



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

RAPPORT

ELEMENTS METHODOLOGIQUES POUR L'ELABORATION DE L'ETUDE D'IMPACT RADIOLOGIQUE D'UNE INSTALLATION CYCLOTRON

Pôle Santé et Environnement

Rapport IRSN N° 2022-00193

TABLE DES MATIÈRES

1	ELEMENTS DE CONTEXTE	5
2	CADRE REGLEMENTAIRE	5
3	ETAPES DE L’EVALUATION DE L’IMPACT DES REJETS	6
3.1	La description des rejets	8
3.2	La description de l’environnement.....	9
4	LES TRANSFERTS DANS L’ENVIRONNEMENT	10
4.1	Les voies de transfert des radionucléides dans l’environnement.....	10
4.2	Le choix des codes de calcul.....	11
5	L’EVALUATION DE LA DOSE	12
5.1	Les personnes représentatives.....	12
5.2	Les voies d’exposition.....	12
5.3	Le calcul de la dose.....	13
6	LA GESTION DES INCERTITUDES	14
	FICHES	16

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1 : Démarche générale d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets d'un cyclotron, à l'appui d'une demande d'autorisation de rejet.....8

Glossaire

ASN Autorité de sûreté nucléaire

CSP Code de la santé publique

IRSN Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

INERIS Institut national de l'environnement industriel et des risques

1 ELEMENTS DE CONTEXTE

Un cyclotron est un accélérateur de particules permettant la production d'isotopes radioactifs utilisés pour l'élaboration de radiopharmaceutiques pour des applications diagnostiques, thérapeutiques ou de recherche. Le fluor 18 et le carbone 11 sont les isotopes principalement produits. Les périodes radioactives de ces isotopes sont courtes (quelques heures) et justifient l'implantation des cyclotrons à proximité des hôpitaux qui les utilisent. Au regard des caractéristiques actuelles du fonctionnement des installations de production de radiopharmaceutiques, les cyclotrons rejettent des effluents radioactifs dans l'atmosphère. Ils ne rejettent pas d'effluents radioactifs liquides dans les cours d'eau ou dans la mer.

Conformément aux obligations réglementaires (présentées au chapitre 2 du présent guide) auxquelles les exploitants d'installations nucléaires sont soumis, un exploitant d'installation fabriquant des radionucléides au moyen d'un cyclotron (dénommée dans ce guide plus simplement « cyclotrons ») doit se conformer au régime d'autorisation. Dans ce cadre, il doit notamment produire en support à sa demande d'autorisation de rejets radioactifs dans l'environnement, une évaluation quantifiée de leur impact sur la population (appelée dans le présent document « étude d'impact »). Cette évaluation nécessite la mise en œuvre d'une démarche calculatoire pour estimer des valeurs des doses potentiellement reçues par la population autour des sites de production.

Le présent document vise à proposer un cadrage général sur les attendus de l'étude d'impact pour les cyclotrons, qui pourrait être mis à disposition des exploitants pour les guider dans la réalisation de leurs études. Il comprend un rappel du cadre réglementaire et identifie les principales étapes de la modélisation de l'impact dosimétrique, à savoir : la description des rejets, la description de l'environnement de l'installation, l'identification des voies de transfert dans l'environnement et leur modélisation (via l'évaluation de la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère et des transferts de radionucléides dans les compartiments de l'environnement), l'identification des voies d'exposition de la population, des personnes représentatives et l'évaluation des doses reçues par les personnes représentatives. Il attire par ailleurs l'attention sur certains points clés de l'étude sur lesquels la qualité de l'évaluation repose en grande partie, et qui sont notamment issus du retour d'expérience de l'IRSN de l'expertise de dossiers récents de demandes d'autorisation de rejets par des exploitants de cyclotrons. En fin de document, sont annexées des fiches détaillées pour approfondir certains points de la démarche.

Enfin, il convient de préciser que le présent document de cadrage est limité à l'étude d'impact radiologique sur les populations pour le fonctionnement normal de l'installation.

2 CADRE REGLEMENTAIRE

La fabrication de radionucléides et de produits en contenant au moyen d'un cyclotron relève du régime d'autorisation prévu aux articles L. 1333-8 et R. 1333-104 du code de la santé publique. Le cadre réglementaire pour cette activité est celui du code de la santé publique (CSP) et le régime administratif de ces installations est celui de l'autorisation.

L'article R. 1333-16 alinéa I du CSP [1] stipule que le responsable d'une activité nucléaire rejetant dans ses effluents des quantités significatives de radionucléides dans l'environnement propose à l'autorité compétente des valeurs limites de rejet en tenant compte notamment de l'estimation des doses reçues par la population potentiellement exposée. L'évaluation des doses auxquelles la population est potentiellement soumise du fait des rejets est encadrée par l'article R. 1333-23 qui stipule que « toute estimation de doses auxquelles la population est exposée prend en compte les doses résultant de l'exposition externe aux rayonnements ionisants et de l'incorporation de radionucléides. Elle est calculée pour une personne représentative, selon des scénarios aussi réalistes que possible ». Une personne représentative est définie à l'Annexe 13-7 du CSP [2] comme une « personne recevant une dose, qui est représentative des personnes les plus exposées au sein de la population, à l'exclusion des personnes ayant des habitudes extrêmes ou rares ». L'article 66 de la directive Euratom 2013/59 [3] précise que l'ampleur des dispositions prises pour l'estimation des doses auxquelles sont soumises les

personnes du public du fait de pratiques autorisées « *est proportionnée au risque d'exposition concerné* ». L'IRSN attire notamment l'attention sur le terme « réaliste » utilisé par le législateur pour qualifier les scénarios d'exposition, spécification qui sous-tend la démarche d'évaluation des doses décrite dans les chapitres qui suivent. L'application du principe de proportionnalité aux enjeux implique que le niveau de détail et de réalisme attendu dans l'étude d'impact d'un établissement est en proportion avec l'importance de son impact dosimétrique potentiel.

Pour respecter les principes généraux d'optimisation et de limitation mentionnés à l'article L. 1333-2 du CSP [1], l'article L. 1333-7 du CSP impose que le responsable d'une activité nucléaire mette en œuvre des moyens et mesures permettant d'assurer la protection de la santé publique, de la salubrité et de la sécurité publiques, ainsi que de l'environnement, contre les risques ou inconvénients résultant des rayonnements ionisants liés à l'exercice de cette activité. L'évaluation de l'impact des rejets radioactifs est un élément permettant au responsable de l'installation cyclotron de montrer, conformément à l'article R. 1333-15 du CSP, qu'il met bien en œuvre tous les moyens relevant de sa compétence et raisonnablement possibles, compte tenu de l'état actuel des connaissances techniques et des facteurs économiques et sociétaux, pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection des intérêts mentionnés à l'article L. 1333-7 du CSP et, en particulier, ceux relatifs à la protection de la population contre les rayonnements ionisants liés à l'exercice de son activité.

La décision n° 2008-DC-0108 du 19 août 2008 de l'Autorité de sûreté nucléaire [4], homologuée par l'arrêté du 30 octobre 2008, précise le contenu des informations qui doivent être jointes aux demandes d'autorisation de détention et d'utilisation d'un accélérateur de particules (cyclotron) et de fabrication, de détention et d'utilisation de radionucléides émetteurs de positons et produits en contenant ou de renouvellement de ces autorisations. Ces demandes d'autorisations sont requises en application de l'article L. 1333-8¹ du CSP [1]. En application de l'article L. 592-21 du code de l'environnement [4], l'ASN délivre les autorisations. Celles-ci sont données pour une période de 5 ans dans la mesure où les conditions d'exercice restent conformes aux dispositions décrites dans le dossier de demande d'autorisation².

De plus, il convient de noter que les études d'impact sont soumises à la consultation du public, dans le cadre des procédures administratives de l'ASN, en application du titre II du livre 1^{er} du code de l'environnement [5], et mises à disposition du public par l'exploitant (Article L. 1333-6 du CSP).

Dans les chapitres qui suivent, on s'attache à décrire les principes, déclinés en quatre étapes, qui sous-tendent l'estimation dosimétrique de la population exposées aux rejets d'un cyclotron.

3 ETAPES DE L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS

L'évaluation de l'impact des rejets doit permettre de démontrer de façon quantifiée que les niveaux d'exposition induits par les rejets à l'atmosphère d'effluents radiologiques de l'installation sont aussi faibles³ que raisonnablement possible pour l'environnement et les populations. Cette évaluation s'appuie sur la présentation de :

¹ Article L. 1333-8 du CSP [6] ou article R. 1333-23 [1] dans la numérotation des articles du CSP applicable lors de l'homologation de la décision 2008-DC-0108.

² En particulier, une révision à la hausse des rejets ou une modification de leur composition peuvent être considérées comme n'étant pas conformes aux dispositions décrites dans le dossier. Il en serait de même si les modifications de l'environnement de l'installation sont susceptibles de faire évoluer le choix de la personne représentative à considérer dans l'étude d'impact (par exemple si un nouveau bâtiment est construit à proximité de l'émissaire de rejet).

³ Cette évaluation de l'impact des rejets radioactifs est un élément permettant au responsable de l'installation cyclotron de montrer, conformément à l'article R1333-15 du CSP [1], qu'il met bien en œuvre tous les moyens relevant de sa compétence et raisonnablement possibles, compte tenu de l'état actuel des connaissances techniques et des facteurs économiques et sociétaux, pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection des intérêts mentionnés à l'article L. 1333-7 du CSP [1] et, en particulier, ceux relatifs à la protection de la population contre les rayonnements ionisants liés à l'exercice de son activité ou à un acte de malveillance.

- la composition justifiée des effluents : nature et quantité des substances rejetées ;
- d'une ou plusieurs évaluations des doses à la population qui serait exposée aux valeurs limites d'activités rejetées demandées par l'exploitant de l'installation.

Dans les chapitres qui suivent, ces deux points sont abordés successivement à travers quatre étapes d'analyse qui consistent en (voir **Figure 1**) :

1. La description des rejets ;
2. La description de l'environnement de l'installation ;
3. Les transferts dans l'environnement par l'identification des voies de transfert, et leur modélisation via l'évaluation de la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère et des transferts de radionucléides dans les compartiments de l'environnement ;
4. L'évaluation des doses par l'identification des voies d'exposition, des personnes représentatives et le calcul des doses reçues par celle-ci.

La description des rejets et celle de l'environnement local sont les étapes préalables qui permettent d'identifier les voies de transfert dans l'environnement, de choisir les modèles pour estimer la dispersion des radionucléides et leur transfert vers les différents compartiments de l'environnement et dans la chaîne alimentaire, et d'identifier les voies d'exposition de la population ainsi que les personnes représentatives pour calculer leur exposition.

La mise en œuvre de l'approche proportionnée peut notamment être déclinée conjointement sur la description des rejets et de l'environnement ainsi que sur le niveau de complexité des modèles de transferts retenus. Chacun de ces points est à adapter au regard de l'impact potentiel attendu et de la complexité de l'environnement autour du cyclotron.

Des éléments détaillés pour mettre en œuvre cette démarche sont présentés dans les deux fiches en annexe du présent document :

- **Fiche 1** : Éléments d'aide pour le choix du modèle utilisé pour le calcul de dispersion atmosphérique
- **Fiche 2** : Description de la personne représentative

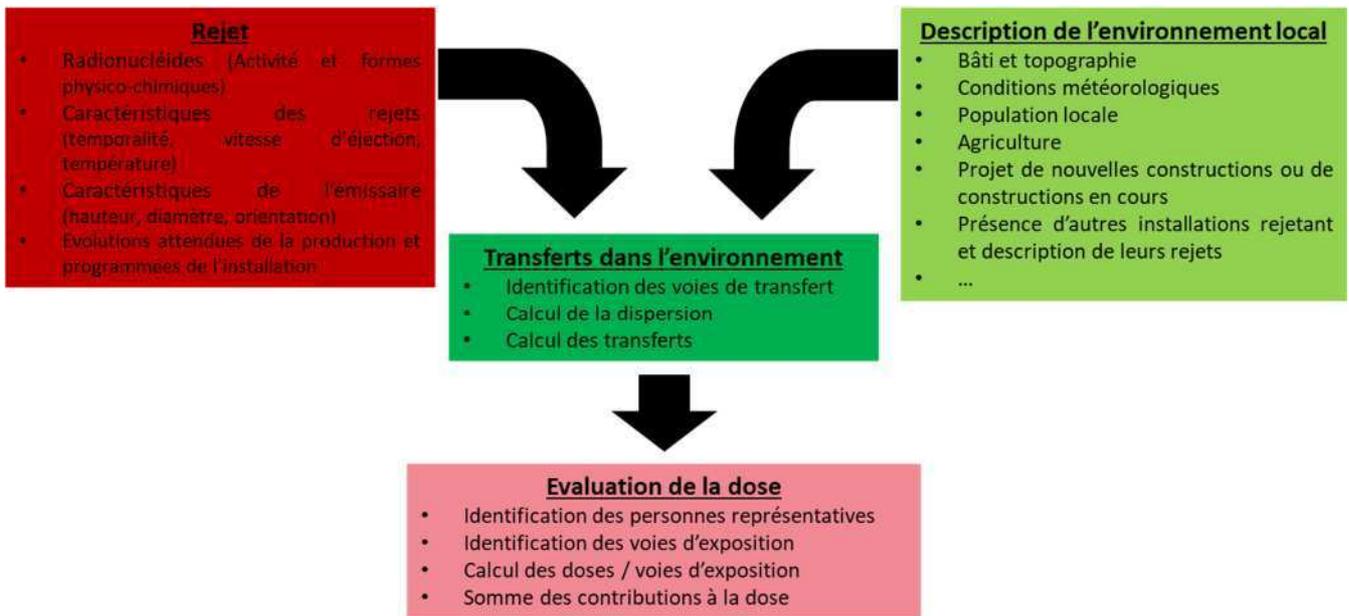


Figure 1 : Démarche générale d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets d'un cyclotron, à l'appui d'une demande d'autorisation de rejet.

3.1 La description des rejets

L'étude d'impact est réalisée pour les valeurs limites de rejets annuels demandées par l'exploitant. Ces limites de rejet sont estimées sur la base des quantités de radionucléides produits, des processus de production [6,7], des moyens mis en œuvre sur l'installation pour réduire et maîtriser les rejets (filtration, mesure, lignes de retard...) en vue d'assurer un impact limité [8], et de la connaissance de l'exploitant acquise grâce à la surveillance à la cheminée des rejets de son installation.

La description des rejets pourra s'appuyer sur l'identification et la quantification des substances rejetées pour les différents états de fonctionnement de l'installation, à savoir :

- le fonctionnement normal de base, générant des rejets réguliers tout au long de l'année ;
- le cas échéant, les phases particulières de fonctionnement, comme des phases de maintenance, de changement de production etc. La fréquence de ces rejets et leur répartition dans l'année est à préciser ;
- le cas échéant, les aléas de fonctionnement, tel qu'une reprogrammation de la production pour l'adapter à la demande. Ces aléas de fonctionnement, considérés comme normaux, ne doivent pas être confondus avec les incidents et accidents, considérés⁴ en dehors du fonctionnement normal. La fréquence de ces aléas est à préciser.

Ainsi, les rejets cumulés du fonctionnement normal de base, des phases particulières de fonctionnement et des aléas de fonctionnement doivent être pris en compte pour définir les limites de rejet. D'une façon générale, les données relatives aux activités rejetées, présentées dans les dossiers, doivent être aussi réalistes que possible. L'exploitation de la surveillance des rejets en cheminée devrait contribuer au réalisme des demandes formulées par l'exploitant. La demande d'autorisation se fonde sur les niveaux de rejet attendus assortis éventuellement de marges raisonnables. Ces marges doivent reposer sur des bases justifiées auxquelles le retour d'expérience d'exploitation doit contribuer. Elles peuvent tenir compte des variations normales du fonctionnement de

⁴ On rappelle que les incidents et accidents, qui ne doivent en aucun cas être retenus pour les limites de rejet, font l'objet d'études séparées de l'étude d'impact proprement dite des rejets normaux.

l'installation, des différentes incertitudes relatives à l'estimation des rejets attendus, des moyens de contrôle de la radioactivité des effluents et des modifications prévues de l'activité de l'installation.

Les éléments suivants doivent être présentés dans l'étude d'impact :

- **Origine et caractérisation des effluents :** il s'agit de présenter, pour les différents états de fonctionnement de l'installation mentionnés ci-dessus, la composition des effluents (radionucléides et activités correspondantes) et les caractéristiques physico-chimiques de chaque radionucléide rejeté. La caractérisation des formes physicochimiques (partition entre les phases gazeuses et particulaires) s'appuiera notamment sur l'inventaire des différents lieux de production des effluents puisque celle-ci varie selon le mode de production (activation de l'air, enceinte de radiosynthèse...).
- **Modalités de rejet :** il s'agit d'identifier les plages horaires de rejet (à partir des registres de suivis de rejet pour les installations en fonctionnement ou sur les prévisions d'exploitation de l'installation pour les nouveaux sites de production), la durée des rejets, le nombre de rejets par jour ainsi que le nombre de jours de fonctionnement de l'installation ou la fréquence des rejets dans l'année pour les phases particulières et les aléas de fonctionnement.
- **Description des émissaires :** il s'agit de préciser à minima la localisation exacte de l'émissaire et sa hauteur. La forme de l'émissaire, ses dimensions (par exemple, pour une cheminée, sa hauteur, son diamètre ou sa section et son orientation) et les paramètres liés aux rejets, à savoir la vitesse et le débit d'éjection ainsi que la température des effluents sont également requis pour la mise en œuvre de modèle de dispersion atmosphérique de type 3D (Fiche 1) et pour les cyclotrons localisés en zone urbaine ou péri-urbaine.

Ces éléments caractérisant les rejets permettent en particulier de choisir les paramètres retenus pour simuler le comportement des radionucléides et leur transfert dans les différents compartiments de l'environnement. Par exemple, les plages horaires de rejet permettent de définir les conditions météorologiques prévalant pour le transport des effluents dans l'atmosphère ; la localisation précise du ou des émissaires, leurs formes et les paramètres liés aux rejets sont des éléments à considérer pour évaluer la hauteur effective des rejets. Cette dernière conditionne la hauteur du panache et donc l'exposition interne par inhalation due à l'immersion dans le panache pour des personnes situées à faible distance de l'émissaire.

3.2 La description de l'environnement

La description de l'environnement doit permettre d'identifier les voies de transfert potentielles, de choisir une modélisation adaptée pour les transferts des radionucléides dans l'environnement (voir aussi Fiche 1 en annexe) et d'identifier les voies d'exposition ainsi que les personnes représentatives (voir aussi Fiche 2 en annexe). Le niveau de détails fournis dans cette description doit être proportionné à l'impact radiologique de l'installation attendu et à la complexité de l'environnement décrit. L'environnement des cyclotrons situés en zone urbanisée ou dans une zone à orographie complexe devra être décrit avec précision et ce d'autant plus que le niveau de rejet demandé est important.

L'environnement est compris ici au sens large et comprend :

- l'orographie locale, la topographie des lieux, la climatologie locale ;
- l'environnement démographique, social et industriel local ;
- dans le cas où l'ingestion est une voie d'exposition à considérer, la description de l'environnement agricole, maraîcher, des jardins et vergers.

Ainsi doivent être décrites les caractéristiques qui influencent les écoulements atmosphériques au voisinage du site qui sont susceptibles d'affecter la dispersion atmosphérique des effluents et leur dépôt, à savoir :

- l'orographie, particulièrement, les variations de relief à proximité des installations, cette description est accompagnée de cartes aux échelles pertinentes ;
- la topographie des lieux et la description des bâtiments à proximité de l'installation. Ces informations doivent être associées à un plan précisant la position du ou des émissaires de rejet ;
- la climatologie locale doit être décrite, c'est-à-dire les distributions temporelles des conditions météorologiques à proximité de l'installation dont, *a minima*, la température, les vitesses et directions du vent, les hauteurs de précipitation, la nébulosité et l'humidité relative.

La description de l'environnement démographique est un élément concourant à la définition des personnes représentatives. Elle porte sur :

- l'habitat, les lieux de travail, les lieux recevant du public. Le critère de proximité géographique est à considérer en priorité ;
- les critères socioprofessionnels (populations résidentes, personnes travaillant à proximité) et les critères d'âge ;
- les critères d'habitude de vie ou de comportements (activités susceptibles de modifier l'exposition) ;
- les données relatives à la fraction du temps annuel passé par les personnes dans chaque lieu (habitation, jardin, terrain de sport...) et pour la pratique des activités en extérieur.

Dans le cas où l'ingestion est une voie d'exposition à considérer, la description de l'environnement doit aussi préciser :

- la description des pratiques agricoles, d'élevage et de production agroalimentaire (y compris les potagers privés et collectifs) qui peuvent se situer sous l'influence des rejets radioactifs,
- les données relatives aux régimes alimentaires des populations (en fonction de l'âge) autour de l'installation en tenant compte autant que possible des consommations d'aliments produits localement.

A proximité de l'installation, la présence éventuelle d'autres installations susceptibles d'émettre des radionucléides doit être mentionnée notamment si les personnes représentatives sont susceptibles d'être exposées aux différents rejets. Le cas particulier de deux cyclotrons implantés dans le même voisinage est susceptible d'être rencontré. Dans ce cas et si la proximité des installations le justifie, une étude d'impact commune peut être réalisée, en particulier s'ils partagent les mêmes personnes représentatives.

4 LES TRANSFERTS DANS L'ENVIRONNEMENT

L'évaluation des transferts dans l'environnement repose sur l'identification des différentes voies de transfert depuis l'atmosphère vers les compartiments de l'environnement et sur la modélisation des transferts de radionucléides depuis l'émissaire jusqu'aux différentes matrices environnementales par des codes de calculs appropriés.

4.1 Les voies de transfert des radionucléides dans l'environnement

Les voies de transferts correspondent au cheminement des radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement (sol, air, plantes, ...) à partir des émissaires du cyclotron jusqu'au contact des populations.

Ainsi, à partir du rejet à l'émissaire, les voies de transfert dans l'environnement concernent généralement : le transfert dans l'atmosphère des radionucléides ; pour les radionucléides sous forme d'aérosols ou de gaz, le dépôt sur les sols ; s'il y a présence de cultures agricoles ou maraichères, de jardins ou vergers privés, le dépôt sur les fruits et légumes. Pour les éventuels radionucléides à vie plus longue, on considérera la migration dans

les couches superficielles du sol. Enfin, dans le cas peu fréquent de présence de prés avec élevage de bétail, le transfert aux produits d'origine animale devra être considéré, notamment vers le lait.

A titre d'illustration, on pourra considérer les phénomènes et mécanismes suivants :

- La dispersion dans l'atmosphère en fonction de la climatologie annuelle et la dilution des radionucléides par la turbulence atmosphérique ;
- le dépôt sur la surface du sol ou sur les végétaux des radionucléides sous forme d'aérosols (poussières) ou de gaz réactifs qui sont dans l'atmosphère à proximité du sol et « tombent » sur le sol ou les feuilles des végétaux (dépôt dit « sec ») ;
- le dépôt sur le sol ou les végétaux des radionucléides sous forme d'aérosols ou de gaz réactifs par les gouttes de pluie qui traversent le panache (dépôt dit « humide ») ;
- le transfert foliaire correspondant au passage des radionucléides déposés par dépôt sec et par dépôt humide vers les feuilles des végétaux ;
- la translocation d'une fraction de l'activité déposée sur les parties aériennes du végétal qui migre dans ses parties comestibles ;
- la migration dans les couches superficielles du sol, par l'action humaine (labour, bêchage) ou par les précipitations, des radionucléides déposés par dépôt sec et par dépôt humide ;
- le transfert aux parties comestibles du végétal via ses racines de l'activité contenue dans le sol suite à la migration du dépôt ;
- ...

L'identification des voies de transfert dans l'environnement tient compte des caractéristiques des radionucléides rejetés telles que la période de décroissance et les paramètres radioécologiques (ie : facteurs de transfert, périodes biologiques d'élimination...). Dans l'hypothèse où des voies de transfert venaient à être négligées volontairement, cette omission devrait être justifiée, par exemple au moyen d'une estimation sommaire à titre de comparaison avec d'autres voies.

4.2 Le choix des codes de calcul

En pratique, quel que soit le cyclotron, les calculs de transfert des radionucléides dans l'atmosphère jusqu'à l'activité déposée sur le sol doivent être menés de façon à évaluer l'exposition des personnes au panache et au dépôt. Les transferts allant de l'activité déposée sur le sol jusqu'à l'homme au travers de l'ingestion de denrées contaminées sont à modéliser si les radionucléides rejetés ont une période de décroissance radioactive suffisamment longue pour être intégrés dans la chaîne alimentaire.

Pour modéliser ces différents processus de transfert des radionucléides dans l'environnement, le recours à des codes de calcul plus ou moins sophistiqués est nécessaire. En pratique, le choix du modèle doit se faire de façon proportionnée aux enjeux, c'est-à-dire au regard de l'impact attendu ou, en première intention, au regard de la limite de rejet demandée et de la complexité de l'environnement autour du cyclotron. La typologie⁵ des modèles de dispersion (voir la Fiche 1 en annexe) et de transfert retenus doit être détaillée et le choix des codes de calcul doit être justifié. Les hypothèses simplificatrices des modèles, les limitations connues, les expériences de validation doivent être présentées (éventuellement par un renvoi à des publications référencées dans le dossier et facilement accessibles). Les éventuelles adaptations du modèle au cas particulier du site doivent être décrites en détail. Concernant la dispersion du rejet dans l'atmosphère, l'influence de l'orographie ou de la présence de bâtiments élevés doit être discutée en regard de la typologie du modèle choisi et de la proximité des personnes

⁵ Le terme typologie fait ici référence à la nature des modèles numériques qui sous-tendent les codes de calcul utilisés, à savoir des modèles analytiques ou bien pluridimensionnels maillés dans l'espace.

représentatives identifiées. En effet, lorsque les particularités orographiques et l'occupation du terrain sont susceptibles d'affecter significativement la dispersion atmosphérique des effluents aux distances d'intérêt (pour le calcul de la dose), comme cela peut être le cas pour les cyclotrons situés en zone urbaine ou péri-urbaine, il convient de préciser dans quelle mesure la modélisation tient compte de ces effets et de montrer que la modélisation ne conduit pas à sous-estimer sensiblement l'exposition des populations.

5 L'ÉVALUATION DE LA DOSE

5.1 Les personnes représentatives

La notion de personne représentative est définie à l'Annexe 13-7 du CSP (définitions des termes utilisés en matière de protection contre les rayonnements ionisants) : il s'agit d'une « *personne recevant une dose, qui est représentative des personnes les plus exposées au sein de la population, à l'exclusion des personnes ayant des habitudes extrêmes ou rares* » [2]. En pratique, la personne la plus exposée peut différer en fonction de critères tels que les voies de transfert, les voies d'exposition, le nombre d'émissaires ou encore les groupes socio-professionnels potentiellement impactés par les rejets. Aussi, on sera le plus souvent amené à proposer plusieurs personnes représentatives illustrant la variabilité des impacts selon ces critères. A titre d'exemple, les travailleurs d'une industrie, les enfants d'une école et les adultes y travaillant ou les habitants vivant à proximité de l'installation parmi les plus exposés de leur catégorie pourront être choisis comme personnes représentatives pour une étude d'impact et identifiés séparément dans la restitution et la discussion des résultats. La dose reçue par ces personnes est par construction la dose maximum reçue par toute personne de la même catégorie du fait des rejets de l'installation. A la fin, on identifie une personne plus exposée que toutes les autres que l'on peut qualifier alors de personne représentative. La dose reçue par cette personne est par construction la dose maximum reçue par toute personne du fait des rejets de l'installation et celle qui fait référence pour l'acceptabilité des rejets.

Précisons que la démarche française consiste à choisir des personnes représentatives de l'occupation réelle des lieux plutôt que résultant d'une construction virtuelle. Comme indiqué ci-avant, on peut identifier des personnes représentatives par voie de transfert et voie d'exposition mais la plupart des personnes reçoivent des doses issues de plusieurs voies de transfert et d'exposition. Pour les rejets dans l'atmosphère, la proximité des personnes avec l'installation et la climatologie (direction des vents) joue un rôle important. Par ailleurs, l'âge de la personne représentative est un paramètre également important : des personnes d'âge différent, même exposées de manière identique, ne reçoivent pas la même dose.

L'identification des personnes représentatives repose donc sur des critères tels que :

- la distribution spatiale des lieux fréquentés (travail, sports, autres) ou habités, en particulier selon la proximité géographique de l'émissaire,
- l'utilisation des lieux (résidence/travail/activités particulières, fréquence et durée de présence),
- l'âge.

L'analyse approfondie de l'occupation et de l'utilisation de l'environnement est généralement une source d'information indispensable pour l'identification et le recensement des personnes représentatives.

5.2 Les voies d'exposition

Les voies d'exposition (appelées aussi parfois voies d'atteinte) correspondent aux voies suivies par les radionucléides et/ou les rayonnements pour atteindre les personnes exposées à partir d'un compartiment de l'environnement. Les voies d'exposition les plus fréquentes sont les suivantes :

- Le panache conduit à la contamination interne par **inhalation** des radionucléides et à l'irradiation des personnes par les rayonnements des radionucléides contenus dans le panache ;

- le dépôt conduit à l'**irradiation des personnes** par les rayonnements des radionucléides déposés sur le sol ;
- la contamination des aliments, notamment végétaux, conduit à la contamination interne par **ingestion** des radionucléides contenus dans les végétaux.

L'identification des voies d'exposition doit être réalisée à partir des compartiments de l'environnement concernés par les voies de transfert identifiées, et en tenant compte des caractéristiques des radionucléides rejetés (période de décroissance, facteur de protection de l'habitat, existence et valeur des coefficients de dose) et des personnes exposées (classe d'âge, présence et utilisation des lieux, régime alimentaire). Les voies d'atteinte très mineures ne sont négligées qu'après justification, éventuellement au moyen d'estimations sommaires.

5.3 Le calcul de la dose

L'indicateur qui permet d'évaluer l'impact sanitaire des rejets radioactifs est la dose efficace qui est estimée pour deux modes d'exposition qui sont :

- l'exposition externe : les radionucléides sont dans un compartiment de l'environnement en dehors de l'individu. Ce sont leurs rayonnements qui atteignent l'individu. L'exposition externe peut être notamment due à :
 - l'irradiation par le panache,
 - l'irradiation par les radionucléides déposés sur le sol.
- L'exposition interne : les radionucléides sont dans l'organisme de l'individu, i.e. il y a eu incorporation de ces derniers. L'exposition interne peut être notamment due à :
 - l'inhalation des radionucléides présents dans l'atmosphère,
 - l'ingestion d'aliments contaminés.

Le calcul de la dose inclut l'ensemble des voies d'exposition et des radionucléides rejetés par l'installation. Des coefficients de dose externe et des coefficients de doses engagées par unité d'incorporation (DPUI) sont utilisés selon le type d'exposition. Ces coefficients permettent de calculer la dose efficace à partir des activités incorporées pour l'exposition interne, des activités surfaciques sur les sols pour l'irradiation et l'activité volumique dans l'air pour l'immersion dans le panache.

Actuellement, les coefficients de dose recommandés pour le calcul de dose sont :

- pour l'exposition externe : les valeurs figurant au « Federal Guidance Report » n°12 ou 15 de l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (US-EPA) [10,11], ainsi que les valeurs de la publication 144 de la CIPR [12]⁶ ;
- pour l'exposition interne : les valeurs des DPUI de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 de la réglementation française [13], valeurs qui devraient être prochainement mises à jour.

Les doses calculées pour l'ensemble des personnes représentatives sont à mettre en regard de la valeur limite de 1 mSv/an pour la population (Art R. 1333-11 du code de la santé publique [1]) pour le fonctionnement normal de l'installation.

⁶ A la date de parution du présent document, le choix des coefficients de dose externe pour la population n'est pas réglementé. Il n'y a pas non plus de recommandation spécifique quant à la référence à privilégier pour choisir les coefficients de dose. Il est cependant conseillé de vérifier que cela est toujours le cas au moment de réaliser une étude d'impact. L'IRSN souligne que les publications les plus récentes de l'US-EPA et de la CIPR sont à l'état de l'art et à ce titre peuvent être choisies préférentiellement si le choix reste à la discrétion de l'exploitant.

6 LA GESTION DES INCERTITUDES

Les choix de modélisation (les modèles, les hypothèses, les paramètres, etc...) doivent être clairement exposés et justifiés, notamment sur la base de la description de l'environnement (valeurs spécifiques au site) ou de la littérature scientifique pertinente (valeurs non spécifiques au site). Toutefois, certains paramètres qui interviennent dans les calculs ne sont connus qu'imparfaitement (par exemple la forme physico-chimique des radionucléides rejetés ou le temps de présence des personnes à proximité de l'installation) ou sont variables (par exemple les conditions météorologiques varient d'une année sur l'autre). Il est préférable, dans ce cas, d'adopter une démarche prudente qui conduit à choisir des hypothèses et des valeurs de paramètres, compte tenu des incertitudes et des diverses options possibles, qui sont de nature à majorer le calcul de dose.

Pour étayer l'impact de ces choix ou vérifier que les hypothèses retenues sont prudentes, il est souvent souhaitable qu'une étude de sensibilité aux paramètres les plus incertains ou variables soit réalisée, dans l'objectif de conforter le caractère majorant des hypothèses retenues in fine pour calculer les doses des personnes représentatives. Une telle analyse doit rester graduée, en fonction des enjeux dosimétriques associés aux rejets.

RÉFÉRENCES

- [1] Code de la santé publique - Partie réglementaire - Première partie : Protection générale de la santé - Livre III : Protection de la santé et environnement - Titre III : Prévention des risques sanitaires liés à l'environnement et au travail - Chapitre III : Rayonnements ionisants.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006171595/#LEGISCTA000032044835
- [2] Code de la santé publique - Annexes de la première partie : Définition des termes utilisés en matière de protection contre les rayonnements ionisants. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000037018730/
- [3] Directive Euratom 2013/59 du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=fr>
- [4] Arrêté du 30 octobre 2008 portant homologation de la décision n°2008-DC-0108 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 19 août 2008 relative au contenu détaillé des informations qui doivent être jointes aux demandes d'autorisation de détention. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000019865945>
- [5] Code de l'environnement - Partie législative.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006108630/#LEGISCTA000006108630
- [6] Avis IRSN/2016-00046 du 16 février 2016 - Etude relative à l'évaluation des rejets d'effluents gazeux radioactifs des installations de production de radionucléides au moyen d'un cyclotron.
- [7] Avis IRSN/2017-00317 du 13 octobre 2017 - Analyse relative aux dispositifs de limitation des rejets des installations produisant des radio-pharmaceutiques (18F,11C) au moyen d'un cyclotron.
- [8] Avis IRSN/2017-00031 du 26 janvier 2017 - Effluents gazeux rejetés par les installations industrielles ou de recherche produisant des radionucléides au moyen d'un cyclotron - Dispositifs de mesure des rejets à l'émissaire.
- [9] Eckerman, K.F. and J.C. Ryman, External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, Federal Guidance Report 12 - EPA 402-R-93-081, ORNL, 1993
- [10] Bellamy, M.B. and al., External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil - External Dose Rate Coefficients for General Application, Federal Guidance Report N° 15 - EPA 402-R-19-002, ORNL, 2019
- [11] ICRP, 2020. Dose coefficients for external exposures to environmental sources. ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49 (2)
- [12] Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, Journal Officiel de la République Française N°262 du 13 novembre 2003

FICHES

Fiche 1. Eléments d'aide pour le choix du modèle de dispersion atmosphérique 17
Fiche 2. Description de la personne représentative..... 23

Fiche 1. Éléments d'aide pour le choix du modèle de dispersion atmosphérique

Les modèles de dispersion atmosphérique permettent de simuler le devenir des rejets en modélisant le transport, la diffusion et le dépôt au sol des polluants.

Le calcul de la dispersion atmosphérique des radionucléides rejetés par un cyclotron est un des points clés de l'étude d'impact parce que les activités de tous les autres compartiments de l'environnement en découlent. Les cyclotrons étant fréquemment implantés en milieu urbain ou semi-urbain (situés parfois à quelques dizaines de mètres de lieux de vie ou d'établissements recevant du public), cette étape requiert une attention particulière pour choisir un modèle de dispersion adapté et définir une configuration de calcul pertinente qui garantit de ne pas sous-estimer l'activité dans l'air et celle déposée sur les sols depuis l'atmosphère.

En pratique, le choix du modèle doit se faire de façon proportionnée aux enjeux, c'est-à-dire au regard de l'impact attendu ou, en première intention, au regard de la limite de rejet demandée et de la complexité de l'environnement autour du cyclotron. Une modélisation simplifiée et conservatrice de la dispersion atmosphérique peut suffire à évaluer l'ordre de grandeur majoré de l'impact même si les personnes exposées sont situées dans le voisinage proche de l'émissaire à l'exception des sites très urbanisés. Si l'impact estimé dépasse la dizaine de micro-Sievert⁷, il convient d'affiner l'estimation en mettant en œuvre une modélisation qui tienne compte des spécificités du site étudié.

Dans ce qui suit, nous abordons successivement les caractéristiques générales de deux types de modèles du transport atmosphérique des radionucléides, leur pertinence en fonction des caractéristiques des sites industriels à modéliser et enfin, pour chacun d'eux, les configurations de calcul à privilégier.

Quelques considérations générales sur la modélisation des transferts atmosphériques

Le transport des radionucléides est assuré par le vent et les caractéristiques de la turbulence atmosphérique conditionnent la dilution du panache. La turbulence près du sol et les caractéristiques des précipitations contribuent aux processus de dépôts qui transfèrent les radionucléides transportés par l'atmosphère sur les sols.

Les obstacles (bâtiments, lotissements, vallées, falaises, collines, buttes...) perturbent la trajectoire du vent et modifient les caractéristiques moyennes et turbulentes de l'écoulement de l'air. D'une manière générale, lorsque les obstacles sont de faible taille par rapport à celle du panache, les perturbations qu'elles engendrent n'affectent que de façon globale la dispersion du panache et il est possible de les prendre en compte par des paramètres de dispersion adaptés, sans qu'il soit nécessaire de modéliser les obstacles de manière explicite⁸. En revanche, lorsque la taille des obstacles est supérieure ou égale à la taille du panache, qu'il y a des îlots de bâtiments ou encore une rupture du relief, alors les mécanismes de dispersion sont réputés dépendre explicitement des caractéristiques du site. Dans ce cas, la mise en œuvre de modèles de dispersion permettant de tenir compte de la spécificité de l'écoulement autour des obstacles peut s'avérer nécessaire.

⁷ Cette valeur ne doit pas être interprétée comme une contrainte de dose mais comme un niveau d'aide au choix de la modélisation à mettre en œuvre.

Cette valeur est déduite d'une part du détriment radiologique (environ 10^{-6} à une dose efficace de 10 μ Sv, selon l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil) et d'autre part, correspond à un niveau de dose efficace pouvant être rencontré autour des installations nucléaires de base.

⁸ Prendre en compte de manière explicite les obstacles dans les calculs signifie que l'écoulement autour des obstacles est modélisé en tenant compte de leurs caractéristiques (dimension, forme, localisation).

...

Pour répondre à ses deux types de configurations, il existe plusieurs catégories de modèles de dispersion atmosphérique. Deux types de modèles sont en particulier utilisés dans les études d'impact⁹: les modèles gaussiens ou les modèles dits tridimensionnels (modèles 3D).

Modèles Gaussien

Initialement développés au début des années 60 pour représenter le comportement d'un panache issu d'une cheminée sur un terrain plat, les modèles gaussiens postulent que la concentration dans le panache est régie par une loi gaussienne (Figure 1). Cette formulation introduit des coefficients de dispersion dans les directions horizontales et verticales normales à la direction du panache (σ_y , σ_z). Ceux-ci sont déterminés à partir de données expérimentales qui conditionnent l'utilisation pour les situations similaires à celles dans lesquelles ces données ont été obtenues (soit leurs domaines de validité).

Cette approche gaussienne est très peu coûteuse en temps de calcul et simple à mettre en œuvre. Cela en fait les modèles les plus couramment utilisés pour les études d'impact. En contrepartie, ils ne sont pas validés dans les situations suivantes :

- une cible à une distance très proche, typiquement située à une distance à la source de moins de 100 mètres ;
- une cible à une distance à la source supérieure à quelques dizaines de kilomètres ;
- la dispersion sur un terrain avec relief ou en présence d'obstacles.

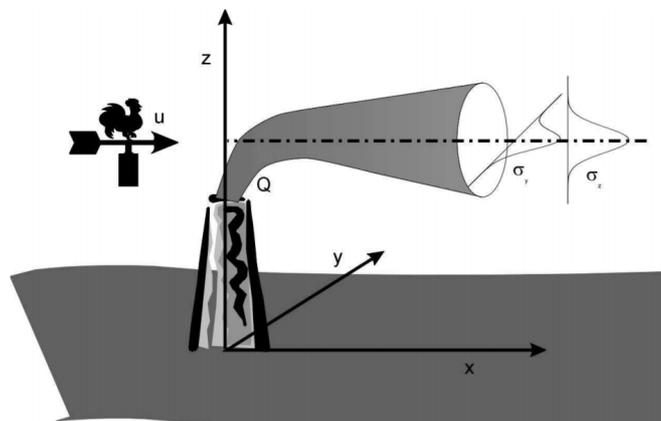


Figure 1 : Représentation d'un panache gaussien d'après [1].

Modèles maillés (tridimensionnels ou 3D)

Des modèles beaucoup plus sophistiqués et utilisant des maillages¹⁰ de l'espace multidimensionnels (Figure 2) (modèles « tridimensionnels » 3D dans le cas présent) sont capables de simuler le comportement dans les trois dimensions de l'espace d'un rejet atmosphérique. Ils se distinguent en particulier des modèles gaussiens dans la

⁹ Ces deux types de modèles sont aujourd'hui utilisés par les industriels exploitant des cyclotrons pour modéliser les transferts de radionucléides.

¹⁰ Pour résoudre le système d'équations, celles-ci sont discrétisées sur un maillage, c'est-à-dire que le domaine de calcul est découpé en volumes élémentaires (les mailles) et les mailles sont définies de façon à décrire explicitement les obstacles tels que le bâti.

mesure où ils modélisent les obstacles ou le relief liés au site, en prenant en compte l'ensemble des phénomènes intervenant de façon significative sur la dispersion. Ce type d'outil permet de simuler, par exemple, les zones de recirculation autour d'obstacles ou les phénomènes d'accélération ou de décélération autour d'une topographie marquée qui jouent un rôle important dans l'accumulation ou la dilution du panache et le dépôt qui en résulte (Figure 3).



Figure 2 : Exemple de maillage autour de bâtiments pour la mise en œuvre de modèle 3D.

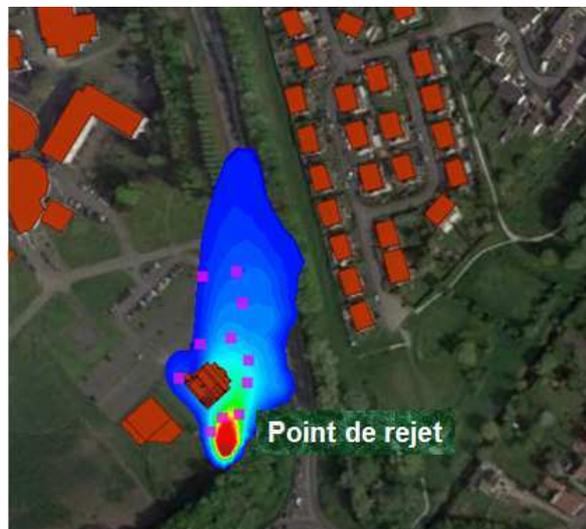


Figure 3 : Exemple de concentration près du sol simulée avec un modèle dit 3D.

Parmi les modèles 3D maillés, on distingue les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) et les modèles dits « mass-consistant ». Les modèles CFD sont les plus précis. Ils permettent de calculer simultanément le champ de vent et la dispersion des radionucléides en résolvant numériquement le système d'équations qui décrit le mouvement d'un fluide et la conservation de la masse des polluants. Les modèles « mass-consistant » représentent une alternative simplifiée aux modèles CFD pour le calcul du champ de vent et nécessitent d'être

couplés à un modèle de dispersion. Tous deux offrent des performances globalement équivalentes lorsqu'ils sont utilisés pour l'élaboration des études d'impact de cyclotrons.

Les modèles 3D sont toutefois coûteux en temps de calcul. De ce fait, ils sont utilisés pour simuler la dispersion sur des domaines de taille limitée couvrant des distances à la source ne dépassant pas le kilomètre ou au plus quelques kilomètres. Ils sont complexes à mettre en œuvre et requièrent des compétences spécifiques.

Critères de choix du modèle à présenter dans l'étude d'impact

L'étude d'impact présentée par l'exploitant doit préciser le type de modèle de dispersion utilisé et justifier ce choix. Pour choisir un modèle de dispersion compte tenu des conditions générales d'application des modèles présentés ci-avant, il convient en premier lieu de définir les caractéristiques de l'étude à mener. Dans le cas d'une étude d'impact d'un cyclotron cela consiste essentiellement à déterminer :

- L'échelle spatiale des calculs compte tenu des personnes représentatives identifiées sur le terrain : le domaine d'intérêt peut varier de quelques dizaines ou quelques centaines de mètres autour de la source à quelques dizaines de kilomètres ;
- La complexité de la topographie du site : celle-ci est liée à la présence d'obstacles, de bâtiments ou au relief entre l'émissaire et les personnes représentatives ;
- L'éloignement des personnes représentatives par rapport à l'émissaire.

Sur la base de ces considérations et du retour d'expérience de l'analyse des études d'impact on peut distinguer trois situations types :

- Pour les cyclotrons implantés en **zone urbaine**, les personnes représentatives sont situées à proximité immédiate de la source et l'influence des bâtiments devrait être explicitement prise en compte. La réalisation de l'étude d'impact requiert la mise en œuvre d'un modèle 3D ;
- Pour les cyclotrons implantés sur des **sites isolés** à quelques centaines de mètres des premières personnes représentatives, et si le site est peu accidenté, la configuration est compatible avec l'utilisation des modèles gaussiens ;
- Pour les cyclotrons situés en **zone péri-urbaine**, le choix du modèle de dispersion est moins trivial. Il repose en particulier sur l'analyse :
 - De la proximité des premières personnes représentatives à la source. Pour les personnes représentatives éloignées de l'émissaire, les turbulences induites par un bâtiment proche de la source peuvent être négligées sous certaines conditions et il n'est pas nécessaire de modéliser explicitement l'influence de l'obstacle sur l'écoulement. Dans ce cas, l'hypothèse d'un terrain approximativement plat sur le domaine de calcul peut être adoptée et un modèle gaussien utilisé. En revanche, si les personnes représentatives sont localisées à proximité de la source, dans la zone d'influence des bâtiments du site, un modèle maillé 3D est recommandé. En pratique, les mécanismes de dispersion peuvent être considérés comme dégagés de l'influence de tout obstacle au sol à des distances supérieures à 5 à 10 fois la dimension caractéristique de cet obstacle dans la direction du vent, ou à 2,5 fois perpendiculairement à cette direction à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical [2, 3].
 - De la taille, du nombre et de la densité des bâtiments présents sur la zone. Pour les sites dont les bâtiments sont peu nombreux ou peu élevés, une modélisation gaussienne peut être envisagée sous réserve que le paramétrage des calculs soit prudent en choisissant notamment une hypothèse de rejet au sol de façon à obtenir une estimation enveloppe de l'impact.

Remarque : lorsque l'impact estimé avec un modèle gaussien s'avère être significatif, typiquement supérieur à quelques dizaines de micro-Sievert par an, la vérification de l'ordre de grandeur ainsi calculé

peut nécessiter d'affiner l'estimation de l'impact avec une évaluation plus réaliste en mettant en œuvre un modèle 3D.

Quelques éléments clés de configuration des modèles

La configuration des calculs diffère selon le type de modèle utilisé notamment le choix de la hauteur du rejet et des conditions météorologiques. Par ailleurs, la configuration des modèles 3D nécessite des précautions qui sont en particulier discutées dans les travaux du GT3D¹¹ auxquels le présent document renvoie sans les détailler.

La configuration de l'émissaire de rejet atmosphérique

La hauteur de rejet est un paramètre susceptible d'influencer significativement l'impact en champs proche. Elle doit être paramétrée différemment selon le modèle de dispersion.

- **Modèle Gaussien** : à proximité de la source, en limite de validité des modèles, il convient de retenir l'hypothèse prudente d'un rejet au sol. Pour évaluer l'impact sur les personnes représentatives localisées à des distances à la source pour lesquelles les modèles gaussiens sont validés, une hauteur de rejet correspondant à la hauteur de la cheminée peut être retenue même si une hypothèse de rejet au sol reste un choix prudent.
- **Modèle 3D** : pour simuler de manière réaliste le comportement du panache en tenant compte de la perturbation du panache par les bâtiments, il convient de retenir la hauteur réelle de rejet en modélisant la manière dont les radionucléides sont rejetés à l'atmosphère. Pour cela, il est nécessaire de considérer la hauteur de la cheminée mais également la forme et la section de la cheminée, la température des rejets et la vitesse d'éjection pour modéliser une éventuelle élévation du panache au-dessus de la cheminée (appelée sur-hauteur).

Les conditions météorologiques

Les données météorologiques sont prises en compte sur une période longue de l'ordre d'une ou plusieurs années. Météo France dispose de plusieurs stations météorologiques par département susceptibles de mesurer les informations nécessaires à l'initialisation des modèles. Le choix de la station doit être guidé par sa capacité à représenter les conditions sur le site. L'éventuelle difficulté vient de possibles effets de vent locaux (en particulier en présence de relief) à l'origine de conditions différentes sur le site et au niveau de la station. La représentativité de la station doit être discutée dans l'étude d'impact ; si celle-ci s'avère être satisfaisante, des adaptations peuvent être proposées pour mieux prendre en compte les conditions météorologiques locales.

Les données météorologiques généralement utilisées pour initialiser les modèles sont les suivantes :

- **Modèle gaussien** : Le plus souvent, ce sont des roses des vents et de stabilité, construites à partir des données de la station météorologique choisie, qui sont utilisées. Il est également possible de simuler l'ensemble des situations météorologiques recensées sur une période représentative (5 ans par exemple) pour en déduire une évaluation des activités moyennes annuelles et des activités déposées cumulées.
- **Modèle 3D** : Les temps de calculs étant conséquents, les observations météorologiques utilisées pour initialiser les modèles 3D sont généralement les conditions observées sur une seule année choisie comme étant représentative de la rose des vents et de la rose des stabilités de la station. La représentativité de l'année choisie doit être démontrée dans l'étude d'impact. L'ensemble des situations

¹¹ Groupe de travail national créé à la demande du ministère en charge de l'écologie et piloté par l'INERIS qui a produit un guide de Bonnes Pratiques pour la réalisation de modélisations 3D.

météorologiques recensées au cours de l'année retenue pour l'étude peuvent être simulées. Une autre solution consiste à regrouper les conditions météorologiques en classes de caractéristiques similaires auxquelles des fréquences d'apparition sont affectées. Il suffit alors de simuler un nombre restreint de conditions afin d'évaluer l'exposition de chaque personne représentative en adoptant une démarche prudente, par exemple en choisissant, pour chaque classe, les conditions météorologiques susceptibles de conduire à la plus forte exposition. L'exposition annuelle est obtenue en effectuant la moyenne des valeurs calculées pour chaque classe, pondérée par leur fréquence d'apparition.

Précautions d'usage pour la mise en œuvre de modèles 3D

Si les modèles gaussiens sont relativement simples à mettre en œuvre, la complexité des modèles 3D nécessite un niveau d'expertise élevé, tant pour leur utilisation que pour l'analyse et l'interprétation des résultats. De plus, la complexité des phénomènes physiques nécessite un certain nombre de précautions. A cet égard, le GT3D a produit un document dans lequel il est notamment identifié des bonnes pratiques¹² à suivre pour la réalisation de modélisations 3D [4].

RÉFÉRENCES

- [1] Nicolas J. et Graffe F., La modélisation de la dispersion atmosphérique. Cas particulier des odeurs, Fondation Universitaire Luxembourgeoise – Arlon, 2003.
- [2] Hug M., Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique. Edition Eyrolles, 1975.
- [3] Seinfeld J.H. et Pandis S.N., Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate change. New York, John Wiley and sons, 1998.
- [4] INERIS, Guide des Bonnes pratiques pour la réalisation de modélisations 3D pour les scénarios de dispersion atmosphérique en situation accidentelle, Ref : DRA-15-148997-06852A, juillet 2015. https://aida.ineris.fr/sites/default/files/gesdoc/86009/Guide_Bonnes_Pratiques.pdf

¹² Le document du GT3D identifie des bonnes pratiques pour la réalisation de modélisation 3D pour des phénomènes dangereux de dispersion en situation accidentelles. Les bonnes pratiques ne sont donc pas toutes adaptées à la réalisation d'étude d'impact de cyclotron mais celles énoncées aux chapitres 3-4-5 sont spécifiques à la configuration des modèles 3D et il convient de les suivre ou de justifier pourquoi elles ne sont pas suivies dans les documents de l'étude d'impact.

Le document du GT3D insiste notamment sur les paramètres clés identifiés comme particulièrement influents sur le résultat d'une simulation pour tout type de situation modélisée (fonctionnement normal de l'installation ou situations accidentelles), et donc sur lesquels il convient d'être particulièrement attentifs. Les points relevés sont la constitution du maillage, l'utilisation de conditions aux limites adaptées, et la modélisation de la turbulence. Par ailleurs, en préambule à toute utilisation, il convient de disposer d'une étude de validation par l'utilisateur de l'outil. La validation par l'utilisateur impose à celui-ci de s'interroger sur le contenu et les limites de l'outil.

Fiche 2. Description de la personne représentative

Qu'est-ce qui caractérise une personne représentative ?

Pour réaliser une étude d'impact, une personne représentative est caractérisée par son âge, son débit respiratoire (selon ses activités), un budget temps, c'est-à-dire la fraction du temps annuel passée dans des zones potentiellement affectées par les rejets et par son régime alimentaire.

Généralement, les groupes de population autour des installations cyclotron sont constitués de plusieurs classes d'âge (l'exception principale étant les groupes constitués de professionnels, composés seulement d'adultes). Aussi il convient d'identifier parmi ces groupes la classe d'âge qui reçoit la dose la plus élevée. Pour la mise en œuvre pratique de cette identification, il est nécessaire de tenir compte des coefficients de dose et des données d'habitudes de vie (débit respiratoire, régime alimentaire, budget temps) pour ces classes d'âge. Les coefficients de dose et certaines caractéristiques sont disponibles pour les classes d'âge suivantes :

- l'enfant de moins de un an (enfant dit de 3 mois)
- l'enfant de 1 an à 2 ans (enfant dit de 1 an)
- l'enfant de 3 ans à 7 ans (enfant dit de 5 ans),
- l'enfant de 8 ans à 12 ans (enfant dit de 10 ans),
- l'enfant de 13 ans à 17 ans (adolescent dit de 15 ans),
- l'adulte.

En pratique, avec les outils numériques de calcul de dose, l'impact radiologique peut être facilement calculé pour l'ensemble des classes d'âges permettant ainsi d'identifier celles qui seraient les plus exposées.

Les débits respiratoires à utiliser sont les débits respiratoires moyennés sur le temps de présence des personnes et sont définis de préférence à partir des données fournies dans les publications n°66 ou 71 de la CIPR [2,3]. Dans des cas spécifiques, les débits respiratoires peuvent être adaptés pour des activités particulières (selon des critères socio-professionnels ou de pratiques de certaines activités, par exemple, du sport).

Par ailleurs, il est possible de tenir compte d'une certaine protection par les bâtiments pour les temps de présence à l'intérieur. Un facteur de protection de l'habitat peut alors être considéré pour estimer l'exposition de manière plus réaliste. Ce dernier paramètre étant très incertain, il est souvent considéré plus prudent d'ignorer cet effet de protection ou proposer une analyse de sensibilité.

Quand la voie ingestion doit être retenue, la ration alimentaire doit être définie pour les différentes catégories d'aliments. Un régime représentatif des habitudes locales est à privilégier ; il est souvent issu de données représentatives de la région (régimes régionaux). Seule la part des aliments produite localement est à considérer dans l'évaluation de l'impact.

RÉFÉRENCES

- [1] Code de la santé publique – Annexes de la première partie : Définition des termes utilisés en matière de protection contre les rayonnements ionisants.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000037018730/.
- [2] ICRP Publication 66 – Human Respiratory Tract – Model for Radiological Protection, Annals of the ICRP, Volume 24 N° 1-3 1994, Pergamon.
- [3] ICRP Publication 71 - Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Doses Coefficients, Annals of the ICRP, Volume 25 N° 3-4 1995, Pergamon.

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P 17 - 92260 Fontenay-aux-Roses

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr

MEMBRE DE
ETSON