public qui est de 1 mSv/an** (art. R.1333-11 Code de la santé publique). L'échelle ci-dessous présente ces scénarios en lien avec d'autres valeurs d'expositions remarquables.



Dans tous les cas, on note que l'exposition pour une personne du public lors des arrêts en gare des transports de substances radioactives est inférieure à la limite réglementaire d'exposition pour le public et correspond pour des scénarios pénalisants au même ordre de grandeur que l'exposition moyenne du public en France aux rayonnements cosmiques ou telluriques.

6. Conclusion

Ce document a présenté de manière synthétique l'exposition potentielle du public dans les gares ferroviaires de voyageurs concernés par les transports de substances radioactives. A partir d'une analyse des flux de transport, il en ressort que le flux pénalisant est celui des transports de combustibles usés entre les centres nucléaires de production d'électricité et l'usine de traitement de la Hague.

Une analyse des différents arrêts potentiels en gare voyageurs pour ce flux de transport a permis d'identifier une seule gare, la gare voyageurs de Lisieux, présentant des arrêts relativement fréquents. Les modalités pratiques de ces arrêts ont été vérifiées et les statistiques associées ont été déterminées : positionnement, plage horaire, fréquence et durée des arrêts.

En parallèle, les données radiologiques de débits de dose autour des convois de combustibles usés ont été analysées et présentées de manière synthétique dans ce document, avec des valeurs moyennes et pénalisantes, à proximité comme à distance des convois.

Ces données ont permis de déterminer, sur la base de plusieurs scénarios allant du plus réaliste à un scénario purement hypothétique et pénalisant, des valeurs d'exposition potentielle d'une personne du public dans cette gare voyageurs.

Quels que soient les scénarios, l'étude démontre que l'exposition du public est limitée, toujours en dessous de la limite réglementaire d'exposition du public ou de l'exposition naturelle en France (voir les résultats détaillés au §5.4), et d'un ordre de grandeur comparable à l'exposition moyenne du public en France aux rayonnements cosmiques ou telluriques.

Note additionnelle :

A l'issue de cette analyse menée en 2023 et 2024, les modalités d'organisation logistiques des transports de combustibles usés ont évolué et l'arrêt facultatif en gare de Lisieux n'est plus prévu à partir de l'année 2025. Le cas analysé ici est toutefois conservé comme base technique car il présente désormais un caractère d'autant plus pénalisant qu'il n'est plus associé à un cas concret.

Opérateur international de premier plan dans le domaine des matières nucléaires, Orano apporte des solutions aux défis actuels et futurs, dans l'énergie et la santé.

Son expertise ainsi que sa maîtrise des technologies de pointe permettent à Orano de proposer à ses clients des produits et services à forte valeur ajoutée sur l'ensemble du cycle du combustible.

Grâce à leurs compétences, leur exigence en matière de sûreté et de sécurité et leur recherche constante d'innovation, l'ensemble des 17 500 collaborateurs du groupe s'engage pour développer des savoir-faire de transformation et de maîtrise des matières nucléaires, pour le climat, pour la santé et pour un monde économe en ressources, aujourd'hui et demain.

7. Annexe 1

7.1. Objectif

Une analyse a été menée sur la base des transports de combustibles usés réalisés sur plusieurs années. Afin de connaître les débits de dose autour des convois, plusieurs données ont été utilisées et sont détaillées dans cette annexe :

- Les relevés de mesures de débits de dose réalisées lors de chaque transport sur les différents sites.
- Des mesures complémentaires effectuées sur le terrain, lors de transports de combustibles usés, afin de déterminer des valeurs de débits de dose à distance.

Dans cette annexe et le document, les débits de dose correspondent à l'équivalent de dose ambiant par unité de temps mesuré au point d'intérêt. Les valeurs affichées tiennent systématiquement compte de la contribution des rayonnements gamma et neutrons.

7.2. Analyse des relevés lors de chaque transport

Lors de chaque transport de combustibles usés entre les centres nucléaires de production d'électricité et l'usine de traitement de la Hague, des mesures de débits de dose sont réalisées sur les sites expéditeur, destinataire, ainsi qu'en cours de transport. Ces débits de dose sont mesurés au contact et à un mètre des colis ainsi qu'au contact et à deux mètres des moyens de transport.

Des estimations pénalisantes de débits de dose sont également réalisées de manière systématique avant chaque transport.

La synthèse de ces données, pour tous les transports sur les 5 dernières années, est présentée dans le tableau ci-dessous.

Année	**Nombre de transports**	**Indice de transport (TI)**		**Débit de dose (mSv/h)** (moyenne)		
		Moyenne	**Moyenne + 2σ**	**Contact** (du colis)	**1 mètre** (du colis)	**2 mètres** (du moyen de transport)
2019	174	8	11,3	0,406	0,080	0,035
2020	178	7,7	11,6	0,413	0,077	0,033
2021	197	7,4	11,5	0,397	0,074	0,033
2022	140	7,9	12,3	0,436	0,079	0,036
2023	143	7,5	11,4	0,418	0,075	0,032
Moyenne	**166**	**7,7**	**11,6**	**0,414**	**0,077**	**0,034**

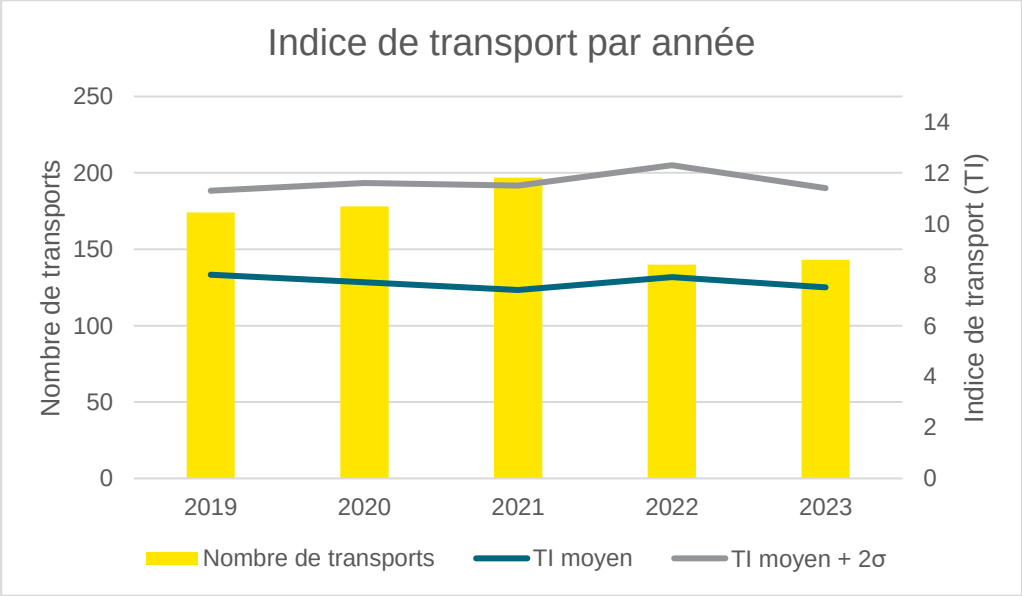
Les valeurs d'indice de transport et de débits de dose sont les moyennes des relevés, issus des documents de transport renseignés par les intervenants lors de chaque transport et des estimations de débits de dose, réalisées de manière systématique avant chaque transport[1].

Pour précision, les valeurs au contact et à 1 mètre sont mesurées à partir du colis, les valeurs à 2 mètres sont mesurées à partir du moyen de transport.

La valeur moyenne de débit de dose issue de l'analyse de tous les transports réalisés est d'environ 0,08 mSv/h à 1 mètre des colis (la valeur moyenne exacte est de 0,077). Cette valeur correspond à un indice de transport (TI) de 8.

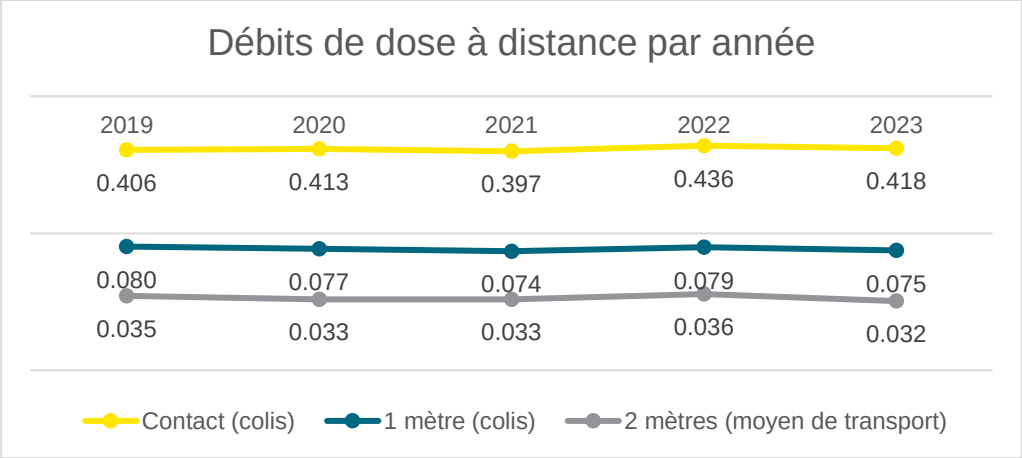
La valeur moyenne d'indice de transport + 2σ, qui correspond à une valeur statistiquement représentative d'un maximum, est de l'ordre de 12.

Ces valeurs sont stables dans le temps, le type de transports réalisés variant peu. La figure ci-dessous présente sur les années 2019 à 2023 le nombre de transports de combustibles usés réalisés entre les centrales nucléaires françaises et la Hague et l'indice de transport moyen (ainsi que l'indice de transport moyen + 2σ) des colis transportés.



[1] Le tableau présente donc la moyenne des mesures réalisées au départ, des mesures réalisées à l'arrivée et des estimations prévisionnelles (estimations de débits de dose calculées avant transport). Les valeurs de ce tableau, appelées moyennes, sont donc « majorées » par le caractère pénalisant des estimatifs. A titre indicatif, le fait de ne considérer que les valeurs relevées (mesurées) sans les estimatifs (pénalisants) donnerait une moyenne de débit de dose à 2 mètres du moyen de transport non pas de 0,034 mSv/h mais de 0,029 mSv/h (0,030 mSv/h sur 2022).

A fins d'illustration, la figure ci-dessous présente la stabilité des valeurs de débits de dose moyens dans le temps.



7.3. Mesures complémentaires

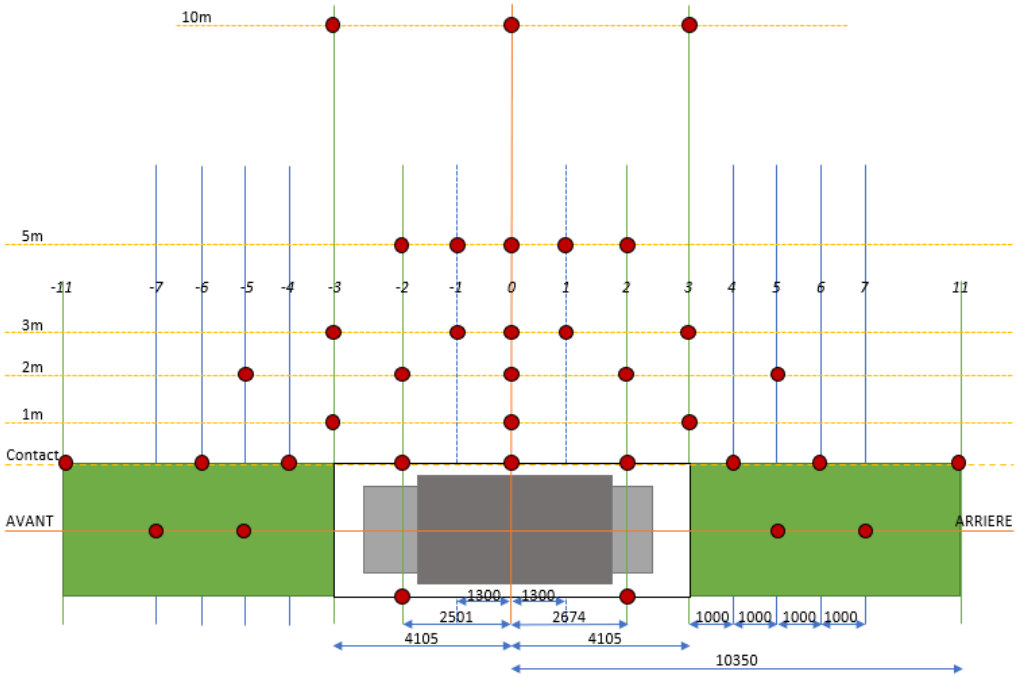
Des mesures complémentaires ont été effectuées sur le terrain, lors de transports de combustibles usés, afin de déterminer des valeurs de débits de dose à distance. Parmi ces mesures considérées, certaines n'ont pas été faites par Orano ou EDF, mais par une entité tierce pour le compte de la SNCF.

A. Campagne de mesure détaillée spécifique

Une première campagne de mesure a été réalisée en janvier 2024 au Terminal Ferroviaire de Valognes autour d'un convoi de combustibles usés. Les mesures ont été faites autour d'un wagon chargé d'un colis de type TN13/2 chargé de 12 assemblages de combustibles usés.

Les valeurs maximales de débits de dose mesurées par l'expéditeur au départ étaient de 0,53 mSv/h au contact du colis et 0,13 mSv/h à 1 mètre de ce colis. L'indice de transport de ce convoi déterminé par l'expéditeur était donc de 13, ce qui en fait un transport représentatif d'un convoi pénalisant dans le cadre de cette étude.

Sur ce convoi, des mesures de débits de dose gamma et neutron ont été réalisées à plusieurs distances du convoi, à plusieurs positions par rapport à l'endroit où le colis est chargé sur le wagon, ainsi que par exemple aux extrémités du wagon. Le schéma ci-dessous donne une représentation simplifiée des différents points de mesure réalisés, en vue de dessus, avec le colis en gris et le wagon en vert (platelages avant et arrière).



Des mesures complémentaires ont de plus été réalisées à 15 et 20 mètres. Tous les points ne sont pas représentés. En pratique, 50 points ont fait l'objet de mesures de débits de dose.

La synthèse de ces mesures, avec les valeurs maximales des débits de dose mesurées aux différentes distances, est présentée dans le tableau ci-dessous.

Distance par rapport au wagon (en mètres)	0	1	2	5	10	20
Débit de dose maximal mesuré sur le wagon (mSv/h)	0,113	0,056	0,030	0,010	0,004	0,0016

Les valeurs au contact, à 1 mètre et à 2 mètres ont été faites par rapport au wagon (pas de mesure directement sur le colis), à hauteur d'homme et à hauteur de l'axe du colis (qui est environ 1 mètre au-dessus). Les mesures à distance (5, 10 et 20 mètres) sont faites à hauteur d'homme. Les valeurs maximales ont été conservées.

B. Campagne de mesures par une entité tierce partie

En 2013, une entité tierce partie, ni associée à l'expéditeur, au destinataire ou au transporteur, a réalisé des mesures de débits de dose autour d'un convoi de combustibles usés dans le cadre d'une campagne de mesures demandée par la SNCF.

La synthèse de ces mesures, avec les valeurs maximales des débits de dose mesurées aux différentes distances, est présentée dans le tableau ci-dessous.

Distance par rapport au wagon (en mètres)	1	2	4	5
Débit de dose maximal mesuré sur le wagon (mSv/h)	0,026	0,022	0,011	0,009

Toutes les mesures ont été faites à hauteur d'homme, afin d'être représentatif des conditions de travail.

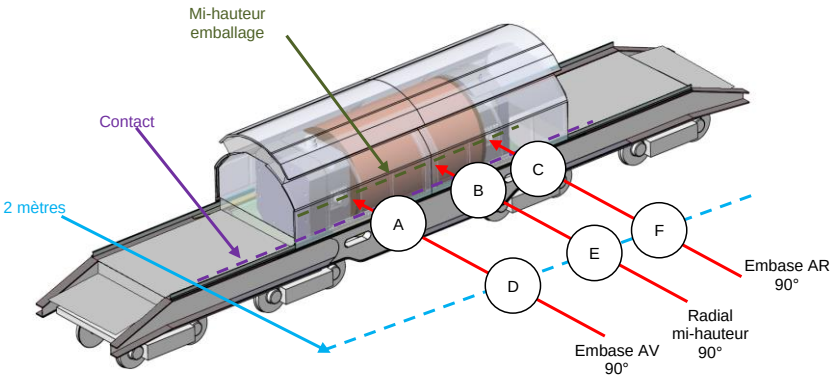
C. Mesures additionnelles à distance sur certains transports

Une campagne de mesure additionnelle a été réalisée en deux temps, en mai et en octobre 2024 au Terminal Ferroviaire de Valognes, autour de convois de combustibles usés. Les mesures ont été faites autour de wagons chargés de colis de type TN112, TN12/2 et TN13/2 chargés de 12 assemblages de combustibles usés.

En mai 2024, 4 transports ont fait l'objet de mesures. Deux wagons ont fait l'objet de mesures alors qu'ils étaient attachés. Il s'agit d'une situation représentative d'un cas avec 2 colis. Les deux autres étaient isolés d'autres substances radioactives.

En octobre 2024, 3 transports ont fait l'objet de mesures. Les trois wagons ont fait l'objet de mesures alors qu'ils étaient attachés. Il s'agit d'une situation représentative d'un cas avec 3 colis.

Sur ces convois, les mesures de débits de dose gamma et neutron ont été réalisées à plusieurs distances du convoi. Le schéma ci-dessous donne une représentation simplifiée des différents points de mesure réalisés au contact et à 2 mètres du wagon.



Les mesures ont été faites à mi-hauteur de l'emballage au contact et à 2 mètres, puis à hauteur d'homme à 5, 10 et 15 mètres du wagon.

Le détail des valeurs relevées est donné dans le tableau ci-dessous, en fonction des configurations rencontrées :

Débits de dose sur le wagon (mSv/h)	Wagon isolé	2 wagons accolés	3 wagons accolés	Moyenne générale
Contact	0,064	0,042	0,055	0,054
2m	0,017	0,025	0,022	0,021
5m	0,009	0,013	0,010	0,010
10m	0,004	0,006	0,004	0,005
15m	0,0020	0,0013	0,0027	0,0021

7.4. Compilation des données

L'objectif des données de débits de dose étant de pouvoir réaliser des estimations dosimétriques, l'ensemble des données précédentes est pris en considération afin de déterminer un ensemble de valeurs utiles.

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des valeurs mesurées précédentes :

Débits de dose (mSv/h)	Distance par rapport au wagon (m)						
	0	1	2	4	5	10	15
A. Mesure spécifique	0,113	0,056	0,030		0,010	0,004	0,0018
A'. Mesure spécifique majorée	0,138	0,068	0,037		0,012	0,005	0,0022
B. Mesures tierces			0,022	0,011	0,009		
C. Mesures complé-mentaires	0,054		0,021		0,010	0,005	0,0021
Tendance	0,140	0,065	0,038	0,017	0,013	0,005	0,0024

Dans ce tableau, les lignes A, B et C correspondent aux campagnes explicitées dans les paragraphes précédents. Deux lignes sont ajoutées.

- La ligne A' correspond à une version majorée des mesures A :

  En effet, les mesures de la campagne A sont des mesures spécifiques adaptées au cas de la présente étude. Elles ont été faites sur un transport dont l'indice de transport était de 13.

  La valeur moyenne de débit de dose issue de l'analyse de tous les transports réalisés est d'environ 0,08 mSv/h à 1 mètre des colis. Cette valeur est stable dans le temps, le type de transports réalisés variant peu. Afin d'être pénalisant dans les estimations qui seront menées dans l'étude, la valeur moyenne de débit de dose à 1 mètre est multipliée par 2, ce qui induit un débit de dose d'environ 0,16 mSv/h à 1 mètre des colis. Cette majoration correspond à un indice de transport de 16, qui couvre par ailleurs l'indice de transport moyen majoré (moyenne + 2σ).

  L'utilisation de cette valeur permet de majorer les données associées aux mesures complémentaires effectuées sur le terrain et de déterminer des débits de dose pénalisants à distance des moyens de transport (ici, les wagons).

La ligne A' correspond ainsi formellement aux valeurs relevées dans la campagne A, multipliées par un facteur correctif pour passer d'un indice de transport de 13 à un indice de transport de 16 (x 16 / 13).

- La ligne « Tendance » correspond à un ensemble de valeurs calculées :

  Cette ligne est calculée en se basant sur une valeur majorée de valeur au contact du wagon, à savoir 0,140 mSv/h. Elle suit une loi d'atténuation, selon la formule suivante :

$$\dot{D}_d = \dot{D}_0 \times \left(\frac{d_0}{d + d_0}\right)^{1,9}$$

  Avec :

  $\dot{D}_d$, le débit de dose à la distance d

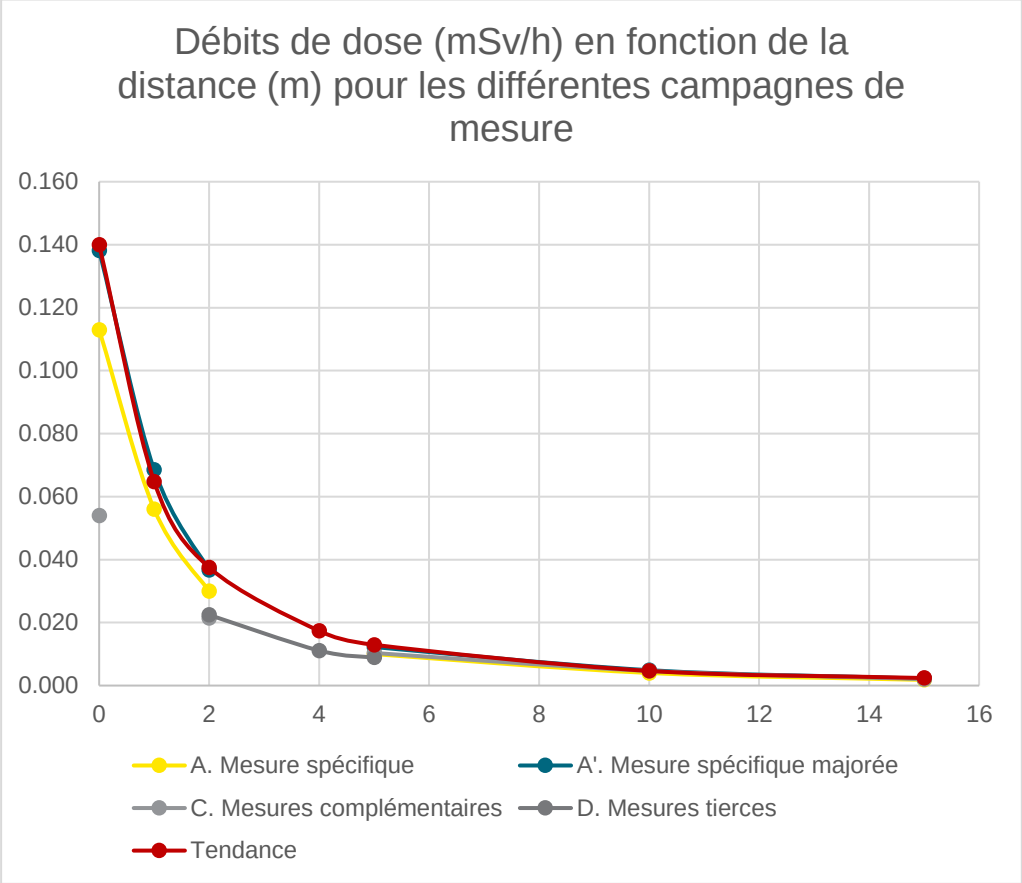
  $\dot{D}_0$, le débit de dose au contact

  d_0 , la distance équivalente au contact (estimée à 2 mètres)

  d , la distance par rapport au wagon

  Cette formule permet d'avoir des données aux différentes distances, même à des distances qui n'ont pas fait l'objet de mesures, et est raisonnablement pénalisante par rapport aux autres données mesurées.

Ces différentes données sont présentées sur la figure suivante, qui précise les débits de dose à partir des surfaces externes du wagon (le colis étant lui-même à l'intérieur du wagon, la valeur au contact du wagon est plus faible que la valeur autour du colis).



Le courbe de tendance couvrant les autres courbes, les valeurs utilisées dans l'étude seront issues de cette courbe de tendance.

Le tableau suivant présente ces jeux de données :

Débits de dose (mSv/h)	**Distance par rapport au wagon (m)**						
	0	**1**	**2**	**4**	**5**	**10**	**15**
Débits de dose péna-lisants (tendance)	0,140	0,065	0,038	0,017	0,013	0,005	0,002
Débits de dose majorés	0,375	0,174	0,100	0,047	0,035	0,012	0,006

Les débits de dose pénalisants sont les débits de dose issus de la courbe de tendance.

Les débits de dose majorés sont déduits de la courbe de tendance, ajustée pour que le débit de dose à 2 mètres soit de 0,1 mSv/h, ce qui correspond au critère réglementaire.