



SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

19 janvier 2009

NOTE TECHNIQUE

Méthodologie d'évaluation de l'impact dosimétrique des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium

CARACTERISANTS SGN	
UNITE CHAINE	
REPERE EQUIPEMENT	
BATIMENT BLOC	
NIVEAU	
SALLE	
SECTEUR (site)	
AIRE (site)	
CODE ARTICLE	
CMT (3 num)	

Rév.	Rédaction	Vérification	Approbation
C	L. DELGOVE Le 19/01/09 	D. KEROUANTON Le 19/01/09 	A. COULAUD Le 19/01/09



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

HISTORIQUE DES REVISIONS

Rév.	Date, N° de contrôle, Signataire et repérages des paragraphes modifiés
A	Approbation le : 15/12/2008 Rédacteur : L. DELGOVE Vérificateur : D. KEROUANTON Approbateur : A. COULAUD N° de contrôle : 8282000074
B	Approbation le : 17/12/2008 Rédacteur : L. DELGOVE Vérificateur : D. KEROUANTON Approbateur : A. COULAUD N° de contrôle : 8347000237 Modification du facteur cumulatif de la dose externe et de la dose inhalation radon pour le scénario de résidence sur stockage sans couverture
C	Approbation le : 19/01/09 Rédacteur : L. DELGOVE Vérificateur : D. KEROUANTON Approbateur : A. COULAUD N° de contrôle : 9015000193 Prise en compte du cas de la dalle fissurée, et prise en compte des facteurs correctifs individuels de l'étude de sensibilité.

RESUME

Ce document décrit la méthodologie utilisée pour évaluer l'impact dosimétrique d'un site, réaménagé, de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium sur son environnement proche. La méthodologie est basée sur la modélisation des différentes voies d'atteinte auxquelles sont exposées les populations riveraines.

Conformément à la doctrine DPPR, plusieurs scénarios sont étudiés :

- un scénario de référence,
- cinq scénarios altérés d'évolution à long terme dont la probabilité d'occurrence est nulle ou extrêmement faible.

Les hypothèses considérées pour les calculs sont le plus souvent enveloppes, ce qui a pour conséquence de majorer les effets des situations envisagées.

L'aspect « phases de surveillance » est également étudié pour le scénario de référence et le premier scénario altéré pour distinguer le court, le moyen et le long terme.

De plus, une étude de sensibilité est menée sur les paramètres dont la valeur a été choisie dans une gamme.



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

SOMMAIRE

1	OBJET ET CONTEXTE	9
2	PRESENTATION GENERALE DE LA DEMARCHE D'ETUDE DE L'IMPACT DES SITES DE STOCKAGE DE RESIDUS DE TRAITEMENT DE MINERAIS D'URANIUM	11
2.1	PRESENTATION D'UN SITE DE STOCKAGE	11
2.2	PRESENTATION GENERALE DE L'EVALUATION	11
2.2.1	Principes	11
2.2.2	Les voies d'exposition à considérer.....	13
2.2.3	L'exposition externe	13
2.2.4	L'exposition interne par inhalation.....	13
2.2.5	L'exposition interne par ingestion.....	14
2.2.6	Groupes de référence	14
3	DESCRIPTION DES SCENARIOS CONSIDERES.....	15
3.1	SCENARIO DE REFERENCE	15
3.2	SCENARIOS ALTERES	17
3.2.1	Perte d'intégrité de la couverture et de la digue.....	17
3.2.2	Résidence sur le stockage avec couverture.....	18
3.2.3	Chantier de terrassement d'une route à travers le stockage	20
3.2.4	Jeux d'enfants sur les tas excavés par le chantier	20
3.2.5	Résidence sur le stockage sans couverture.....	21
3.3	SYNTHESE DES DOSES CALCULEES PAR SCENARIO ET PAR PHASE DE SURVEILLANCE.....	23
4	CODES DE CALCUL UTILISES.....	25
4.1	TERMES SOURCES.....	25

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

4.2	EXPOSITION EXTERNE	25
4.3	EXPOSITION INTERNE.....	25
4.3.1	Dose inhalation.....	25
4.3.2	Dose ingestion	25
5	MODELISATIONS ET METHODES DE CALCUL DE DOSES	26
5.1	ANALYSE DE L'EQUILIBRE DE LA CHAINE DE DECROISSANCE DE L' ²³⁸ U.....	26
5.2	L'EXPOSITION EXTERNE	27
5.2.1	Exposition externe due au stockage induite aux groupes de référence hors du site.....	27
5.2.1.1	<i>Scenario de référence (avec digue)</i>	<i>27</i>
5.2.1.2	<i>Scenario de perte d'intégrité de la digue et perte de couverture</i>	<i>29</i>
5.2.2	Exposition externe due au stockage induite aux groupes de référence sur site	30
5.2.2.1	<i>Cas de la promenade et de la base de loisirs sur stockage.....</i>	<i>30</i>
5.2.2.2	<i>Cas de la résidence sur stockage.....</i>	<i>30</i>
5.2.2.3	<i>Exposition externe due à la construction de la route sur les résidus.....</i>	<i>31</i>
5.2.2.4	<i>Exposition externe due à un tas de résidus excavés</i>	<i>31</i>
5.2.3	Exposition externe induite par le dépôt consécutif à l'irrigation.....	32
5.3	L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DU RADON.....	34
5.3.1	Calcul de l'énergie alpha potentielle volumique de l'air (EAP _v)	35
5.3.2	Facteurs d'équilibre	36
5.3.2.1	<i>A l'extérieur.....</i>	<i>36</i>
5.3.2.2	<i>A l'intérieur.....</i>	<i>37</i>
5.3.2.3	<i>Sur site</i>	<i>38</i>
5.3.2.4	<i>Synthèse et choix des facteurs d'équilibre.....</i>	<i>38</i>
5.3.3	Calcul de la concentration en radon dans l'air.....	38
5.3.3.1	<i>Estimation du flux de ²²²Rn exhalé par le sol.....</i>	<i>38</i>
5.3.3.2	<i>Atténuation du flux de radon.....</i>	<i>39</i>
5.3.3.3	<i>Coefficient de Transfert Atmosphérique.....</i>	<i>43</i>



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

5.3.3.4	Synthèse du calcul de C_{Rn222}	47
5.3.4	Synthèse du processus de calcul de l'exposition au radon.....	48
5.4	L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DE POUSSIÈRES.....	49
5.5	L'EXPOSITION INTERNE PAR INGESTION	51
5.5.1	Consommation d'eau et d'aliments	51
5.5.2	Concentrations dans les sols	51
5.5.3	Consommation de terre	53
6	DONNEES DE BASES INTERVENANT DANS LES CALCULS.....	54
6.1	CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DU SITE	54
6.1.1	Météorologie annuelle	54
6.1.2	Géologie et hydrogéologie du site.....	54
6.2	DONNEES DE DESCRIPTION DU STOCKAGE ET DES RESIDUS	54
6.3	SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT	54
6.4	DONNEES RELATIVES AUX GROUPES DE REFERENCE	55
6.4.1	Situation géographique et classes d'âge.....	55
6.4.2	Temps de présence.....	56
6.4.3	Données relatives à l'inhalation de poussières.....	59
6.4.3.1	<i>Débits respiratoires</i>	59
6.4.3.2	<i>Empoussièrtements</i>	59
6.4.4	Données relatives à l'inhalation de Radon.....	61
6.4.5	Données relatives à l'exposition externe	62
6.4.5.1	<i>Pour le site vue par les villages alentours</i>	62
6.4.5.2	<i>Pour le scénario « perte de couverture et perte d'intégrité de la digue »</i>	63
6.4.5.3	<i>Pour la résidence sur site</i>	63
6.4.5.4	<i>Pour le dépôt consécutif à l'irrigation</i>	63
6.4.6	Données relatives à l'ingestion.....	63

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

6.5	COEFFICIENTS DE DOSE.....	64
6.5.1	Exposition interne.....	64
6.5.1.1	<i>Type d'absorption utilisée pour les différents radionucléides étudiés.....</i>	64
6.5.2	Coefficients de dose interne par inhalation et ingestion.....	65
6.5.3	Coefficients de dose externe	66
6.5.4	Facteurs de conversion des EAP.....	67
6.5.5	Coefficients de transfert aux cultures	67
6.5.5.1	<i>Caractéristiques des végétaux.....</i>	67
6.5.5.2	<i>Facteurs de transfert sol/plante pour les rejets liquides.....</i>	67
7	ETUDE DE SENSIBILITE	68
7.1	SENSIBILITE DES PARAMETRES.....	68
7.2	INFLUENCE DES PARAMETRES DEFINIS DANS LA METHODOLOGIE.....	68
7.2.1	Influence des paramètres de la dose inhalation Radon.....	68
7.2.2	Influence des paramètres de la dose inhalation poussières.....	69
7.2.2.1	<i>Coefficients de dose inhalation</i>	69
7.2.2.2	<i>Empoussièrement « jardin ».....</i>	70
7.2.3	Influence des paramètres de la dose externe.....	71
7.2.4	Influence des paramètres de la dose ingestion.....	72
7.2.5	Scénarios et temps de présence.....	72
7.3	SYNTHESE.....	76
7.3.1	Scénario de référence.....	76
7.3.1.1	<i>Groupe de référence : Retraités vivant aux alentours du site</i>	76
7.3.1.2	<i>Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans vivant aux alentours du site</i>	77
7.3.1.3	<i>Groupe de référence : Adultes du public entretenant le site</i>	77
7.3.1.4	<i>Groupe de référence : Retraités se promenant sur le site</i>	78
7.3.1.5	<i>Groupe de référence : Enfants de 12 à 17 ans se promenant sur le site</i>	78

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

7.3.1.6	<i>Groupe de référence : Travailleurs sur le site (enfants de 12 à 17 ans) et adultes</i>	79
7.3.1.7	<i>Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (enfants et adultes)</i>	79
7.3.2	Scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture	80
7.3.2.1	<i>Groupe de référence : Retraités vivant aux alentours du site</i>	80
7.3.2.2	<i>Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans vivant aux alentours du site</i>	80
7.3.2.3	<i>Groupe de référence : Retraités se promenant sur le site</i>	81
7.3.2.4	<i>Groupe de référence : Enfants de 12 à 17 ans se promenant sur le site</i>	81
7.3.2.5	<i>Groupe de référence : Travailleurs sur le site (adultes du public)</i>	82
7.3.2.6	<i>Groupe de référence : Travailleurs sur le site (enfants de 12 à 17 ans)</i>	82
7.3.2.7	<i>Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (adultes)</i>	83
7.3.2.8	<i>Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (enfants)</i>	83
7.3.3	Scénario de résidence sur stockage avec couverture	84
7.3.3.1	<i>Groupe de référence : Retraités habitant sur le site</i>	84
7.3.3.2	<i>Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans habitant sur le site</i>	85
7.3.4	Scénario de terrassement d'une route	86
7.3.4.1	<i>Groupe de référence : Travailleurs sur le site</i>	86
7.3.5	Scénario de jeux d'enfants	86
7.3.5.1	<i>Groupe de référence : Enfants de 7 à 12 ans jouant sur les tas excavés (sur le site)</i>	86
7.3.6	Scénario de résidence sur stockage sans couverture	87
7.3.6.1	<i>Groupe de référence : Retraités habitant sur le site</i>	87
7.3.6.2	<i>Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans habitant sur le site</i>	88
8	CONCLUSION	90
9	REFERENCES	91
10	ANNEXE 1: DESCRIPTION DES CODES DE CALCUL	95
10.1	LE CODE CESAR 4.38	96
10.2	LE CODE ORIGEN 2.2	96



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

10.3	LE CODE DE CALCUL MERCURAD.....	96
11	ANNEXE 2 : DESCRIPTION DES MODELES GAUSSIENS.....	97
11.1	MODELES GAUSSIENS	98
11.1.1	Modèle bouffée gaussienne	99
11.1.2	Modèle panache gaussien.....	100
11.1.3	Correspondance entre les modèles.....	100
11.1.4	Coefficient de transfert Atmosphérique.....	102
11.2	DESCRIPTION DES MODELES DE DOURY ET DE PASQUILL	103
11.2.1	Modèle de DOURY	103
11.2.1.1	<i>Généralités</i>	103
11.2.1.2	<i>Stabilité atmosphérique</i>	103
11.2.1.3	<i>Ecarts-types de DOURY</i>	103
11.2.2	Modèle de PASQUILL.....	104
11.2.2.1	<i>Généralités</i>	104
11.2.2.2	<i>Ecarts- types de PASQUILL</i>	104
12	ANNEXE 3: COEFFICIENTS DE TRANSFERT AUX CULTURES ...	105
12.1	CARACTERISTIQUES DU MILIEU RECEPTEUR	106
12.2	CARACTERISTIQUES DES VEGETAUX	106
12.3	FACTEURS DE TRANSFERT SOL/ PLANTE POUR LES REJETS LIQUIDES	107

SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

1 OBJET ET CONTEXTE

La loi n° 2006-739 de 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs institue, en son article 4, un programme d'étude comprenant « un bilan en 2008 de l'impact à long terme des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium et la mise en œuvre d'un plan de surveillance radiologique renforcée de ces sites ».

L'objet de ce document est de présenter la méthodologie d'évaluation de l'impact dosimétrique des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium qu'AREVA se propose d'utiliser.

La méthodologie est basée sur la modélisation des différentes voies d'atteinte auxquelles sont exposées les populations riveraines. Tout en restant conservatrice, cette évaluation a pour objectif d'être la plus réaliste possible.

L'évaluation de l'impact s'appuie sur la doctrine DPPR diffusée par le MEDD/DPPR en mai 1999 [1] et commentée par l'IRSN [2]. Cette évaluation est basée sur la détermination de la dose efficace ajoutée au bruit de fond naturel prenant en compte toutes les voies d'exposition possibles.

L'évaluation de la dose efficace ajoutée est effectuée pour les groupes de référence ou pour des personnes intervenant ou se promenant sur le site avec prise en compte des différentes voies d'exposition externe ou interne.

La méthode consiste à étudier des scénarios en situation d'évolution normale du site et en situations hypothétiques prenant en compte certains événements aléatoires d'origine naturelle ou associés à des actions humaines pouvant perturber l'évolution normale du site et éventuellement conduire à des doses efficaces ajoutées plus élevées.

Six scénarios d'évolution possibles (un scénario dit de référence et 5 altérés) sont étudiés :

- le scénario de référence correspondant à la situation d'évolution normale du stockage,
- cinq scénarios altérés :
 - Perte d'intégrité de la couverture et de la digue,
 - Résidence sur le stockage avec couverture,
 - Chantier de terrassement d'une route à travers le stockage,
 - Jeux d'enfants sur le tas excavé par le chantier routier,
 - Résidence sur le stockage sans couverture.



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Pour ces scénarios d'évolution à long terme, dont la probabilité d'occurrence est nulle ou extrêmement faible, on considère la constance des caractéristiques de l'homme (sensibilité aux rayonnements, habitudes alimentaires, conditions de vie, connaissances générales, ...) sans prise en compte de progrès scientifiques dans les domaines technique et médical, conformément à la RFS [40].

Les hypothèses prises sont le plus souvent enveloppées en termes d'impact, ce qui a pour conséquence de majorer les effets des situations envisagées.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

2 PRESENTATION GENERALE DE LA DEMARCHE D'ETUDE DE L'IMPACT DES SITES DE STOCKAGE DE RESIDUS DE TRAITEMENT DE MINERAIS D'URANIUM

2.1 PRESENTATION D'UN SITE DE STOCKAGE

Il existe différents types de stockage (mines à ciel ouvert (MCO) avec ou sans digue, bassins créés ou Thalweg derrière les digues, ...), comme le montre la figure 1.

Néanmoins, compte tenu de la variété des types de stockages, une même modélisation simplifiée sera retenue (voir § 5).

2.2 PRESENTATION GENERALE DE L'EVALUATION

2.2.1 Principes

L'étude d'impact radiologique consiste à considérer différentes situations d'expositions radiologiques individuelles prenant en compte toutes les voies d'exposition possibles de groupes de personnes représentatifs de la population vivant autour d'un site.

L'évaluation de l'impact radiologique du stockage des résidus de traitement de minerai d'uranium consiste en la détermination de la dose efficace totale ajoutée résultant de l'exposition de ces groupes de population.

La notion de dose ajoutée traduit le fait que l'impact du stockage vient s'additionner au bruit de fond naturel significatif des régions uranifères où sont généralement implantés les anciens sites miniers. En effet, toutes les voies d'exposition à l'uranium et à ses descendants existent également dans le milieu naturel en dehors de toute activité industrielle.

Les très longues vies des éléments radioactifs présents et la lenteur des transferts par l'eau impliquent qu'il est indispensable d'introduire une échelle de temps dans tout raisonnement relatif à l'évaluation de l'impact d'un stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium.

Actuellement, l'évaluation de l'impact radiologique des sites réaménagés repose principalement sur le réseau de surveillance mis en place par l'exploitant dans l'environnement proche du site.

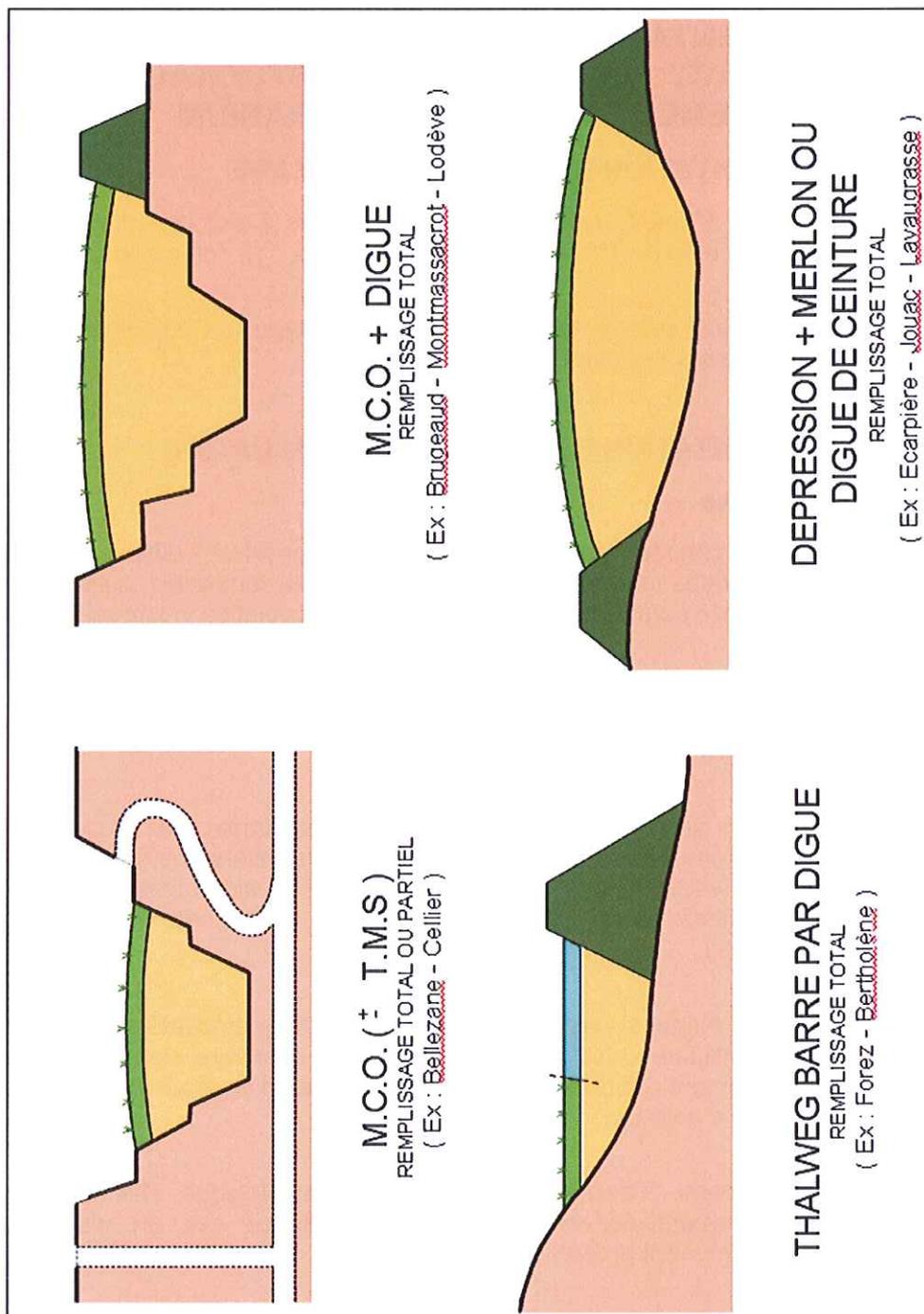


Figure 1 : Présentation des différents types de stockages de résidus de traitement des minerais d'uranium

2.2.2 Les voies d'exposition à considérer

Selon le scénario considéré, différentes voies d'atteinte peuvent être prises en compte.

La figure 2 ci-après schématise ces voies d'atteinte potentielles.

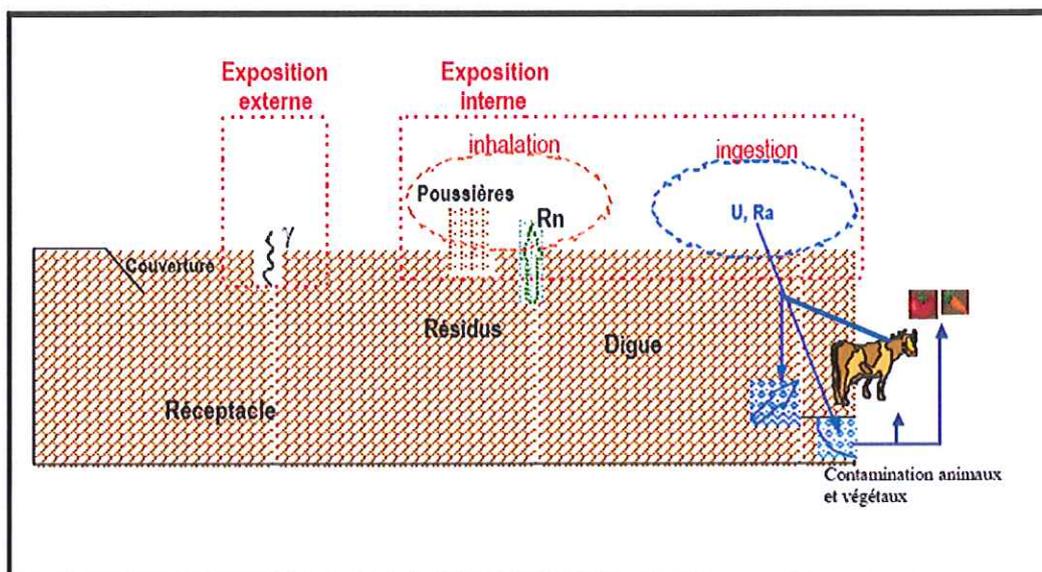


Figure 2 : schéma des différentes voies d'exposition potentielles

2.2.3 L'exposition externe

L'exposition externe est induite principalement par les rayonnements gamma issus du site.

L'exposition externe due au dépôt des poussières est négligée au regard de la dose inhalation induite par celles-ci.

Par contre, l'exposition due au dépôt induite par l'irrigation est pris en compte.

2.2.4 L'exposition interne par inhalation

L'exposition interne due à l'inhalation des descendants à vie courte du ^{222}Rn constitue une importante voie d'atteinte potentielle. L'identification de la contribution du site est déduite des concentrations volumiques des descendants à vie courte du ^{222}Rn dans l'air respiré par les individus des groupes de population étudiés.

Les poussières véhiculées par le vent depuis le site, ou la remise en suspension de particules contaminées, contribuent également à l'exposition interne par inhalation. Cette exposition est calculée à partir de l'activité volumique des émetteurs alpha présents dans les poussières en suspension dans l'air.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

2.2.5 L'exposition interne par ingestion

L'ingestion de produits alimentaires issus de parcelles soumises au dépôt dû à l'irrigation ou issus du site est également une source d'exposition interne à prendre en compte.

La lixiviation des résidus peut entraîner la présence de certains radionucléides dans les eaux rejetées (avec ou sans traitement) et éventuellement dans la nappe sous-jacente. On considère le cas où cette eau est utilisée pour l'irrigation des jardins, des champs, et l'abreuvement des animaux.

L'irrigation est à l'origine d'un dépôt au sol entraînant la contamination des produits cultivés par transfert sol-plantes. La pêche est aussi une source de contamination potentielle pour l'homme.

On peut également considérer que ce dépôt constitue une source de d'exposition externe.

2.2.6 Groupes de référence

Les groupes de population identifiés - dont les paramètres sont l'âge, le mode de vie, les habitudes alimentaires et la localisation - sont considérés comme ceux étant potentiellement les plus exposés en fonction des différents scénarios.

Ces groupes de référence sont composés :

- d'adultes (actifs ou retraités),
- d'enfants de 5 ans, 10 ans, et de 15 ans,
- de travailleurs,
- de promeneurs.

Ils sont présentés plus en détail avec les scénarios considérés au §3.

3 DESCRIPTION DES SCENARIOS CONSIDERES

L'étude d'un site minier implique d'analyser les conséquences de l'évolution normale du site et d'appréhender l'effet de dégradations ou d'utilisations potentielles du site, tel que mentionné dans la « doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerai d'uranium » [2].

Les scénarios décrits ci-dessous, issus du document [3], doivent être adaptés à chaque site.

3.1 SCENARIO DE REFERENCE

Le scénario de référence, schématisé sur la figure 3, correspond à la situation d'évolution normale du stockage avec évaluation de la dose efficace ajoutée pour les groupes de référence et pour des personnes intervenant ou se promenant sur le site avec prise en compte des différentes voies d'exposition.

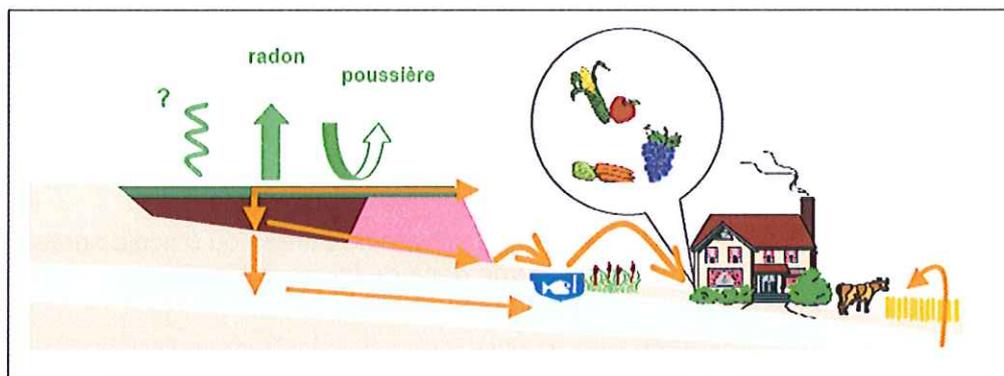


Figure 3 : Schéma du scénario de référence

Trois phases de vie du stockage sont à considérer ici :

- phase de surveillance active (court terme);
- phase de surveillance passive (moyen terme);
- phase de surveillance non garantie (long terme).

L'impact en évolution normale du site, pour les 3 phases de surveillance, prendra en compte 5 expositions potentielles :

- l'exposition par inhalation de radon par les surfaces des différentes zones de résidus du site,
- l'exposition par inhalation de poussières provenant du site,
- l'exposition externe induite par le site,
- l'exposition externe liée à l'irrigation des jardins et potagers par de l'eau issue de l'aval du site,
- l'exposition par ingestion induite par l'abreuvement des animaux, la pêche et l'irrigation.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Remarque : Tant que la couverture est présente sur le stockage, aucune poussière n'est considérée s'échapper des résidus (voir § 5.4).

Ce scénario est donc caractérisé par 4 voies d'exposition.

La nuance entre les phases pour ce scénario se fera comme suit :

- pour la phase de surveillance active :
 - utilisation de l'eau traitée,
 - possibilité de promenade sur le site (si ce dernier le permet),
 - entretien du site par un membre du public (adulte).
- pour la phase de surveillance passive :
 - utilisation de l'eau non traitée,
 - absence d'entretien du site;
 - possibilité de promenade sur le site.
- pour phase de surveillance non garantie :
 - utilisation de l'eau non traitée (valeurs asymptotiques des concentrations de radioéléments),
 - absence d'entretien du site,
 - possibilité de promenade sur le site,
 - possibilité d'une activité de bureau ou d'école sur le site,
 - possibilité d'une base de loisirs sur le site.

Les groupes de référence étudiés pour le scénario de référence selon le type de phase de surveillance sont :

- ceux retenus par le réseau de surveillance sur plusieurs critères, notamment géographiques (des résidences hors site). Pour chaque voie d'exposition, les groupes de référence retenus sont les plus pénalisants à savoir : adultes retraités (> 61 ans) et les enfants de 5 ans. Cette dernière classe d'âge est recommandée par [24]. Ce groupe sera cité sous l'appellation « habitants proche du site » dans la suite du document ;
- des « travailleurs » (membres du public > 17 ans) sur le site (activité de bureau, entretien du site) et des écoliers dont le temps de travail est pénalisant d'après CIBLEX [25] : des enfants de 12 à 17 ans ;
- des promeneurs dont le temps de promenade est pénalisant d'après CIBLEX [25] : retraités pour les adultes, enfants de 12 à 17 ans pour les enfants ;
- des personnes passant du temps sur une base de loisirs : adultes et enfants (temps d'exposition pris indépendamment de l'âge).

SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

3.2 SCENARIOS ALTERES

Les scénarios altérés correspondent à des situations hypothétiques liées à des événements aléatoires, qui peuvent être soit de même nature que ceux retenus dans la situation de référence, mais d'ampleur exceptionnelle, soit des événements très incertains quant à leur date d'occurrence et leur déroulement.

Ces scénarios visent à prendre en compte des situations hypothétiques liées à des événements aléatoires d'origine naturelle mais de forte intensité ou d'activités humaines de type intrusives.

Pour ces scénarios d'évolution à long terme, dont la probabilité d'occurrence est nulle ou extrêmement faible, on considère la constance des caractéristiques de l'homme (sensibilité aux rayonnements, habitudes alimentaires, conditions de vie, connaissances générales, ...) sans prise en compte de progrès scientifiques dans les domaines technique et médical, conformément à la RFS [40].

Les hypothèses prises sont le plus souvent enveloppes en termes d'impact, ce qui a pour conséquence de majorer les effets des situations envisagées.

3.2.1 Perte d'intégrité de la couverture et de la digue

Deux phases de vie du stockage sont à considérer pour ce scénario altéré :

- phase de surveillance passive ;
- phase de surveillance non garantie.

La nuance entre ces phases pour ce scénario est la même que pour le scénario de référence. Les activités possibles durant ces phases de surveillance sont donc les mêmes qu'au paragraphe 3.1.

Compte tenu de la stabilité des digues [35], ce scénario étudiera l'impact causé par la disparition de la couverture du site et d'une partie de la digue sous la forme d'une ouverture qui entraîne la mise à jour des résidus. Ce scénario est modélisé sur la figure 4.

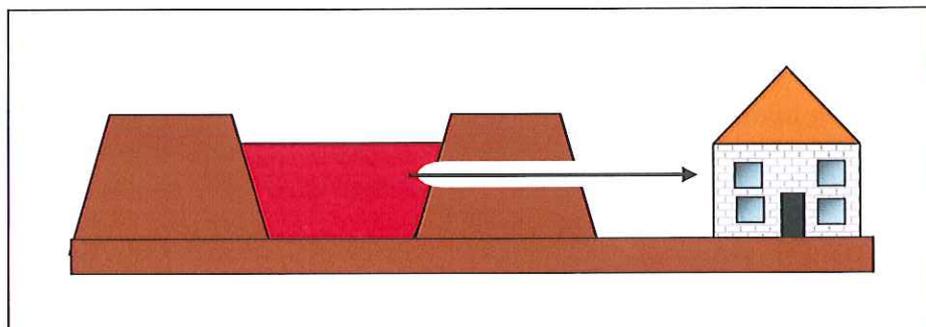


Figure 4 : Schéma du stockage de résidus suite à la perte de la couverture et d'une partie de la digue

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Les expositions potentielles sont :

- Pour les groupes de référence « habitants proche du site » définis au §3.1 :
 - l'exposition par inhalation de radon par les surfaces des différentes zones du stockage de résidus,
 - l'exposition par inhalation de poussières provenant du site,
 - l'exposition externe induite par le site,
 - l'exposition externe liée à l'irrigation des jardins et potagers par de l'eau issue de l'aval du site,
 - l'exposition par ingestion due à l'utilisation de l'eau de rivière à des fins d'abreuvement, de pêche et d'irrigation.

Ce scénario est donc caractérisé par 5 voies d'exposition.

- Pour les « travailleurs », les promeneurs et les personnes jouant dans la base de loisirs :
 - l'exposition par irradiation externe d'un promeneur,
 - l'exposition par inhalation de radon par les surfaces que parcourt le promeneur,
 - l'exposition par inhalation de poussières provenant du site.

Remarque : on supposera que les évolutions géochimiques éventuelles subies par les résidus (telles que leur induration) n'influent pas sur la lixiviation des résidus et que la concentration des radionucléides dans les eaux rejetées n'est pas modifiée par rapport au scénario d'évolution normale [35]. Les doses induites aux groupes de référence par ingestion et par le dépôt induit par l'irrigation seront donc supposées être les mêmes que précédemment.

3.2.2 Résidence sur le stockage avec couverture

Ce scénario apparaît dans la phase de surveillance non garantie du stockage.

Le groupe de référence correspond à des habitants d'une maison supposée être localisée sur le site : adultes retraités et enfants de 5 ans tel que recommandé par le document [24].

On considérera la construction sur la couverture d'une habitation à étage avec un sous-sol semi enterré (en pointillés sur la figure 5) et une dalle de béton (en gris sur la figure) reposant, selon l'épaisseur de la couverture, sur les stériles ou directement sur les résidus.

Remarque 1 : une majorité d'habitations sont actuellement construites sur vide sanitaire ou avec un sous-sol ayant une ouverture sur l'extérieur (garage). La prise en compte d'un sous-sol semi-enterré sans ouverture constitue donc une hypothèse pénalisante.

Remarque 2 : La dalle de béton sera considérée avec fissures en étude de sensibilité.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

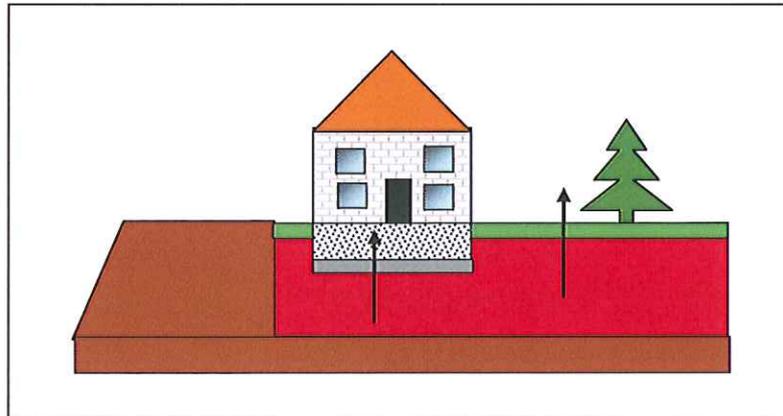


Figure 5 : Schéma de la résidence sur stockage avec couverture

Les expositions potentielles sont :

- A l'extérieur de la maison :
 - l'exposition interne par inhalation due au radon des habitants lors de leur présence dans le jardin,
 - l'exposition externe due au site lors de la présence des habitants dans le jardin et sur le reste du site,
 - l'exposition externe liée à l'irrigation des jardins et potagers par de l'eau issue de l'aval du site,
 - l'ingestion de légumes cultivés dans les potagers sur le stockage et d'eau issue de l'aval du site.

Remarque : On supposera que les concentrations en radionucléides contenus dans l'eau dans ce scénario sont les mêmes que celles considérées dans le scénario de référence en phase de surveillance non garantie. La dose externe due à l'irrigation du jardin est alors la même que dans le scénario de référence en phase de surveillance non garantie.

- A l'intérieur de la maison :
 - l'exposition interne par inhalation due au radon des habitants lors de leur présence dans toutes les pièces de la maison,
 - l'exposition externe de ces habitants lors de leur présence dans la maison.

Ce scénario est donc caractérisé par 6 voies d'exposition.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Remarque : En termes d'exposition au radon à l'intérieur de la maison, la concentration volumique en radon, en régime permanent, sera déterminée dans la cave et appliquée de manière pénalisante à l'ensemble des pièces de la maison. Cette hypothèse est enveloppe dans le sens où il n'est pas considéré la présence d'ouvertures (de portes ou de fenêtres) dont l'utilisation diminue fortement les niveaux de concentrations de radon en intérieur. Des études de terrains ont ainsi permis de montrer que la concentration au rez de chaussée et aux étages étant nettement inférieures à celle mesurée dans le sous-sol des habitations [13].

3.2.3 Chantier de terrassement d'une route à travers le stockage

Ce scénario apparaît dans la phase de surveillance non garantie du stockage.

Le groupe de référence étudié est constitué par les travailleurs du chantier.

On considérera la construction d'une route de campagne sur la longueur maximale du stockage, en adaptant au besoin ce scénario général aux contraintes topographiques locales, avec une vitesse d'avancement de 10 m par jour.

L'étude portera sur 3 voies d'exposition potentielles :

- l'exposition externe,
- l'exposition interne par inhalation de poussières,
- l'exposition interne par inhalation due au radon.

Les calculs seront réalisés en considérant que le chantier se fait directement sur les résidus présents sur le site.

3.2.4 Jeux d'enfants sur les tas excavés par le chantier

Ce scénario apparaît dans la phase de surveillance non garantie du stockage.

Le groupe de référence correspond à des enfants de 10 ans tel que recommandé par [24].

On considérera que le sol excavé par le chantier routier est simplement déversé sous forme de tas sur site et que les enfants viennent y jouer tant que le chantier existe.

L'étude portera sur 4 voies d'exposition potentielles :

- l'exposition externe,
- l'exposition interne par inhalation de poussières,
- l'exposition interne par inhalation due au radon,
- l'exposition interne par ingestion de terre.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

3.2.5 Résidence sur le stockage sans couverture

Ce scénario apparaît dans la phase de surveillance non garantie du stockage.

Ce scénario cumule la perte de couverture et la construction d'une habitation directement sur les résidus.

Le groupe de référence est le même que dans le scénario « résidence sur stockage avec couverture ».

On considérera la construction d'une habitation à étage avec un sous-sol semi enterré (en pointillés sur la figure 6) et une dalle de béton éventuellement fissurée (en gris sur la figure) reposant sur les résidus.

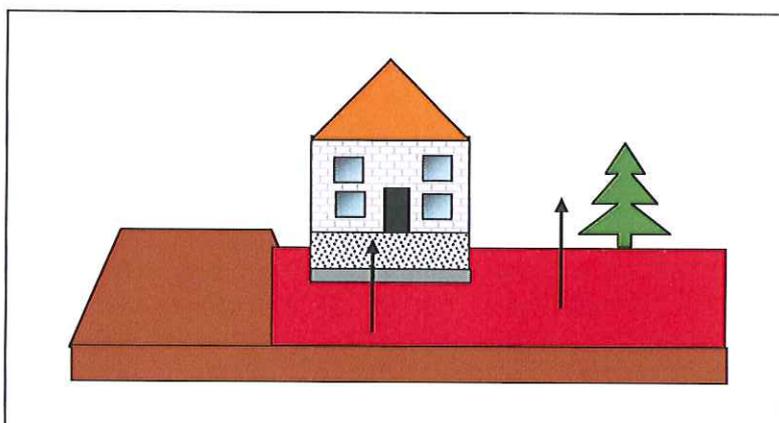


Figure 6 : Schéma de la résidence sur stockage sans couverture

Les expositions potentielles sont :

- A l'extérieur de la maison :
 - l'exposition interne par inhalation due au radon lors de la présence des habitants dans le jardin,
 - l'exposition interne par inhalation due aux poussières lors de la présence des habitants dans le jardin,
 - l'exposition externe due au site lors de la présence des habitants dans le jardin et sur le reste du site,
 - l'exposition externe liée à l'irrigation des jardins et potagers par de l'eau issue de l'aval du site,
 - l'ingestion de légumes cultivés dans les potagers sur le stockage et d'eau issue de l'aval du site.



SGN	Type Doc.	Activité	Cat. MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Remarque : On supposera que les concentrations en radionucléides contenus dans l'eau dans ce scénario sont les mêmes que celles considérées dans le scénario de référence en phase de surveillance non garantie. La dose externe due à l'irrigation du jardin est alors la même que dans le scénario de référence en phase de surveillance non garantie.

- A l'intérieur de la maison :
 - l'exposition interne par inhalation due au radon lors de la présence des habitants dans toutes les pièces de la maison,
 - l'exposition interne par inhalation due aux poussières lors de la présence des habitants dans toutes les pièces de la maison,
 - l'exposition externe de ces habitants lors de leur présence dans la maison.

Ce scénario est donc caractérisé par 8 voies d'exposition.

Remarque 1 : En termes d'exposition externe, à l'extérieur de la maison, les résultats sont présentés pour une surface de résidus nus et en prenant en compte la présence d'une épaisseur de 30 cm de terre végétale apportée pour la création d'un jardin potager ou d'agrément.

Remarque 2 : En termes d'exposition au radon à l'intérieur de la maison, la concentration volumique en radon, en régime permanent, sera déterminée dans la cave et appliquée de manière pénalisante à l'ensemble des pièces de la maison. Cette hypothèse est enveloppe dans le sens où il n'est pas considéré la présence d'ouvertures (de portes ou de fenêtres) dont l'utilisation diminue fortement les niveaux de concentrations de radon en intérieur. Des études de terrains ont ainsi permis de montrer que la concentration au rez de chaussée et aux étages étant nettement inférieures à celle mesurée dans le sous-sol des habitations [13].

Remarque 3 : La dalle de béton sera considérée avec fissures en étude de sensibilité.

3.3 SYNTHÈSE DES DOSES CALCULÉES PAR SCÉNARIO ET PAR PHASE DE SURVEILLANCE

Le tableau 1 récapitule les phases de surveillance rencontrées par scénario et leurs conséquences.

Scénarios	Phase de surveillance	Conséquences sur calcul
Référence	active	site fermé au public*
		entretien du site
		eau traitée
	passive	site fermé au public*
		site non entretenu
		eau non traitée
	non garantie	site ouvert au public
		base de loisirs
		promenade
site non entretenu		
eau non traitée		
Perte d'intégrité digue et couverture	passive	site fermé au public*
		site non entretenu
		eau non traitée
	non garantie	site ouvert au public
		base de loisirs
		promenade
Résidence sur stockage avec couverture	non garantie	site ouvert au public
		eau non traitée
Chantier de route sur stockage	non garantie	site ouvert au public
Jeux d'enfants	non garantie	site ouvert au public
Résidence sur stockage sans couverture	non garantie	site ouvert au public
		eau non traitée

Tableau 1 : Synthèse des phases de surveillances rencontrées par scénario

* Remarque : Certains sites sont actuellement accessibles au public, la promenade y sera donc considérée dès la phase de surveillance active.

- Le tableau 2 récapitule les doses qui sont calculées pour chaque scénario et quelle que soit la phase de surveillance rencontrée.

Scénarios	Doses calculées
Scénario de référence	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose externe (due à l'irrigation)
	Dose ingestion
Scénario altéré n°1 : Perte d'intégrité de la couverture et de la digue	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose externe (due à l'irrigation)
	Dose ingestion
	Dose inhalation due aux poussières
Scénario altéré n°2 : Résidence sur stockage avec couverture	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose externe (due à l'irrigation)
	Dose ingestion
Scénario altéré n°3 : Chantier de terrassement d'une route	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose inhalation due aux poussières
Scénario altéré n°4 : Jeux d'enfants sur un tas excavé par le chantier	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose ingestion (terre)
	Dose inhalation due aux poussières
Scénario altéré n°5 : Résidence sur stockage sans couverture	Dose externe (due au site)
	Dose inhalation due au radon
	Dose externe (due à l'irrigation)
	Dose ingestion
	Dose inhalation due aux poussières

Tableau 2 : Synthèse des doses calculées par scénario et par phase

Remarque : Pour les scénarios de résidence sur stockage, la « dose inhalation due au radon » comprend l'exposition au radon à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, de même pour la dose inhalation poussières.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

4 CODES DE CALCUL UTILISES

4.1 TERMES SOURCES

Pour évaluer la dose externe due au site, il est nécessaire de déterminer le spectre d'émission γ représentatif des résidus.

Pour cela, les codes d'évolution CESAR 4.38 [4], [5] et [6] et ORIGEN 2.0 [4] et [7], sont utilisés à partir de la concentration des différents radioéléments présents dans les résidus.

Les codes CESAR 4.38 et ORIGEN 2.0 sont décrits en Annexe 1.

4.2 EXPOSITION EXTERNE

Les débits d'équivalent de dose (DED) seront calculés à l'aide du code MERCURAD v1.05 [4] et [8] pour les groupes de référence sur le site comme les travailleurs ou les enfants.

Le code MERCURAD v1.05 est décrit en Annexe 1.

4.3 EXPOSITION INTERNE

4.3.1 Dose inhalation

Pour évaluer les doses inhalation (due au ^{222}Rn et aux poussières), un coefficient de transfert atmosphérique est calculé (voir CTA au § 5.2.4).

La dispersion atmosphérique est modélisée par le code de dispersion atmosphérique COTRAM 4 [4], [9] et [10] qui utilise le modèle de DOURY (voir Annexe 2) et qui est implémenté dans le code de calcul d'impact COMODORE 2.0 [4] et [11].

4.3.2 Dose ingestion

Dans le cas où un individu irrigue son potager avec de l'eau potentiellement marquée, on calculera le transfert de la contamination eau - plantes pour ensuite évaluer la dose ingestion à l'aide du code de calcul d'impact COMODORE 2.0 [11]. Ceci sera effectué pour tous les scénarios quelque soit la phase de surveillance.

5 MODELISATIONS ET METHODES DE CALCUL DE DOSES

5.1 ANALYSE DE L'EQUILIBRE DE LA CHAINE DE DECROISSANCE DE L'²³⁸U

La chaîne de décroissance de l'²³⁸U est présentée sur la figure suivante.

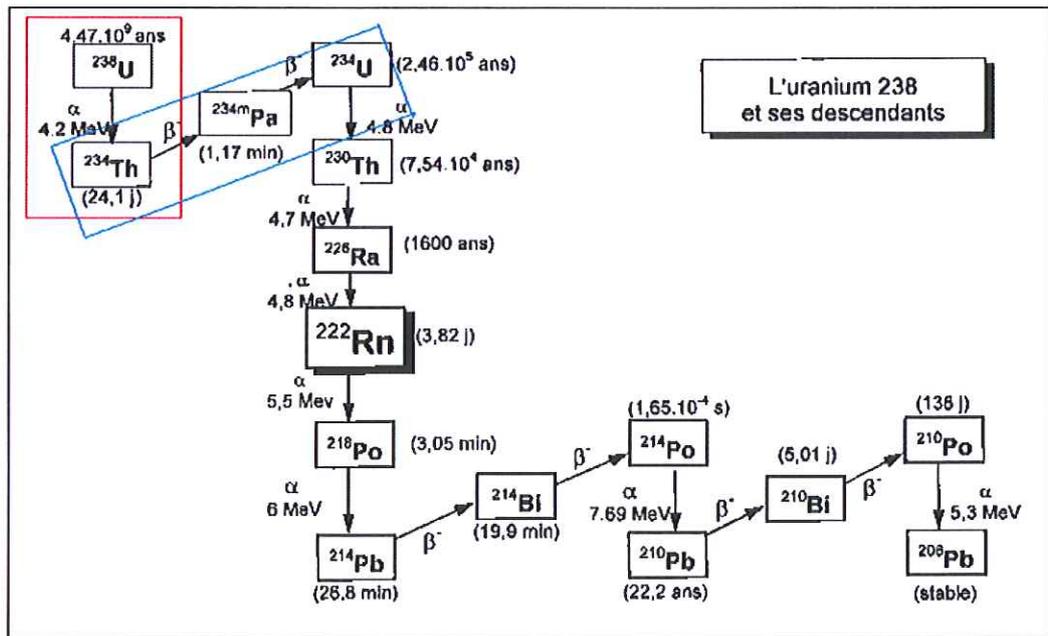


Figure 7 : Chaîne de décroissance de l'²³⁸U

L'uranium naturel extrait est composé à 99,27 % d'²³⁸U, 0,72 % d'²³⁵U et 0,01% d'²³⁴U (en masse).

La chaîne de l'²³⁸U est à l'équilibre séculaire avant l'extraction de l'uranium.

Après extraction de l'uranium, l'équilibre de la chaîne de désintégration est rompu.

L'efficacité du procédé d'extraction étant supposée la même pour tous les isotopes de l'uranium, l'activité résiduelle de l'²³⁸U et de l'²³⁴U reste la même.

Le ²³⁴Th se désintègre au fil du temps pour générer de l'²³⁴U. Cependant le nombre d'atomes générés induit une activité très faible d'²³⁴U du fait de la période de ce dernier.

Du fait de sa courte période, le ²³⁴Th et ses descendants à vie courte sont rapidement à l'équilibre avec l'²³⁸U.

Au final, il peut donc être considéré l'équilibre entre l'²³⁸U et ses descendants jusqu'à l'²³⁴U pour les résidus.

La descendance de l'²³⁴U reste quant à elle à l'équilibre. En effet, elle n'est pas touchée par la rupture d'équilibre générée par l'extraction de l'uranium, grâce à la période du ²³⁰Th.

5.2 L'EXPOSITION EXTERNE

La principale source de l'exposition externe est le stockage lui-même.
Le dépôt au sol induit par l'irrigation constitue aussi une exposition externe.

5.2.1 Exposition externe due au stockage induite aux groupes de référence hors du site

5.2.1.1 *Scenario de référence (avec digue)*

Le stockage de résidus sera modélisé éventuellement par un parallélépipède rectangle. Celui-ci sera recouvert d'une couche de stériles miniers et éventuellement d'une couche de terre, l'ensemble modélisant la couverture. La digue sera modélisée par un volume de stériles.

La digue et la couverture atténuent efficacement l'irradiation induite par les résidus. Ce phénomène est illustré par la figure 8 [22] qui donne l'atténuation du flux γ pour une épaisseur variable de terre ou de béton.

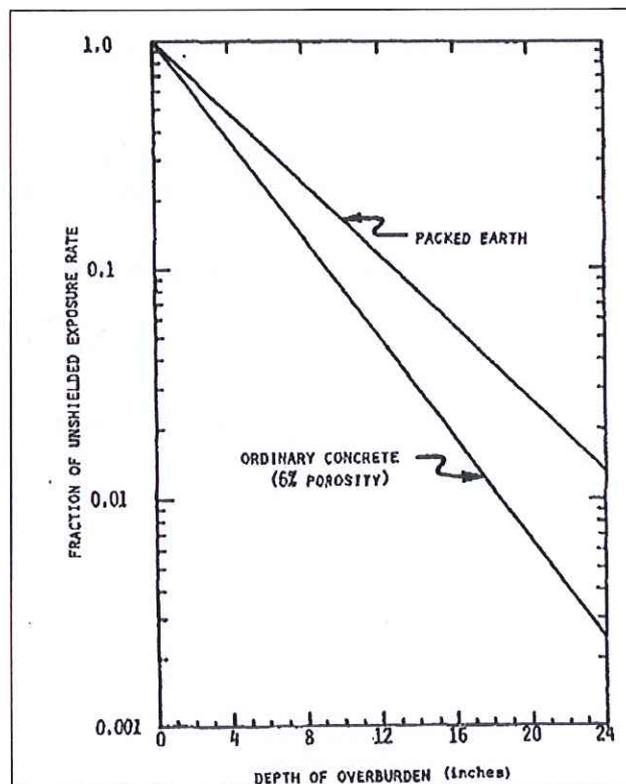


Figure 8 : Proportion de flux de γ traversant une épaisseur de terre ou de béton [22]

Néanmoins, la digue et la couverture étant composées de stériles miniers, elles génèrent une exposition externe.

SGN	Type Doc. Activité Cat.MT N° Ordre Révision	REF
	NT 100350 00 0001 C	
CLIENT		

Cette exposition est calculée à partir de l'angle solide (la digue perçue par un point de calcul), de la manière suivante :

$$D_{ext_site} = T_{expo} \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot e^{-\mu_{air}d} \cdot \sum_i (FCD_{dépôt_infini}(i) \cdot C_i) \quad (6)$$

Avec :

- T_{expo} : Temps d'exposition (s)
- Ω : angle solide de la digue perçue par le point de calcul (stéradians)
- μ_{air} : coefficient d'atténuation de l'air pour l'énergie de rayonnement (cm^{-1})
- d : la distance de la source d'émission au point de calcul (cm)
- $FCD_{dépôt_infini}(i)$: Coefficient de dose externe pour un dépôt infini du radioélément i ($Sv/s \cdot Bq/m^3$)
- C_i : Activité volumique du radioélément i dans les stériles (Bq/m^3)

Remarque 1 : la source maximale que peut représenter la digue est égale à 2π , d'où le coefficient $\Omega/2\pi$.

Remarque 2 : Le coefficient d'atténuation de l'air pour l'énergie de rayonnement, μ_{air} , est calculé à partir de la courbe du § 6.4.5.1, extraite du document [36].

Pour rappel, l'angle solide se calcule comme suit :

$$\Omega = \iint \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (7)$$

Avec θ l'angle parcouru dans le plan (XY) et φ l'angle dans le plan (XZ), comme le montre la figure suivante.

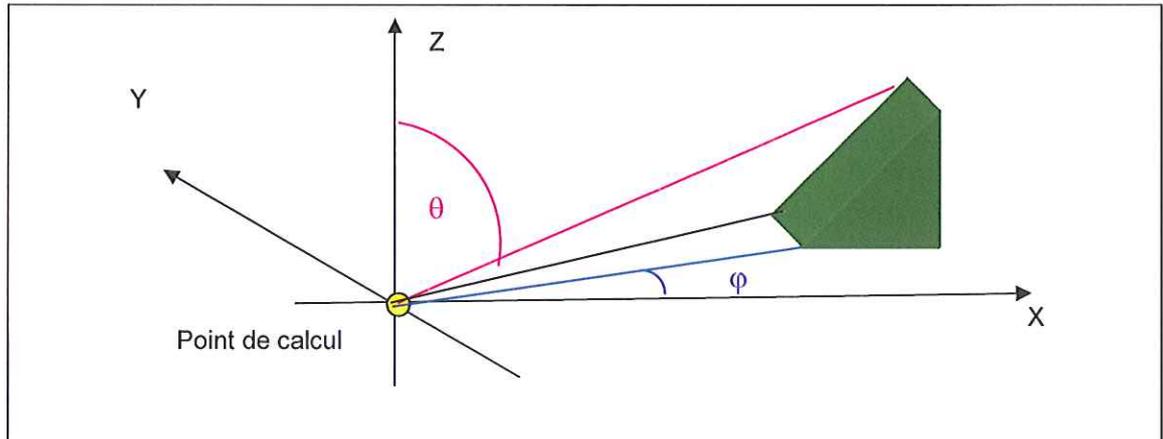


Figure 9 : Schéma permettant le calcul de l'angle solide

De manière enveloppe, les points d'observation seront considérés à mi-hauteur de la digue.

5.2.1.2 *Scenario de perte d'intégrité de la digue et perte de couverture*

Dans le cas de la perte d'intégrité de la couverture et d'une partie de la digue, on considèrera la disparition de la couverture et une ouverture dans la digue comme le montre la figure 10 suivante, car la stabilité des digues est démontrée dans [35].

L'exposition totale est en première approximation la somme de l'irradiation directe de l'ouverture de la digue sur les résidus et l'irradiation due aux stériles miniers constituant la digue calculée précédemment.

Les doses externes induites par les résidus sont calculées de la même manière qu'au paragraphe précédent mais en utilisant l'activité des résidus et l'angle solide associé à l'ouverture dans la digue.

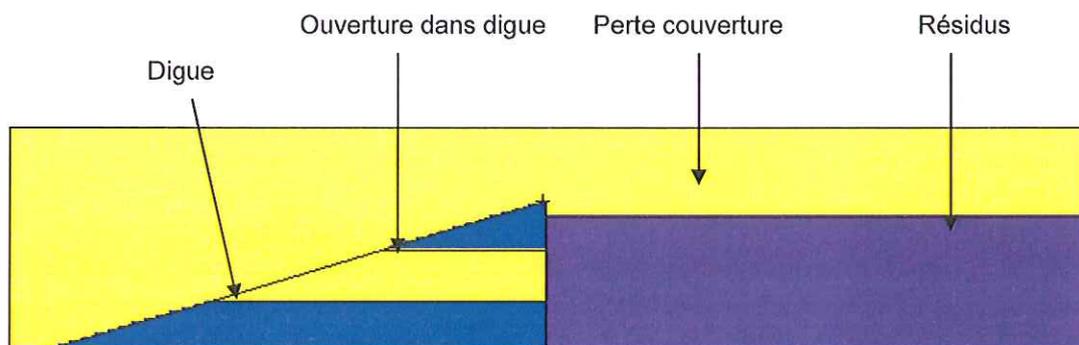


Figure 10 : Modélisation du site dans le cas du scénario perte d'intégrité de la digue et de la couverture

Remarque : Par défaut, une section de 200 m² [14] est retenue.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

5.2.2 Exposition externe due au stockage induite aux groupes de référence sur site

5.2.2.1 Cas de la promenade et de la base de loisirs sur stockage

Tant que la couverture est présente, les promeneurs ainsi que les personnes étant dans la base de loisirs sont exposés à la couverture de stériles.

Si l'épaisseur de stériles est supérieure à 50 cm, cette source d'exposition est modélisée par un massif semi-infini constitué de stériles. Sinon, la source considérée est un massif semi-infini constitué de résidus atténué par un coefficient propre au site, ou non atténué pour les cas sans couverture.

5.2.2.2 Cas de la résidence sur stockage

Dans le cas du scénario résidence sur stockage, une cave enterrée d'une hauteur de 2 m est considérée, comme le montre le schéma suivant.

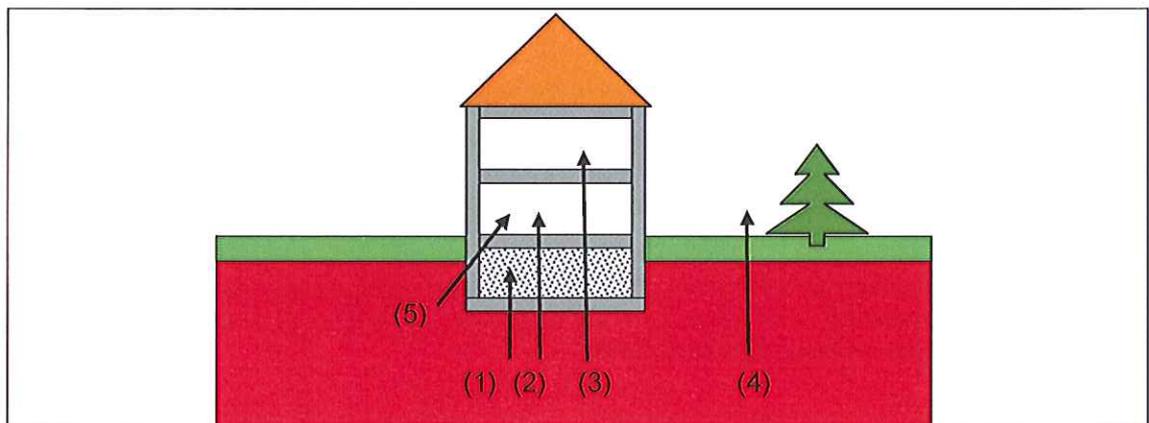


Figure 11 : Exposition externe induite par les résidus dans le cas du scénario de résidence sur stockage

Les doses dans la cave, au rez-de-chaussée, à l'étage ainsi qu'à l'extérieur (respectivement numérotées de (1) à (5) sur le schéma) se calculent en prenant en compte les angles solides à partir desquels la source est vue.

Les effets de la couverture, des murs et de la présence éventuelle d'une dalle sont pris en compte.

Ainsi, la dose induite par les fractions de source vues directement est ajoutée à celle atténuée par une ou plusieurs épaisseurs de béton ou par la couverture.

Remarque : D'après la figure 8, la traversée d'une dalle ou d'un mur de béton (de 10 cm = 4 inches), atténué par 2 le flux de γ entrant.

Néanmoins, deux cas se présentent alors, selon que l'épaisseur de la couverture (en vert sur la figure) est supérieure à 2 m ou non.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- Epaisseur de couverture > 2 m

La cave est supposée surplomber un massif semi-infini (MSI) de stériles.
La dose externe est alors proportionnelle à l'activité des stériles.

- Epaisseur de couverture < 2 m

La cave est supposée surplomber un MSI de résidus.
La dose externe est alors proportionnelle à l'activité des résidus.

Remarque 1 : A l'extérieur de la résidence, la dose externe est évaluée sur le jardin d'agrément ou le potager, où l'on considère une couche de 30 cm de terre. Cette couche de terre atténue d'environ 14 % le flux de gamma émis par les couches inférieures (voir figure 8).

Remarque 2 : L'angle solide à l'intérieur de la maison est calculé pour un point au centre de la maison à 1 m du sol (de la cave, du RDC ou du 1^{er} étage). Les éventuels biais sont négligés en termes de protection, c'est-à-dire que l'épaisseur des murs et des dalles sont mesurées au droit de celles-ci.

5.2.2.3 Exposition externe due à la construction de la route sur les résidus

L'exposition externe due à la construction de la route sur les résidus s'évalue à partir du DED et du temps d'exposition, selon :

$$D_{ext} = \int DED_{ext} . dt \quad (8)$$

Où DED_{ext} est le débit d'équivalent de dose γ mesuré ou calculé sur les zones de présence des individus étudiés (Sv/h).

Comme l'indique la doctrine [1], dans le cas de ce scénario, la couverture est absente. Ainsi, la route est modélisée par une mise au jour des résidus sur une surface rectangulaire (10 m x 5 m).

Le DED est calculé au centre de la route et à 1 m de hauteur, soit à 1 m des résidus.

5.2.2.4 Exposition externe due à un tas de résidus excavés

Dans le cas du scénario « jeux d'enfants », on considère que le sol excavé par le chantier routier est simplement déversé sous forme de tas sur le site et que les enfants viennent y jouer.

Le tas de résidus est modélisé par un cône tronqué de 300 cm de diamètre inférieur et 100 cm de diamètre supérieur et d'une hauteur de 150 cm.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

L'exposition externe due à la construction de la route sur les résidus s'évalue à partir du DED et du temps d'exposition.

Le DED est calculé au sommet et sur le côté du tas, comme l'indique la figure ci-dessous. La moyenne de ces DED est calculée de manière à obtenir un « DED jeux » plus réaliste.

La figure 12 présente le modèle pour un tas de résidus avec le point de calcul.

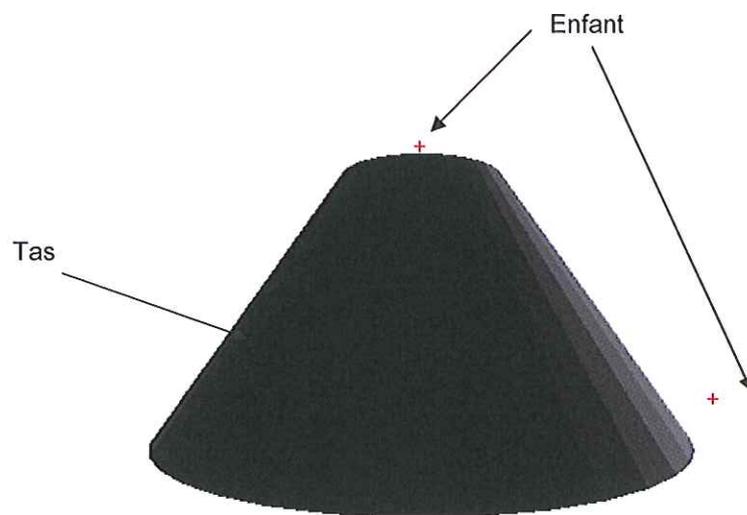


Figure 12 : Modélisation d'un tas

5.2.3 Exposition externe induite par le dépôt consécutif à l'irrigation

Lors de l'irrigation de jardins et de potagers se forme un dépôt au sol susceptible d'induire une dose externe.

Cette dose externe par radionucléide correspond au produit de l'activité surfacique maximum intégrée sur 1 an par le Facteur de Conversion en Dose externe dépôt du radionucléide i :

$$D_{\text{ext dépôt}}(i) = \int_0^{1 \text{ an}} D_{\text{max}} \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot FCD_{\text{ext dépôt}}(i) \cdot dt \quad (9)$$

$$D_{\text{ext dépôt}}(i) = D_{\text{max}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_i \cdot 365,25}}{\lambda_i} \right) \cdot FCD_{\text{ext dépôt}}(i) \quad (10)$$

Avec :



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Page : 33 / 109

- $D_{\text{ext dépôt}}$: Dose efficace engagée sur 1 an due à l'exposition externe aux dépôts consécutifs à un rejet (Sv) ;
- $D_{\text{ext dépôt (i)}}$: Dose efficace engagée sur 1 an due à l'exposition externe au dépôt du radionucléide i consécutif à un rejet (Sv) ;
- D_{max} : Activité surfacique maximum déposée du radionucléide i au point d'observation (Bq.m^{-2}) ;
- λ_i : Constante de décroissance radioactive du radionucléide i (j^{-1}) ;
- $\text{FCD}_{\text{ext dépôt (i)}}$: Facteur de Conversion en Dose par exposition externe au dépôt du radionucléide i ($\text{Sv.Bq}^{-1}/\text{s.m}^{-2}$).

Remarque : L'impact de cette irradiation à l'intérieur des habitations est négligé.

L'impact de l'accumulation du dépôt est calculé pour 1 an en phases de surveillance active et passive et de manière asymptotique en phase de surveillance non garantie.

5.3 L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DU RADON

Le radon 222 est formé par la désintégration des atomes de radium 226 (figure 13).

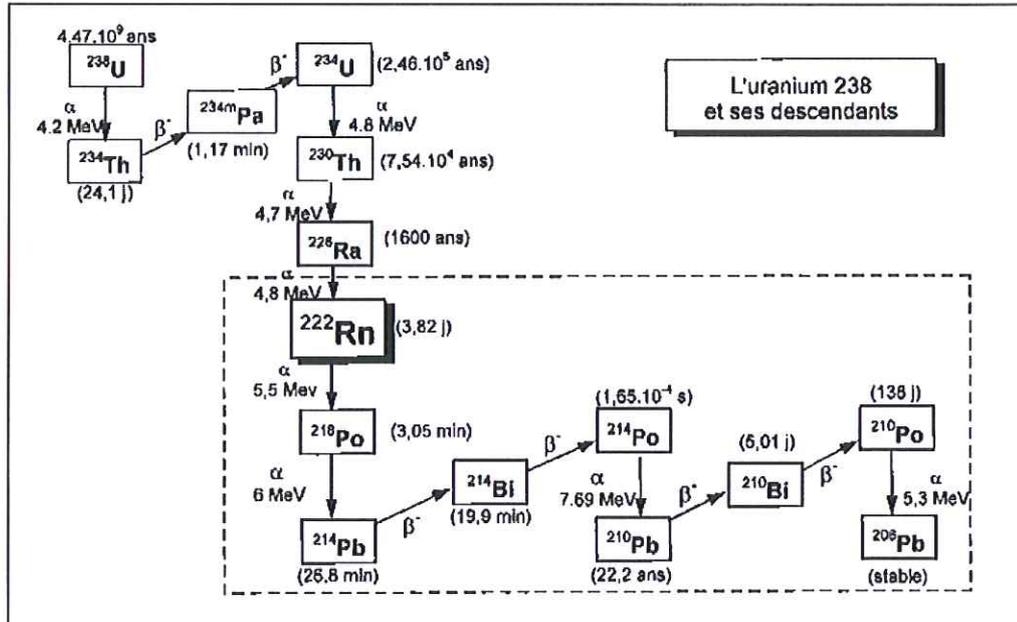


Figure 13 : Chaîne de ^{238}U et du ^{226}Ra

Dans les sols, une fois formé, le gaz ^{222}Rn migre vers la surface (exhalation). Cette migration dépend des caractéristiques géologiques et géotechniques du sol.

Le risque sanitaire du radon 222 n'est pas lié au gaz lui-même mais à ses produits de filiation. Le radon 222 se désintègre pour donner successivement des atomes de polonium 218, de plomb 214, de bismuth 214 et de polonium 214.

Le descendant suivant, le plomb 210, a une période beaucoup plus longue (22 ans) et peut alors être considéré comme stable vis à vis de ses précurseurs.

Le rayonnement alpha du ^{214}Po , du fait de sa très courte période ($1,6 \cdot 10^{-4}$ s), se comptabilise en pratique sur le ^{214}Bi .

Radionucléide	Période		Constante radioactive	
		Unité		Unité
Rn222	3,82	j	$2,10 \cdot 10^{-6}$	s^{-1}
Po218	2,11	mn	$5,47 \cdot 10^{-3}$	s^{-1}
Bi214	19,86	mn	$5,82 \cdot 10^{-4}$	s^{-1}
Pb214	26,75	mn	$4,32 \cdot 10^{-4}$	s^{-1}

Tableau 3 : Période et constante radioactive des descendants du radon 222

Ainsi, les risques induits par l'inhalation du ^{222}Rn sont essentiellement liés à l'énergie totale libérée par ses descendants à vie courte ^{218}Po , ^{214}Pb et ^{214}Bi .

De ce fait, le document [1] préconise de calculer la dose due à l'inhalation des descendants à vie courte du ^{222}Rn à partir des valeurs des concentrations volumiques en énergie alpha potentielle (EAP) des descendants à vie courte du ^{222}Rn dans l'air respiré par les individus des groupes de population étudiés.

De manière à appréhender l'impact du site, il est nécessaire de connaître l'EAP. Celle-ci est généralement mesurée sur le site mais elle intègre le bruit de fond, c'est pourquoi il est nécessaire de calculer l'EAP induite par le site.

La dose inhalation due au radon se déduit de la manière suivante :

$$D_{inh} = T_{expo} \cdot (K_{Rn222} \cdot EAP_v) \quad (11)$$

Où

T_{expo}	Temps d'exposition de la personne	(h)
K_{Rn222}	Coefficient de conversion du ^{222}Rn issu de la CIPR 65 [12]	Sv / (J.h.m ⁻³)
EAP_v	Energie alpha potentielle due au ^{222}Rn volumique	(J/m ³)

Remarque : Le coefficient K_{Rn222} adulte est donné dans [12] et [28] en atmosphère intérieure pour le public et le travailleur. On supposera que ces coefficients peuvent s'appliquer à l'extérieur. Pour l'enfant, le coefficient de l'adulte (non travailleur) sera utilisé (voir § 6.5.4).

D'après les documents [13] et [14], le calcul de l'EAP s'effectue à partir de la concentration volumique de ^{222}Rn dans l'air, elle-même calculée à partir de la dispersion atmosphérique du flux d'émission de ^{222}Rn à la surface du sol.

Pour un sol donné, le flux de radon libéré est directement proportionnel à la concentration en ^{226}Ra dans le sol et également fonction de l'épaisseur de la couche de résidus.

5.3.1 Calcul de l'énergie alpha potentielle volumique de l'air (EAP_v)

L'EAP est déterminée par l'équation suivante :

$$EAP_v = F \cdot EAP_{équilibre} \cdot C_{Rn222} \quad (12)$$

Avec :

F	Facteur d'équilibre	-
$EAP_{équilibre}$	Énergie alpha potentielle du ^{222}Rn (en équilibre avec ses descendants)	$5.54 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$ pour 1 Bq/m^3 de ^{222}Rn [13]

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

C_{Rn222} Concentration du ^{222}Rn dans l'air Bq/m^3

Le calcul de l'EAP impose donc la détermination de la concentration en ^{222}Rn et du facteur d'équilibre.

5.3.2 Facteurs d'équilibre

Dans l'atmosphère, en fonction du temps de transfert ou du temps écoulé depuis son émission, le ^{222}Rn émis ne peut être en équilibre avec ses descendants. L'atteinte de l'équilibre nécessite au minimum 5 périodes du père.

Le facteur d'équilibre se définit comme le rapport de l'énergie alpha potentielle au point considéré sur l'énergie alpha potentielle qu'aurait eu le ^{222}Rn et ses fils à vie courte s'ils étaient à l'équilibre.

Ainsi, à un facteur d'équilibre faible correspond un radon fraîchement émis avec peu de descendants formés et dont l'effet sanitaire sera faible en relatif.

En outre, il existe une différence de facteur d'équilibre entre l'extérieur et l'intérieur des habitations à mettre principalement à l'actif du dépôt sur les parois.

5.3.2.1 A l'extérieur

A l'extérieur, le facteur d'équilibre du bruit de fond est élevé car les contributions sont d'origine régionale. Le facteur d'équilibre n'atteint cependant pas l'unité (du moins à hauteur d'homme) du fait du dépôt au sol.

En extérieur, en incluant donc le bruit de fond, les données bibliographiques disponibles sont :

- les travaux de Reineking et Porstendörfer [15] mesurent un F d'une valeur moyenne de 0,67 ;
- Porstendörfer [16] donne un facteur d'équilibre moyen de 0,6 pour des valeurs variant de 0,4 à 0,8 à une hauteur de 1,5 m ;
- Kojima [17] mesure un facteur d'équilibre de l'ordre de 0,4 à 0,5 le jour atteignant 0,5 à 0,6 la nuit. Il observe aussi un écart entre les saisons : 0,45 à 0,5 pour la saison printemps/ été et 0,5 à 0,6 l'automne/ hiver, la valeur moyenne se situant aux alentours de 0,5 ;
- Keller et al.[18] mesurent un taux moyen F de 0,4 ;
- Bernhard et al. [19] mesurent un facteur d'équilibre annuel moyen de 0,5 (sur 13 stations dont les moyennes annuelles individuelles varient de 0,4 à 0,64).

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

En résumé, si l'UNSCEAR donne dans [20] une valeur moyenne de l'ordre de 0,7 de plus récents résultats semblent indiquer qu'une moyenne de 0,5 à 0,6 semble plus réaliste.

5.3.2.2 A l'intérieur

A l'intérieur, le facteur d'équilibre est plus faible qu'à l'extérieur du fait du dépôt plus important sur les parois même en cas d'accumulation (faible taux de renouvellement de l'air).

Dans les habitations, le document [21] précise que ce facteur varie de 0,3 à 0,6 et recommande en absence de valeur exacte, la valeur de 0,4. Celle-ci est également recommandée par la CIPR 65 [12].

Dans les habitations, le temps de résidence de l'air y étant beaucoup plus long qu'à l'extérieur, on retiendra un facteur d'équilibre de 0,4 [12] (cette valeur est également retenue dans les documents [13])

Remarque : Dans le cas de la résidence sur stockage, une exposition au ^{222}Rn dans la cave (ou sous-sol) et dans les autres pièces est considérée.

La dose inhalation à l'intérieur de la résidence est donc de la forme suivante :

$$D_{inh_Rn_tot} = K_{Rn222} \cdot \sum_s EAP_{int_s} \cdot T_{expo_s} \quad (13)$$

Où

K_{Rn222}	Coefficient de conversion du ^{222}Rn issu de la CIPR 65 [12]	$\text{Sv} / (\text{J.h.m}^{-3})$
T_{expo_s}	Temps d'exposition de la personne dans la salle s	(h)
EAP_{int_s}	Energie alpha potentielle due au ^{222}Rn volumique à l'intérieur de la salle s	(J/m^3)

Comme l'indique le § 5.3.1, l'EAP est proportionnelle à la concentration de Rn. L'activité volumique du ^{222}Rn au rez-de-chaussée ainsi qu'au premier étage sont proportionnelles à l'activité volumique du ^{222}Rn dans la cave.

L'activité volumique du ^{222}Rn dans la cave, nécessaire pour le calcul de l'EAP dans la cave, évolue selon :

$$\frac{d}{dt} C_{Rn222}(t) = C_{Rn222}(t=0) - (\lambda + T) \cdot C_{Rn222}(t) \quad (14)$$

Avec :

λ : constante de décroissance radioactive du ^{222}Rn (s^{-1})

T : Taux de renouvellement de l'air (s^{-1})

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

h : la hauteur de la cave ou du sous-sol (m)

ϕ : flux d'émanation du ^{222}Rn (Bq/ m²/ s)

Dont la solution est :

$$C_{\text{Rn}222}(t) = \frac{\phi}{h \cdot (\lambda + T)} \cdot (1 - e^{-(\lambda + T) \cdot t}) \quad (15)$$

5.3.2.3 Sur site

En ce qui concerne le radon en provenance des sites de stockage, le document [22] indique que le facteur d'équilibre du radon dans le voisinage immédiat du tas de résidus dépasse rarement 0,1.

On retrouve ce résultat par un calcul simple : avec un vent de 1 m.s⁻¹, le temps de transfert sur une distance de 500 m est de 500 s. Sur un tel laps de temps, on obtient un facteur d'équilibre très largement inférieur à 0,1.

Cependant, de manière conservatrice, le facteur d'équilibre au niveau des groupes de référence est fixé à 0,1.

5.3.2.4 Synthèse et choix des facteurs d'équilibre

En définitive, on retiendra un facteur d'équilibre de :

- 0,1 sur le site (enveloppe) ;
- 0,5 en extérieur pour les groupes de références hors site (moyen) ;
- 0,4 en intérieur (moyen).

Remarque : L'influence du facteur d'équilibre en extérieur pour les groupes de référence hors site sera étudiée dans l'étude de sensibilité (§ 7).

5.3.3 Calcul de la concentration en radon dans l'air

D'après le §5.3.1, la détermination de la concentration en ^{222}Rn est indispensable au calcul de l'EAP à l'extérieur.

La concentration de ^{222}Rn dans l'air est déterminée à partir du flux de radon émis.

5.3.3.1 Estimation du flux de ^{222}Rn exhalé par le sol

Le flux de ^{222}Rn provient des résidus et des stériles (qui constituent la couverture et la digue). L'impact des deux flux est évalué.

Le document [13] préconise d'utiliser la formule suivante pour l'estimation du flux de radon à la surface des résidus. Chaque flux – issu des résidus ou de la couverture – est estimé à partir de cette formule :

$$F_R = C_R E_R \rho_R \sqrt{\lambda D_R} \quad (16)$$

Avec :

F_R	Flux de radon à la surface des résidus ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
C_R	Concentration de radon dans les résidus (Bq.kg^{-1})
E_R	Facteur d'émanation du radon pour les résidus (-)
ρ_R	Masse volumique des résidus (kg.m^{-3})
λ	Constante de décroissance radioactive du radon (s^{-1})
D_R	Coefficient de diffusion à travers les résidus ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

De manière pénalisante, la concentration de ^{222}Rn dans les résidus est prise à l'équilibre avec celle du ^{226}Ra .

5.3.3.2 Atténuation du flux de radon

Une fois émis, le flux de ^{222}Rn est atténué par la couverture qui constitue un dispositif de protection radiologique, mécanique et d'intégration paysagère mis en place lors du réaménagement du site (figure 14).

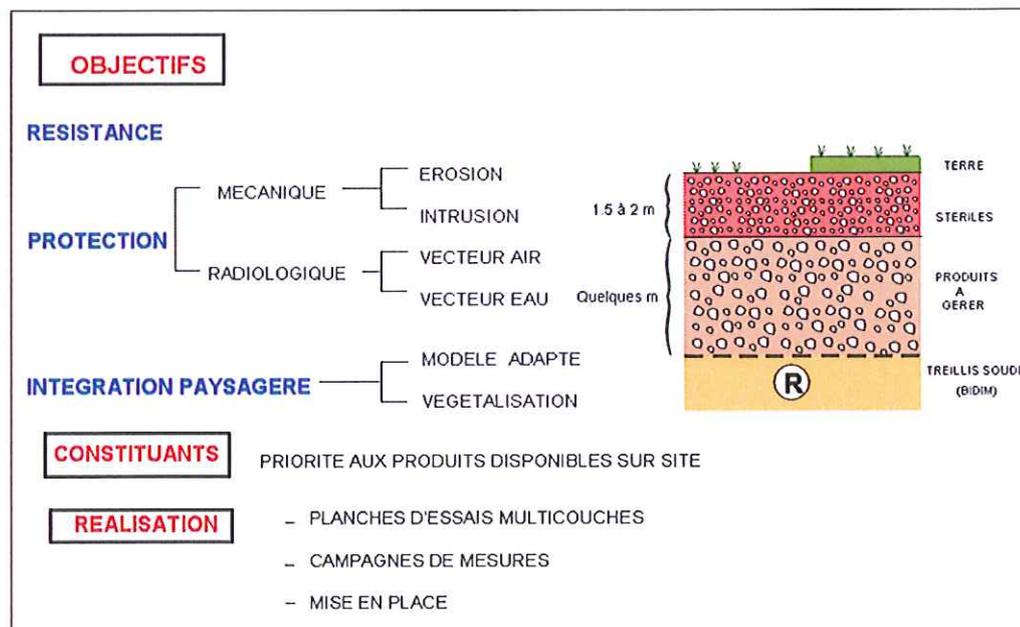


Figure 14 : Composition de la couverture des stockages

La couverture peut être constituée de différents matériaux (terre, stériles, béton) suivant la configuration du stockage ou le scénario (le scénario « résidence sur stockage » a pour écran de protection une dalle de béton).

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Cas de la couverture

Le document [13] préconise d'utiliser la formule suivante pour l'estimation du flux de radon à la surface d'une couverture :

$$F_C = F_R \cdot e^{-\left[\sqrt{\frac{\lambda}{D_C}} X_C\right]} \quad (17)$$

Avec :

F_C	Flux de radon à la surface de la couverture ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
F_R	Flux de radon à la surface des résidus ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
λ	Constante de décroissance radioactive du radon (s^{-1})
D_C	Coefficient de diffusion à travers la couverture ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
X_C	Epaisseur de la couverture (m)

Cas du béton (scénario résidence sur stockage)

Les études montrent que le radon diffuse très peu dans le béton. Le document [22] présente le résultat d'études d'émanation de radon après traversée d'une plaque de béton d'épaisseur variable (figure 15).

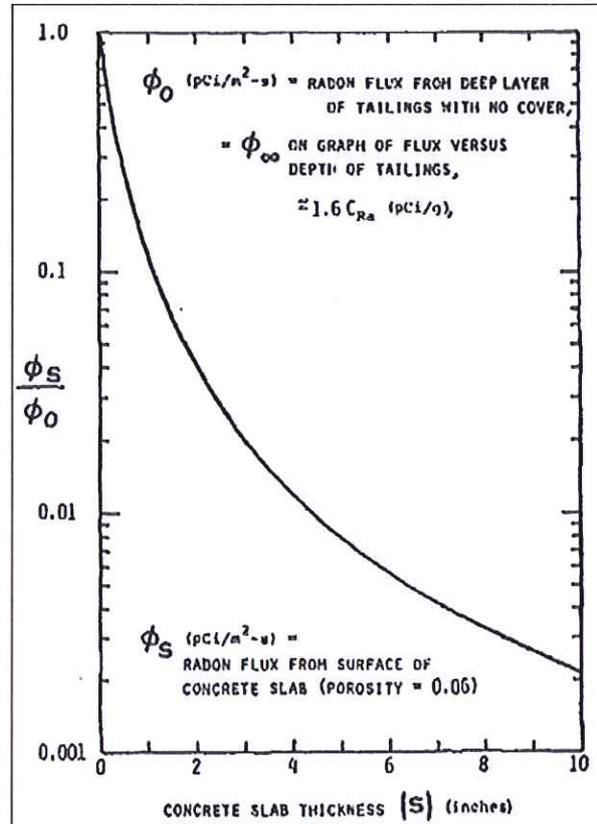


Figure 15 : Fraction du flux de ^{222}Rn émanant à travers une épaisseur de béton

On considérera ici le cas d'une résidence avec une dalle de 10 cm, ce qui semble assez réaliste.

Un flux relatif de ^{222}Rn sortant de la dalle de 1,2 % du flux initial (dalle de 10 cm de béton) sera considéré.

Cas de la dalle fissurée

Le cas d'une résidence avec une dalle de béton fissurée sera étudié en étude de sensibilité.

Le flux de radon au travers d'une surface quelconque est proportionnel au coefficient de diffusion par le biais du gradient de concentration mesurés dans les sols. Le coefficient de diffusion effectif est utilisé dans la littérature pour décrire le transfert du radon dans les milieux poreux.

Les valeurs ou plages de variation du coefficient de diffusion effectif dans le béton intact (ou récemment coulé) disponibles dans la littérature [37], [38], [39] sont données dans le tableau suivant.

Valeurs ou plages de variation du coefficient de diffusion effectif du radon dans le béton récent (en $10^{-4} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$)	Source
1,69 – 3,08	Culot et al. [37]
0,23 – 0,37	Leung et al. [37]
0,46 – 1,8	Rogers et al. [37]
1,84 – 3,83	Snoddy et al. [37]
4,38 – 14,7	Renken et al. [37]
2,06 – 3,93	Maas et al. [37]
0,97 -1,22	Daoud et al. [37]
3,4	Zapalac et al. [39]
2,1 – 52	Rogers et al. [38]
3,3	Stranden et al. [39]
0,8 – 8,4	
8 – 30	

Tableau 4 : Valeurs et plages de variation du coefficient D_{eff} du radon à travers le béton

La moyenne des mesures précédentes est de $6,5.10^{-4} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$.

L'influence de fissures présentes dans le béton a été investiguée par Daoud et al. [37] qui ont mené une série d'expériences en générant artificiellement des fissures (de 1,3 mm d'épaisseur et de profondeur équivalente à celles considérées dans ce document) sur toute la largeur d'échantillons de béton, dont le processus de coulage est conforme aux spécifications ASTM (American Society for Testing Materials). Les résultats montrent un coefficient de diffusion effectif moyen de $1,08.10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ce qui induit un taux de transfert moyen de 1,67 fois supérieur à celui obtenu pour une dalle intacte.

Cette valeur est en cohérence avec les mesures réalisées par Rogers et al. [38] dans des constructions résidentielles présentant une dalle de béton et datant de 12 à 45 ans. Ces mesures permettent d'appréhender l'effet du vieillissement du béton sur l'émanation du radon.

Le coefficient de diffusion mesuré variait de $1,5.10^{-4} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ à $5,5.10^{-4} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$. Les auteurs précisent que ces valeurs sont en moyenne 1,6 fois supérieures aux mesures réalisées en Floride sur des bétons résidentiels neufs.

De manière pénalisante, pour l'étude de sensibilité, **le facteur de 1,67 est retenu.**

Ce coefficient sera appliqué à la dose inhalation à l'intérieur de la résidence sur stockage (avec et sans couverture) ainsi que dans les bureaux et écoles sur site (avec et sans couverture).

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

5.3.3.3 Coefficient de Transfert Atmosphérique

La source étant quantifiée, la concentration en ^{222}Rn au point de calcul est déterminée à l'aide d'un modèle de dispersion atmosphérique.

Le Coefficient de Transfert Atmosphérique (CTA exprimé en s.m^{-3}) caractérise la dispersion. Il correspond à une fonction de transfert entre l'activité rejetée et l'activité volumique au point de calcul.

Ce CTA est défini comme le rapport de la concentration intégrée sur le temps de passage sur l'intégrale de la fonction source ou quantité totale émise pendant le même temps.

Cette définition se traduit par l'égalité suivante :

$$\text{CTA} = \frac{\int \chi \cdot dt}{\int Q \cdot dt} \quad (18)$$

Avec :

- $\chi(x,y,z,t)$: concentration du polluant dans la bouffée au point (x,y,z) à l'instant t (Bq.m^{-3}),
- Q : quantité de polluant relarguée (Bq),

$\chi(x,y,z,t)$ est solution de l'équation de diffusion turbulente par les modèles gaussiens (Doury et Pasquill) décrits en Annexe 2.

Si le flux de radon est modélisé par une succession de bouffées, le CTA s'écrit alors comme le rapport de l'activité volumique intégrée en un point (Bq.s.m^{-3}) sur la quantité totale relarguée (Bq) :

$$\text{CTA} = \frac{AVI}{Q} \quad (19)$$

Modélisation sur site

Au dessus du site, la concentration est calculée en considérant la dilatation d'une succession de bouffées émises tout au long de la surface amont en fonction du temps de transfert.

La figure 16 montre la dilatation d'une bouffée émise au point A en fonction du temps de transfert.

Remarque : En fonction de leur domaine de validité, le modèle de Pasquill sera utilisé pour quantifier la dispersion pour des distances inférieures à 500 m et celui de Doury pour des distances supérieures à 500 m.

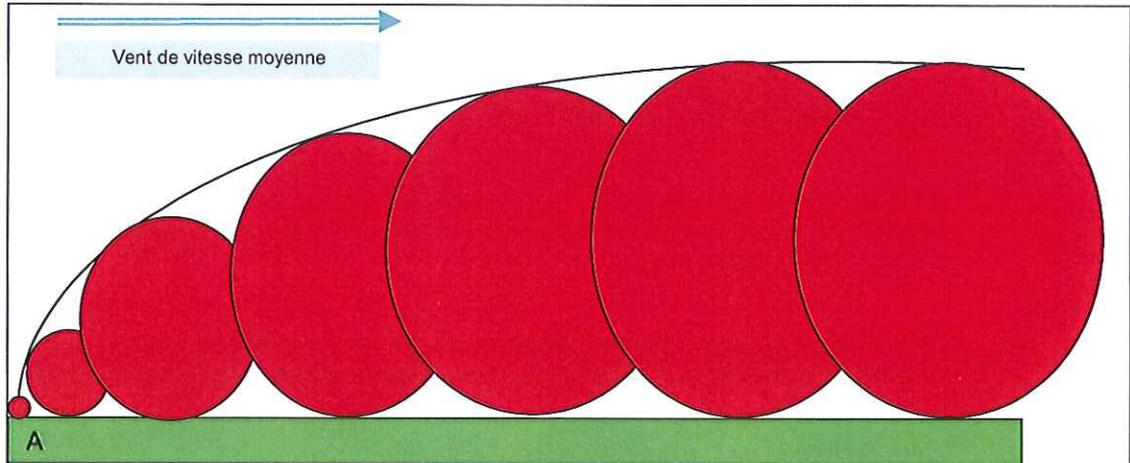


Figure 16 : Dilatation d'une bouffée sur le site

De manière pénalisante, le calcul sera réalisé en bordure de site (en aval par rapport à la direction du vent) car il correspond à la zone du site la plus exposée.

En effet, selon l'axe du vent, le stockage est donc modélisé comme une succession de sources ponctuelles (une par m^2) émettant une bouffée de radon par seconde, au rythme du flux d'émanation ($Bq.m^{-2}.s^{-1}$), comme le montre la figure 17.

La concentration au bord du site, en aval du vent, correspond alors à la somme des bouffées émises.

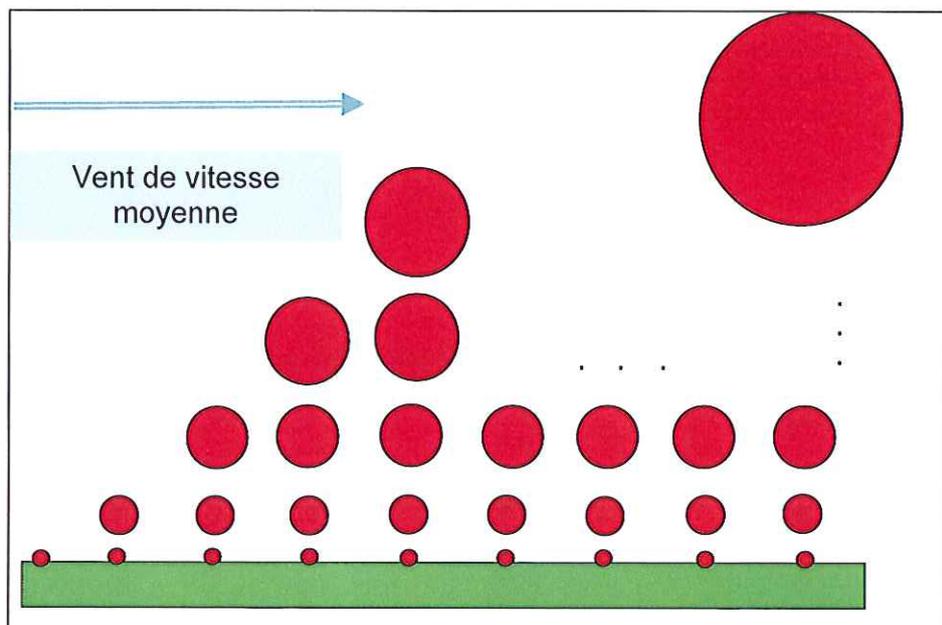
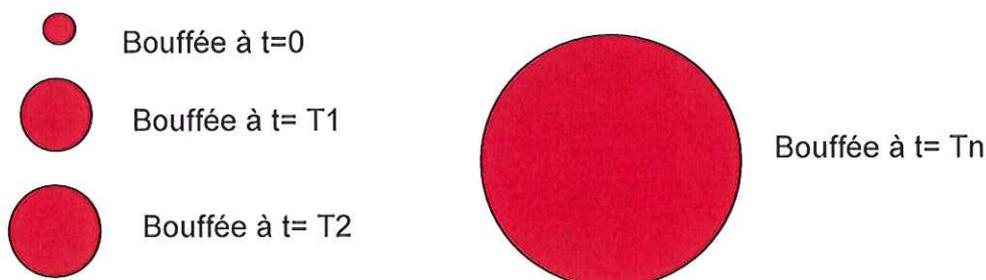


Figure 17 : Schéma des émissions successives de bouffées sur le site

Avec



Cette succession de bouffées est réalisée selon l'axe x (longueur du site) et répétée sur toute la largeur (y variant de -larg / 2 à +larg / 2) selon le quadrillage suivant :

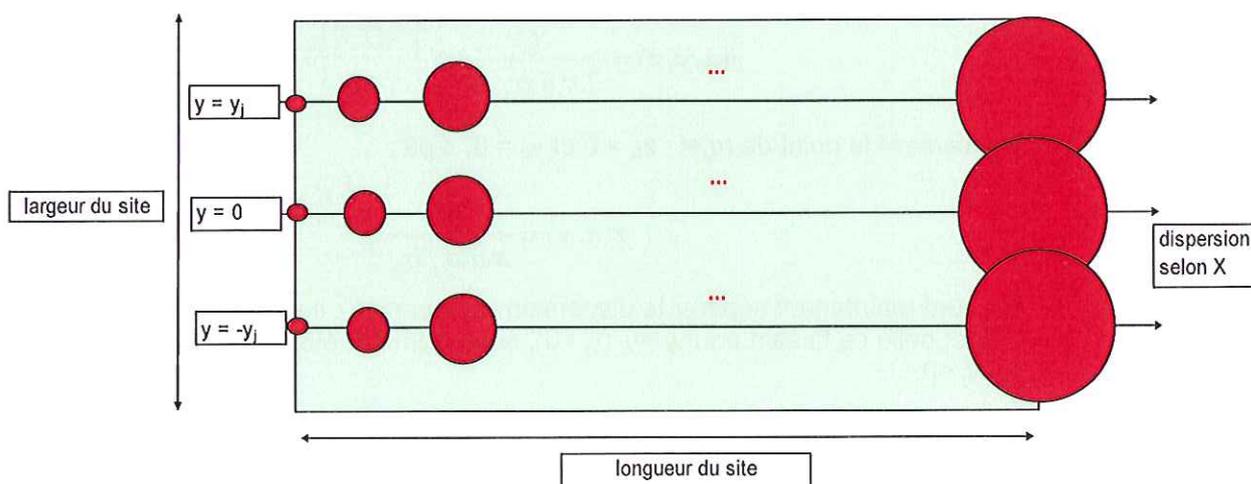


Figure 18 : Quadrillage d'un site pour les émissions et dispersions de bouffées de radon

Remarque : Les bouffées répétées au niveau y_j ne sont pas identiques à celles obtenues à $y = 0$, contrairement à ce que schématise la figure 18 ; mais sont calculées de la même manière.

Le modèle de PASQUILL est utilisé pour la dispersion continue de radon sur le site. Il correspond à une émission ponctuelle prolongée (voir Annexe 2) et son expression est la suivante :

$$\chi(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{(y-y_0)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]} \cdot \left[e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} + \alpha \cdot e^{-\frac{(z+z_0)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \right] \quad (20)$$

Avec :

$\chi(x, y, z)$: concentration du polluant au point x (Bq.m⁻³),

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- \dot{Q} : débit de polluant relargué (Bq.s⁻¹),
 σ_y, σ_z : écarts-types de la distribution gaussienne (m),
 x, y, z : coordonnées du point où est calculée la concentration (m),
 x_0, y_0, z_0 : coordonnées du point de rejet (m) avec z_0 =hauteur de rejet réelle,
 \bar{u} : vitesse moyenne horizontale du vent selon l'axe des x (m.s⁻¹), le vent est supposé confondu avec cette direction,
 α : coefficient de réflexion au sol :
 $\alpha = 0$: absorption totale,
 $\alpha = 1$: réflexion totale.

On considère une réflexion totale ($\alpha = 1$) et $z = z_0$, l'équation (20) devient :

$$\chi(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{(y-y_0)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]} \left[1 + e^{-\frac{(2z_0)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \right]$$

Concernant le point de rejet : $z_0 = 0$ et $y_0 = 0$, d'où :

$$\chi(x, y) = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]}$$

On peut maintenant séparer la dispersion en 2 parties : celle se faisant sur l'axe central ($y = 0$) et celle se faisant pour $y = y_j$ ($y_j > 0$), cette dernière étant symétrique à celle définie par les $y_j < 0$.

Ainsi sur l'axe central, on a :

$$\chi(x, 0) = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z}$$

Et l'accumulation des bouffées s'écrit :

$$\chi(x_p, 0) = \sum_{i=0}^p \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} ; \text{ avec } x_p = \text{longueur du site divisée par } u$$

Sur les côtés ($y_j > 0$), on a :

$$\chi(x, y) = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]}$$

Et l'accumulation des bouffées s'écrit :

$$\chi(x, y_m) = \sum_{j=1}^m \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\left[\frac{y_j^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]}; \text{ avec } y_m = \text{demi-largeur du site divisée par } u$$

Au final, on a :

$$\chi(x_p, y_m) = \sum_{i=1}^p \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} + 2 \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\left[\frac{(y_j)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]} \quad (21)$$

Modélisation hors site

Hors du site, un Coefficient de Transfert Atmosphérique (CTA en s.m⁻³) moyen annuel traduisant la dispersion à partir du site est calculé pour chaque groupe de référence.

Cette moyenne est calculée à la fois géographiquement en considérant un point d'émission au centre du stockage et temporellement en prenant en compte la météorologie annuelle (notamment la fréquence d'occurrence du vent dans le secteur d'intérêt).

5.3.3.4 Synthèse du calcul de C_{Rn222}

Le schéma ci-dessous résume la méthodologie du calcul de la concentration en ²²²Rn.

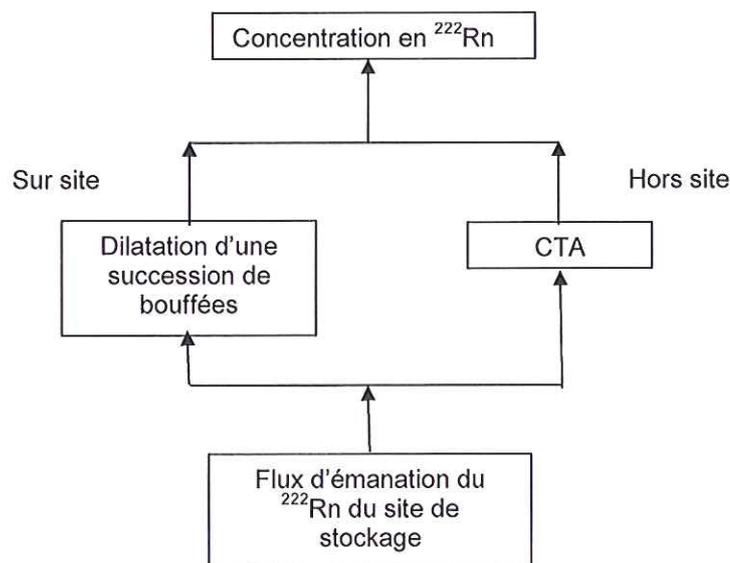


Figure 19 : Schéma récapitulatif du calcul de la concentration en ²²²Rn

5.3.4 Synthèse du processus de calcul de l'exposition au radon

La figure suivante récapitule la démarche de calcul à effectuer pour déterminer l'EAP à l'intérieur et à l'extérieur puis la dose inhalation due au radon à partir de la concentration en ^{226}Ra dans les résidus.

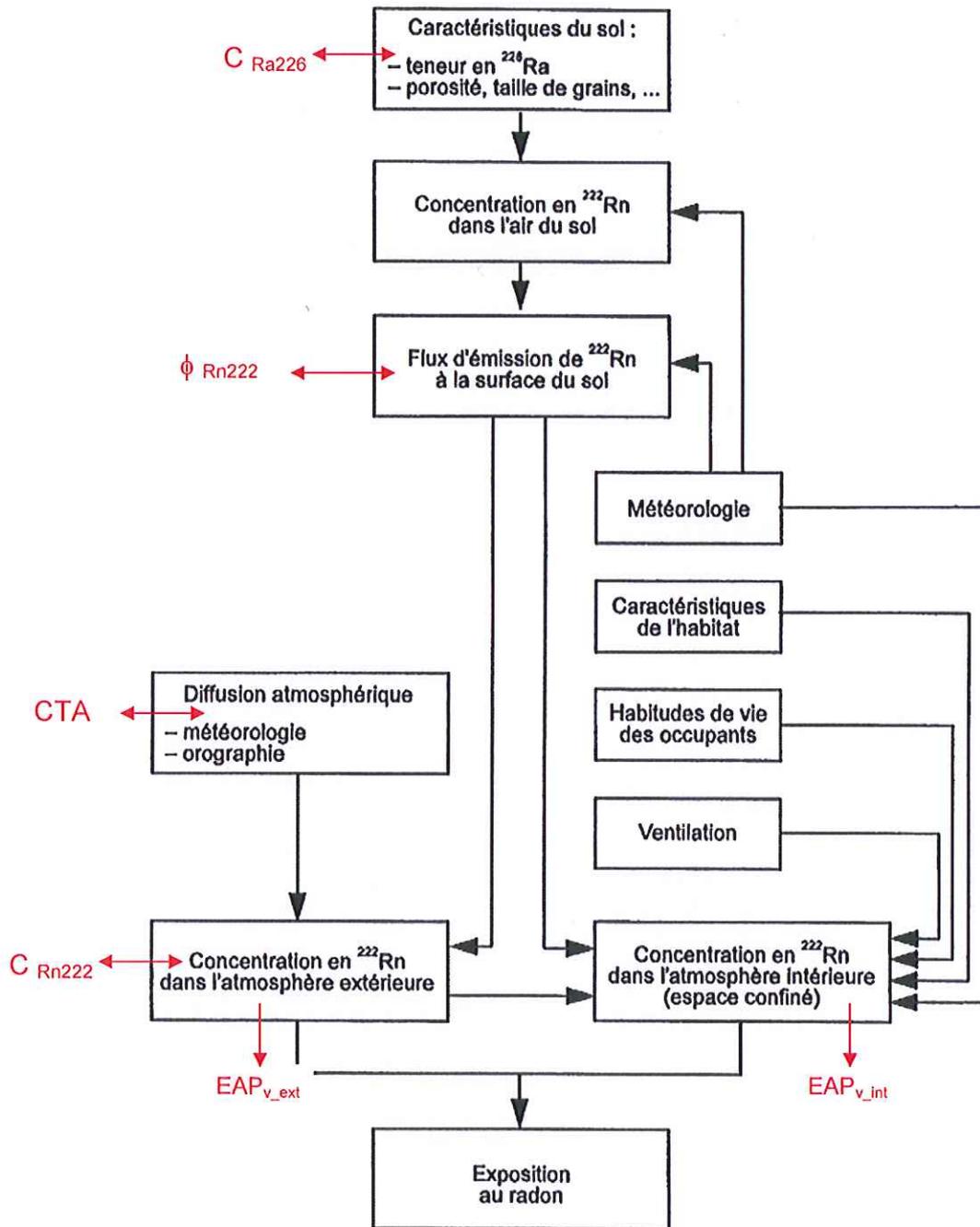


Figure 20 : Schéma général du processus d'exposition au radon [13]

5.4 L'EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION DE POUSSIÈRES

En extérieur, le vent lèche la surface du sol et entraînant la mise en suspension de particules arrachées à la surface.

En l'absence de couverture et en cas de chantier de terrassement du site (ouverture dans la couverture), la remise en suspension de poussières contaminées par les résidus et leur présence dans l'air inhalé par les groupes de référence doit être modélisée.

La dose inhalation due aux poussières se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$D_{inh_pou} = \beta_{inh} \cdot T_{expo} \cdot C_{poussières_air} \cdot \left[\sum_i FCD_{inh_i} \cdot A_{m_i} \right] \quad (22)$$

Avec :

β_{inh} : débit respiratoire (m³/h)

T_{expo} : Temps d'exposition (h/an)

$C_{poussières_air}$: Concentration de poussières dans l'air (g/m³)

FCD_{inh_i} : Coefficient de dose inhalation pour le radionucléide i (Sv/Bq)

A_{m_i} : Activité massique du radionucléide i (Bq/g)

Le terme $\left[\sum_i FCD_{inh_i} \cdot A_{m_i} \right]$ constitue la dose pour 1 g de poussière inhalé.

Les radionucléides retenus pour le calcul de la dose pour 1 g de poussières sont les radionucléides de la chaîne de l'²³⁸U.

La concentration de poussières dans l'air se détermine à l'aide de la relation suivante :

$$C_{poussières_air} = \frac{Emp}{F_{dilution}} \quad (23)$$

Avec :

Emp : empoussièrement du volume fictif (g/m³)

$F_{dilution}$: facteur de dilution (-)

L'empoussièrement (Emp) est issu de données bibliographiques (§ 6.4.4).

Remarque 1 : Tant qu'il y a présence de la couverture sur le stockage, on ne considère pas de contamination des poussières par les résidus (poussières de stériles assimilées à du bruit de fond). Ainsi, dans le cas du scénario de référence et de résidence sur stockage avec couverture, la dose inhalation poussières due au site est supposée nulle.

SGN	Type Doc	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Remarque 2 : Dans le cas du scénario « jeux d'enfants », les enfants étant très proche du tas de résidus sur lequel ils jouent, on ne considérera pas de dilution. La concentration de poussières dans l'air sera considérée égale à l'empoussièremement du site. Il en est de même pour les travailleurs auxquels l'empoussièremement de chantier de construction sera associé.

En dehors du site, un facteur de dilution ($F_{dilution}$) sera déterminé.

Le facteur de dilution minimal (qui est toujours supérieur à 1) est calculé en faisant le rapport du volume minimal d'une bouffée au point de calcul considéré après un temps de transfert minimal (V_2 sur la figure 21) sur le volume maximal qu'avait cette même bouffée lors de son émission par le site (i-e une bouffée émise à une extrémité et dont la taille est mesurée à l'autre extrémité : V_1 sur la figure 21).

Ainsi : $F_{dilution} = V_2 / V_1$. $F_{dilution}$ est minimal pour (V_{2min} ; V_{1max}).

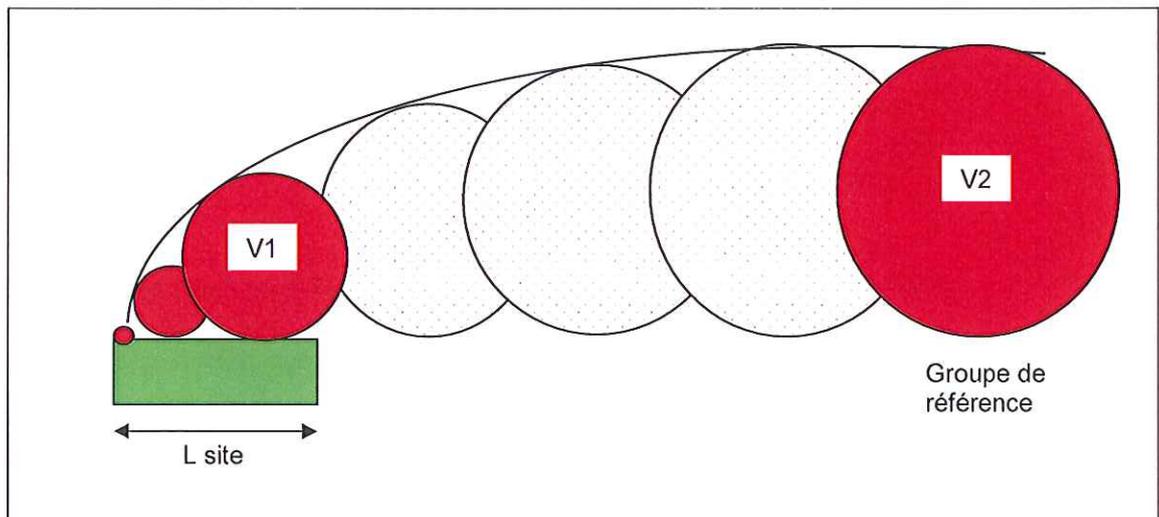


Figure 21 : Schéma de la dilution d'une bouffée

Les volumes V_1 et V_2 sont déterminés à partir des écarts-types de Doury. Ceux-ci étant eux-mêmes fonction du temps de transfert (voir Annexe 2), et le temps de transfert minimal étant déterminé à partir de la vitesse de vent moyenne u la plus importante observée sur le site.

Ainsi :

$$F_{dilu} = \frac{V_2(gpe_ref)}{V_1(bord_site)} = \alpha \cdot \frac{t_2(gpe_ref)}{t_1(bord_site)} = \alpha \cdot \frac{d_2(gpe_ref)}{u} \cdot \frac{u}{d_1(bord_site)}$$

$$F_{dilu} = \alpha \cdot \frac{d_2(gpe_ref)}{d_1(bord_site)} \quad (\alpha \text{ montre juste la proportionnalité})$$

La distance d_2 est fixée par l'emplacement du groupe de référence. Ainsi, pour avoir un facteur de dilution minimal, il faut une distance d_1 maximale. C'est pourquoi, quelque soit l'emplacement du groupe de référence, d_1 = diagonale du site.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

5.5 L'EXPOSITION INTERNE PAR INGESTION

5.5.1 Consommation d'eau et d'aliments

On considérera un individu vivant en autarcie et s'abreuvant d'eau contaminée issue de l'aval du site. Celui-ci est supposé irriguer son potager avec cette même eau.

Les calculs sont basés sur la contamination mesurée de l'eau issue de l'aval du site.

A partir du taux d'irrigation de culture ($l/m^2/j$) un dépôt annuel au sol est calculé. De manière pénalisante sur le plan dosimétrique, ce dépôt est considéré entièrement réalisé en début d'année.

L'activité déposée pénètre dans les couches superficielles du sol puis dans les plantes et enfin transite vers les animaux.

De là, la dose ingestion par consommation des plantes et des viandes animales est déduite.

A cette dose, s'ajoute la dose ingestion induite par l'incorporation directe d'eau par l'homme et l'abreuvement des animaux.

Remarque 1 : les poissons consommés sont supposés pêchés dans le cours d'eau en aval du site.

Remarque 2 : Dans le cas du scénario « résidence sur stockage », les plantes du potager sont supposées être enterrées dans au moins 30 cm de terre. Elles ne sont donc contaminées que par l'eau d'irrigation, il s'agit donc d'un transfert eau- plantes uniquement.

5.5.2 Concentrations dans les sols

Le transfert des radioéléments contenus dans l'eau vers les sols a été étudié en prenant en compte l'accumulation au fil du temps.

On suppose que les jardins et potagers sont irrigués avec la même concentration en eau chaque année. L'évolution de la concentration dans les sols est calculée (avec COMODORE) au fil du temps pour 1 Bq/m^3 de chaque radioélément dans l'eau d'irrigation.

La courbe de la figure 22 montre que l' ^{238}U et l' ^{234}U atteignent une asymptote en activité au bout de 150 ans.

De même, la courbe de la figure 23 montre que le ^{226}Ra atteint une asymptote d'activité au bout de 800 ans.

Notons que le ^{230}Th , père du ^{226}Ra , s'accumule légèrement plus dans les sols que le ^{226}Ra .

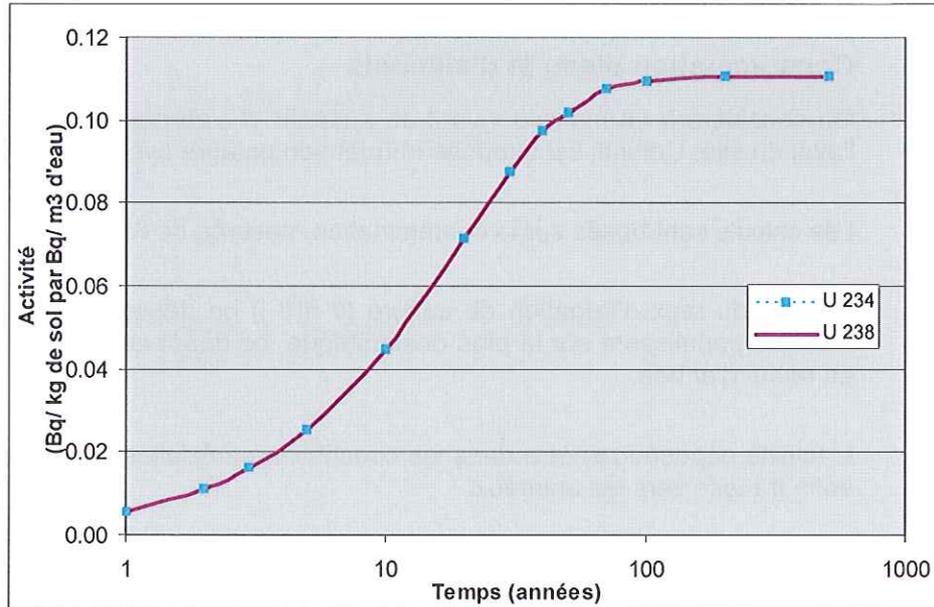


Figure 22 : Evolution des activités de l'²³⁴U et de l'²³⁸U dans les sols en fonction du temps

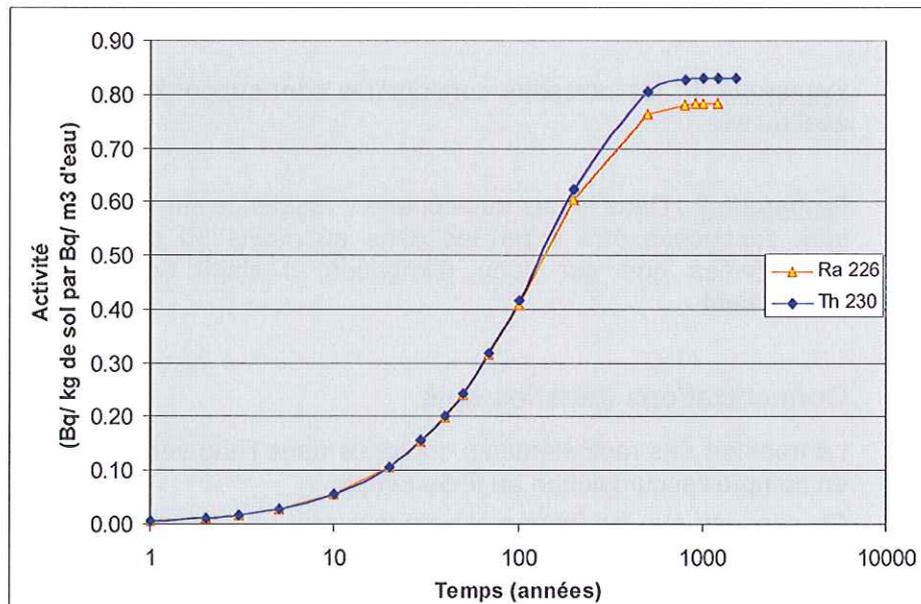


Figure 23 : Evolution des activités du ²³⁰Th et du ²²⁶Ra dans les sols en fonction du temps

Du fait que la chaîne de l'²³⁸U à l'²³⁴U puisse être considérée instantanément à l'équilibre, de même que la descendance du ²²⁶Ra, le phénomène d'accumulation peut donc être pris en compte en considérant les valeurs asymptotiques de ces 3 seuls radioéléments (: ²³⁸U, ²³⁰Th et ²²⁶Ra) dans les calculs en lieu et place des concentrations obtenues au bout d'un an.

Les activités obtenues sont extrêmement pénalisantes puisqu'elles sous-entendent l'irrigation des sols sans discontinuité pendant plusieurs centaines d'années.



SGN	Type Doc	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Ce calcul s'appliquant au long terme avec la phase de surveillance non garantie, l'eau d'irrigation sera considérée non traitée.

Bilan :

- en phase active, l'eau est considérée traitée ; et les valeurs sont celles de l'année de mesures ;
- en phase passive, l'eau est considérée non traitée ; et les valeurs sont celles de l'année de mesures ;
- en phase de surveillance non garantie, l'eau est considérée non traitée ; et les valeurs sont des valeurs asymptotiques.

5.5.3 Consommation de terre

Dans le cas du scénario « jeux d'enfants », on considérera un groupe d'enfants de 7 à 12 ans jouant sur une butte de terre extraite du tas de résidus.

Ces enfants ingérant une certaine quantité de terre, on évaluera alors l'activité massique de la terre pour en déduire la dose due à cette ingestion.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

6 DONNEES DE BASES INTERVENANT DANS LES CALCULS

En cas d'absence de données, on prendra les valeurs recommandées par la bibliographie (et notamment le document [24]).

6.1 CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DU SITE

6.1.1 Météorologie annuelle

Le transport atmosphérique des poussières mises en suspension et du radon émis par la source est étroitement lié à la météorologie annuelle locale. Il convient donc de connaître avec une bonne précision les processus météorologiques qui conditionnent la dispersion atmosphérique.

Il sera donc utilisé, pour les études d'impact des différents sites, une rose des vents détaillée indiquant la probabilité des vents répartis par secteur de 20°, par classes de vitesse de vent et tenant compte de la pluviométrie.

A défaut de mesures locales, on utilisera les données météorologiques provenant de la station la plus proche du site.

6.1.2 Géologie et hydrogéologie du site

La description générale de la géologie de la région et la description plus détaillée de la géologie locale sont utilisées pour sélectionner les groupes de référence.

De même, la description des aquifères et de leurs principales caractéristiques (localisation, écoulement, communication entre les nappes et l'hydrologie de surface, etc.) et la description détaillée des différents cours d'eau passant à proximité du site et les exutoires des eaux souterraines sont utilisées pour choisir les groupes de références.

6.2 DONNEES DE DESCRIPTION DU STOCKAGE ET DES RESIDUS

Les données qui seront utilisées pour la modélisation du stockage dans chaque scénario sont :

- les dimensions et la géométrie du stockage et de ces différents composants (les couches constituant la couverture, les drains, les digues et les volumes de résidus) ;
- pour chaque composant : sa densité, sa concentration en U ;
- et pour les résidus de traitement : les concentrations en U et Ra (avec leur plage de variation si elle est connue).

6.3 SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Pour réaliser les calculs du scénario de référence et également valider les modèles, il peut être utile de posséder des mesures :

- Des concentrations massiques en ^{238}U , en ^{230}Th et en ^{226}Ra ;
- de l'EAP du ^{222}Rn (en différents points) ;

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- du flux de ^{222}Rn (en différents points) ;
- des Débits d'Equivalents de Dose (en différents points) ;
- des concentrations en ^{238}U , en ^{234}U , en ^{230}Th , en ^{226}Ra , en ^{210}Pb , en ^{210}Po dans l'eau et les aliments.

6.4 DONNEES RELATIVES AUX GROUPES DE REFERENCE

Pour étudier l'impact que peut avoir le site en évolution normale ou altérée, il est nécessaire de posséder des données sur les groupes de référence telles que :

- la situation géographique (par rapport au site),
- les classes d'âge,
- les temps de présence selon l'activité,
- les débits respiratoires considérés selon les activités et les classes d'âge,
- les régimes alimentaires pour les productions locales,
- les masses de terre pouvant être ingérées par classe d'âge,
- l'empoussièrement des habitations.

6.4.1 Situation géographique et classes d'âge

Pour étudier l'impact d'un site de stockage, on considère une population restant la plus proche du site et/ou étant le plus sensible à la radioactivité.

En terme de classe d'âge, on étudiera les cas les plus majorants à savoir :

- pour le scénario de référence :
 - des retraités (adultes de plus de 61 ans) et des enfants de 5 ans [24] habitant les villages alentours ;
 - des adultes (membres du public > 17 ans) pour l'entretien du site;
 - des promeneurs sur site (retraités et enfants de 12 – 17 ans car plus pénalisants en termes de temps d'exposition) ;
 - des adultes (membres du public > 17 ans) et des enfants (12 -17 ans) pour l'activité de bureau ou école (groupes de référence les plus pénalisants en termes de temps d'exposition).
- pour le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture :
 - des retraités (adultes de plus de 61 ans) et des enfants de 5 ans [24] habitant les villages alentours ;
 - des adultes (membres du public > 17 ans) pour l'entretien du site;
 - des promeneurs sur site (retraités et enfants de 12 – 17 ans car plus pénalisants en termes de temps d'exposition) ;
 - des adultes (membres du public > 17 ans) et des enfants (12 -17 ans) pour l'activité de bureau ou école (groupes de référence les plus pénalisants en termes de temps d'exposition).
- pour le scénario de résidence sur stockage :
 - les retraités (adultes de plus de 61 ans),
 - les enfants de 5 ans [24].

- pour le scénario de terrassement d'une route à travers le stockage :
 - des travailleurs (> 17 ans).
- pour le scénario de jeux d'enfants :
 - des enfants de 10 ans [24] jouant durant la durée du chantier.

Remarque : D'après les recommandations du document [25] sur les classes d'âge à étudier pour les scénarios décrits plus haut, les nourrissons ne sont pas considérés.

6.4.2 Temps de présence

L'étude est réalisée à partir de la base de données CIBLEX 2004 [25]. Les temps d'exposition fournis par ce document sont pris en compte si :

- le taux de pratique de l'activité est supérieur à 75 %,
- sauf pour la promenade dont la limite de taux de pratique est de 20%,
- et le jardinage et le travail dont les limites de taux de pratique sont de 25 %.

On obtient ainsi le tableau suivant :

Temps (h/an)	enfant 2-7 ans	enfant 7-12 ans	enfant 12-17 ans	adulte	retraité
Sommeil	4745	3650	3498	3169	3589
Veille int. hors sommeil dont :	1977	2190	2001	2835	3680
- loisirs	700	1095	1205	998	1545
- ménage	0	0	0	1004	1132
- repas	639	548	566	602	754
- salle de bain	639	548	231	231	249
Extérieur dont :	760	1156	1138	1028	1229
- transports	183	274	511	529	0
- jardinage	0	0	0	0	681
- promenade jardin	0	0	0	0	0
- Promenade	456	517	627	499	548
- pêche	0	0	0	0	0
- plage	0	0	0	0	0
- sports	122	365	0	0	0
Travail	1278	1095	2379	2792	0
Total intérieur	6722	5840	5499	6004	7270
Total extérieur - env-t site	2038	2251	3516	3820	1229
TOTAL	8760	8091	9016	9825	8498

Tableau 5 : Temps d'exposition extraits de CIBLEX après tri par taux de pratique

Dans le tableau 5 ci-dessus, on constate que le total des temps d'exposition pour l'enfant de 12 à 17 ans et pour l'adulte est supérieur à 1 année (8766 h).

Le temps de travail pour ces personnes est supérieur à 50 h/ semaine (47 semaines de travail par an considérées), ce temps de travail est donc réduit à 45 h/ semaine (40 h de travail + 1h/ jour pour le déjeuner) soit : 2115 h / an.

Malgré cela, le total des temps d'exposition pour l'adulte reste supérieur à 1 année. Ainsi, on réduit le temps de sommeil de l'adulte à 7h30 / jour, soit : 2739 h/ an.

Le tableau suivant est ainsi obtenu :

Temps (h/an)	enfant 2-7 ans	enfant 7-12 ans	enfant 12-17 ans	adulte	retraité
Sommeil	4745	3650	3498	2739	3589
Veille int. hors sommeil dont :	1977	2190	2001	2835	3680
- loisirs	700	1095	1205	998	1545
- ménage	0	0	0	1004	1132
- repas	639	548	566	602	754
- salle de bain	639	548	231	231	249
Extérieur dont :	760	1156	1138	1028	1229
- transports	183	274	511	529	0
- jardinage	0	0	0	0	681
- promenade jardin	0	0	0	0	0
- Promenade	456	517	627	499	548
- pêche	0	0	0	0	0
- plage	0	0	0	0	0
- sports	122	365	0	0	0
Travail	1278	1095	2115	2115	0
Total intérieur	6722	5840	5499	5574	7270
Total extérieur - env-t site	2038	2251	3253	3143	1229
TOTAL	8760	8091	8752	8717	8498

Tableau 6 : Temps d'exposition extraits de CIBLEX après corrections

Le total des temps d'exposition est inférieur à 1 année quelque soit la classe d'âge.

Ces temps d'exposition sont appliqués directement au groupe de référence « habitants proche du site » utilisé dans le scénario de référence et dans le scénario « perte d'intégrité de la digue et de la couverture ».

Pour les autres groupes de référence, les temps suivants sont appliqués :

- 400 h/ an pour l'entretien du site [32];
- Pour les promeneurs, les temps de « promenade » les plus pénalisants du tableau 6 sont retenus : 627 h/ an pour les enfants de 12 à 17 ans et 548 h/ an pour les retraités ;
- Pour les membres du public exerçant une activité de bureau / école sur le site, les temps de « travail » les plus pénalisants sont retenus : 2115 h/ an pour les enfants de 12 à 17 ans et les adultes.

- Pour la base de loisirs, un temps d'exposition constant quelque soit la classe d'âge a été choisi : il correspond à une exposition de 6 h/ jour pendant 3 mois, soit : 540 h/ an ;
- Pour la baignade, un temps d'exposition constant quelque soit la classe d'âge a été choisi : 20 h/ an [33];
- Pour la baignade, un temps d'exposition constant quelque soit la classe d'âge a été choisi : 100 h/ an [33].

Pour le scénario « chantier de terrassement d'une route », un temps d'exposition de 8 h/ jour par jour de chantier est considéré. La durée du chantier est proportionnelle à la vitesse d'avancement fixée à 10 m/ jour.

Pour le scénario « jeux d'enfants », un temps d'exposition de 1 h/ jour par jour de chantier est considéré. La durée du chantier est la même que précédemment.

Pour le scénario « résidence sur stockage», les temps d'exposition sont extraits du tableau 6, dans lequel :

- le temps « Sommeil » est assimilé au temps « 1^{er} étage »,
- le temps « Veille intérieur hors sommeil » est assimilé au temps « RDC »,
- le temps « Jardinage » et le temps « Promenade » constituent les expositions à l'extérieur de la maison respectivement sur le potager ou sur le reste du site (avec ou sans couverture) ;
- une exposition « cave » de 100 h/ an quelque soit la classe d'âge a été ajoutée; ce temps est déduit du temps « RDC ».

Le tableau suivant récapitule ces expositions :

Temps (h/an)	enfant 2-7 ans	enfant 7-12 ans	enfant 12-17 ans	adulte	retraité
1 ^{er} étage	4745	3650	3498	2739	3589
RDC	1877	2090	1901	2735	3580
Cave	100	100	100	100	100
Extérieur sur site dont :	456	517	627	499	1229
- jardinage	0	0	0	0	681
- Promenade	456	517	627	499	548
TOTAL	7178	6357	6126	6073	8498

Tableau 7 : Temps d'exposition extraits de CIBLEX après corrections

Le reste du temps, ces personnes ne sont pas soumises à l'influence du site.

Remarque : L'influence du paramètre « temps d'exposition » sera étudiée dans l'étude de sensibilité.

6.4.3 Données relatives à l'inhalation de poussières

6.4.3.1 Débits respiratoires

Le décret 90-222 [27] retient un débit d'inhalation d'air de 0,80 m³/h pour un adulte.

Les valeurs préconisées par la CIPR n°66 [26] pour un adulte selon l'activité exercée sont présentées dans le tableau 8 et celles pour les enfants sont présentées dans le tableau 9.

Activité	Débit respiratoire (m ³ /h) de l'adulte
Sommeil	0,45
Maison et loisir (1/3 du temps assis et 2/3 en légère activité)	1,18
Travail	1,18
Travail extérieur (4/8 assis, 3/8 en légère activité et 1/8 en forte activité)	1,21
Travail de force (7/8 en légère activité et 1/8 en forte activité)	1,69

Tableau 8 : Débit respiratoire pour un adulte selon son activité

Activité	Débit respiratoire (m ³ /h) des enfants de	
	5 ans	10 ans
Sommeil	0,24	0,31
Éveil et autres	0,49	0,87
Sport et voyage		
Travail		

Tableau 9 : Débit respiratoire pour un enfant de 1 an et de 10 ans selon son activité

Du tableau 8, on en déduit 3 débits respiratoires moyens pour l'adulte :

- en activité (hors travail de force): 1,21 m³/h,
- travail de force : 1,69 m³/h,
- pendant le sommeil : 0,45 m³/h.

On conserve les débits respiratoires du tableau 9 pour les enfants de 2 à 7 ans et les enfants de 7 à 12 ans.

6.4.3.2 Empoussièrèments

L'inhalation poussières n'est considérée qu'en absence de couverture, les poussières de stériles sont assimilées au bruit de fond.

Le document [24] donne l'empoussièrèment des espaces retranscrit dans le tableau 10.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Type d'empoussièrment	Concentration de particules dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Empoussièrment déblai remblai : - chantier de construction - site	1000 500
Empoussièrment intérieur	10
Empoussièrment jardin	20

Tableau 10 : concentration de particules dans l'air pour les différents types d'empoussièrment

L'empoussièrment « site » est utilisé:

- pour les habitations alentours dans le cas des scénarios « référence » et « perte de couverture et perte d'intégrité de la digue », il correspond, après dilution, à un nouvel empoussièrment « jardin »;
- pour les promeneurs et les personnes allant à la base de loisirs dans le scénario « perte d'intégrité de la digue et de la couverture » (on considère l'empoussièrment « site » pour prendre en compte la remise en suspension des poussières due à la marche) ;
- pour le « scénario « jeux d'enfants » (on considère l'empoussièrment « site » pour prendre en compte la remise en suspension des poussières due aux jeux) ;

Les empoussièrments « intérieur » et « jardin » sont utilisés :

- pour le scénario « résidence sur stockage sans couverture » ;
- pour l'activité bureau/ école sur site pour le scénario « perte d'intégrité de la digue et de la couverture » (on considère l'inhalation de poussières à l'intérieur des locaux) ;
- pour les habitations alentours : le ratio « intérieur » sur « jardin » est utilisé pour évaluer l'empoussièrment intérieur des habitations alentours à partir du nouvel empoussièrment « jardin » défini ci-dessus.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

6.4.4 Données relatives à l'inhalation de Radon

Au §5.3.3.1 est décrit la méthode d'évaluation du flux de radon sortant de la couverture, pour laquelle les paramètres E_R , D_R et D_C sont utilisés.

Les valeurs recommandées pour ces paramètres par le document [13] sont :

E_R	0,1 pour les résidus et les stériles
E_{R_eau}	1 pour l'eau (cas particulier du site de Bois Noirs)
D_R	$5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_C	$5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une couverture en stériles
D_{C_eau}	$1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une couverture en eau (cas particulier du site de Bois Noirs)

Ce sont des valeurs moyennes. En effet, des gammes de valeurs sont proposées, l'impact des valeurs maximales est estimé en étude de sensibilité.

Un taux de renouvellement de l'air est utilisé pour évaluer la concentration volumique de ^{222}Rn dans la cave, dans le scénario résidence sur stockage.

Ce taux est pris égal à 1 h^{-1} [13]. L'influence du choix de ce paramètre sera étudiée en étude de sensibilité.

6.4.5 Données relatives à l'exposition externe

6.4.5.1 Pour le site vue par les villages alentours

Dans le calcul de la dose externe induite par le site aux habitants proche du site (scénario de référence et de perte d'intégrité de la digue et de la couverture) est utilisé le paramètre μ_{air} qui dépend de l'énergie des gamma émis par les résidus et les stériles, il est donné par raie d'énergie des gamma dans le document [36].

E(MeV)	μ_{air} / ρ
1,50.10 ⁻²	1,614
2,00.10 ⁻²	7,779.10 ⁻¹
3,00.10 ⁻²	3,538.10 ⁻¹
4,00.10 ⁻²	2,485.10 ⁻¹
5,00.10 ⁻²	2,080.10 ⁻¹
6,00.10 ⁻²	1,875.10 ⁻¹
8,00.10 ⁻²	1,662.10 ⁻¹
1,00.10 ⁻¹	1,541.10 ⁻¹
1,50.10 ⁻¹	1,356.10 ⁻¹
2,00.10 ⁻¹	1,233.10 ⁻¹
3,00.10 ⁻¹	1,067.10 ⁻¹
4,00.10 ⁻¹	9,549.10 ⁻²
5,00.10 ⁻¹	8,712.10 ⁻²
6,00.10 ⁻¹	8,055.10 ⁻²
8,00.10 ⁻¹	7,074.10 ⁻²
1,00	6,358.10 ⁻²
1,25	5,687.10 ⁻²
1,50	5,175.10 ⁻²
2,00	4,447.10 ⁻²
3,00	3,581.10 ⁻²
4,00	3,079.10 ⁻²
5,00	2,751.10 ⁻²
6,00	2,522.10 ⁻²
8,00	2,225.10 ⁻²
1,00.10 ¹	2,045.10 ⁻²

Tableau 11 : Valeurs de μ_{air} / ρ en fonction de l'énergie du rayonnement gamma

6.4.5.2 Pour le scénario « perte de couverture et perte d'intégrité de la digue »

Pour le scénario « perte de couverture et perte d'intégrité de la digue », la section d'ouverture de la digue est prise égale à 200 m².

6.4.5.3 Pour la résidence sur site

L'angle solide à l'intérieur de la maison est calculé pour un point au centre de la maison à 1 m du sol (de la cave, du RDC ou du 1^{er} étage) pour représenter le barycentre du corps.

6.4.5.4 Pour le dépôt consécutif à l'irrigation

Le document [24] considère un rapport de 5 % entre l'irradiation à l'intérieur par rapport à l'extérieur. De ce fait, l'irradiation à l'intérieur des habitations est négligée.

6.4.6 Données relatives à l'ingestion

Le document réalisé à partir de la base de données CIBLEX 2004 [25] propose un régime alimentaire moyenné sur la France. Celui-ci est décrit dans le tableau suivant.

	Quantités ingérées en Kg/ an ou en L/ an	
	Adulte (> 61 ans)	Enfant (2-7 ans)
Céréales	69,6	38,8
Légumes feuilles	21,1	7,3
Légumes racines	37,2	24,7
Fruits	92,3	42,2
Produits laitiers	48,8	42,9
lait	63,7	93,8
Viandes :	66	43,8
- Veau	6,85	5,05
- Boeuf	6,85	5,05
- Ovin	8,3	5,5
- Porc	17	12,7
- Volaille	17,2	9,3
- Oeuf	9,8	6,2
Poissons	17,1	8,9
Eau	548	475

Tableau 12 : Régime alimentaire pour adultes et enfants moyenné sur la France

L'autarcie est prise de manière conservative à 100%.

Dans le cas du scénario « jeux d'enfants », les enfants (~10 ans) jouant sur les tas de résidus excavés ingèrent de la terre. La quantité annuelle de terre ingérée par ces enfants est prise égale à **3,3 g/an** [34]. Ce qui correspond à la valeur maximale de la plage de valeurs recommandées par [24], c'est pourquoi ce paramètre n'apparaît pas en étude de sensibilité.

Le taux d'irrigation des potagers est pris égal à $1,60 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ [11].

6.5 COEFFICIENTS DE DOSE

6.5.1 Exposition interne

6.5.1.1 Type d'absorption utilisée pour les différents radionucléides étudiés

La forme des radionucléides par défaut pour le public et le travailleur sont extraits de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [28]. Ils sont présentés dans le tableau 13 ci-dessous :

	Forme recommandée par défaut pour l'inhalation	
	du public	du travailleur
U238	M	
TH234	S	M
PA234M		M
PA234		M
U234	M	
TH230	S	M
RA226	M	M
RN222	V	V
PO218	M	F
AT218		
PB214	M	F
BI214		M
PO214	M	F
PB210	M	F
BI210		M
PO210	M	F

Tableau 13 : Type d'absorption utilisé pour les calculs de dose

Le ^{222}Rn est traité à part (voir § 5.2).

Pour les radionucléides qui n'ont pas de type d'absorption recommandée par défaut, on prendra le coefficient de dose maximal.

Remarque : L'influence de ce paramètre sur la dose inhalation sera étudiée dans l'étude de sensibilité.

6.5.2 Coefficients de dose interne par inhalation et ingestion

Les coefficients de dose inhalation et ingestion, correspondant à la forme par défaut de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [28] sont donnés ci-dessous.

	FCD Inhalation (JO 2003) Par défaut (Sv.Bq ⁻¹)				
	Public 2-7ans	Public 7-12 ans	Public 12-17ans	Public > 17 ans	Travailleur 5 µm
U238	5,90.10 ⁻⁶	4,00.10 ⁻⁶	1,30.10 ⁻⁶	2,90.10 ⁻⁶	5,70.10 ⁻⁶
TH234	1,70.10 ⁻⁸	1,10.10 ⁻⁸	1,40.10 ⁻⁸	7,70.10 ⁻⁹	5,30.10 ⁻⁹
PA234M	0	0	1,10.10 ⁻⁷	0	0
PA234	1,10.10 ⁻⁹	7,10.10 ⁻¹⁰	1,70.10 ⁻⁸	4,00.10 ⁻¹⁰	5,50.10 ⁻¹⁰
U234	7,00.10 ⁻⁶	4,80.10 ⁻⁶	4,00.10 ⁻⁶	3,50.10 ⁻⁶	6,80.10 ⁻⁶
TH230	2,40.10 ⁻⁵	1,60.10 ⁻⁵	0	1,40.10 ⁻⁵	2,80.10 ⁻⁵
RA226	7,00.10 ⁻⁶	4,90.10 ⁻⁶	0	3,50.10 ⁻⁶	2,20.10 ⁻⁶
RN222	5,10.10 ⁻⁹	5,10.10 ⁻⁹	5,10.10 ⁻⁹	5,10.10 ⁻⁹	6,49.10 ⁻⁹
PO218	0	0	4,50.10 ⁻⁶	0	0
AT218	0	0	1,50.10 ⁻⁵	0	0
PB214	2,60.10 ⁻⁸	1,90.10 ⁻⁸	9,10.10 ⁻⁹	1,40.10 ⁻⁸	4,80.10 ⁻⁹
BI214	3,10.10 ⁻⁸	2,20.10 ⁻⁸	5,00.10 ⁻¹⁰	1,40.10 ⁻⁸	2,10.10 ⁻⁸
PO214	0	0	0	0	0
PB210	2,20.10 ⁻⁶	1,50.10 ⁻⁶	4,20.10 ⁻⁶	1,10.10 ⁻⁶	1,10.10 ⁻⁶
BI210	1,90.10 ⁻⁷	1,30.10 ⁻⁷	3,40.10 ⁻⁶	9,30.10 ⁻⁸	6,00.10 ⁻⁸
PO210	6,70.10 ⁻⁶	4,60.10 ⁻⁶	1,30.10 ⁻⁶	3,30.10 ⁻⁶	7,10.10 ⁻⁷

Tableau 14 : Coefficients de dose inhalation pour l'adulte, l'enfant et le travailleur

	FCD Ingestion (JO 2003) (Sv.Bq ⁻¹)		
	Public 2-7ans	Public 7-12 ans	Public > 17 ans
U238	8,00.10 ⁻⁸	6,80.10 ⁻⁸	4,50.10 ⁻⁸
TH234	1,30.10 ⁻⁸	7,40.10 ⁻⁹	3,40.10 ⁻⁹
PA234M	0	0	0
PA234	1,70.10 ⁻⁹	1,00.10 ⁻⁹	5,10.10 ⁻¹⁰
U234	8,80.10 ⁻⁸	7,40.10 ⁻⁸	4,90.10 ⁻⁸
TH230	3,10.10 ⁻⁷	2,40.10 ⁻⁷	2,10.10 ⁻⁷
RA226	6,20.10 ⁻⁷	8,00.10 ⁻⁷	2,80.10 ⁻⁷
RN222	0	0	0
PO218	0	0	0
AT218	0	0	0
PB214	5,20.10 ⁻¹⁰	3,10.10 ⁻¹⁰	1,40.10 ⁻¹⁰
BI214	3,60.10 ⁻¹⁰	2,10.10 ⁻¹⁰	1,10.10 ⁻¹⁰
PO214	0	0	0
PB210	2,20.10 ⁻⁶	1,90.10 ⁻⁶	6,90.10 ⁻⁷
BI210	4,80.10 ⁻⁹	2,90.10 ⁻⁹	1,30.10 ⁻⁹
PO210	4,40.10 ⁻⁶	2,60.10 ⁻⁶	1,20.10 ⁻⁶

Tableau 15 : Coefficients de dose ingestion pour l'adulte et l'enfant

6.5.3 Coefficients de dose externe

Les facteurs de conversion de flux en équivalent de dose, $H^*(10)$, utilisés dans le code de simulation MERCURAD, sont issus de la CIPR74 [29].

Facteurs de conversion Flux/ Equivalent de dose $H^*(10)$ CIPR74		
E_γ (MeV)	$H^*(10)/\phi$ ($\mu\text{Sv.cm}^2$)	$H^*(10)/\phi$ ($\mu\text{Sv.cm}^2/\text{h}$)
$1,00.10^{-2}$	0,061	$2,20.10^{-4}$
$1,50.10^{-2}$	0,83	$2,99.10^{-3}$
$2,00.10^{-2}$	1,05	$3,78.10^{-3}$
$3,00.10^{-2}$	0,81	$2,92.10^{-3}$
$4,00.10^{-2}$	0,64	$2,30.10^{-3}$
$5,00.10^{-2}$	0,55	$1,98.10^{-3}$
$6,00.10^{-2}$	0,51	$1,84.10^{-3}$
$8,00.10^{-2}$	0,53	$1,91.10^{-3}$
$1,00.10^{-1}$	0,61	$2,20.10^{-3}$
$1,50.10^{-1}$	0,89	$3,20.10^{-3}$
$2,00.10^{-1}$	1,20	$4,32.10^{-3}$
$3,00.10^{-1}$	1,80	$6,48.10^{-3}$
$4,00.10^{-1}$	2,38	$8,57.10^{-3}$
$5,00.10^{-1}$	2,93	$1,05.10^{-2}$
$6,00.10^{-1}$	3,44	$1,24.10^{-2}$
$8,00.10^{-1}$	4,38	$1,58.10^{-2}$
1,00	5,20	$1,87.10^{-2}$
1,50	6,90	$2,48.10^{-2}$
2,00	8,60	$3,10.10^{-2}$
3,00	11,1	$4,00.10^{-2}$
4,00	13,4	$4,82.10^{-2}$
5,00	15,5	$5,58.10^{-2}$
6,00	17,6	$6,34.10^{-2}$
8,00	21,6	$7,78.10^{-2}$
$1,00.10^1$	25,6	$9,22.10^{-2}$

Tableau 16 : Facteurs de conversion de flux en équivalent de dose $H^*(10)$

Des coefficients de dose externe doivent également être utilisés dans le cas de l'exposition au dépôt de radionucléides suite à une irrigation.

Dans ce cas, les coefficients de dose utilisés sont extraits de la FGR 12 [30] et sont présentés dans le tableau 17 suivant.

	FCD externe (FGR 12) dépôt au sol 0 cm (Sv.Bq ⁻¹ /s.m ⁻²)	FCD externe (FGR 12) dépôt au sol infini (Sv.Bq ⁻¹ /s.m ⁻³)
U238	5,51.10 ⁻¹⁹	5,52.10 ⁻²²
TH234	8,32.10 ⁻¹⁸	1,29.10 ⁻¹⁹
PA234M	1,53.10 ⁻¹⁷	4,80.10 ⁻¹⁹
PA234	1,84.10 ⁻¹⁵	6,18.10 ⁻¹⁷
U234	7,48.10 ⁻¹⁹	2,15.10 ⁻²¹
TH230	7,50.10 ⁻¹⁹	6,47.10 ⁻²¹
RA226	6,44.10 ⁻¹⁸	1,70.10 ⁻¹⁹
RN222	3,95.10 ⁻¹⁹	1,26.10 ⁻²⁰
PO218	8,88.10 ⁻²¹	3,02.10 ⁻²²
AT218	4,18.10 ⁻¹⁸	3,13.10 ⁻²⁰
PB214	2,44.10 ⁻¹⁶	7,18.10 ⁻¹⁸
BI214	1,41.10 ⁻¹⁵	5,25.10 ⁻¹⁷
PO214	8,13.10 ⁻²⁰	2,75.10 ⁻²¹
PB210	2,48.10 ⁻¹⁸	1,31.10 ⁻²⁰
BI210	1,05.10 ⁻¹⁸	1,93.10 ⁻²⁰
PO210	8,29.10 ⁻²¹	2,80.10 ⁻²²

Tableau 17 : Coefficients de dose externe pour des radionucléides déposés sur le sol ou le dépôt infini de résidus

6.5.4 Facteurs de conversion des EAP

Pour l'adulte les facteurs de conversion conventionnels recommandés par les documents [12] et [28], exprimant la dose efficace par unité d'exposition à l'énergie alpha potentielle (EAP) sont :

- dans les habitations : $K_{Rn222} = 1,1 \text{ Sv.J}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{m}^3$;
- sur les lieux de travail : $K_{Rn222} = 1,4 \text{ Sv.J}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{m}^3$.

Pour les enfants, quelque soit leur âge, le coefficient pour l'inhalation radon $K_{Rn222} = 1,1 \text{ Sv.J}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{m}^3$ sera utilisé.

6.5.5 Coefficients de transfert aux cultures

6.5.5.1 Caractéristiques des végétaux

Les caractéristiques des végétaux utilisés pour le calcul de la contamination des végétaux pour estimer la dose ingestion, sont ceux implantés par défaut dans le code COMODORE [11]. Ils sont présentés en annexe 3.

6.5.5.2 Facteurs de transfert sol/plante pour les rejets liquides

Les facteurs de transfert sol/ plante pour chaque radioélément (en Bq/kg de végétal frais / Bq/kg de sol), utilisés pour le calcul de la contamination des plantes pour estimer la dose ingestion, sont ceux implantés par défaut dans le code COMODORE [11]. Ils sont présentés en annexe 3.

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

7 ETUDE DE SENSIBILITE

7.1 SENSIBILITE DES PARAMETRES

Un certain nombre des paramètres retenus pour les calculs est le plus souvent issu de données expérimentales variant sur des plages de mesures parfois assez importantes.

D'autres sont propres à la méthodologie définie dans ce document, comme :

- les paramètres définissant le flux de ^{222}Rn ;
- les coefficients de dose inhalation ;
- les temps de présence.

Des valeurs moyennes ou supposées réalistes ont été retenues pour ces paramètres. L'influence du choix de ces valeurs au lieu d'une valeur pénalisante est évaluée dans les paragraphes suivants.

En tout état de cause, les doses calculées, pour lesquelles on a recourt à ces paramètres, sont directement proportionnelles aux valeurs utilisées.

7.2 INFLUENCE DES PARAMETRES DEFINIS DANS LA METHODOLOGIE

Les paramètres propres à la méthodologie listés précédemment sont donnés ci-après.

7.2.1 Influence des paramètres de la dose inhalation Radon

La dose inhalation due au radon a été estimée avec les paramètres tels que :

- le facteur d'équilibre à l'extérieur (hors site);
- le facteur d'émanation des résidus ;
- le coefficient de diffusion des résidus ;
- le coefficient de diffusion de la couverture ;
- la proportion de flux sortant de la dalle de béton quand celle-ci est fissurée;
- taux de renouvellement de l'air dans la cave,
- hauteur de cave,
- la vitesse moyenne annuelle de dispersion du radon sur le site.

Pour le dernier paramètre, la dose inhalation radon sur le site est directement proportionnelle à l'inverse de la vitesse de dispersion (dont la valeur choisie est la vitesse moyenne annuelle mesurée). Pour l'étude de sensibilité, une vitesse de dispersion minimale de 1 m.s^{-1} est considérée. Ce paramètre sera donc étudié dans les notes dédiées aux sites.

Pour les autres paramètres, la dose inhalation radon a été recalculée pour chacun d'entre eux, en prenant la valeur maximale. Le ratio par rapport à la dose inhalation radon calculée avec les valeurs choisies est déduit. L'ensemble des ratios obtenus est présenté dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	Valeur choisie	Valeur max	Ratio dose (valeur max)/ dose (valeur choisie)
Facteur d'équilibre à l'extérieur des habitations	0,5	0,7	~1,09
Facteur d'émanation des résidus	0,1	0,5	5,00
Coefficient de diffusion des résidus	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,09 (avec couverture) et 1,41 (sans couverture)
Coefficient de diffusion de la couverture	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,90
Flux relatif de Radon sortant de la dalle	1,2 %	2 %	1,67
Taux de renouvellement de l'air dans la cave	1	0,5	~1,88 (avec couverture) et ~1,78 (sans couverture)
Hauteur de cave (m)	2,0	1,5	~1,18 (avec couverture) et ~1,26 (sans couverture)

Tableau 18 : Influence des paramètres sur la dose inhalation totale due au ^{222}Rn

Remarque 1: Le facteur concernant le flux relatif de Radon sortant de la dalle fissurée de 1,67 est obtenu pour la dose inhalation radon à l'intérieur de la résidence sur stockage (§ 5.3.2.2). La dose inhalation radon totale (intérieur et extérieur) augmentera donc d'un facteur légèrement différent.

Remarque 2: L'absence d'un premier étage n'influe pas sur la dose inhalation radon à l'intérieur de la résidence sur stockage, car celle-ci est considérée indifféremment comme l'exposition à la même concentration de radon dans toutes les pièces pendant le temps de sommeil et le temps de veille à l'intérieur.

7.2.2 Influence des paramètres de la dose inhalation poussières

7.2.2.1 Coefficients de dose inhalation

Les coefficients de dose inhalation dépendent du type d'absorption choisi. La forme par défaut a été prise selon les recommandations de [28].

Le tableau 19 présente le rapport du FCD pénalisant sur le FCD par défaut retenu pour les calculs différent selon la classe d'âge.

	ratio (FCD_max/ FCD_par défaut)				
	Public 2 à 7ans	Public 7 à 12 ans	Public 12 à 17ans	Public > 17 ans	Travailleur 5 µm
U238	2,71	2,50	2,56	2,76	1,00
TH234	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09
PA234M	-	-	-	-	-
PA234	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05
U234	2,71	2,50	2,38	2,69	1,00
TH230	5,83	6,88	6,60	7,14	1,00
RA226	2,71	2,45	2,22	2,71	1,00
RN222	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PO218	-	-	-	-	-
AT218	-	-	-	-	-
PB214	1,08	1,11	1,07	1,07	1,00
BI214	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PO214	-	-	-	-	-
PB210	5,00	4,80	4,54	5,09	1,00
BI210	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PO210	1,28	1,28	1,28	1,30	3,10
<i>Moyenne</i>	<i>2,19</i>	<i>2,21</i>	<i>2,14</i>	<i>2,31</i>	<i>1,19</i>

Tableau 19 : Ratio des coefficients de dose inhalation lors du passage au type d'absorption pénalisant

La dose inhalation poussières augmente d'un **facteur ~2** en utilisant les coefficients de dose inhalation maximaux.

7.2.2.2 Empoussièrement « jardin »

Les empoussièrtements « intérieur » et « jardin » sont utilisés pour le scénario « résidence sur stockage sans couverture ». Pour voir l'influence de ce choix, on calcule la dose inhalation poussière pour ce scénario avec l'empoussièrement « site » à la place de l'empoussièrement « jardin », et on garde la proportionnalité « intérieur – jardin », soit :

Paramètres	Valeur choisie	Valeur max	Ratio dose (valeur max)/ dose (valeur choisie)
Empoussièrement « jardin »	20	500	25
Empoussièrement « intérieur »	10	250	25

Tableau 20 : Influence des paramètres « Empoussièrtements » sur la dose inhalation poussières

Les doses inhalation poussières induite à l'intérieur de la maison et à l'extérieur de la maison augment d'un **facteur 25**. La dose inhalation poussière totale augmente donc d'un **facteur 25**.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

7.2.3 Influence des paramètres de la dose externe

Utilisation d'un MSI de stériles en présence de couverture

La dose externe induite par le site au promeneur (ou à l'habitant sur site) a été estimée dans les cas où la couverture est toujours présente avec un massif semi infini (MSI) de stériles.

La sensibilité de ce paramètre ne peut pas être étudié ici car il dépend des activités des stériles et des résidus qui sont propres au site. De plus, le cas du massif semi infini de résidus est étudié dans le cas sans couverture.

C'est pourquoi l'influence du paramètre MSI de stériles ne sera pas traitée en étude de sensibilité.

Influence de la dalle fissurée

Il est considéré qu'une dalle fissurée n'apporte pas de variation notable à la dose externe par rapport à une dalle intacte.

Influence d'un premier étage

Il est considéré une maison avec un premier étage où se trouvent les chambres. En l'absence de 1^{er} étage l'exposition aux rayonnements gamma au RDC est donc plus grande.

Ainsi, la dose externe en présence ou non de couverture, augmente d'un facteur **1,24 pour les adultes et 1,45 pour les enfants** (car les enfants passent plus de temps au 1^{er} étage).

Influence de la hauteur de cave

Si l'on fait varier la hauteur de cave de 2 m à 1,5 m, la dose externe en présence ou non de couverture augmente d'un **facteur 1,05**.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

7.2.4 Influence des paramètres de la dose ingestion

Influence du régime alimentaire

Les rations alimentaires des différentes viandes peuvent évoluer, surtout à long terme. C'est pourquoi, on calcule l'influence d'une alimentation basée sur celle décrite dans le tableau 12 où les quantités de veau, de bœuf, d'ovin et de porc seraient transférées à la quantité de volailles soit 56,1 kg/ an pour le retraité et 37,6 Kg / an pour l'enfant de 2 à 7 ans.

Le ratio entre la dose ingestion avec ce nouveau régime et celle avec le régime du tableau 12 est de **1,01 pour l'enfant et le retraité.**

Influence de la provenance de l'eau

Sur les sites pour lesquels une contamination des eaux souterraines potentiellement exploitables est avérée ou jugée envisageable, l'étude d'impact du site sera complétée par l'impact associé à l'utilisation d'un puits ou d'un forage pour les besoins en eau domestique, en eau d'irrigation et en eau d'abreuvement des animaux. Ce calcul est propre au site et apparaîtra dans les notes dédiées aux sites concernés par ce paramètre.

7.2.5 Scénarios et temps de présence

La totalité des temps d'exposition utilisés dans les calculs est inférieur à 1 année. De manière enveloppe, il est possible de considérer pour chaque type d'individu que 100 % du temps de présence s'effectue sous l'influence du site. Ainsi le temps hors influence du site est réparti sur les autres temps de présence proportionnellement à ce qui avait été établi dans les tableaux 6 et 7.

Les nouveaux temps d'exposition pour le scénario de référence et le scénario de résidence sur stockage sont :

SGN	Type Doc	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Temps (h/an)	enfant 2 à 7 ans	retraité
Sommeil	4748	3702
Veille int. hors sommeil dont :	1978	3796
- loisirs	700	1594
- ménage	0	1167
- repas	639	778
- salle de bain	639	257
Extérieur dont :	761	1268
- transports	183	0
- jardinage	0	703
- promenade jardin	0	0
- Promenade	457	565
- pêche	0	0
- plage	0	0
- sports	122	0
Travail	1278	0
Total intérieur	6727	7498
Total extérieur - env-t site	2039	1268
Total extérieur - loin site	0	0
Total	8766	8766

Tableau 21 : Répartition des temps de présence pour le scénario de référence en étude de sensibilité

résidence sur site (h/an)	enfant 2 à 7 ans	retraité
Tps 1er étage	5794	3702
Tps RDC	2292	3693
Tps cave	122	103
Tpromenade	557	565
Tjardin	0	703
T ext site = Tprom + Tjardin	557	1268
Total	8766	8766

Tableau 22 : Répartition des temps de présence pour le scénario de résidence sur stockage en étude de sensibilité

Les conséquences sont données sous forme de ratio pour les groupes de référence « villages » et « habitants sur site » quelque soit le type de phase de surveillance, dans le tableau suivant.

Scénarios	Doses calculées	Ratio (Texpo_sensi/ Texpo_choisi)
Scénario de référence adultes	Dose externe (due au site)	1,03
	Dose inhalation due au radon	1,03
	Dose externe (due à l'irrigation)	1,03
	Dose ingestion	-
Scénario de référence enfants	Dose externe (due au site)	1,00
	Dose inhalation due au radon	1,00
	Dose externe (due à l'irrigation)	-
	Dose ingestion	-
Scénario altéré n°1 : Perte d'intégrité de la couverture et de la digue adultes	Dose externe (due au site)	1,03
	Dose inhalation due au radon	1,03
	Dose inhalation due aux poussières	1,03
	Dose externe (due à l'irrigation)	1,03
	Dose ingestion	-
Scénario altéré n°1 : Perte d'intégrité de la couverture et de la digue enfants	Dose externe (due au site)	1,00
	Dose inhalation due au radon	1,00
	Dose inhalation due aux poussières	1,00
	Dose externe (due à l'irrigation)	-
	Dose ingestion	-

Scénarios	Doses calculées	Ratio (Texpo_sensi/ Texpo choisi)
Scénario altéré n°2 : Résidence sur stockage adultes	Dose externe (due au site)	1,05
	Dose inhalation due au radon	1,03
	Dose inhalation due aux poussières	1,03
	Dose externe (due à l'irrigation)	1,03
	Dose ingestion	-
Scénario altéré n°2 : Résidence sur stockage enfants	Dose externe (due au site)	1,23
	Dose inhalation due au radon	1,22
	Dose inhalation due aux poussières	1,22
	Dose externe (due à l'irrigation)	-
	Dose ingestion	-

Tableau 23 : Ratio des doses induites par un temps d'exposition maximal par rapport aux doses évaluées selon méthode

L'utilisation d'un temps d'exposition « maximal » n'influe pas sur les doses aux enfants dans le cas du scénario de référence et du scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture. C'est pourquoi ces paramètres n'apparaissent pas dans les tableaux récapitulatifs correspondants aux enfants habitants proche du site, pour ces 2 scénarios.

7.3 SYNTHÈSE

Compte tenu des plages de valeur retenues, les facteurs correctifs devant être utilisés dans le calcul de conséquences radiologiques pour chacune des différentes voies d'exposition en prenant en compte chacune des incertitudes évoquées dans le paragraphe précédent sont présentés dans les tableaux suivants par scénario et groupe de référence.

7.3.1 Scénario de référence

7.3.1.1 Groupe de référence : Retraités vivant aux alentours du site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquibre_ext (villages)	1,07	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-
Régime alimentaire		-		1,01	
Temps d'exposition	1,03	-	1,03	-	1,03

Tableau 24 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités habitants aux alentours du site dans le scénario de référence

Remarque: la dose inhalation poussières est négligée dans le cas du scénario de référence, d'où l'absence de facteur correctif pour la dose inhalation poussières.

7.3.1.2 Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans vivant aux alentours du site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquibre_ext (villages)	1,11	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-
Régime alimentaire		-		1,01	

Tableau 25 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants habitants aux alentours du site dans le scénario de référence

Remarque : l'enfant n'est pas exposé au dépôt d'eau, d'où l'absence de facteur correctif pour la dose externe (dépôt eau).

7.3.1.3 Groupe de référence : Adultes du public entretenant le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-

Tableau 26 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les personnes entretenant le site dans le scénario de référence

Remarque : le temps d'exposition pour l'entretien du site n'est pas un paramètre de l'étude de sensibilité.

7.3.1.4 Groupe de référence : Retraités se promenant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-

Tableau 27 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités se promenant sur le site dans le scénario de référence

Remarque 1 : la dose inhalation poussières est négligée dans le cas du scénario de référence, d'où l'absence de facteur correctif pour la dose inhalation poussières.

Remarque 2 : le temps d'exposition pour la promenade sur le site n'est pas un paramètre de l'étude de sensibilité.

7.3.1.5 Groupe de référence : Enfants de 12 à 17 ans se promenant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-

Tableau 28 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants se promenant sur le site dans le scénario de référence

7.3.1.6 Groupe de référence : Travailleurs sur le site (enfants de 12 à 17 ans) et adultes

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-

Tableau 29 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les personnes travaillant sur le site dans le scénario de référence

Remarque 1 : les facteurs correctifs sont les mêmes que pour les promeneurs car le flux de radon est calculé de la même manière.

Remarque 2 : le temps d'exposition pour le temps de travail sur le site n'est pas un paramètre de l'étude de sensibilité.

7.3.1.7 Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (enfants et adultes)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,09	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,9	-	-	-	-

Tableau 30 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les personnes allant à la base de loisirs sur le site dans le scénario de référence

Remarque 1 : les facteurs correctifs sont les mêmes que pour les promeneurs car le flux de radon est calculé de la même manière.

Remarque 2 : le temps d'exposition pour la base de loisirs sur le site n'est pas un paramètre de l'étude de sensibilité.

7.3.2 Scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.1 Groupe de référence : Retraités vivant aux alentours du site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	1,07	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,31	-	-	-
Régime alimentaire		-		1,01	
Temps d'exposition	1,03	-	1,03	-	1,03

Tableau 31 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités habitant aux alentours du site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.2 Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans vivant aux alentours du site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	1,11	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,19	-	-	-
Régime alimentaire		-		1,01	

Tableau 32 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants habitant aux alentours du site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.3 Groupe de référence : Retraités se promenant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,31	-	-	-

Tableau 33 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités se promenant sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.4 Groupe de référence : Enfants de 12 à 17 ans se promenant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,14	-	-	-

Tableau 34 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants se promenant sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.5 Groupe de référence : Travailleurs sur le site (adultes du public)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,31	-	-	-

Tableau 35 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les adultes travaillant sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.6 Groupe de référence : Travailleurs sur le site (enfants de 12 à 17 ans)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,14	-	-	-

Tableau 36 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants travaillant sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.7 Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (adultes)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,31	-	-	-

Tableau 37 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les personnes allant à la base de loisirs sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

7.3.2.8 Groupe de référence : Base de loisirs sur le site (enfants)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Féquilibre_ext (villages)	-	-	-	-	-
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,2	-	-	-

Tableau 38 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les personnes allant à la base de loisirs sur le site dans le scénario de perte d'intégrité de la digue et de la couverture

Remarque : le facteur 2,2 d'augmentation de la dose inhalation poussières est une moyenne des facteurs obtenus pour les enfants de 2 à 17 ans.

7.3.3 Scénario de résidence sur stockage avec couverture

7.3.3.1 Groupe de référence : Retraités habitant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,14	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,59	-	-	-	-
Flux Rn relatif sortant dalle fissurée *	Part intérieure : 1,67 Part extérieure : 1	-	-	-	-
Taux renouvellement air cave	1,84	-	-	-	-
Hauteur cave	1,17	-	1,05	-	-
Régime alimentaire		-	-	1,01	
Temps d'exposition	1,03	-	1,05	-	1,03
Absence de 1 ^{er} étage	-	-	1,24	-	-

Tableau 39 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités habitant sur le site dans le scénario de résidence sur stockage avec couverture

* le coefficient global multiplicatif sera évalué au cas par cas dans les notes dédiées aux sites.

Remarque : la dose inhalation poussières est négligée dans le cas du scénario de résidence sur stockage avec couverture, d'où l'absence de facteur correctif pour la dose inhalation poussières.

7.3.3.2 Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans habitant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,14	-	-	-	-
Coefficient diffusion stériles	1,56	-	-	-	-
Flux Rn relatif sortant dalle fissurée	Part intérieure : 1,67 Part extérieure : 1	-	-	-	-
Taux renouvellement air cave	1,92	-	-	-	-
Hauteur cave	1,19	-	1,05	-	-
Régime alimentaire		-	-	1,01	
Temps d'exposition	1,22	-	1,23	-	-
Absence de 1 ^{er} étage	-	-	1,45	-	-

Tableau 40 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants habitant sur le site dans le scénario de résidence sur stockage avec couverture

7.3.4 Scénario de terrassement d'une route

7.3.4.1 Groupe de référence : Travailleurs sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	1,19	-	-	-

Tableau 41 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les travailleurs creusant sur le site dans le scénario de terrassement d'une route

Remarque : les doses ingestion et externe induite par le dépôt d'eau ne sont pas étudiées pour le travailleur de chantier.

7.3.5 Scénario de jeux d'enfants

7.3.5.1 Groupe de référence : Enfants de 7 à 12 ans jouant sur les tas excavés (sur le site)

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
FCD inhalation	-	2,21	-	-	-

Tableau 42 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants jouant sur le site dans le scénario de jeux d'enfants

7.3.6 Scénario de résidence sur stockage sans couverture

7.3.6.1 Groupe de référence : Retraités habitant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
Flux Rn relatif sortant dalle fissurée	Part intérieure : 1,67 Part extérieure : 1	-	-	-	-
Taux renouvellement air cave	1,71	-	-	-	-
Hauteur cave	1,24	-	1,05	-	-
Empoussièrément jardin	-	25	-	-	-
FCD inhalation	-	2,31	-	-	-
Régime alimentaire		-	-	1,01	
Temps d'exposition	1,03	1,03	1,05	-	1,03
Absence de 1 ^{er} étage	-	-	1,24	-	-

Tableau 43 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les retraités habitant sur le site dans le scénario de résidence sur stockage sans couverture

7.3.6.2 Groupe de référence : Enfants de 2 à 7 ans habitant sur le site

Doses \ Paramètres	Inhalation Radon	Inhalation poussières	Externe (site)	Ingestion	Externe (dépôt eau)
Facteur d'émanation résidus	5	-	-	-	-
Coefficient diffusion résidus	1,41	-	-	-	-
Flux Rn relatif sortant dalle fissurée	Part intérieure : 1,67 Part extérieure : 1	-	-	-	-
Taux renouvellement air cave	1,85	-	-	-	-
Hauteur cave	1,29	-	1,05	-	-
Empoussièrèment jardin	-	25	-	-	-
FCD inhalation	-	2,19	-	-	-
Régime alimentaire	-	-	-	1,01	-
Temps d'exposition	1,22	1,22	1,23	-	-
Absence de 1 ^{er} étage	-	-	1,45	-	-

Tableau 44 : Facteur correctif par voie d'exposition pour les enfants habitant sur le site dans le scénario de résidence sur stockage sans couverture



SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Page : 89 / 109

Les facteurs correctifs de ces tableaux appliqués aux résultats présentés dans les notes de calcul associées aux sites permettent ainsi d'avoir une évaluation du maximum d'exposition.

Il convient d'insister sur le fait que ces résultats correspondent à une situation qui présente une probabilité d'occurrence très faible et probablement nulle.

Rappelons en outre que les scénarios utilisés pour les calculs de dose s'appuient sur les scénarios préconisés par la doctrine [1] et [2], ces derniers ayant été adaptés aux spécificités de l'étude.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

8 CONCLUSION

Ce document présente la méthodologie appliquée dans les études d'impact de site de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium.

Plusieurs scénarios sont décrits :

- 1 scénario de référence ;
- 5 scénarios altérés :
 - Perte d'intégrité de la digue et de la couverture ;
 - Résidence sur stockage avec couverture ;
 - Chantier de terrassement d'une route à travers le stockage ;
 - Jeux d'enfants ;
 - Résidence sur stockage sans couverture.

Les doses étudiées sont :

- la dose inhalation due de radon ;
- la dose inhalation due aux poussières ;
- la dose externe due au site ;
- la dose ingestion ;
- la dose externe due à un dépôt suite à l'irrigation.

La méthode de calcul des différentes doses pour les différents scénarios et les données de base sont décrites.

Les hypothèses considérées sont le plus souvent enveloppes dans le sens où elles majorent les effets d'un ensemble de situations données. Pour ces scénarios d'évolution à long terme on considère la constance des caractéristiques de l'homme (sensibilité aux rayonnements, habitudes alimentaires, conditions de vie, connaissances générales, ...) sans prise en compte de progrès scientifiques dans les domaines technique et médical.

Il est à noter que chaque scénario altéré (long terme) présente une probabilité d'occurrence nulle ou extrêmement faible.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

9 REFERENCES

- [1] Doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerai d'uranium.
Groupe de travail du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement – Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR)
- [2] Doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerai d'uranium (commentaires sur la doctrine).
F. GOLDSCHMIDT, J.M. PERES.
Rapport IPSN/ DPRE / SERGD / 99-42
- [3] Méthode d'évaluation de l'impact des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium.
A.C. SERVANT, B. CESSAC.
Rapport IPSN/ DPRE / SERGD / 01-53
- [4] Catalogue Calcul
Intranet SGN
- [5] Spécifications physiques de CESAR Version 4.3
J.M. VIDAL
NT CEA/ SPRC/ LECy 98/308
- [6] Spécifications des données de base de CESAR Version 4.3
J.M. VIDAL
NT CEA/ SPRC/ LECy 00/305 (DR)
- [7] CCC-371 Origen 2.2
Oakridge National Laboratory
RSICC Computer Code Collection – Origen 2.2
- [8] IHM MERCURAD
Manuel Utilisateur
CEA/ DEN/ DM2S/ SERMA
- [9] Description des modèles du code COTRAM4 de calcul de coefficients de transfert moyens
Note technique IRSN/ DPEA/ SECRI/ 01-42
- [10] Manuel d'installation et guide utilisateur de l'application COTRAM4 sur PC
Note technique IRSN/ DPEA/ SECRI/ 01-028
- [11] Notices de référence pour le code COMODORE 2.0
ALTRAN_EILis_NAK_DT_07_0026B à 0030B
- [12] CIPR 65
Protection against Radon-222 at home and at work
ICRP, 1993

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- [13] Le Radon de l'environnement à l'homme
H. METIVIER, M.C. ROBE
Collection IPSN
- [14] Etude d'impact du site minier de l'Ecarpière.
Ph. GUETAT, M. MONTFORT, A. AMEUR.
Rapport CEA-DAM/ VAL INDSI RBC DET
- [15] Unattached fraction of short lived Radon decay products in indoor and outdoor environments.
An improved singl.10-screen method and results.
Porstendörfer, J. (1990)
Health Phys, vol. 58, pp.715-727
- [16] Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air.
Porstendörfer, J. (1994)
J. Aerosol Sci., vol. 25, n°2, pp.219-263
- [17] The equilibrium factor between radon and its daughters in the lower atmosphere.
Kojima, H. (1996)
Environment International, vol. 22, Suppl.1, pp.S187-S192
- [18] Radon-222 concentrations and decay-products equilibrium in dwellings and in open air.
Keller, G. and Folkerts, K., H. (1984)
Health Phys, vol. 47, pp.385-398
- [19] Measurement of radiological impact of environmental radon-²²² releases from heaps of solid wastes from the mineral industry.
Bernhard, S., Vauzelle, Y., Zettwoog, P. (1995)
International Conference on radioprotection and radioactive waste management in the mining and mineral industries, South Africa, pp.20-24
- [20] UNSCEAR (1993)
Ionising Radiation : sources and biological effects, New-York, USA
- [21] Le radon²²² et ses descendants à vie courte dans l'environnement atmosphérique : origine et méthodes de mesure
J. Charuau, V. Labed, M.C. Robé M.C
Revue de radioprotection, vol 31, n° 3, juillet septembre 1996
- [22] Analysis of radiation exposures on or near uranium mill tailings piles.
- [23] Particle Fallout and Dispersion in the Atmosphere
HAGE et coll.
Final report, SC-CR
2031 SANDIA CORPORATION, Albuquerque, N.M., 1966

SGN	Type Doc.	Activité	Cat MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- [24] Guide méthodologique pour la gestion des sites industriels potentiellement contaminés par des substances radioactives.
Oudiz, B. Cessac et collaborateurs
Guide IPSN version 0 mai 2001
- [25] CIBLEX : base de données des paramètres descriptif de la population française au voisinage d'un site pollué ADEME/IRSN
- [26] CIPR 66
Human respiratory tract model for radiological protection
- [27] Décret no 90-222 du 9 mars 1990 complétant le règlement général des industries extractives institué par le décret no 80-331 du 7 mai 1980, 1990
- [28] Arrêté du 1er septembre 2003
Modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants
Journal Officiel du jeudi 13 novembre 2003
- [29] CIPR 74
Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation
- [30] Federal Guidance n° 12 de l'U.S. Environmental Protection Agency
Eckerman et al, 1993.
- [31] NT 005511 00 0805 Rév.A
Etude des modèles de Doury et de Pasquill.
- [32] Rapport IRSN DPRE /SERGD / 03-19
Avis de l'IRSN sur l'évaluation par COGEMA de l'impact radiologique en 2001 du site minier du Bernardan (Jouac, Haute Vienne) – Septembre 2003.
- [33] Estimation des doses et des risques de leucémies associés
GRNC – Volume 4.
- [34] Annexe n°1 à la lettre ASN-Dép-DRD-0527-2008 du 30 septembre
- [35] BUM/DO/DQSE RT 07/062
Analyse de la tenue à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerai uranifères.
- [36] X-ray Mass Attenuation Coefficients - National Institute of Standards and Technology
- [37] Laboratory measurements of the radon gas diffusion coefficient for a fractured concrete sample and radon gas barrier systems
W. Z. DAOUD and K. J. RENKEN
In the 1999 International Radon Symposium, 14.0-14.12
Las Vegas, Nevada. AARST, 1999



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

- [38] Radon diffusion coefficients for aged residential concretes
ROGERS V.C ; NIELSON K. K. ; HOLT R.B.
Health physics 1995, vol. 68, n°6 pp. 832-834.
- [39] Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry,
NAZAROFF, W.W., et al., 1988, in Radon and Its Decay Products in Indoor Air,
W.W. NAZAROFF and A.V. NERO (editors), John WILEY & Sons, New York,
N.Y.
- [40] RFS II.2.f (version de 1991)



SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

10 ANNEXE 1: DESCRIPTION DES CODES DE CALCUL

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

10.1 LE CODE CESAR 4.38

Le code CESAR 4.38 (Code d'Evolution Simplifié Appliqué au Retraitement) est un code d'évolution développé par le CEA.

Il permet de calculer rapidement l'évolution en réacteur et hors réacteur des grandeurs physiques d'intérêt du combustible : bilan matière, activités (α , β et totale), puissances résiduelles (α , β , γ et totale), sources et spectres de rayonnements pénétrants ; ceci pour des chaînes d'évolution figées décrivant 46 noyaux lourds (du ^{224}Ra au ^{252}Cf), 208 produits de fission (du ^{72}Zn au $^{166\text{m}}\text{Ho}$) et 125 produits d'activation (du ^3H au ^{156}Gd) des impuretés de l'oxyde et des structures (gainés, grilles et embouts).

10.2 LE CODE ORIGEN 2.2

ORIGEN est un code d'évolution qui permet de calculer la décroissance et l'évolution des matières nucléaires.

ORIGEN utilise une méthode matricielle pour résoudre un système couplé, linéaire, de 1^{er} ordre dans les équations différentielles avec des coefficients constants.

ORIGEN2.2 intègre les mises à jour des réacteurs, sections efficaces, produits de fission, périodes de décroissance, émissions de photons. Il inclut des bibliothèques de burn-up standards pour les calculs PWR et BWR. De plus, le temps d'irradiation a été fixé de manière à ne pas dépasser 100 jours par pas, ce qui réduit la divergence de 10 % à 0.16%.

10.3 LE CODE DE CALCUL MERCURAD

Le code MERCURAD permet d'effectuer des calculs de débits d'équivalent de dose γ en 3D.

Il est basé sur le code MERCURE. Celui-ci traite le transport des photons dans des géométries à 3 dimensions. Il utilise la méthode d'atténuation en ligne droite avec intégration de noyaux ponctuels par une méthode de Mont.10-Carlo.

Le code permet de calculer des grandeurs correspondant au flux sans choc et/ou au flux total (flux sans choc + flux diffusé dans la matière) en un ou plusieurs points pour une ou plusieurs sources d'émission gamma.

Le rayonnement gamma diffusé dans les milieux traversés est pris en compte par l'intermédiaire de facteurs d'accumulation (Build-up Factor) de milieux multicouches.

La grandeur calculée est le débit d'équivalent de dose ambient $H^*(10)$ ou le débit d'équivalent de dose efficace Antéro-Postérieur.

L'intégration par la méthode de Monte Carlo est réalisée à partir de maillages définis sur les volumes sources.



SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

11 ANNEXE 2 : DESCRIPTION DES MODELES GAUSSIENS

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

11.1 MODELES GAUSSIENS

Il existe trois méthodes de résolution de l'équation de la diffusion turbulente, qui sont par ordre croissant de complexité :

- le modèle gaussien, qui suppose que la répartition du polluant suit une loi gaussienne dont les écarts-types dépendent de la distance à la source ou du temps écoulé depuis l'émission (appelé temps de transfert) ainsi que des caractéristiques de la structure de l'atmosphère.
- le modèle intégral, qui tient compte des effets de gravité sur les gaz plus denses que l'air et se base sur une équation de la dispersion atmosphérique dégénérée.
- le modèle tridimensionnel, qui tient compte des phénomènes intervenant sur la dispersion comme les turbulences atmosphériques, du relief et des obstacles du site.

Les modèles gaussiens sont les modèles les plus simples et les plus largement utilisés dans le monde. Ils sont bien adaptés dans les cas suivants :

- source ponctuelle,
- rejet de gaz passifs,
- conditions météorologiques non extrêmes,
- champ lointain (entre 500 m et 30 km de la source),
- pas de relief ou d'obstacle trop marqués,
- vent de vitesse non nulle et de direction constante.

Deux modèles gaussiens existent : bouffée et panache dont les expressions générales sont présentées ci-après.

La figure A1 donne une représentation schématique des deux modèles.

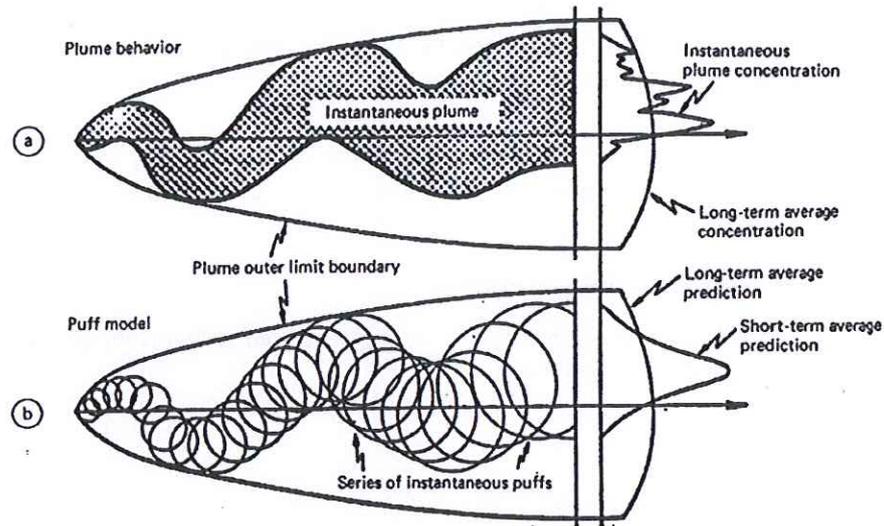


Figure A1 : schéma du modèle panache (en haut) et du modèle à bouffées (en bas)

Des facteurs correctifs peuvent être apportés à ces modèles pour tenir compte de différents phénomènes comme la décroissance radioactive, les dépôts par temps sec et humide, la prise en compte de rugosités différentes...

11.1.1 Modèle bouffée gaussienne

Ce modèle correspond à une émission ponctuelle instantanée dont l'expression générale est la suivante :

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2.\pi)^{3/2} . \sigma_x . \sigma_y . \sigma_z} . e^{-\left[\frac{(x-x_0-\bar{u}.t)^2}{2.\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2.\sigma_y^2} \right]} \left[e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2.\sigma_z^2}} + \alpha . e^{-\frac{(z+z_0)^2}{2.\sigma_z^2}} \right] \quad (1)$$

Avec :

- $\chi(x,y,z,t)$: concentration du polluant dans la bouffée au point (x,y,z) à l'instant t (Bq.m⁻³),
- Q : quantité de polluant relarguée (Bq),
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: écarts-types de la distribution gaussienne (m),
- x, y, z : coordonnées du point où est calculée la concentration (m),
- x_0, y_0, z_0 : coordonnées du point de rejet (m) avec z_0 =hauteur de rejet réelle,
- \bar{u} : vitesse moyenne horizontale du vent selon l'axe des x (m.s⁻¹), le vent est supposé confondu avec cette direction,
- α : coefficient de réflexion au sol :
 $\alpha = 0$: absorption totale,

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

$\alpha = 1$: réflexion totale.

La méthode de DOURY, décrite au § 2.1, utilise cette formulation. Sa particularité réside dans la détermination des écarts-types.

Remarque : cette formulation n'est pas restrictive à des activités (Bq) mais peut également être utilisée pour des masses (kg).

11.1.2 Modèle panache gaussien

Ce modèle correspond à une émission ponctuelle prolongée (régime permanent) et son expression est la suivante :

$$\chi(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{(y-y_0)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right]} \cdot \left[e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} + \alpha \cdot e^{-\frac{(z+z_0)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \right] \quad (2)$$

Avec :

- $\chi(x, y, z)$: concentration du polluant au point x (Bq.m⁻³),
- \dot{Q} : débit de polluant relargué (Bq.s⁻¹),
- σ_y, σ_z : écarts-types de la distribution gaussienne (m),
- x, y, z : coordonnées du point où est calculée la concentration (m),
- x_0, y_0, z_0 : coordonnées du point de rejet (m) avec z_0 =hauteur de rejet réelle,
- \bar{u} : vitesse moyenne horizontale du vent selon l'axe des x (m.s⁻¹), le vent est supposé confondu avec cette direction,
- α : coefficient de réflexion au sol :
 - $\alpha = 0$: absorption totale,
 - $\alpha = 1$: réflexion totale.

La méthode de PASQUILL décrite au § 2.2. utilise cette formulation. Sa particularité réside dans la détermination des écarts-types.

11.1.3 Correspondance entre les modèles

Le modèle à bouffées a été créé pour décrire les rejets instantanés ou transitoires (de quelques minutes à quelques heures), alors que le modèle panache est plus adapté en régime permanent. Cependant il peut être utilisé aussi pour décrire les régimes transitoires.

Si on intègre l'expression du modèle à bouffées dans le temps, on retrouve l'expression du modèle panache. Ce qui signifie qu'il est possible de décrire un panache à l'aide d'un modèle à bouffées. Le panache étant constitué d'une succession de bouffées émises à pas constants.

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

De l'équation du modèle à bouffées, on a la concentration en polluant, pour un rejet unitaire au niveau du sol¹, sous la forme :

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \bar{u} \cdot t)^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4)$$

Si on intègre cette expression dans le temps, on obtient :

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t) \cdot dt = \int_{t=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \bar{u} \cdot t)^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \cdot dt$$

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t) \cdot dt = \left[\frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \int_{t=-\infty}^{+\infty} \left[\exp\left(\frac{-(x - \bar{u} \cdot t)^2}{2\sigma_x^2}\right) \right] \cdot dt$$

On fait le changement de variable suivant :

$$\begin{aligned} \xi &= x - \bar{u} \cdot t \\ d\xi &= -\bar{u} \cdot dt \\ dt &= -\frac{1}{\bar{u}} d\xi \end{aligned}$$

On remplace dans l'équation précédente :

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t) \cdot dt = \left[\frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \int_{t=-\infty}^{+\infty} -\frac{1}{\bar{u}} \left[\exp\left(\frac{-\xi^2}{2\sigma_x^2}\right) \right] \cdot d\xi$$

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t) \cdot dt = \left[\frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \frac{1}{\bar{u}} \right] \int_{t=-\infty}^{+\infty} - \left[\exp\left(\frac{\left(\frac{-\xi^2}{2}\right)}{\sigma_x^2}\right) \right] \cdot d\xi$$

Sachant que :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{X^2}{a^2}\right) dX = 1,$$

¹ Au point de coordonnées : (0 ; 0 ; 0)

SGN	Type Doc.	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

On obtient :

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t).dt = \left[\frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \frac{1}{\bar{u}} \right] \cdot [\sqrt{2\pi} \sigma_x]$$

$$\int_{t=-\infty}^{+\infty} \chi(x, y, z, t).dt = \frac{1}{(2\pi) \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (5)$$

A noter que ce résultat peut être obtenu également en négligeant la dispersion longitudinale devant le transport dans l'équation (4) (détails en annexe C).

11.1.4 Coefficient de transfert Atmosphérique

Le Coefficient de Transfert Atmosphérique (CTA exprimé en $s.m^{-3}$) caractérise la dispersion. C'est en quelque sorte une fonction de transfert entre un signal d'entrée et un signal de sortie. Ce CTA est défini comme le rapport de la concentration intégrée sur le temps de passage sur l'intégrale de la fonction source ou quantité totale émise pendant le même temps.

Le CTA se définit par l'égalité suivante :

$$CTA = \frac{\int \chi \cdot dt}{\int Q \cdot dt}$$

- Dans le cas d'une bouffée gaussienne, le CTA s'écrit comme le rapport de l'activité volumique intégrée en un point ($Bq.s.m^{-3}$) sur la quantité totale relarguée (Bq) :

$$CTA = \frac{AVI}{Q}$$

- Dans le cas d'un régime permanent, le CTA s'écrit comme le rapport de l'activité volumique instantanée en un point (constante par définition) ($Bq.m^{-3}$) sur le débit de rejet ($Bq.s^{-1}$):

$$CTA = \frac{AV}{\dot{Q}}$$

SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

11.2 DESCRIPTION DES MODELES DE DOURY ET DE PASQUILL

11.2.1 Modèle de DOURY

11.2.1.1 Généralités

Le modèle de DOURY (CEA) est basé sur une formulation bouffée gaussienne, présentée au § 1.1. Ce modèle est, depuis l'origine, plus spécifiquement dédié à décrire les effets d'une bouffée de pollution (rejet instantané) et non un panache continu. Cependant, la méthode de DOURY permet de discrétiser toute émission réelle par une succession de bouffées individuelles dont la diffusion est fonction de la durée de transfert entre le point d'émission et le point d'observation.

Ce modèle, quasiment exclusivement utilisé en France et principalement dans l'industrie nucléaire, a été développé pour pallier aux limitations du modèle de PASQUILL en vents faibles.

11.2.1.2 Stabilité atmosphérique

Le modèle de DOURY comprend 2 classes de stabilité notées DN (Diffusion Normale) et DF (Diffusion Faible) correspondant respectivement à des conditions favorables et défavorables de la dispersion. Le choix entre ces deux classes de stabilité s'effectue selon la valeur du gradient de température verticale $\frac{\partial T}{\partial z}$ de la manière suivante :

- Diffusion Normale : $\frac{\partial T}{\partial z} < -0,5 \text{ °C} / 100 \text{ m}$
- Diffusion Faible : $\frac{\partial T}{\partial z} > -0,5 \text{ °C} / 100 \text{ m}$

Cette valeur de $-0,5 \text{ °C} / 100 \text{ m}$ correspond à la valeur du gradient thermique adiabatique de l'air saturée en eau. Pour ces deux classes de stabilité, les écarts-types de la distribution gaussienne sont différents, comme indiqué au paragraphe suivant.

11.2.1.3 Ecarts-types de DOURY

Les écarts-types de DOURY sont donnés en fonction du temps de transfert (temps écoulé depuis l'émission). Ces écarts-types sont directement extraits d'expérimentations françaises et étrangères synthétisées par SANDIA CORPORATION en 1966 [31]. A partir de ces expériences, les formulations suivantes ont été utilisées pour la définition des écarts-types de diffusion horizontale et verticale :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_h = (A_h \cdot t)^{K_h}$$

$$\sigma_z = (A_z \cdot t)^{K_z}$$

Avec :

- A_h, A_z : paramètres de diffusion horizontale et verticale ($\text{m}^{1/K} \cdot \text{s}^{-1}$),
- K_h, K_z : exposants de diffusion horizontale et verticale (sans unité),
- t : temps de transfert (s).



SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

Lorsque la vitesse du vent est constante (ce qui est une hypothèse), le temps de transfert est directement proportionnel à la distance d'éloignement de la source : $t = x / u$.

11.2.2 Modèle de PASQUILL

11.2.2.1 Généralités

Le modèle de PASQUILL, basé sur une formulation panache gaussien (équation (2)), est certainement le modèle gaussien le plus utilisé à travers le monde. PASQUILL a commencé à développer cette méthode à la fin des années 50 et depuis beaucoup d'auteurs se sont inspirés de ses travaux pour améliorer ou compléter cette méthode. Parmi ces auteurs, qui parfois ont associé leur nom à celui de PASQUILL, on peut citer d'après [31] GIFFORD, TURNER, SMITH, VOGT, SINGER, Mc ELROY, HOSKER, SUTTON, ...

L'équation (2) du modèle panache gaussien n'est rigoureusement valable qu'en régime permanent. Elle donne la concentration en un point de l'espace donné pour un débit de rejet constant. Comme l'ont indiqué certains auteurs (PASQUILL, 1961), cette formulation reste valable même dans le cas où la durée d'émission est faible devant la durée de dispersion (si toutefois le vent n'est pas trop faible).

11.2.2.2 Ecarts- types de PASQUILL

Les écarts-types de PASQUILL dépendent de la distance à la source. Ils ont été déterminés expérimentalement à partir de la campagne de mesure de "Prairie Grass" en Grande Bretagne en 1960. Ils correspondent aux éléments météorologiques observés en Grande Bretagne, en terrain plat et peu rugueux (rugosité de l'ordre de 3 cm).

Pour chacune des classes de stabilité, des courbes d'écarts- types de la dispersion ont été établies en fonction de la distance à la source. Différentes formulations analytiques ont été proposées, elles sont de la forme :

$$\sigma_y \text{ ou } \sigma_z = a.x^b + c \quad (\sigma_y, \sigma_z \text{ et } x \text{ sont exprimés en km})$$

Remarque : les valeurs des coefficients des écarts-types de Doury et de Pasquill sont données dans le document [31].



SGN	Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision	REF
	NT	100350	00	0001	C	
CLIENT						

12 ANNEXE 3: COEFFICIENTS DE TRANSFERT AUX CULTURES

12.1 CARACTERISTIQUES DU MILIEU RECEPTEUR

Charge de matière en suspension dans l'eau de la rivière (kg/m ³)	3,70.10 ⁻²
Débits d'irrigation (m ³ .s ⁻¹ .m ⁻²)	1,60.10 ⁻⁸
Flux de carbone moyen provenant du sol (kg.m ⁻² .an ⁻¹)	5,00.10 ⁻¹
Fraction du flux carboné provenant du sol participant à la photosynthèse (-)	2,00.10 ⁻¹

Tableau A1 : Caractéristiques du milieu récepteur

12.2 CARACTERISTIQUES DES VEGETAUX

	Rapport captation sèche	Rapport captation humide	Temps de Croissance (s)	Profondeur de l'horizon racinaire (m)
Foin	9,00.10 ⁻¹	1,00.10 ⁻¹	3,63.10 ⁶	5,00.10 ⁻²
Herbe	7,00.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻¹	3,63.10 ⁶	5,00.10 ⁻²
Maïs	9,00.10 ⁻¹	1,00.10 ⁻¹	5,62.10 ⁶	3,00.10 ⁻¹
Céréales	9,00.10 ⁻¹	1,00.10 ⁻¹	5,62.10 ⁶	3,00.10 ⁻¹
Légume racine	7,00.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻¹	1,30.10 ⁷	3,00.10 ⁻¹
Fruits	9,07.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻³	1,56.10 ⁷	3,00.10 ⁻¹
Légume fruit	5,00.10 ⁻¹	5,00.10 ⁻¹	1,56.10 ⁷	3,00.10 ⁻¹
Légume feuille	5,00.10 ⁻¹	5,00.10 ⁻¹	3,46.10 ⁶	3,00.10 ⁻¹

	Rendement Cultural (kg/m ²)	Fraction exogène	Durée conso Végétal (mois)	Durée de Stockage (s)
Foin	1,50	0,00	12	1,30.10 ⁷
Herbe	1,50	0,00	12	0,00
Maïs	5,00	0,00	12	7,89.10 ⁶
Céréales	5,00.10 ⁻¹	0,00	12	0,00
Légume racine	3,00	0,00	12	0,00
Fruits	2,00	0,00	12	0,00
Légume fruit	2,00	0,00	12	0,00
Légume feuille	1,50	0,00	12	0,00

Tableau A2 : Caractéristiques des végétaux utilisés pour le calcul de la dose ingestion

12.3 FACTEURS DE TRANSFERT SOL/ PLANTE POUR LES REJETS LIQUIDES

Radio - nucléides	Foin	Herbe	Mais	Céréales	Légume racine	Fruits	Légume fruit	Légume feuille
H-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be-10	4,74.10 ⁻⁴							
C-14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne-23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl-36	1,80.10 ¹							
Ar-37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ar-41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca-41	4,00.10 ⁻²							
Cr-51	3,00.10 ⁻⁴	3,00.10 ⁻²	3,00.10 ⁻²	3,00.10 ⁻⁴				
Mn-54	4,90.10 ⁻¹	4,90.10 ⁻¹	2,60.10 ⁻¹	2,60.10 ⁻¹	1,50.10 ⁻²	4,80.10 ⁻²	4,80.10 ⁻²	4,10.10 ⁻²
Fe-55	4,00.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻⁴	3,00.10 ⁻⁴	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,00.10 ⁻⁴
Co-57	2,20.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁴	3,20.10 ⁻³	3,20.10 ⁻³	1,30.10 ⁻²	7,50.10 ⁻³	7,50.10 ⁻³	1,70.10 ⁻²
Co-58	2,20.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁴	3,20.10 ⁻³	3,20.10 ⁻³	1,30.10 ⁻²	7,50.10 ⁻³	7,50.10 ⁻³	1,70.10 ⁻²
Co-60	2,20.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁴	3,20.10 ⁻³	3,20.10 ⁻³	1,30.10 ⁻²	7,50.10 ⁻³	7,50.10 ⁻³	1,70.10 ⁻²
Ni-59	3,70.10 ⁻²	3,70.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²
Ni-63	3,70.10 ⁻²	3,70.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²
Zn-65	1,10	1,10	1,10	1,10	7,40.10 ⁻²	1,80	1,80	2,80
Se-75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,30	1,30	1,00
Se-79	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,30	1,30	1,00
Br-82	2,00.10 ⁻²							
Kr-85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kr-85m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kr-83m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kr-87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kr-88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rb-87	1,00.10 ⁻¹	1,30.10 ⁻¹	1,30.10 ⁻¹	1,00.10 ⁻¹				
Sr-89	2,20.10 ⁻¹	2,20.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	6,00.10 ⁻³	6,00.10 ⁻³	2,10.10 ⁻¹
Sr-90	2,20.10 ⁻¹	2,20.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	6,00.10 ⁻³	6,00.10 ⁻³	2,10.10 ⁻¹
Sr-90+ Y-90	2,20.10 ⁻¹	2,20.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	1,10.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	6,00.10 ⁻³	6,00.10 ⁻³	2,10.10 ⁻¹
Y-91	1,00.10 ⁻²							
Mo-93	1,00.10 ⁻¹							
Zr-93	1,00.10 ⁻⁴	5,00.10 ⁻³	5,00.10 ⁻³	1,00.10 ⁻⁴				
Zr-95	1,00.10 ⁻⁴	5,00.10 ⁻³	5,00.10 ⁻³	1,00.10 ⁻⁴				
Nb-94	1,00.10 ⁻²							



SGN

Type Doc	Activité	Cat.MT	N° Ordre	Révision
NT	100350	00	0001	C

REF

CLIENT

Radio - nucleides	Foin	Herbe	Mais	Céréales	Légume racine	Fruits	Légume fruit	Légume feuille
Nb-95	1,00.10 ⁻²							
Tc99	3,70	3,70	8,30.10 ⁻¹	8,30.10 ⁻¹	9,60.10 ⁻²	1,10	1,10	3,00.10 ¹
Ru-103	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	4,30.10 ⁻³	4,30.10 ⁻³	1,00.10 ⁻²	6,70.10 ⁻²	6,70.10 ⁻²	2,40.10 ⁻²
Ru-106 +Rh-106	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	4,30.10 ⁻³	4,30.10 ⁻³	1,00.10 ⁻²	6,70.10 ⁻²	6,70.10 ⁻²	2,40.10 ⁻²
Pd-107	5,00.10 ¹							
Ag-110m	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	1,20.10 ⁻⁴	4,80.10 ⁻⁵	4,80.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵
Cd-113m	3,00.10 ⁻¹							
Sn-121	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	2,50.10 ⁻³	2,50.10 ⁻³	1,00.10 ⁻¹
Sn-121m	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	2,50.10 ⁻³	2,50.10 ⁻³	1,00.10 ⁻¹
Sn-126	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	2,00.10 ⁻¹	6,00.10 ⁻²	2,50.10 ⁻³	2,50.10 ⁻³	1,00.10 ⁻¹
Sb-124	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	5,00.10 ⁻⁵	4,80.10 ⁻⁶	4,80.10 ⁻⁶	1,00.10 ⁻⁵
Sb-125	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	5,00.10 ⁻⁵	4,80.10 ⁻⁶	4,80.10 ⁻⁶	1,00.10 ⁻⁵
Sb-126	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻²	5,00.10 ⁻⁵	4,80.10 ⁻⁶	4,80.10 ⁻⁶	1,00.10 ⁻⁵
Te-125m	5,00.10 ⁻³	5,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	4,00.10 ⁻⁴	5,00.10 ⁻¹	5,00.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻³
Te-127	5,00.10 ⁻³	5,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	4,00.10 ⁻⁴	5,00.10 ⁻¹	5,00.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻³
Te-127m	5,00.10 ⁻³	5,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³	4,00.10 ⁻⁴	5,00.10 ⁻¹	5,00.10 ⁻¹	3,00.10 ⁻³
I-125	3,40.10 ⁻⁴	3,40.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻²					
I-129	3,40.10 ⁻⁴	3,40.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻²					
I-131	3,40.10 ⁻⁴	3,40.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻²					
I-133	3,40.10 ⁻⁴	3,40.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻²					
Xe-131m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xe-133	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xe-133m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xe-135	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xe-135m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cs-134	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	1,60.10 ⁻²	6,90.10 ⁻³	6,90.10 ⁻³	1,60.10 ⁻²
Cs-135	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	1,60.10 ⁻²	6,90.10 ⁻³	6,90.10 ⁻³	1,60.10 ⁻²
Cs-137 +Ba-137m	2,60.10 ⁻²	2,60.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	2,20.10 ⁻²	1,60.10 ⁻²	6,90.10 ⁻³	6,90.10 ⁻³	1,60.10 ⁻²
Ce-144 +Pr-144	1,00.10 ⁻³	2,00.10 ⁻²	2,00.10 ⁻²	1,00.10 ⁻³				
Pm-147	3,00.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³				
Sm-151	2,50.10 ⁻³							
Eu-152	3,00.10 ⁻³							
Eu-154	3,00.10 ⁻³							
Eu-155	3,00.10 ⁻³							
Hg-203	1,20	1,20	3,00.10 ⁻¹					

Radio - nucléides	Foin	Herbe	Mais	Céréales	Légume racine	Fruits	Légume fruit	Légume feuille
Tl-208	2,50.10 ⁻¹							
Bi-212	2,10.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻³	4,00.10 ⁻³	2,70.10 ⁻³	6,80.10 ⁻²	6,80.10 ⁻²	8,00.10 ⁻⁴
Pb-210	2,10.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻³	4,00.10 ⁻³	2,70.10 ⁻³	6,80.10 ⁻²	6,80.10 ⁻²	8,00.10 ⁻⁴
Po-210	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	1,30.10 ⁻³	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴
Po-216	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	1,30.10 ⁻³	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴
Rn-220	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ra-226	8,00.10 ⁻³	8,00.10 ⁻³	6,60.10 ⁻⁴	6,60.10 ⁻⁴	2,50.10 ⁻³	1,10.10 ⁻²	1,10.10 ⁻²	3,90.10 ⁻³
Ac-227	1,00.10 ⁻³							
Th-228	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,90.10 ⁻⁵	1,90.10 ⁻⁵	2,50.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	1,40.10 ⁻⁴
Th-234	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,90.10 ⁻⁵	1,90.10 ⁻⁵	2,50.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	1,40.10 ⁻⁴
Th-230	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,90.10 ⁻⁵	1,90.10 ⁻⁵	2,50.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	3,00.10 ⁻⁵	1,40.10 ⁻⁴
U-232	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
U-233	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
U-234	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
U-235	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
U-236	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
U-238	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	1,10.10 ⁻³	2,00.10 ⁻³	9,00.10 ⁻²	9,00.10 ⁻²	6,60.10 ⁻⁴
Pa-233	4,00.10 ⁻²	2,50.10 ⁻³	2,50.10 ⁻³	4,00.10 ⁻²				
Pa-234	4,00.10 ⁻²	2,50.10 ⁻³	2,50.10 ⁻³	4,00.10 ⁻²				
Np-237	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	2,30.10 ⁻³	1,50.10 ⁻³	4,80.10 ⁻³	4,80.10 ⁻³	3,00.10 ⁻³
Pu-236	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Pu-238	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Pu-239	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Pu-240	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Pu-241	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Pu-242	1,00.10 ⁻⁴	1,00.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁵	2,20.10 ⁻⁵	4,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵	5,80.10 ⁻⁶
Am-241	1,40.10 ⁻⁴	1,40.10 ⁻⁴	5,10.10 ⁻⁵	5,10.10 ⁻⁵	8,40.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	5,30.10 ⁻⁵
Am-242	1,40.10 ⁻⁴	1,40.10 ⁻⁴	5,10.10 ⁻⁵	5,10.10 ⁻⁵	8,40.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	5,30.10 ⁻⁵
Am-242m	1,40.10 ⁻⁴	1,40.10 ⁻⁴	5,10.10 ⁻⁵	5,10.10 ⁻⁵	8,40.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	5,30.10 ⁻⁵
Am-243	1,40.10 ⁻⁴	1,40.10 ⁻⁴	5,10.10 ⁻⁵	5,10.10 ⁻⁵	8,40.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	9,80.10 ⁻⁵	5,30.10 ⁻⁵
Cm-242	7,10.10 ⁻⁵	7,10.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	6,20.10 ⁻⁵
Cm-243	7,10.10 ⁻⁵	7,10.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	6,20.10 ⁻⁵
Cm-244	7,10.10 ⁻⁵	7,10.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	6,20.10 ⁻⁵
Cm-245	7,10.10 ⁻⁵	7,10.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	6,20.10 ⁻⁵
Cm-246	7,10.10 ⁻⁵	7,10.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	1,90.10 ⁻⁴	6,20.10 ⁻⁵

Tableau A3 : Facteurs de transfert sol/ plante par radioélément, utilisés pour le calcul de la dose ingestion pour les rejets liquides