

Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision
NT	101559	00	0001	C

Unité	Emetteur	CMT	Situation
0000	X00	000	0000

2 décembre 2015

NOTE TECHNIQUE

DDAE TDN

Etude d'impact dosimétrique du projet TDN

Rév.	Rédaction	Vérification	Approbation
C	T. GEILLE Le 17/11/2015	C. BALDASSARRA Le 17/11/2015	A. CIAVALDINI Le 17/11/2015

HISTORIQUE DES REVISIONS

Rév.	Signataire et repérages des paragraphes modifiés	
A	Rédacteur : T. GEILLE Vérificateur : C. BALDASSARRA Approbateur : A. CIAVALDINI	
B	Rédacteur : T. GEILLE Vérificateur : C. BALDASSARRA Approbateur : A. CIAVALDINI	Intégration des commentaires MOA et DSQE
C	Rédacteur : T. GEILLE Vérificateur : C. BALDASSARRA Approbateur : A. CIAVALDINI	Intégration des modifications suite au comité de de relecture

SOMMAIRE

1	GLOSSAIRE	6
2	BIBLIOGRAPHIE.....	6
3	CONTEXTE DE L'ETUDE	7
4	METHODOLOGIE.....	8
4.1	TYPLOGIES DES EFFETS DES SUBSTANCES RADIOACTIVES	8
4.1.1	Introduction	8
4.1.2	Rappels	8
4.1.3	Induction des effets déterministes (réactions tissulaires nocives).....	11
4.1.4	Induction des effets stochastiques	12
4.1.5	Induction des maladies autres que le cancer	14
4.1.6	Effets des rayonnements sur l'embryon et le fœtus.....	15
4.2	LOGICIEL DE MODELISATION DE L'IMPACT DOSIMETRIQUE.....	15
4.3	METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT DOSIMETRIQUE.....	16
4.4	ESTIMATION DE LA DISPERSION	18
4.5	CALCULS DES EXPOSITIONS ET MECANISMES DE TRANSFERT VERS L'HOMME.....	18
4.5.1	Transfert des radionucléides contenus dans les rejets aqueux	20
4.5.2	Transfert des radionucléides contenus dans les rejets atmosphériques.....	20
5	DONNEES RELATIVES AU LOGICIEL	21
6	DONNEES D'ENTREE LIEES AU PROJET TDN	23
6.1	TERMES SOURCES.....	23

6.1.1	Caractéristique de l'exutoire	23
6.1.2	Rejets atmosphériques.....	23
6.1.3	Hypothèses concernant les rejets atmosphériques.....	30
6.2	VOIES D'EXPOSITION RETENUES	31
6.3	DUREES DE FONCTIONNEMENT.....	31
7	CALCUL DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE A L'AIDE DU MODULE COTRAM.....	32
7.1	DONNEES METEOROLOGIQUES.....	32
7.2	DISTANCE ET AZIMUT DES GROUPES DE POPULATION PAR RAPPORT A L'EMISSAIRE DE REJETS ATMOSPHERIQUES DU PROJET TDN	33
8	RESULTATS.....	36
8.1	CAS DE L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DES DESCENDANTS DU RADON 222.....	36
8.2	DOSE EFFICACE ANNUELLE GLOBALE	37
8.3	CONCLUSION	38
9	EVALUATION DES INCERTITUDES	39
9.1	INCERTITUDES ASSOCIEES A LA CARACTERISATION DES EMISSIONS	39
9.2	INCERTITUDES ASSOCIEES A LA MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE.....	39
9.3	INCERTITUDES ASSOCIEES A L'EVALUATION DE L'EXPOSITION.....	40
9.4	INCERTITUDES ASSOCIEES AU CALCUL DE DOSE.....	40
9.5	BILAN DES INCERTITUDES	40
10	ANNEXE : CALCUL D'IMPACT DETAILLE POUR LE GROUPE LE PLUS EXPOSE : ENFANT 7-12 ANS – LIVIERE HAUTE.....	41
10.1	PARAMETRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE.....	41

10.2	EVALUATION DES TRANSFERTS DANS LES DIFFERENTS MILIEUX D'EXPOSITION	42
10.2.1	Activité dans les sols.....	42
10.2.2	Activité dans les produits d'origine animale	44
10.2.3	Activité dans les végétaux	46
10.2.4	Activité dans l'air.....	48
10.3	EVALUATION DES ACTIVITES INGEREES ET INHALEES CHEZ L'ENFANT 7-12 ANS DU GROUPE « LIVIERE HAUTE »	50
10.4	RESULTATS DETAILLES DU CALCUL DE DOSE – ENFANT 7-12 ANS – HABITATION LIVIERE HAUTE	52
10.4.1	Résultats détaillés du calcul de dose par voie d'exposition	52
10.4.2	Résultats détaillés du calcul de dose par radionucléides	53

1 GLOSSAIRE

ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AIEA	Agence Internationale pour l'Energie Atomique
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiologique
COMODORE	Code Modulable d'évaluation des Doses liées aux Rejets dans l'environnement
INCA	Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
UNSCEAR	United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

2 BIBLIOGRAPHIE

- [1] IRSN, 2009 - Publication 103 de La CIPR - Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique - Édition en langue française par J.C. Nénot assisté de J. Brenot, D. Laurier, A. Rannou et D. Thierry - Ed. Tec & Doc.
- [2] INSTN, 2006 – Radioprotection et ingénierie nucléaire – H. Métivier – Ed. EDP Sciences.
- [3] Notice d'évolution des paramètres de transfert du logiciel COMODORE version 2012 - Réf. 11AREP034RAP03C.
- [4] Notice théorique du logiciel COMODORE version 2012 - Réf. 11AREP034RAP06C.
- [5] Base CIBLEX, « Banque de données des paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué » - Juin 2003

3 CONTEXTE DE L'ETUDE

L'établissement AREVA NC Malvézi a pour activité la transformation des concentrés uranifères en tétrafluorure d'uranium (UF₄), première étape de la conversion de l'uranium, opération préalable aux opérations d'enrichissement isotopique.

Le procédé de conversion de l'uranium naturel génère des effluents liquides chargés en nitrates. Ces effluents liquides subissent une étape de décantation naturelle, dans des bassins. Les effluents épurés des matières en suspension sont transférés vers des bassins d'évaporation (lagunes) où ils sont concentrés sous l'effet du vent et du soleil.

Afin de traiter ces effluents liquides concentrés en sels, renfermant des traces de radionucléides, AREVA NC a lancé le projet de mise en place d'une installation industrielle de traitement, dénommée TDN (Traitement Des Nitrates).

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'impact sanitaire lié aux rejets radioactifs de cette installation. Cette évaluation est réalisée à l'aide de l'outil COMODORE.

Les résultats présentés ci-après sont basés sur les données et les hypothèses fournies et validées par AREVA NC.

4 METHODOLOGIE

4.1 TYPOLOGIES DES EFFETS DES SUBSTANCES RADIOACTIVES

4.1.1 Introduction

La plupart des effets nuisibles pour la santé de l'exposition aux rayonnements ionisants peuvent être regroupés en deux catégories générales :

- les « effets déterministes », (réactions tissulaires nocives), dus en grande partie à l'élimination / dysfonctionnement de cellules à la suite de fortes doses ;
- les « effets stochastiques », c'est-à-dire le cancer et les effets héréditaires impliquant soit le développement d'un cancer chez des individus exposés du fait de la mutation de cellules somatiques, soit une maladie héréditaire chez leur descendance du fait de la mutation des cellules reproductives (germinales).

Les effets sur l'embryon et le fœtus, ainsi que les maladies autres que le cancer, sont également pris en considération.

4.1.2 Rappels

Les éléments radioactifs présents dans l'environnement émettent des rayonnements alpha, bêta et gamma :

- les rayonnements gamma sont des ondes électromagnétiques ;
- les rayonnements alpha et bêta sont des particules : alpha est un noyau d'hélium, bêta est un électron ou positron.

Les effets biologiques des rayonnements ionisants (c'est-à-dire capables de provoquer des réactions générant des ions, particules chargées positivement ou négativement) dépendent :

- de la nature du spectre énergétique et du **pouvoir de pénétration** dans les tissus ;
- de la quantité totale reçue dans un volume tissulaire ou « dose » ;
- des conditions d'exposition : exposition externe ou interne ;
- du type d'irradiation : globale ou localisée.



Pouvoir de pénétration

Par leur énergie, les rayonnements ionisants sont pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent traverser la matière. Cependant, le pouvoir de pénétration est différent pour chacun d'entre eux, ce qui définit différentes épaisseurs de matériaux pour se protéger.

La grandeur utilisée pour comparer les effets des expositions aux rayonnements ionisants est la **dose**.

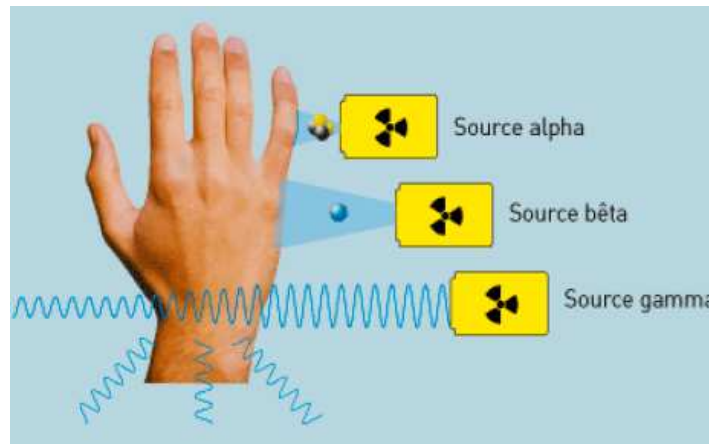


Figure 1 : Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants sur l'organisme (source : INSTN cf. [2])

La dose dépend des dépôts d'énergie dans l'organisme en provenance des rayonnements. Ces dépôts d'énergie sont à l'origine de modifications physiques et chimiques susceptibles d'entraîner des dommages biologiques. L'importance des dommages résultants dépend non seulement de la quantité d'énergie absorbée mais aussi du type de rayonnement et de la sensibilité de l'organe irradié.

Le tableau suivant présente les unités de mesure de la dose.

Dose	Dose absorbée (D)	Dose équivalente (HT)	Dose efficace (E)
Unité	Gray (Gy)	Sievert (Sv)	Sievert (Sv)
Définition	Quantité d'énergie communiquée à la matière par unité de masse (joule/kg)	Dose absorbée par le tissu ou l'organe T, pondérée suivant le type et la qualité du rayonnement ionisant	Somme des doses équivalentes pondérées délivrées aux différents tissus et organes par l'irradiation interne et externe

Tableau 1 : Unités de mesure de la dose

Les tableaux ci-après récapitulent les facteurs de pondération (facteurs de sensibilité des tissus) pour les rayonnements (utilisés pour le calcul de la dose équivalente) et les facteurs de pondération pour les tissus (utilisés pour le calcul de la dose efficace).

Particule / énergie	Facteur de pondération Nouvelles Recommandations CIPR 103*
Photons, toutes énergies	1
Électrons et muons, toutes énergies	1
Protons	2
Particules α , fragments de fission, noyaux lourds	20
Neutrons	Fonction continue

* La CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) élabore des recommandations générales portant sur tous les aspects de la protection contre les rayonnements ionisants, qu'il s'agisse des données scientifiques, des bases de la dosimétrie ou du système de radioprotection proprement dit. La CIPR 103 est la publication 103 parue fin 2007. Elle remplace la Publication 60 de 1991.

Tableau 2 : Facteurs de pondération pour les rayonnements (Source : IRSN, 2009 cf. [1])

Organe	Facteur de pondération	Somme des facteurs de pondération
Moelle épinière, sein, colon, poumon, estomac, tissus restants	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Vessie, œsophage, foie, thyroïde	0,04	0,16
Os, cerveau, glandes salivaires, peau	0,01	0,04

* Tissus restants : surrénales, région extrathoracique (ET), vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscle, muqueuse buccale, pancréas, prostate (♂), intestin grêle, rate, thymus, utérus/col de l'utérus(♀)

Tableau 3 : Facteurs de pondération tissulaires recommandés (Source : IRSN, 2007)

Le sievert est donc une unité additive : elle permet d'additionner des irradiations qui vont concerner plusieurs secteurs de l'organisme. Par exemple, si on irradie la peau et la thyroïde, on peut sommer les deux irradiations et prendre en compte la proportion de l'organe irradié.

Deux approches sont utilisées pour étudier les différents effets biologiques des rayonnements ionisants :

- l'épidémiologie, qui consiste à observer les effets sur des populations qui ont subi des irradiations d'origine naturelle ou artificielle (populations d'Hiroshima et Nagasaki, premiers radiologues et travailleurs dans les mines d'uranium...);
- l'expérimentation, qui consiste à observer, en particulier, les dégâts et perturbations engendrés par les rayonnements ionisants sur l'ADN (Acide DésoxyriboNucléique : très longue molécule présente dans les cellules vivantes, support de l'information génétique).

4.1.3 Induction des effets déterministes (réactions tissulaires nocives)

(Source : publication 103 CIPR)


Une forte irradiation par des rayonnements ionisants provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes : ces effets immédiats sont appelés effets déterministes, ils surviennent peu de temps après l'irradiation, de quelques heures à quelques mois.

L'induction de réactions tissulaires est généralement caractérisée par une dose seuil. Cette dose seuil peut varier d'un tissu à un autre. Les tissus les plus fragiles sont la peau, le poumon, les cellules formatrices du sang (la moelle osseuse), l'intestin et les organes sexuels. La raison de l'existence de cette dose seuil est que les dommages causés par les rayonnements (dysfonctionnement grave ou mort) à une population critique de cellules dans un tissu donné doivent être prolongés avant que la lésion ne puisse se manifester sous forme cliniquement significative. Au-dessus de la dose seuil, la gravité de la lésion, y compris l'altération de la capacité de récupération des tissus, augmente avec la dose.

Même si les symptômes sont souvent précoces, ils peuvent aussi s'avérer tardifs ou tératogènes. Les réactions précoces des tissus aux rayonnements (allant de quelques jours à plusieurs semaines), lorsque la dose seuil a été dépassée, peuvent être du type inflammatoire en raison de la libération de facteurs cellulaires ; elles peuvent également survenir après la perte de cellules. Les réactions tissulaires tardives (de quelques mois à plusieurs années) peuvent être de type générique si elles apparaissent comme le résultat direct des dommages causés aux tissus atteints. En revanche, d'autres réactions tardives peuvent être de type indirect si elles surviennent à la suite de dommages cellulaires précoces.

Classement des doses de l'UNSCEAR
(United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic radiation)

Ce classement se rapporte aux doses efficaces reçues lors d'une exposition globale aigue.
Il s'agit d'effets déterministes et non pas des effets stochastiques.



au delà de 10 Sv	très fortes doses
2 Sv à 10 Sv	fortes doses
200 mSv à 2000 mSv (2 Sv)	doses moyennes
20 à 200 mSv	faibles doses
0 à 20 mSv	très faibles doses

UNSCEAR
UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE
ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS

© OMBRES 2004

4.1.4 Induction des effets stochastiques

Les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme de cancers ou de leucémies, ou encore de maladies héréditaires. Ces effets se manifestent de façon aléatoire (que l'on ne peut pas prédire pour une personne donnée). Ils sont appelés effets stochastiques.

Contrairement à un effet déterministe, un effet stochastique n'est pas lié à un effet de seuil (typiquement, une limite d'exposition à un rayonnement ionisant qui, si elle était dépassée, induirait des effets connus et d'ampleur prévisible). Il ne peut lui être adjoint qu'une estimation statistique du « risque » de voir l'effet se manifester chez un patient. Il existe néanmoins un seuil de significativité (une limite au-delà de laquelle le risque est considéré comme significatif). Par ailleurs, il n'est pas possible de quantifier une dose pour laquelle un effet donné serait certain de se manifester. Par contre, sa probabilité d'apparition (et donc la fréquence d'apparition de ce risque) augmente selon la dose reçue, mais de façon aléatoire.

Dans le cas du cancer, des études épidémiologiques et expérimentales prouvent le risque des rayonnements, avec toutefois des incertitudes pour des doses de l'ordre de 100 mSv, voire moins. Dans le cas des maladies héréditaires, même s'il n'existe aucune preuve directe de risques des rayonnements pour les êtres humains, les observations expérimentales indiquent de façon convaincante que de tels risques pour les générations futures doivent être pris en compte dans le système de protection.

4.1.4.1 *Risque de cancer*

Depuis 1990, l'accumulation de données sur les cellules et les animaux relatives à l'induction de tumeurs par les rayonnements, a renforcé l'opinion selon laquelle les processus de réponse à la lésion de l'ADN au niveau d'une seule cellule sont très importants dans le développement d'un cancer après l'exposition aux rayonnements.

Les progrès sur la compréhension des effets des rayonnements sur l'ADN, tels que l'induction de formes complexes de cassures double-brin d'ADN, les problèmes rencontrés par les cellules pour réparer de façon correcte ces formes complexes de dommages causés à l'ADN, et l'apparition consécutive de mutations géniques/chromosomiques, revêtent une importance particulière. Les avancées des connaissances en microdosimétrie, en ce qui concerne les dommages radio-induits causés à l'ADN, ont également contribué de façon significative à cette compréhension.

Bien qu'il existe des exceptions reconnues, la CIPR estime, à des fins de protection radiologique, que les connaissances sur les processus cellulaires fondamentaux, couplées aux données concernant la relation dose-effet, confortent l'opinion selon laquelle dans la plage des faibles doses, en dessous d'environ 100 mSv, il est scientifiquement plausible de supposer que l'incidence d'effets cancérigènes ou héréditaires croît proportionnellement à l'augmentation de la dose équivalente reçue par les organes et tissus concernés.

Par conséquent, le système pratique de protection radiologique recommandé par la CIPR continuera d'être fondé sur l'hypothèse que, pour des doses inférieures à environ 100 mSv, un incrément de dose donné produira un incrément directement proportionnel de la probabilité d'induction d'effets cancérigènes ou héréditaires attribuables aux rayonnements.

4.1.4.2 Risque d'effets héréditaires

Il n'existe toujours pas de preuve directe que l'exposition de parents aux rayonnements conduise à un excès de maladies héréditaires dans leur descendance. Cependant, la CIPR estime qu'il existe des preuves irréfutables que les rayonnements provoquent des effets héréditaires chez les animaux utilisés dans les études expérimentales. Par conséquent, la CIPR continue par prudence à inclure le risque d'effets héréditaires dans son système de protection radiologique.

La figure suivante schématise les effets liés à l'exposition aux rayonnements ionisants.

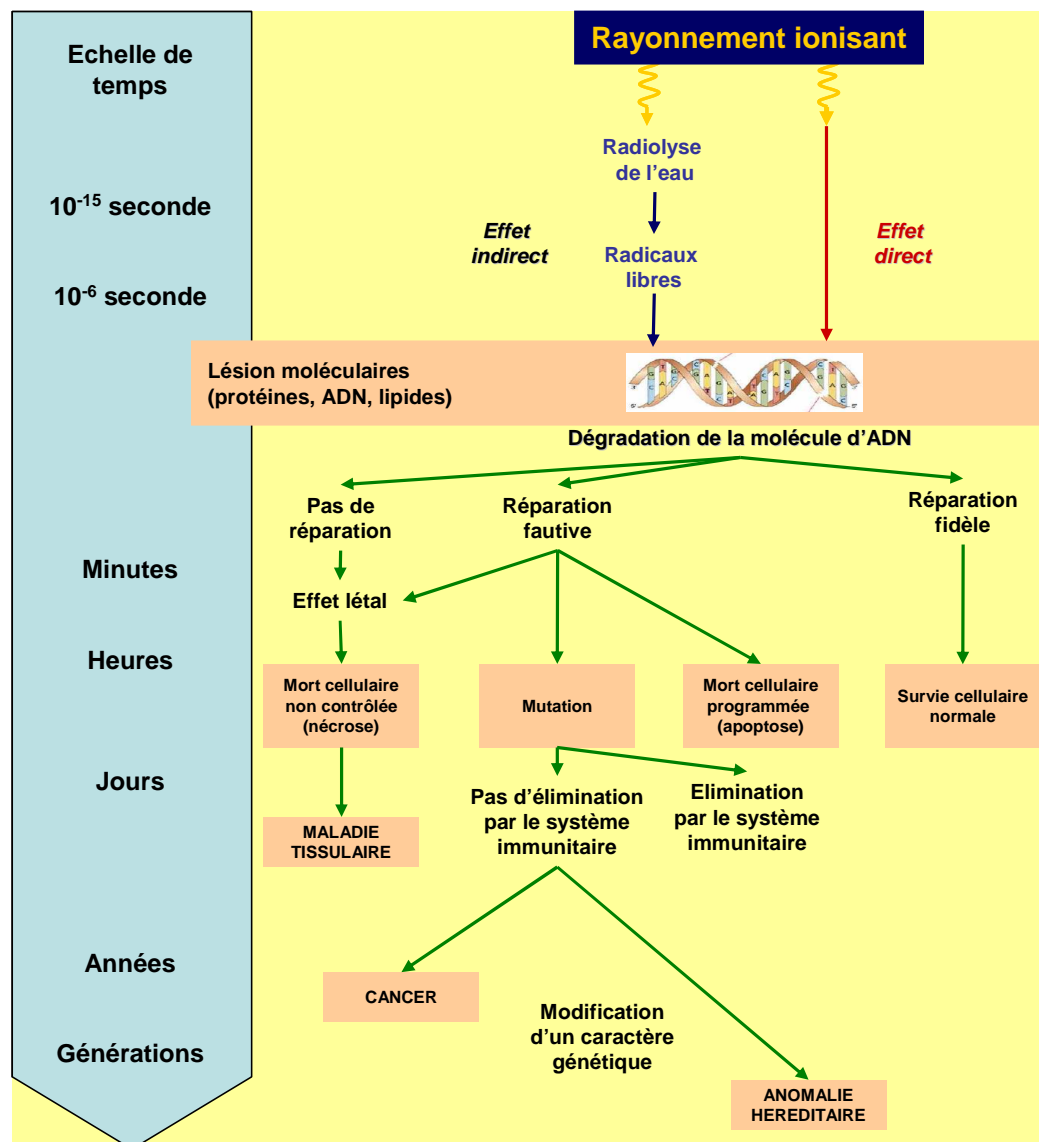


Figure 2 : Schématisation des effets liés à l'exposition aux rayonnements ionisants (source : INSTN)

4.1.4.3 Coefficients de risque nominal ajusté au détriment sanitaire

De nouvelles informations sur les risques d'effets cancérogènes et d'effets héréditaires induits par les rayonnements ont été utilisées dans la modélisation du risque et le calcul de détriment sanitaire, afin d'estimer les coefficients de risque nominal moyenné sur le sexe.

Dans le tableau ci-après, les coefficients actuels (CIPR 103) ont été calculés d'une façon différente de celle de la Publication 60 (CIPR 60). Malgré les changements dans les données sur le risque de cancer et leur traitement, les coefficients de risque nominal actuels sont entièrement compatibles avec ceux présentés par la commission de la publication précédente (CIPR60). Par conséquent, la recommandation de la CIPR est que l'approximation du coefficient global de risque de décès de 5 % par sievert, sur lequel reposent actuellement les normes, continue de convenir aux besoins de la protection radiologique.

Population exposée	CIPR 103		
	Cancers	Effets héréditaires	Total
Ensemble	5,5	0,2	5,7
Adultes (travailleurs)	4,1	0,1	4,2

Tableau 4 : Coefficient de risque nominal ajusté au détriment ($1.10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) pour les effets stochastiques après exposition aux rayonnements à faible débit de dose (Source : IRSN, 2007)

4.1.5 Induction des maladies autres que le cancer

Depuis 1990, des preuves concernant l'augmentation de la fréquence de maladies autres que le cancer chez certaines populations irradiées se sont accumulées. Les preuves statistiques les plus solides sur l'induction de ces effets non cancérogènes à des doses efficaces de l'ordre de 1 Sv proviennent de la dernière analyse de la mortalité après 1968 des survivants japonais aux bombes atomiques (Preston et al, 2003). Des preuves supplémentaires sur des effets non cancérogènes des rayonnements, bien qu'à des doses élevées, proviennent d'études sur des malades cancéreux traités par radiothérapie, mais ces données ne clarifient pas la question de l'existence d'un seuil de dose.

Tout en reconnaissant l'importance potentielle des observations sur les maladies autres que le cancer, la CIPR estime que les données disponibles ne permettent pas leur intégration dans l'estimation du détriment aux faibles doses de rayonnement, inférieures à 100 mSv environ.

4.1.6 Effets des rayonnements sur l'embryon et le fœtus

Les risques de réactions tissulaires et de malformations chez l'embryon et le fœtus irradiés ont fait l'objet d'une revue dans la Publication 90 (CIPR 2003a). Sur cette base, les conclusions de la CIPR sur les risques in utero de lésions des tissus et de malformation à des doses inférieures à 100 mGy sont résumées ci-dessous :

- les nouvelles données confirment la sensibilité de l'embryon aux effets létaux (très rares aux doses inférieures à 100 mGy) de l'irradiation pendant la période de pré-implantation du développement ;
- concernant l'induction de malformations, la radiosensibilité in utero varie au cours de la gestation en fonction de l'âge. On estime que pour l'induction de malformations, il existe un véritable seuil de dose aux alentours de 100 mGy ;
- la revue des données (CIPR 2003a) sur les survivants des bombardements atomiques relatives à l'induction d'un retard mental grave après une irradiation pendant la période prénatale la plus sensible (8^{ème} à 15^{ème} semaine après conception) est en faveur de l'existence d'un seuil de dose d'au minimum 300 mGy pour cet effet et par conséquent de l'absence de risque aux faibles doses ;
- la CIPR considère que le risque de cancer sur la vie entière après une exposition in utero est similaire à celui qui existe après une irradiation dans la jeune enfance, c'est-à-dire au plus de l'ordre de trois fois celui de la population dans son ensemble.

4.2 LOGICIEL DE MODELISATION DE L'IMPACT DOSIMETRIQUE

Le groupe AREVA s'est équipé depuis 2005 d'un logiciel spécifique de calcul d'impact dosimétrique. Le choix s'est porté sur un logiciel développé initialement par le Groupe Radioécologique Nord-Cotentin en charge du suivi du site d'AREVA La Hague. Après adaptation, cet outil (COMODORE) est maintenant utilisé par les sites AREVA notamment ceux de Malvézi, du Tricastin et de Romans-sur-Isère.

Ce logiciel est une synthèse de trois logiciels validés par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) : ACADIE, COTRAM et AQUAREJ. Il est destiné au calcul d'impact dosimétrique de rejets chroniques (en fonctionnement normal des installations) de produits radioactifs, en prenant en compte les transferts de contamination dans l'environnement, ainsi que les transferts dans la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme.

Ce logiciel a été mis à jour en 2012 avec des données bibliographiques actualisées.

4.3 METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT DOSIMETRIQUE



Comment s'effectue une évaluation de l'impact dosimétrique ?

A partir de l'activité rejetée (rejets radioactifs) via les effluents liquides et gazeux et de leur dispersion dans le milieu, la radioactivité dans l'environnement est évaluée, et l'impact dosimétrique en est déduit en envisageant l'ensemble des voies par lesquelles la radioactivité peut atteindre l'homme : la voie atmosphérique (air), les dépôts (végétaux, terres), les eaux (eau potable, ruisseaux, rivières, fleuves, nappes souterraines), les aliments (lait, légumes, viandes, poissons...). Cette évaluation porte sur des groupes de population dits de référence les plus exposés localement à l'impact des rejets. Ces modèles d'évaluation sont disponibles dans des bases de données internationales telles que les données fournies par l'AIEA (Agence Internationale pour l'Energie Atomique).

L'étude d'impact dosimétrique est réalisée en prenant en compte les rejets selon une approche raisonnablement majorante afin de maximaliser les effets étudiés. Les calculs sont basés sur les débits annuels rejetés, sous forme d'effluents gazeux et liquides. Le calcul permet d'évaluer l'impact dosimétrique lié aux rejets atmosphériques et aqueux sur les populations locales.

Le résultat final obtenu est exprimé en sievert (Sv), représentant la dose efficace (indicateur d'impact) reçue par les populations étudiées du fait des rejets des installations.

Les étapes de cette méthodologie sont reprises dans les paragraphes suivants.

Le schéma général retenu pour le calcul d'impact est présenté ci-après.

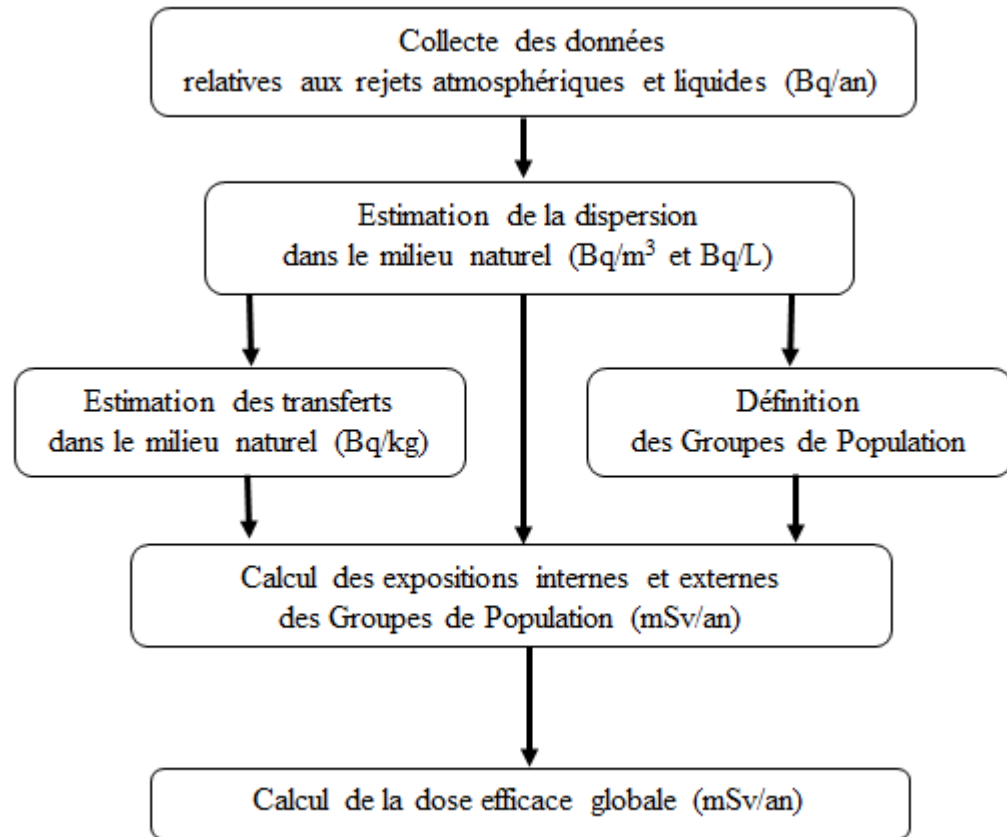


Figure 3 : Schéma général du calcul d'impact dosimétrique

4.4 ESTIMATION DE LA DISPERSION

Dispersion atmosphérique

La dispersion des radionucléides rejetés via le(s) émissaire(s) de rejets atmosphériques dans l'environnement est calculée à l'aide d'un modèle physique de dispersion. L'effet de la dispersion varie suivant les conditions météorologiques.

Le coefficient de transfert atmosphérique, pour une condition météorologique et un point donnés, est le rapport entre la concentration intégrée en ce point et la quantité émise.

Le débit de dépôt est la quantité déposée par unité de surface et par unité de temps. Il traduit l'appauvrissement (dilution) du panache en fonction des données météorologiques.

Ces deux valeurs sont nécessaires pour déterminer l'impact sur la population étudiée. Elles sont déterminées par le logiciel COTRAM, à partir des données météorologiques locales.

Ce logiciel réalise les calculs à partir des probabilités des conditions de transfert (vitesse et direction du vent, type de stabilité atmosphérique) en prenant en compte la hauteur de rejet. Il est valable pour des aérosols et des gaz rares. Il réalise le calcul pour plusieurs points de rejets à un même point cible.

Dispersion liquide

Dans le cadre du projet TDN, aucun effluent liquide radioactif n'est généré. La dispersion des rejets aqueux n'est donc pas étudiée.

4.5 CALCULS DES EXPOSITIONS ET MECANISMES DE TRANSFERT VERS L'HOMME

L'homme peut être exposé aux radionucléides par voie externe (exposition externe) et par voie interne (ingestion et inhalation).

Dans le cas des expositions externes, les coefficients de dose ne dépendent pas du métabolisme des personnes : en conséquence, ils ne varient pas en fonction de l'âge et une valeur unique est utilisée pour chaque radionucléide. En revanche, ces coefficients de dose externe sont fonction de la nature de la source et de la situation dans laquelle se trouve la personne : exposition au panache et à un dépôt au sol pour le domaine terrestre.

Dans le cas des expositions internes, des coefficients de dose spécifiques de chaque radionucléide fournissent la dose efficace engagée pour chaque becquerel incorporé. Ces coefficients sont exprimés en sievert par becquerel (Sv/Bq). Les tables de la CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) donnent des valeurs de coefficients spécifiques permettant de connaître la dose délivrée à un organe particulier.

Les rejets atmosphériques d'une installation se dispersent dans l'environnement. Le transfert vers l'homme intervient via les différents compartiments de l'écosystème comme le montre le schéma conceptuel de la figure suivante.

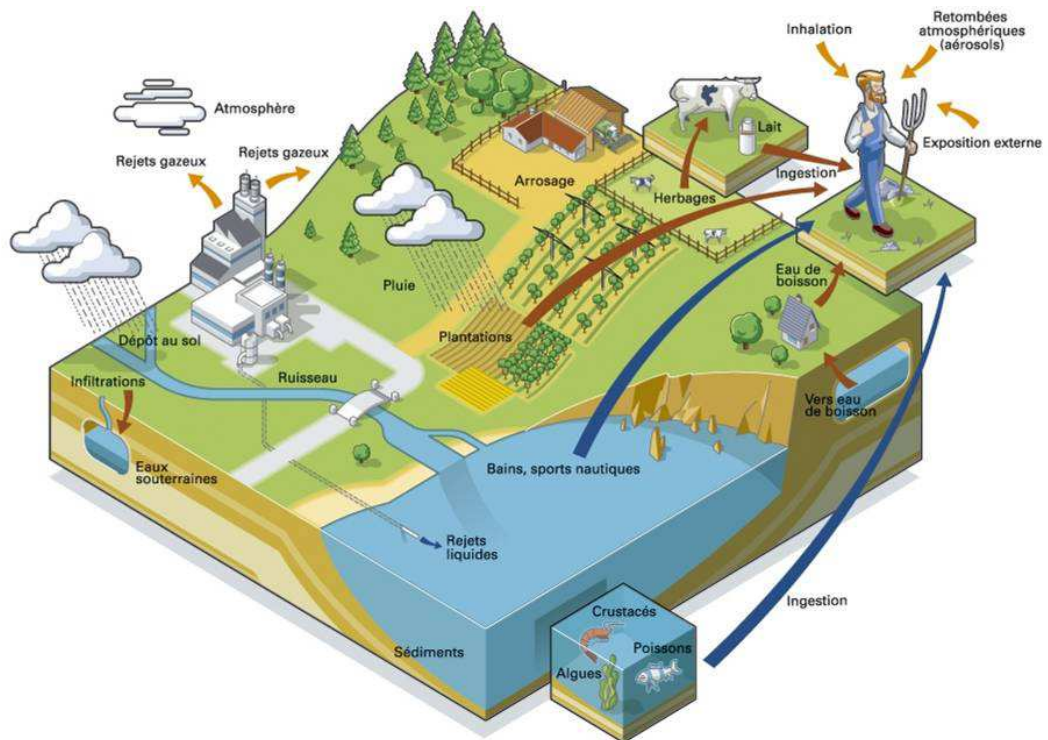


Figure 4 : Représentation schématique des différentes voies d'exposition potentielles de l'homme

La modélisation de la dispersion des radionucléides contenus dans les rejets et de leur devenir dans l'environnement aboutit à un calcul de la contamination de l'air, des sols et plus globalement de l'ensemble de la chaîne alimentaire.

A partir de ces valeurs, des scénarii d'exposition retenus et des habitudes alimentaires locales, des calculs d'expositions externes et internes sont menés pour les populations les plus exposées.

C'est ensuite la somme des voies principales d'exposition retenues qui constitue la dose efficace globale évaluée pour les populations étudiées :

- exposition externe due au panache ;
- exposition externe due au dépôt ;
- exposition interne par inhalation ;
- exposition interne par ingestion (qui peut avoir plusieurs origines : consommation de végétaux, de produits d'origine animale, de sols, ...) ;

4.5.1 Transfert des radionucléides contenus dans les rejets aqueux

Dans le cadre du projet TDN, aucun effluent liquide radioactif n'est généré. C'est pourquoi la présente étude se limitera à l'étude d'impact dosimétrique liée aux rejets atmosphériques radioactifs du projet.

Les voies d'exposition suivantes ne sont donc pas retenues :

- l'ingestion d'eau de boisson ;
- la consommation de poissons ;
- la consommation de végétaux contaminés par irrigation et de produits d'origine animale provenant d'animaux ayant ingéré des végétaux contaminés ;
- l'ingestion par inadvertance de sol contaminé par irrigation.

4.5.2 Transfert des radionucléides contenus dans les rejets atmosphériques

La dispersion des radionucléides dans l'atmosphère entraîne une exposition externe directe et une exposition interne par inhalation.

En outre, le panache est partiellement lavé par les pluies ; les particules se déposent au sol et sur la végétation. Les dépôts sur la végétation et les sols entraînent un transfert par absorption foliaire et racinaire. L'impact sur l'homme est évalué via l'exposition interne par ingestion des aliments contenant des éléments assimilables par le sol et la végétation. L'atteinte à l'homme par ingestion tient compte également de la consommation de végétaux par les animaux.

Le dépôt au sol provoque également une exposition externe. L'inhalation due à la remise en suspension des dépôts est également considérée.

Par conséquent, les voies d'exposition retenues pour l'étude d'impact des rejets d'effluents radioactifs gazeux sont :

- l'exposition interne par inhalation ;
- l'exposition interne par ingestion (produits végétaux et animaux) ;
- l'exposition interne par ingestion de sols par inadvertance ;
- l'exposition externe due au panache ;
- l'exposition externe due aux dépôts.

5 DONNEES RELATIVES AU LOGICIEL

L'ensemble des données d'entrées relatives au logiciel COMODORE (paramètres de transfert radioécologique, etc.) nécessaire au calcul d'impact dosimétrique est présenté en détail dans la notice théorique du logiciel COMODORE (version 2012 - Réf. 11AREP034RAP06C (cf. [4])).

Rations alimentaires et taux d'autoconsommation

Les données de ration alimentaire et de taux de consommation exploitées et présentées ci-dessous sont issues de la base CIBLEX (cf [5]). Le profil alimentaire de type « agriculteurs en zone rurale »¹ de la région Languedoc-Roussillon a été retenu de manière majorante.

	Rations alimentaires (kg/an ou l/an)		
	2-7 ans	7-12 ans	Adulte
Céréales	3,58.10 ¹	5,88.10 ¹	7,03.10 ¹
Légumes racines	2,33.10 ¹	3,05.10 ¹	3,15.10 ¹
Fruits	2,04.10 ¹	2,44.10 ¹	4,56.10 ¹
Légumes fruits	2,04.10 ¹	2,44.10 ¹	4,56.10 ¹
Légumes feuilles	7,98	8,70	2,16.10 ¹
Viande de bœuf	0,00	0,00	0,00
Viande de mouton	5,19	8,36	1,10.10 ¹
Viande de porc	1,23.10 ¹	1,62.10 ¹	2,22.10 ¹
Viande de volaille	7,98	1,44.10 ¹	1,76.10 ¹
Viande de veau	0,00	0,00	0,00
Lait de vache	0,00	0,00	0,00
Œuf	5,77	8,29	9,59
Produits laitiers	0,00	0,00	0,00
Vin	0,00	0,00	0,00

Tableau 5 : Rations alimentaires

¹ Ceci désigne, dans CIBLEX, les agriculteurs habitant dans des communes de moins de 2 000 habitants

Le taux d'autoconsommation évalue la proportion d'aliment autoconsommé (produits puis consommés localement) par rapport à la quantité totale d'aliment consommé. Ce paramètre est sans unité. Le tableau des valeurs est donné ci-après :

Taux d'autoconsommation			
Céréales	0,0020	Viande de porc	0,991
Légumes racines	0,7	Viande de volaille	0,804
Fruits	0,938	Viande de veau	0,0
Légumes fruits	0,938	Lait de vache	0,0
Légumes feuilles	0,866	Œuf	0,67
Viande de bœuf	0,0	Produits laitiers	0,0
Viande de mouton	0,268	Vin	0,0

Tableau 6 : Taux d'autoconsommation

6 DONNEES D'ENTREE LIEES AU PROJET TDN

6.1 TERMES SOURCES

Les radionucléides rejetés via les effluents gazeux dans le milieu « air » constituent le terme source. Ce terme source constitue la donnée d'entrée du calcul d'impact. Il précise pour chaque radionucléide les quantités rejetées annuellement.

Pour rappel, dans le cadre du projet TDN, aucun effluent liquide radioactif n'est généré. C'est pourquoi la présente étude se limitera à l'étude d'impact dosimétrique liée aux rejets atmosphériques radioactifs du projet.

6.1.1 Caractéristique de l'exutoire

L'installation de traitements des nitrates possède une cheminée de rejets atmosphériques. Le tableau ci-dessous rappelle les caractéristiques de cet exutoire :

	Cheminée TDN
Hauteur (m)	30
Type de rejet	canalisé
Coordonnées Lambert 93	X = 698200
	Y = 6235253

Tableau 7 : Caractéristiques de la cheminée de rejets de l'installation TDN

6.1.2 Rejets atmosphériques

Les rejets radioactifs à la cheminée sont à la fois liés aux activités radiologiques des effluents nitrates traités mais également à celles provenant des réactifs (charbon et argile) qui renferment les radionucléides de la famille de l'uranium naturel et du thorium.

Les hypothèses prises pour définir les rejets atmosphériques radiologiques sont présentées en détail au chapitre 2 « Description du projet ».

6.1.2.1 Activité des résidus liés aux effluents provenant des lagunes

L'activité des résidus pulvérulents a été calculée pour un débit d'effluents de 2 553 L/h pour un fonctionnement de l'installation 337,5 jours par an, 24 heures sur 24.

Radionucléide	Activité des effluents nitrates (Bq/L)	Activité due aux effluents, présente dans le résidu pulvérulent (MBq/an)
²³⁵ U	5,12.10 ⁻³	1,06.10 ⁻¹
²³¹ Th	5,12.10 ⁻³	1,06.10 ⁻¹
²³¹ Pa	1,86	3,84.10 ¹
²²⁷ Ac	1,86	3,84.10 ¹
²²⁷ Th	1,86	3,84.10 ¹
²²³ Ra	1,86	3,84.10 ¹
²¹⁹ Rn	1,86	3,84.10 ¹
²¹⁵ Po	1,86	3,84.10 ¹
²¹¹ Pb	1,86	3,84.10 ¹
²¹¹ Bi	1,86	3,84.10 ¹
²⁰⁷ Tl	1,86	3,84.10 ¹
²³⁸ U	1,55.10 ⁻¹	3,21
²³⁴ Th	1,55.10 ⁻¹	3,21
^{234m} Pa	1,55.10 ⁻¹	3,21
²³⁸ Pu	2,78.10 ⁻²	5,75.10 ⁻¹
²³⁴ U	1,55.10 ⁻¹	3,21
²³⁰ Th	1,41.10 ¹	2,91.10 ²
²²⁶ Ra	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²²² Rn	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁸ Po	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁴ Pb	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁴ Bi	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁴ Po	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁰ Pb	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁰ Bi	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²¹⁰ Po	3,25.10 ²	6,72.10 ³
²⁴¹ Pu	2,66	5,49.10 ¹
²⁴¹ Am	1,43.10 ⁻¹	2,97
²³⁷ Np	3,54.10 ⁻¹	7,33
²³³ Pa	3,54.10 ⁻¹	7,33
²²⁸ Ra	3,50	7,24.10 ¹
²²⁸ Ac	3,50	7,24.10 ¹
²²⁸ Th	3,50	7,24.10 ¹
²²⁴ Ra	3,50	7,24.10 ¹
²²⁰ Rn	3,50	7,24.10 ¹

Radionucléide	Activité des effluents nitrates (Bq/L)	Activité due aux effluents, présente dans le résidu pulvérulent (MBq/an)
²¹⁶ Po	3,50	7,24.10 ¹
²¹² Pb	3,50	7,24.10 ¹
²¹² Bi	3,50	7,24.10 ¹
²¹² Po	2,24	4,64.10 ¹
²⁰⁸ Tl	1,26	2,60.10 ¹
¹³⁷ Cs	9,13	1,89.10 ²
^{137m} Ba	9,13	1,89.10 ²
⁹⁹ Tc	4,14.10 ³	8,56.10 ⁴
⁹⁰ Sr	1,54.10 ¹	3,18.10 ²
⁹⁰ Y	1,54.10 ¹	3,18.10 ²
^{239/240} Pu	2,64.10 ⁻²	5,47.10 ⁻¹
Total	7,18.10³	1,48.10⁵

Tableau 8 : Activité due aux effluents, présente dans les résidus pulvérulents

6.1.2.2 Activité des résidus liée à l'activité provenant du charbon

L'activité provenant du charbon a été estimée pour une teneur en ²³⁸U et en ²³²Th de 5 ppm.

Radionucléide	Activité du charbon (Bq/kg)	Activité rajoutée dans les résidus due au charbon (MBq/an)
²³⁵ U	2,82	1,60.10 ¹
²³¹ Th	2,82	1,60.10 ¹
²³¹ Pa	2,82	1,60.10 ¹
²²⁷ Ac	2,82	1,60.10 ¹
²²⁷ Th	2,82	1,60.10 ¹
²²³ Ra	2,82	1,60.10 ¹
²¹⁹ Rn	2,82	1,60.10 ¹
²¹⁵ Po	2,82	1,60.10 ¹
²¹¹ Pb	2,82	1,60.10 ¹
²¹¹ Bi	2,82	1,60.10 ¹
²⁰⁷ Tl	2,82	1,60.10 ¹
²³⁸ U	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²³⁴ Th	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
^{234m} Pa	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²³⁴ U	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²³⁰ Th	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²²⁶ Ra	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²²² Rn	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁸ Po	6,20.10 ¹	3,52.10 ²

Radionucléide	Activité du charbon (Bq/kg)	Activité rajoutée dans les résidus due au charbon (MBq/an)
²¹⁴ Pb	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁴ Bi	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁴ Po	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁰ Pb	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁰ Bi	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²¹⁰ Po	6,20.10 ¹	3,52.10 ²
²³² Th	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²²⁸ Ra	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²²⁸ Ac	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²²⁸ Th	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²²⁴ Ra	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²²⁰ Rn	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²¹⁶ Po	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²¹² Pb	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²¹² Bi	2,00.10 ¹	1,13.10 ²
²¹² Po	1,28.10 ¹	7,26.10 ¹
²⁰⁸ Tl	7,20	4,08.10 ¹
Total	1,10.10³	6,23.10³

Tableau 9 : Activité liée au charbon présente dans les résidus pulvérulents

6.1.2.3 Activité des résidus liée à l'activité provenant de l'argile

L'activité provenant de l'argile a été estimée pour des teneurs en ^{238}U et en ^{232}Th , respectivement de 5 et 25 ppm.

Radionucléide	Activité de l'argile (Bq/kg)	Activité rajoutée dans les résidus due à l'argile (MBq/an)
^{235}U	2,82	8,74
^{231}Th	2,82	8,74
^{231}Pa	2,82	8,74
^{227}Ac	2,82	8,74
^{227}Th	2,82	8,74
^{223}Ra	2,82	8,74
^{219}Rn	2,82	8,74
^{215}Po	2,82	8,74
^{211}Pb	2,82	8,74
^{211}Bi	2,82	8,74
^{207}Tl	2,82	8,74
^{238}U	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{234}Th	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{234}Pa	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{234}U	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{230}Th	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{226}Ra	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{222}Rn	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{218}Po	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{214}Pb	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{214}Bi	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{214}Po	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{210}Pb	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{210}Bi	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{210}Po	$6,20 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
^{232}Th	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{228}Ra	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{228}Ac	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{228}Th	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{224}Ra	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{220}Rn	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{216}Po	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{212}Pb	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$
^{212}Bi	$1,00 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$

Radionucléide	Activité de l'argile (Bq/kg)	Activité rajoutée dans les résidus due à l'argile (MBq/an)
²¹² Po	6,40.10 ¹	1,99.10 ²
²⁰⁸ Tl	3,60.10 ¹	1,12.10 ²
Total	1,90.10³	5,89.10³

Tableau 10 : Activité liée à l'argile présente dans les résidus pulvérulents

6.1.2.4 Activité totale rejetée

Les rejets atmosphériques radiologiques de l'installation TDN ont été déterminés à partir des activités présentées ci-dessus et de l'efficacité du filtre en sortie de cheminée (99,9 % pour l'ensemble des radionucléides, à l'exception des radons). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Radionucléide	Activité rejetée après filtration (MBq/an)
²³⁵ U	2,48.10 ⁻²
²³¹ Th	2,48.10 ⁻²
²³¹ Pa	6,31.10 ⁻²
²²⁷ Ac	6,31.10 ⁻²
²²⁷ Th	6,31.10 ⁻²
²²³ Ra	6,31.10 ⁻²
²¹⁹ Rn	6,31.10 ¹
²¹⁵ Po	6,31.10 ⁻²
²¹¹ Pb	6,31.10 ⁻²
²¹¹ Bi	6,31.10 ⁻²
²⁰⁷ Tl	6,31.10 ⁻²
²³⁸ U	5,47.10 ⁻¹
²³⁴ Th	5,47.10 ⁻¹
²³⁴ Pa	5,47.10 ⁻¹
²³⁸ Pu	5,75.10 ⁻⁴
²³⁴ U	5,47.10 ⁻¹
²³⁰ Th	8,35.10 ⁻¹
²²⁶ Ra	7,26
²²² Rn	7,26.10 ³
²¹⁸ Po	7,26
²¹⁴ Pb	7,26
²¹⁴ Bi	7,26
²¹⁴ Po	7,26
²¹⁰ Pb	7,26
²¹⁰ Bi	7,26
²¹⁰ Po	7,26

Radionucléide	Activité rejetée après filtration (MBq/an)
²⁴¹ Pu	5,49.10 ⁻²
²⁴¹ Am	2,97.10 ⁻³
²³⁷ Np	7,33.10 ⁻³
²³³ Pa	7,33.10 ⁻³
²³² Th	4,24.10 ⁻¹
²²⁸ Ra	4,96.10 ⁻¹
²²⁸ Ac	4,96.10 ⁻¹
²²⁸ Th	4,96.10 ⁻¹
²²⁴ Ra	4,96.10 ⁻¹
²²⁰ Rn	4,96.10 ²
²¹⁶ Po	4,96.10 ⁻¹
²¹² Pb	4,96.10 ⁻¹
²¹² Bi	4,96.10 ⁻¹
²¹² Po	3,17.10 ⁻¹
²⁰⁸ Tl	1,79.10 ⁻¹
¹³⁷ Cs	1,89.10 ⁻¹
^{137m} Ba	1,89.10 ⁻¹
⁹⁹ Tc	8,56.10 ¹
⁹⁰ Sr	3,18.10 ⁻¹
⁹⁰ Y	3,18.10 ⁻¹
^{239/240} Pu	5,47.10 ⁻⁴
Total	7,97.10³

Tableau 11 : Rejets atmosphériques radiologiques de l'installation TDN

6.1.3 Hypothèses concernant les rejets atmosphériques

Quelques hypothèses concernant le terme source ont été retenues :

- l'activité des radionucléides ^{90}Y et ^{90}Sr a été sommée et associée au couple $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$
- l'activité des radionucléides ^{137}Cs et $^{137\text{m}}\text{Ba}$ a été sommée et associée au couple $^{137}\text{Cs}+^{137\text{m}}\text{Ba}$,
- à l'inverse l'activité du couple $^{239/240}\text{Pu}$ a été divisée par deux et associée aux radionucléides ^{239}Pu et ^{240}Pu .

Les coefficients de dose efficace pour l'ingestion et l'inhalation ont été recherchés dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003². Les coefficients de dose efficace par exposition externe au dépôt et au panache sont issus du Federal Guidance Report N°12³.

Pour certains radionucléides, à savoir le ^{211}Bi , le $^{234\text{m}}\text{Pa}$, le ^{214}Po , le ^{215}Po , le ^{218}Po , le ^{219}Rn , le ^{222}Rn ainsi que le ^{207}Tl , leurs coefficient de dose efficace pour l'ingestion et l'inhalation n'étant pas définis par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003, seuls les calculs de dose efficace externe ont pu être calculés à l'aide du logiciel COMODORE.

En ce qui concerne le radon 222, la dose efficace par inhalation a été déterminée à partir des valeurs d'Energie Alpha Potentielle (EAP). La méthodologie utilisée est présentée au paragraphe 8.1. La dose calculée inclut les descendant à vie courte du ^{222}Rn , à savoir le ^{218}Po , le ^{214}Pb , le ^{214}Bi ainsi que le ^{214}Po .

² Arrêté définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

³ Federal Guidance Report n°12 – US EPA (EPA-402-R-93-081) : External Exposure to radionuclides in air, water and soil – Septembre 1993

6.2 VOIES D'EXPOSITION RETENUES

Dans le cadre du projet TDN, l'ensemble des voies d'exposition suivantes sont prises en compte :

- exposition externe liée au panache ;
- exposition externe liée au dépôt ;
- exposition interne par inhalation ;
- exposition interne par ingestion de sols par inadvertance ;
- exposition interne par ingestion de végétaux / produits maraîchers (exposés aux dépôts atmosphériques) ;
- exposition interne par ingestion de produits animaux et dérivés.

6.3 DUREES DE FONCTIONNEMENT

La durée d'exploitation de l'installation TDN a été estimée à 35 ans.

7 CALCUL DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE A L'AIDE DU MODULE COTRAM

Préalablement au calcul d'impact dosimétrique réalisé à l'aide du logiciel de modélisation, COMODORE, un calcul de dispersion atmosphérique est réalisé à l'aide du module de calcul COTRAM inclus dans le logiciel COMODORE.

Les hypothèses suivantes sont considérées comme données d'entrée des évaluations sur la santé pour les effluents gazeux radioactifs.

7.1 DONNEES METEOROLOGIQUES

Les données météorologiques retenues pour la modélisation de la dispersion atmosphérique sont les valeurs moyennes sur la période 2012 à 2014. Ces données sont spécifiques à la zone d'étude.

La figure suivante présente la rose des vents construite sur la base de ces données.

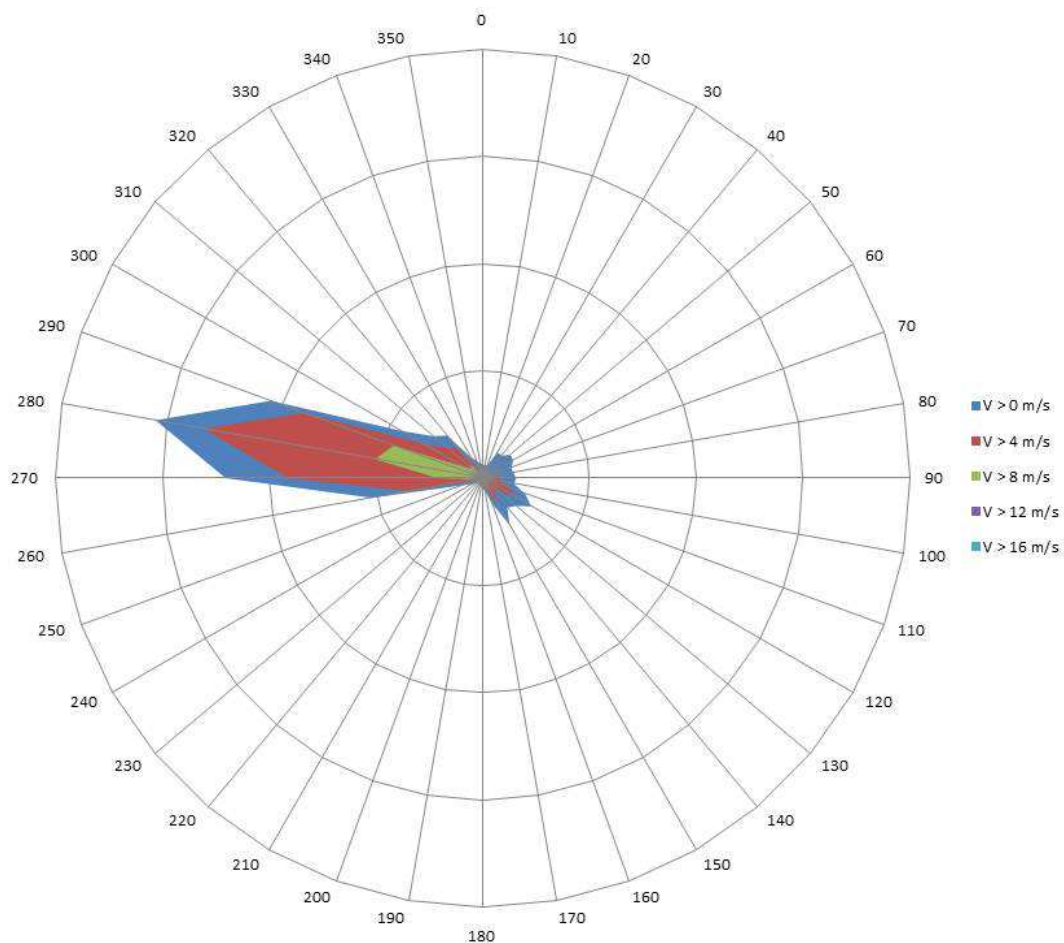


Figure 5 : Rose des vents du site AREVA NC Malvés de 2012 à 2014

7.2 DISTANCE ET AZIMUT DES GROUPES DE POPULATION PAR RAPPORT A L'EMISSAIRE DE REJETS ATMOSPHERIQUES DU PROJET TDN

Le choix des groupes de population retenus pour l'évaluation des impacts a été établi à partir :

- de l'identification des populations résidentielles et des entreprises externes situés à proximité du site ;
- de la rose des vents,
- des choix effectués lors des précédentes études réalisées pour le site de Malvési, dans le cadre de la demande d'autorisation d'exploiter du projet COMURHEX II et de la demande d'autorisation de création de l'INB ECRIN.

En fonction de l'usage observé au droit du lieu d'exposition, deux types de récepteurs ont été retenus :

- des récepteurs de type « résidentiel » pour les zones d'habitation,
- des récepteurs de type « professionnel » pour les entreprises voisines, à savoir :
 - ACPG Aude (entretien d'espace vert),
 - SLMC (fabricant de colorant)⁴,
 - ARTERRIS (coopérative agricole), TEA BLANC TRS (transport routier) et DIVIMER (Diffusion des Vins Méditerranéen), qui de par leur proximité ont été regroupés en un même point.

Dans la suite de l'évaluation, en première approche majorante, les récepteurs professionnels sont considérés de la même manière que les récepteurs résidentiels. En effet, même si les groupes de population professionnels sont moins exposés que ceux résidentiels (% de temps soumis à l'inhalation plus faible, ingestion alimentaire de produits locaux nulle), il est considéré de prendre les mêmes paramètres pour les calculs de dose efficace entre ces deux types de groupe de population (100 % de temps soumis à l'inhalation pour la dose efficace par inhalation et prise en compte des rations alimentaires pour la dose efficace par ingestion).

⁴ Il est à noter que cette entreprise a cessé son activité et que son site d'implantation fait actuellement l'objet de travaux de remédiation.

Les données d'entrée nécessaires au module de dispersion atmosphérique COTRAM sont :

- la distance de l'émissaire de rejets atmosphériques à chaque groupe de population ;
- l'azimut entre l'émissaire de rejets atmosphériques et chaque groupe de population.

Elles sont présentées dans le tableau suivant.

Nom du groupe de population	Type	Distance (m)	Azimut (°)
Romilhac le Haut	Résidentiel	605	180
Romilhac le Bas		886	180
Livière Haute		1262	100
Geysnières		717	260
Domaine de Montlaurès		484	40
ACPG Aude	Professionnel	1586	220
SLMC		317	180
ARTERRIS		998	160

Tableau 12 : Distance et azimut entre l'émissaire de rejets atmosphériques et les groupes de population sélectionnés

8 RESULTATS

8.1 CAS DE L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DES DESCENDANTS DU RADON 222

Pour le radon 222, la dose efficace due à l'inhalation est calculée à partir de l'Energie Alpha Potentielle (EAP) due à ses descendants émetteurs alpha à vie courte (polonium 218, plomb 214, bismuth 214 et polonium 214) :

$$Dose_{inh} = EAP_v \times t_{exp} \times FC_{RN}$$

Avec :

- $Dose_{inh}$: dose efficace annuelle due à l'inhalation des descendants émetteurs alpha à vie courte du ^{222}Rn (Sv/an),
- EAP_v : Energie Alpha Potentielle volumique (J/m^3)
- T_{exp} : durée de l'exposition exprimée en h/an (une exposition continue a été retenue, à savoir 8760 h/an),
- FC_{RN} : facteur de conversion exprimant la dose efficace par unité d'exposition à l'énergie alpha potentielle exprimé en Sv / ($J.h.m^{-3}$). Le facteur de conversion a été pris égal à 1,1 pour les habitations et à 1,4 pour les lieux de travail, conformément à la Directive EURATOM et l'arrêté du 1er septembre 2003.

L'EAPv est déterminé par l'équation suivante :

$$EAP_v = F \times EAP_{222} \times C_{Rn222}$$

Avec :

- F : Facteur d'équilibre (l'UNSCEAR préconise une valeur de 0,6 pour l'air extérieur⁵),
- EAP_{222} : énergie alpha potentielle du ^{222}Rn en équilibre avec ses descendants ($5,54.10^{-9}$ J/Bq),
- C_{Rn222} : Concentration mesurée du ^{222}Rn en Bq/m³ (calculée à l'aide du logiciel COMODORE).

⁵ Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008, Annex B.

Les doses efficaces annuelles dues à l'inhalation des descendants émetteurs alpha à vie courte du ^{222}Rn sont présentés dans le tableau suivant.

Groupes de population	Concentration en ^{222}Rn (Bq/m ³)	EAP _v (J/m ³)	Dose inhalée annuelle due au ^{222}Rn (mSv)
Romilhac le Haut	$7,46.10^{-5}$	$2,48.10^{-13}$	$2,39.10^{-6}$
Romilhac le Bas	$6,72.10^{-5}$	$2,23.10^{-13}$	$2,15.10^{-6}$
Livière Haute	$4,21.10^{-4}$	$1,40.10^{-12}$	$1,35.10^{-5}$
Geyssières	$1,25.10^{-4}$	$4,16.10^{-13}$	$4,00.10^{-6}$
Domaine de Montlaurès	$3,73.10^{-5}$	$1,24.10^{-13}$	$1,19.10^{-6}$
ACPG Aude	$5,04.10^{-5}$	$1,68.10^{-13}$	$2,05.10^{-6}$
SLMC	$9,12.10^{-5}$	$3,03.10^{-13}$	$3,72.10^{-6}$
ARTERRIS	$1,76.10^{-4}$	$5,85.10^{-13}$	$7,17.10^{-6}$

Tableau 13 : Dose annuelle due à l'inhalation du radon pour les groupes de population étudiés

8.2 DOSE EFFICACE ANNUELLE GLOBALE

Le tableau suivant présente pour chaque groupe de population sélectionné et les classes d'âges ([2-7 ans], [7-12 ans] et [adulte]), les résultats de dose efficace globale (mSv/an) due aux rejets atmosphériques de l'installation TDN.

Groupes de population	Type	Dose efficace globale (mSv/an) par classe d'âge		
		[2-7ans]	[7-12ans]	[adulte]
Romilhac le Haut	Résidentiel	$5,53.10^{-5}$	$5,79.10^{-5}$	$4,38.10^{-5}$
Romilhac le Bas		$4,95.10^{-5}$	$5,18.10^{-5}$	$3,93.10^{-5}$
Livière Haute		$3,29.10^{-4}$	$3,43.10^{-4}$	$2,57.10^{-4}$
Geyssières		$9,94.10^{-5}$	$1,03.10^{-4}$	$7,73.10^{-5}$
Domaine de Montlaurès		$2,86.10^{-5}$	$2,98.10^{-5}$	$2,24.10^{-5}$
ACPG Aude	Professionnel	nc		$2,93.10^{-5}$
SLMC				$5,50.10^{-5}$
ARTERRIS				$1,05.10^{-4}$

Tableau 14 : Dose efficace annuelle globale pour les groupes de population et classes d'âges étudiés

Les rejets atmosphériques de l'installation TDN conduisent à une dose efficace globale maximale de 0,000343 mSv/an pour la classe d'âge [7-12ans] du groupe de population « Livière Haute », soit près de 3 000 fois moins que la valeur limite réglementaire de référence de 1 mSv/an (Code de la Santé publique).

Pour la population la plus exposée, à savoir les enfants 7-12 ans du groupe « Livière Haute », les radionucléides les plus contributeurs sont le ^{210}Po , le ^{210}Pb et le ^{226}Ra puisqu'ils représentent respectivement 31, 27 et 18 % de la dose efficace globale.

Les voies d'exposition les plus importantes sont l'ingestion de produits terrestres et l'inhalation (avec respectivement 62 et 38 %), les voies restantes représentant moins de 0,5 %.

Le calcul d'impact détaillé pour le récepteur « Livière Haute » est présenté en annexe.

8.3 CONCLUSION

En termes d'impact dosimétrique, les résultats obtenus pour tous les groupes de population étudiés montrent que l'impact des rejets radioactifs atmosphériques de l'installation TDN est très faible. En effet, pour la population la plus exposée aux rejets atmosphériques, à savoir les enfants 7-12 ans du groupe « Livière Haute », la dose efficace globale est de $3,43 \cdot 10^{-4}$ mSv/an. Cette valeur de dose est plus de 3 000 fois inférieure à la limite de dose acceptable pour le public de 1 mSv/an (Code de la Santé publique).

Les doses efficaces annuelles globales (mSv/an) concernant le groupe de population « Livière Haute » associées aux classes d'âge étudiées sont représentées sur la figure suivante.

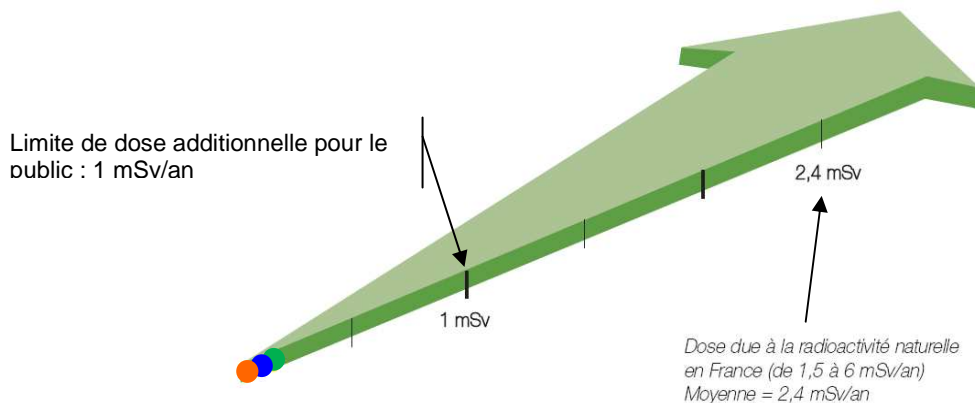


Figure 7 : Représentation des résultats de doses efficaces globales annuelles obtenus (mSv/an) pour l'ensemble des classes d'âge du groupe de population « Livière Haute »

Symbole	Dose efficace global (mSv/an)	
●	7-12 ans	$3,43 \cdot 10^{-4}$
●	2 -7 ans	$3,29 \cdot 10^{-4}$
●	Adulte	$2,57 \cdot 10^{-4}$

Tableau 15 : Légende de la figure représentant les résultats de calcul de dose efficace globale

9 EVALUATION DES INCERTITUDES

Ce chapitre présente une analyse globale des incertitudes associées aux calculs de risque réalisés.

Les principales étapes de l'évaluation des risques susceptibles de présenter des incertitudes significatives sont la caractérisation des émissions, l'estimation des concentrations d'exposition et la quantification des risques.

Les incertitudes associées à chaque étape sont discutées de manière qualitative dans les paragraphes qui suivent.

9.1 INCERTITUDES ASSOCIEES A LA CARACTERISATION DES EMISSIONS

La technologie prévue pour l'installation TDN n'ayant encore jamais été utilisée à échelle industrielle, le bilan des émissions a été établi à partir d'hypothèses. Le choix de ces hypothèses a été orienté dans le but de réaliser une étude conservatrice, notamment vis-à-vis des rejets envisagés.

Les activités émises ont été estimées à partir des activités des résidus liés aux effluents provenant des lagunes mais également à celles provenant des réactifs (charbon et argile) qui renferment les radionucléides de la famille de l'uranium naturel et du thorium.

9.2 INCERTITUDES ASSOCIEES A LA MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

L'outil COMODORE spécialisé dans ce type d'étude a été utilisé. Cet outil est régulièrement utilisé par AREVA pour l'évaluation des impacts radiologiques. L'outil COMODORE utilise des valeurs reconnues internationalement ou des paramètres réglementaires.

Cependant, tout modèle est une représentation simplifiée de la réalité, comprenant des éléments d'incertitude qu'il est important de prendre en compte, notamment pour l'analyse des résultats. La qualité de ces résultats dépend d'une part, du modèle et de la modélisation (phénomène modélisé, équations utilisées, ...) et d'autre part, de la qualité des données d'entrée saisies dans le modèle.

L'influence de la modélisation de la dispersion atmosphérique par le module COTRAM dépend du domaine de validité du modèle d'une part et, d'autre part, du coefficient de transfert atmosphérique qui a un effet direct et proportionnel sur le résultat.

Selon le rapport de l'INERIS relatif aux « Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels » (DRA-006, de décembre 2002), les résultats, obtenus grâce au modèle Gaussien, sont valables pour une distance de 100 m à quelques dizaines de kilomètres. Au-delà de ces distances de dispersion, en effet, les résultats ne sont plus valables puisque d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés.

Compte tenu des distances entre le point de rejet et les groupes de référence retenus, il apparaît que le modèle reste valide dans le cadre de l'étude.

Les données météorologiques utilisées proviennent de la station Météo France de Narbonne, au lieu-dit Jonquières. Le fichier météorologique a été préparé pour les besoins des calculs à partir des données météorologiques tri-horaires. Les données collectées depuis janvier 2012 jusqu'à décembre 2014 ont été exploitées. Les données météorologiques spécifiques à la zone d'étude les plus récentes ont donc été utilisées dans le cadre de cette étude.

9.3 INCERTITUDES ASSOCIEES A L'EVALUATION DE L'EXPOSITION

Comme présenté au § 6.1.3 « Hypothèses concernant les rejets atmosphériques », certains radionucléides présents dans le terme source ne disposent pas de coefficient de dose efficace pour l'ingestion et l'inhalation dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003. Il s'agit du ²¹¹Bi, du ^{234m}Pa, du ²¹⁴Po, du ²¹⁵Po, du ²¹⁸Po, du ²¹⁹Rn, du ²²²Rn ainsi que du ²⁰⁷Tl. Pour ces composés seule la dose efficace externe a pu être calculée.

Ces radionucléides ne disposent pas de coefficient de dose efficace pour l'ingestion et l'inhalation pour la plupart car ils sont soit déjà pris en compte dans les facteurs de dose de leurs pères, soit parce que leur durée de vie est trop courte

En particulier, la dose efficace due à l'inhalation des descendants émetteurs alpha à vie courte du ²²²Rn, à savoir le ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi et ²¹⁴Po, a été calculée à partir de l'Energie Alpha Potentielle du ²²²Rn.

9.4 INCERTITUDES ASSOCIEES AU CALCUL DE DOSE

Les récepteurs ont été retenus au niveau des points où les concentrations maximales ont été modélisées, pour chaque type d'exposition. Pour l'ensemble des récepteurs, à la fois résidentiels et professionnels, une durée d'exposition permanente (24 h/j et 365 j/an) a été considérée.

Il convient de préciser que cette hypothèse est majorante pour les récepteurs résidentiels et à plus forte raison pour les récepteurs professionnels. En effet, l'étude « Estimation du temps passé à l'intérieur du logement de la population française - Novembre 2008 »⁶ réalisée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur indique que la moyenne du temps passé à l'intérieur du logement est de 16,2 heures par jour pour l'ensemble de la population française, ce qui confirme le caractère majorant des calculs réalisés.

Les paramètres utilisés pour caractériser les risques liés à une exposition par ingestion sont les activités dans les aliments ingérés et les paramètres d'exposition, à savoir le poids corporel, le taux d'ingestion et la fréquence d'exposition. Ces paramètres d'exposition sont relativement bien connus et correspondent à des valeurs spécifiques locales (données CIBLEX de la région Languedoc-Roussillon).

9.5 BILAN DES INCERTITUDES

Aux incertitudes évaluées dans les paragraphes précédents peuvent s'ajouter les incertitudes liées aux connaissances techniques du moment. Ce type d'incertitude ne peut être quantifié.

L'approche qui a été suivie dans le cadre de cette étude est basée sur des hypothèses pénalisantes et sur des informations spécifiques au site.

⁶ Cette étude a été réalisée dans le cadre du groupe de travail "Exploitation des données" de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) auquel participent le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), l'InVS (Institut de Veille Sanitaire), l'Afsset, le LOCEAN/IPSL (Laboratoire d'Océanographie et du Climat/Institut Pierre Simon Laplace), le LHVP (Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris) et l'Inserm (Institut national de la Santé et de la Recherche Médicale). Les auteurs de cette étude sont A. Zeghnoun1, F. Dor1, S. Kirchner2, A. Gregoire2 et J.-P. Lucas2 (1/ InVS, Saint-Maurice – 2/ CSTB, Champs-sur-Marne).

10 ANNEXE : CALCUL D'IMPACT DETAILLE POUR LE GROUPE LE PLUS EXPOSE : ENFANT 7-12 ANS – LIVIERE HAUTE

10.1 PARAMETRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Les paramètres de dispersion atmosphérique au niveau du groupe de population le plus exposé (Livière Haute) sont présentés dans le tableau ci-après :

Caractéristiques	Cheminée TDN
Coefficient de transfert atmosphérique pour les aérosols (s/m^3)	1.80E-6
Coefficient de transfert atmosphérique pour les gaz rares, le tritium et le carbone 14 (s/m^3)	1.83E-6
Débit de dépôt sec ($Bq.m^{-2}.s^{-1}/Bq.s^{-1}$ rejeté) Compte tenu des très faibles valeurs des radiations dues au tritium pas de valeur spécifique pour le tritium	8.99E-9
Débit de dépôt humide ($Bq.m^{-2}.s^{-1}/Bq.s^{-1}$ rejeté)	1.94E-9
Débit de dépôt total ($Bq.m^{-2}.s^{-1}/Bq.s^{-1}$ rejeté)	1.09E-8

Tableau 16 : Paramètres de dispersion atmosphérique au niveau du groupe de population le plus exposé « Livière Haute »

10.2 EVALUATION DES TRANSFERTS DANS LES DIFFERENTS MILIEUX D'EXPOSITION

10.2.1 Activité dans les sols

Radionucléides	Activité dans les sols (Bq/m ²)
²³⁵ U	4.36E-3
²³¹ Th	1.14E-6
²³¹ Pa	2.14E-2
²²⁷ Ac	1.32E-2
²²⁷ Th	5.08E-5
²²³ Ra	3.10E-5
²¹¹ Pb	6.82E-8
²³⁸ U	9.61E-2
²³⁴ Th	5.67E-4
²³⁸ Pu	1.90E-4
²³⁴ U	9.61E-2
²³⁰ Th	2.83E-1
²²⁶ Ra	2.44E0
²¹⁴ Pb	5.82E-6
²¹⁴ Bi	4.31E-6
²¹⁰ Pb	1.53E0
²¹⁰ Bi	1.57E-3
²¹⁰ Po	4.31E-2
²⁴¹ Pu	1.01E-2
²⁴¹ Am	1.09E-3
²³⁷ Np	1.86E-3
²³³ Pa	8.52E-6
²³² Th	1.44E-1
²²⁸ Ra	4.19E-2
²²⁸ Ac	5.46E-6
²²⁸ Th	1.46E-2
²²⁴ Ra	7.83E-5
²¹⁶ Po	3.59E-11
²¹² Pb	9.47E-6
²¹² Bi	8.98E-7
²¹² Po	4.73E-17
²⁰⁸ Tl	1.62E-8
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	9.86E-2

Radionucléides	Activité dans les sols (Bq/m ²)
⁹⁹ Tc	1.48E-1
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	1.08E-1
²³⁹ Pu	1.03E-4
²⁴⁰ Pu	1.03E-4
²¹¹ Bi	4.02E-9
^{234m} Pa	1.92E-8
²¹⁴ Po	4.31E-6
²¹⁵ Po	5.59E-14
²¹⁸ Po	6.62E-7
²⁰⁷ Tl	9.01E-9

Tableau 17 : Activité dans les sols (Bq/m²)

10.2.2 Activité dans les produits d'origine animale

Radionucléides	Activité dans les produits d'origine animale (Bq/kg frais)			
	Porc	Volaille	Œuf	Mouton
²³⁵ U	2,00E-06	3,69E-09	1,04E-09	1,26E-07
²³¹ Th	1,01E-10	6,07E-13	3,03E-13	3,56E-09
²³¹ Pa	2,01E-06	1,44E-08	7,19E-09	2,94E-06
²²⁷ Ac	1,26E-06	9,24E-09	4,62E-09	1,70E-07
²²⁷ Th	7,21E-09	7,18E-11	3,59E-11	7,15E-08
²²³ Ra	1,99E-10	5,09E-12	1,03E-09	2,86E-07
²¹¹ Pb	1,52E-12	9,00E-15	1,82E-14	1,63E-09
²³⁸ U	4,41E-05	8,13E-08	2,30E-08	2,78E-06
²³⁴ Th	1,06E-07	1,21E-09	6,07E-10	6,79E-07
²³⁸ Pu	5,94E-12	6,07E-12	3,64E-11	9,70E-11
²³⁴ U	4,41E-05	8,13E-08	2,30E-08	2,78E-06
²³⁰ Th	2,60E-05	1,80E-07	9,02E-08	2,82E-06
²²⁶ Ra	5,92E-06	3,89E-07	7,85E-05	1,50E-04
²¹⁴ Pb	1,30E-10	7,69E-13	1,55E-12	1,39E-07
²¹⁴ Bi	1,30E-10	5,69E-13	1,15E-12	1,45E-07
²¹⁰ Pb	1,46E-05	2,65E-07	5,36E-07	1,74E-04
²¹⁰ Bi	3,85E-08	2,07E-10	4,18E-10	3,89E-05
²¹⁰ Po	1,35E-06	1,03E-04	1,33E-04	3,66E-04
²⁴¹ Pu	3,32E-10	3,63E-10	2,18E-09	7,44E-09
²⁴¹ Am	1,19E-10	3,42E-11	5,14E-10	1,13E-09
²³⁷ Np	1,76E-07	1,26E-09	6,31E-10	8,63E-09
²³³ Pa	1,79E-09	2,14E-11	1,07E-11	9,45E-08
²³² Th	1,32E-05	9,16E-08	4,58E-08	1,43E-06
²²⁸ Ra	1,24E-07	9,76E-09	1,97E-06	5,86E-06
²²⁸ Ac	4,78E-10	2,91E-12	1,46E-12	1,81E-08
²²⁸ Th	2,23E-06	2,35E-08	1,17E-08	9,37E-07
²²⁴ Ra	6,25E-10	1,03E-11	2,09E-09	1,05E-06
²¹⁶ Po	8,52E-16	1,15E-14	1,48E-14	3,62E-12
²¹² Pb	2,07E-10	1,25E-12	2,53E-12	2,20E-07
²¹² Bi	2,71E-11	1,18E-13	2,39E-13	3,01E-08
²¹² Po	1,12E-21	1,51E-20	1,96E-20	4,78E-18
²⁰⁸ Tl	7,50E-11	4,33E-14	4,33E-14	1,10E-09
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	2,26E-04	4,92E-05	7,30E-06	2,65E-04
⁹⁹ Tc	8,89E-05	2,51E-05	1,59E-03	2,11E-02
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	3,18E-06	5,01E-07	8,77E-06	3,41E-06
²³⁹ Pu	3,20E-12	3,24E-12	1,94E-11	4,91E-11
²⁴⁰ Pu	3,20E-12	3,23E-12	1,94E-11	4,91E-11
²¹¹ Bi	1,22E-13	5,31E-16	1,07E-15	1,36E-10

^{234m} Pa	1,71E-12	1,02E-14	5,11E-15	6,46E-10
²¹⁴ Po	1,02E-10	1,38E-09	1,78E-09	4,35E-07
²¹⁵ Po	1,33E-18	1,79E-17	2,31E-17	5,65E-15
²¹⁸ Po	1,57E-11	2,12E-10	2,74E-10	6,69E-08
²⁰⁷ Tl	4,17E-11	2,40E-14	2,40E-14	6,12E-10

**Tableau 18 : Activité dans les produits d'origine animale
(Bq/kg frais)**

10.2.3 Activité dans les végétaux

Radionucléides	Activité dans les végétaux (Bq/kg frais)							
	Foin	Herbe	Maïs	Céréale	Légume racine	Fruit	Légume fruit	Légume feuille
²³⁵ U	7,44E-06	5,57E-06	2,21E-06	4,71E-07	4,76E-06	6,14E-08	5,22E-08	2,30E-06
²³¹ Th	5,36E-07	4,45E-07	1,61E-07	1,61E-06	3,34E-07	1,98E-09	1,33E-09	1,85E-07
²³¹ Pa	2,83E-05	2,54E-05	7,46E-06	5,75E-05	1,39E-05	1,90E-07	1,66E-07	7,65E-06
²²⁷ Ac	1,70E-05	1,42E-05	5,58E-06	5,55E-05	1,20E-05	1,00E-07	7,69E-08	5,78E-06
²²⁷ Th	1,08E-05	8,92E-06	3,30E-06	3,30E-05	6,87E-06	4,07E-08	2,73E-08	3,70E-06
²²³ Ra	8,57E-06	7,12E-06	2,60E-06	2,60E-05	5,39E-06	3,25E-08	2,19E-08	2,96E-06
²¹¹ Pb	3,45E-08	2,86E-08	1,03E-08	2,07E-07	2,15E-08	1,28E-10	8,56E-11	1,19E-08
²³⁸ U	1,64E-04	1,23E-04	4,87E-05	1,04E-05	1,05E-04	1,35E-06	1,15E-06	5,06E-05
²³⁴ Th	1,02E-04	8,45E-05	3,15E-05	3,15E-04	6,58E-05	3,91E-07	2,62E-07	3,50E-05
²³⁸ Pu	1,54E-07	1,28E-07	5,06E-08	1,01E-08	1,09E-07	1,37E-11	1,04E-11	5,24E-08
²³⁴ U	1,64E-04	1,23E-04	4,87E-05	1,04E-05	1,05E-04	1,35E-06	1,15E-06	5,06E-05
²³⁰ Th	2,94E-04	2,01E-04	7,38E-05	7,36E-04	1,59E-04	9,61E-07	6,50E-07	7,62E-05
²²⁶ Ra	2,00E-03	2,46E-03	6,70E-04	6,46E-03	1,42E-03	4,73E-05	4,46E-05	7,14E-04
²¹⁴ Pb	2,95E-06	2,45E-06	8,84E-07	1,77E-05	1,83E-06	1,09E-08	7,32E-09	1,02E-06
²¹⁴ Bi	2,18E-06	1,81E-06	6,54E-07	6,54E-06	1,36E-06	8,71E-09	6,05E-09	7,55E-07
²¹⁰ Pb	2,30E-03	2,24E-03	6,41E-04	1,28E-02	1,38E-03	1,58E-05	1,31E-05	8,85E-04
²¹⁰ Bi	5,85E-04	4,85E-04	1,76E-04	1,75E-03	3,64E-04	2,40E-06	1,68E-06	2,02E-04
²¹⁰ Po	1,82E-03	1,50E-03	5,87E-04	5,87E-03	1,25E-03	7,45E-06	4,99E-06	6,19E-04
²⁴¹ Pu	1,47E-05	1,22E-05	4,83E-06	9,65E-07	1,04E-05	1,14E-09	8,29E-10	5,00E-06
²⁴¹ Am	7,96E-07	7,06E-07	2,61E-07	5,27E-08	5,64E-07	2,14E-10	1,87E-10	2,70E-07
²³⁷ Np	2,12E-06	1,70E-06	6,70E-07	6,45E-06	1,40E-06	1,94E-08	1,67E-08	6,77E-07
²³³ Pa	1,42E-06	1,18E-06	4,40E-07	4,39E-06	9,19E-07	5,50E-09	3,70E-09	4,86E-07
²³² Th	1,49E-04	1,02E-04	3,75E-05	3,73E-04	8,06E-05	4,88E-07	3,30E-07	3,86E-05
²²⁸ Ra	1,33E-04	1,24E-04	4,39E-05	4,35E-04	9,44E-05	1,23E-06	1,04E-06	4,59E-05
²²⁸ Ac	2,72E-06	2,25E-06	8,15E-07	8,15E-06	1,69E-06	1,00E-08	6,73E-09	9,40E-07
²²⁸ Th	1,34E-04	1,09E-04	4,29E-05	4,29E-04	9,25E-05	5,50E-07	3,69E-07	4,46E-05
²²⁴ Ra	3,14E-05	2,61E-05	9,43E-06	9,43E-05	1,96E-05	1,17E-07	7,90E-08	1,09E-05
²¹⁶ Po	1,82E-11	1,51E-11	5,45E-12	5,45E-11	1,13E-11	6,71E-14	4,50E-14	6,29E-12
²¹² Pb	4,65E-06	3,86E-06	1,40E-06	2,79E-05	2,90E-06	1,72E-08	1,16E-08	1,61E-06
²¹² Bi	4,53E-07	3,76E-07	1,36E-07	1,36E-06	2,82E-07	1,81E-09	1,26E-09	1,57E-07
²¹² Po	2,40E-17	1,99E-17	7,19E-18	7,19E-17	1,49E-17	8,85E-20	5,93E-20	8,29E-18
²⁰⁸ Tl	8,28E-09	6,88E-09	2,48E-09	2,47E-08	5,13E-09	3,94E-11	2,94E-11	2,86E-09
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,86E-04	1,22E-04	5,13E-05	3,07E-03	9,84E-04	1,68E-04	1,13E-04	4,82E-05
⁹⁹ Tc	5,13E-02	2,63E-02	8,18E-03	7,55E-02	2,69E-03	8,44E-04	6,85E-04	1,44E-02

Radionucléides	Activité dans les végétaux (Bq/kg frais)							
	Foin	Herbe	Maïs	Céréale	Légume racine	Fruit	Légume fruit	Légume feuille
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	4,70E-04	2,27E-04	1,08E-04	1,13E-03	4,86E-05	6,60E-05	6,08E-05	8,09E-05
²³⁹ Pu	7,32E-08	6,07E-08	2,41E-08	4,81E-09	5,20E-08	6,76E-12	5,23E-12	2,49E-08
²⁴⁰ Pu	7,32E-08	6,07E-08	2,41E-08	4,81E-09	5,20E-08	6,76E-12	5,23E-12	2,49E-08
²¹¹ Bi	2,04E-09	1,69E-09	6,12E-10	6,12E-09	1,27E-09	8,14E-12	5,65E-12	7,05E-10
^{234m} Pa	9,72E-09	8,07E-09	2,91E-09	2,91E-08	6,04E-09	3,60E-11	2,41E-11	3,36E-09
²¹⁴ Po	2,18E-06	1,81E-06	6,54E-07	6,54E-06	1,36E-06	8,05E-09	5,39E-09	7,54E-07
²¹⁵ Po	2,84E-14	2,35E-14	8,50E-15	8,50E-14	1,76E-14	1,05E-16	7,01E-17	9,80E-15
²¹⁸ Po	3,36E-07	2,78E-07	1,01E-07	1,01E-06	2,09E-07	1,24E-09	8,30E-10	1,16E-07
²⁰⁷ Tl	4,60E-09	3,82E-09	1,37E-09	1,37E-08	2,85E-09	2,19E-11	1,63E-11	1,58E-09

**Tableau 19 : Activité dans les végétaux
(Bq/kg frais)**

10.2.4 Activité dans l'air

Radionucléides	Activité dans l'air (Bq/m ³)
²³⁵ U	1.43E-9
²³¹ Th	1.42E-9
²³¹ Pa	3.67E-9
²²⁷ Ac	3.65E-9
²²⁷ Th	3.60E-9
²²³ Ra	3.60E-9
²¹¹ Pb	3.60E-9
²³⁸ U	3.15E-8
²³⁴ Th	3.12E-8
²³⁸ Pu	3.34E-11
²³⁴ U	3.15E-8
²³⁰ Th	4.86E-8
²²⁶ Ra	4.23E-7
²¹⁴ Pb	4.14E-7
²¹⁴ Bi	4.14E-7
²¹⁰ Pb	4.20E-7
²¹⁰ Bi	4.14E-7
²¹⁰ Po	4.15E-7
²⁴¹ Pu	3.17E-9
²⁴¹ Am	1.73E-10
²³⁷ Np	4.24E-10
²³³ Pa	4.18E-10
²³² Th	2.47E-8
²²⁸ Ra	2.84E-8
²²⁸ Ac	2.83E-8
²²⁸ Th	2.84E-8
²²⁴ Ra	2.83E-8
²²⁰ Rn	2.88E-5
²¹⁶ Po	2.83E-8
²¹² Pb	2.83E-8
²¹² Bi	2.83E-8
²¹² Po	1.81E-8
²⁰⁸ Tl	1.02E-8
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	2.19E-8
⁹⁹ Tc	4.88E-6
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	3.67E-8

Radionucléides	Activité dans l'air (Bq/m ³)
²³⁹ Pu	1.59E-11
²⁴⁰ Pu	1.59E-11
²¹¹ Bi	3.60E-9
^{234m} Pa	3.12E-8
²¹⁴ Po	4.14E-7
²¹⁵ Po	3.60E-9
²¹⁸ Po	4.14E-7
²¹⁹ Rn	3.66E-6
²²² Rn	4.21E-4
²⁰⁷ Tl	3.60E-9

Tableau 20 : Activité dans l'air due aux rejets atmosphériques (Bq/m³)

10.3 EVALUATION DES ACTIVITES INGEREES ET INHALEES CHEZ L'ENFANT 7-12 ANS DU GROUPE « LIVIERE HAUTE »

Radionucléides	Activité ingérée et inhalée chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière haute (Bq/an)			
	Ingestion de sol par inadvertance	Ingestion de produits d'origine animale	Ingestion de végétaux	Inhalation
²³⁵ U	5,16E-07	3.24E-5	1.21E-4	8.02E-6
²³¹ Th	1,35E-10	9.61E-9	8.77E-6	7.94E-6
²³¹ Pa	2,53E-06	3.90E-5	3.69E-4	2.06E-5
²²⁷ Ac	1,56E-06	2.07E-5	3.10E-4	2.04E-5
²²⁷ Th	6,02E-09	2.77E-7	1.80E-4	2.02E-5
²²³ Ra	3,67E-09	6.49E-7	1.41E-4	2.02E-5
²¹¹ Pb	8,07E-12	3.67E-9	5.76E-7	2.02E-5
²³⁸ U	1,14E-05	7.14E-4	2.68E-3	1.77E-4
²³⁴ Th	6,72E-08	3.24E-6	1.72E-3	1.75E-4
²³⁸ Pu	2,25E-08	5.85E-10	2.73E-6	1.87E-7
²³⁴ U	1,14E-05	7.14E-4	2.68E-3	1.77E-4
²³⁰ Th	3,35E-05	4.25E-4	4.08E-3	2.72E-4
²²⁶ Ra	2,89E-04	8.73E-4	3.85E-2	2.37E-3
²¹⁴ Pb	6,89E-10	3.14E-7	4.93E-5	2.32E-3
²¹⁴ Bi	5,10E-10	3.27E-7	3.57E-5	2.32E-3
²¹⁰ Pb	1,81E-04	6.30E-4	3.82E-2	2.35E-3
²¹⁰ Bi	1,86E-07	8.77E-5	9.58E-3	2.32E-3
²¹⁰ Po	5,10E-06	2.78E-3	3.24E-2	2.32E-3
²⁴¹ Pu	1,19E-06	3.83E-8	2.60E-4	1.77E-5
²⁴¹ Am	1,29E-07	7.70E-9	1.41E-5	9.68E-7
²³⁷ Np	2,21E-07	2.85E-6	3.66E-5	2.38E-6
²³³ Pa	1,01E-09	2.41E-7	2.40E-5	2.34E-6
²³² Th	1,70E-05	2.16E-4	2.07E-3	1.38E-4
²²⁸ Ra	4,96E-06	2.62E-5	2.46E-3	1.59E-4
²²⁸ Ac	6,46E-10	4.81E-8	4.44E-5	1.59E-4
²²⁸ Th	1,73E-06	3.82E-5	2.38E-3	1.59E-4
²²⁴ Ra	9,27E-09	2.37E-6	5.14E-4	1.59E-4
²²⁰ Rn	1,62E-09	0.00E0	0.00E0	1.61E-1
²¹⁶ Po	4,25E-15	8.35E-12	2.97E-10	1.59E-4
²¹² Pb	1,12E-09	4.96E-7	7.78E-5	1.59E-4
²¹² Bi	1,06E-10	6.80E-8	7.42E-6	1.59E-4
²¹² Po	5,60E-21	1.10E-17	3.92E-16	1.01E-4

Radionucléides	Activité ingérée et inhalée chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière haute (Bq/an)			
	Ingestion de sol par inadvertance	Ingestion de produits d'origine animale	Ingestion de végétaux	Inhalation
²⁰⁸ Tl	1,92E-12	3.67E-9	1.35E-7	5.71E-5
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	1,17E-05	4.82E-3	2.81E-2	1.23E-4
⁹⁹ Tc	1,75E-05	5.78E-2	2.09E-1	2.74E-2
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	1,27E-05	1.13E-4	4.67E-3	2.05E-4
²³⁹ Pu	1,22E-08	3.07E-10	1.30E-6	8.93E-8
²⁴⁰ Pu	1,22E-08	3.06E-10	1.30E-6	8.93E-8
²¹¹ Bi	4,76E-13	3.06E-10	3.34E-8	2.02E-5
^{234m} Pa	2,27E-12	1.47E-9	1.59E-7	1.75E-4
²¹⁴ Po	5,10E-10	1.00E-6	3.57E-5	2.32E-3
²¹⁵ Po	6,62E-18	1.30E-14	4.64E-13	2.02E-5
²¹⁸ Po	7,84E-11	1.54E-7	5.49E-6	2.32E-3
²¹⁹ Rn	1,48E-11	0.00E0	0.00E0	2.05E-2
²²² Rn	1,42E-04	0.00E0	0.00E0	2.36
²⁰⁷ Tl	1,07E-12	2.04E-9	7.50E-8	2.02E-5

Tableau 21 : Activité ingérée ou inhalée chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière Haute (Bq/an)

10.4 RESULTATS DETAILLES DU CALCUL DE DOSE – ENFANT 7-12 ANS – HABITATION LIVIERE HAUTE

10.4.1 Résultats détaillés du calcul de dose par voie d'exposition

Le tableau ci-après présente la dose reçue, pour la population la plus exposée à savoir les enfants 7-12 ans du groupe « Livière Haute » et pour l'ensemble des voies d'exposition liées aux rejets atmosphériques de l'installation TDN.

Voies d'exposition	Dose chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière Haute (mSv/an)
Ingestion de produits terrestres (origine animale et végétale)	2.11E-4
Ingestion de sol par inadvertance	6.29E-7
Exposition externe au dépôt	8.57E-7
Exposition externe au panache	1.80E-9
Inhalation	1.17E-4
Inhalation ²²² Rn (cf §8.1)	1.35E-5
Somme	3.43E-4

Tableau 22 : Dose efficace globale (mSv/an) par voie d'exposition chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière Haute

La dose reçue par un enfant de 7-12 ans au groupe Livière Haute soumis aux rejets de l'installation TDN est de $3,43 \cdot 10^{-4}$ mSv/an. Cette valeur de dose est largement inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an (Code de la santé publique).

L'exposition provient essentiellement de l'ingestion de produits terrestres (62 %) puis de l'inhalation (38 %). Les autres voies d'exposition représentent moins de 0,5 % de la dose totale.

10.4.2 Résultats détaillés du calcul de dose par radionucléides

Le tableau ci-après, présente, pour la population la plus exposée, à savoir les enfants 7-12 ans du groupe Livière Haute et pour les rejets atmosphériques liés au fonctionnement de l'installation TDN, la dose associée à chaque radionucléide.

Radionucléides	Dose chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière Haute (Sv/an)
²³⁵ U	1.10E-10
²³¹ Th	1.10E-14
²³¹ Pa	3.48E-9
²²⁷ Ac	1.52E-8
²²⁷ Th	2.87E-10
²²³ Ra	2.86E-10
²¹¹ Pb	4.04E-13
²³⁸ U	2.00E-9
²³⁴ Th	1.47E-11
²³⁸ Pu	2.13E-11
²³⁴ U	2.37E-9
²³⁰ Th	5.45E-9
²²⁶ Ra	6.04E-8
²¹⁴ Pb	4.89E-11
²¹⁴ Bi	5.21E-11
²¹⁰ Pb	9.12E-8
²¹⁰ Bi	3.31E-10
²¹⁰ Po	1.05E-7
²⁴¹ Pu	4.39E-11
²⁴¹ Am	1.00E-10
²³⁷ Np	1.24E-10
²³³ Pa	8.78E-14
²³² Th	1.86E-8
²²⁸ Ra	1.29E-8
²²⁸ Ac	9.20E-12
²²⁸ Th	9.10E-9
²²⁴ Ra	8.32E-10
²²⁰ Rn	1.68E-14
²¹⁶ Po	7.40E-19
²¹² Pb	4.12E-11
²¹² Bi	6.99E-12
²¹² Po	0.00E0

Radionucléides	Dose chez l'enfant 7-12 ans du groupe Livière Haute (Sv/an)
^{208}Tl	5.77E-14
$^{137}\text{Cs}+^{137\text{m}}\text{Ba}$	8.36E-10
^{99}Tc	8.13E-10
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	1.82E-10
^{239}Pu	1.11E-11
^{240}Pu	1.11E-11
^{211}Bi	2.35E-16
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.23E-15
^{214}Po	5.94E-17
^{215}Po	9.58E-19
^{218}Po	5.60E-18
^{219}Rn	3.09E-13
^{222}Rn	2.54E-13 + 1.35E-08 (inhalation)
^{207}Tl	6.02E-17
Somme	3.43E-7

Tableau 23 : Tableau de synthèse des niveaux d'exposition – Enfant 7-12 ans – Livière Haute

Le plus gros contributeur est le ^{210}Po qui représente plus de 31 % de la dose totale, viennent ensuite le ^{210}Pb (27 %) et le ^{226}Ra (18 %).