

Etude d'impact de l'installation Cyceron

Evaluation de l'impact des rejets radioactifs dans l'atmosphère liés au fonctionnement normal et en situation accidentelle de l'installation sur l'environnement et le public

Campus Jules Horowitz
Boulevard Henri Becquerel
Caen

Table des matières

1. Impact des rejets en situation normale	2
1.1. Synthèse des résultats.....	2
1.2. La confiance à porter aux résultats	2
1.3. Les résultats pour les « personnes représentatives »	4
2. Impact de rejets en cas d'accident.....	9
2.1. Synthèse des résultats en situation d'accident.....	9
2.2. Confiance à porter aux résultats	11
2.3. Examen de cas de « personnes représentatives »	11
3. Les modèles de transferts atmosphériques utilisés	12
3.1. Le modèle pour les rejets permanents :.....	12
3.2. Le modèle pour les rejets accidentels	14
3.3. Le choix d'un modèle gaussien.....	15
3.4. Un test pratique du modèle de rejet accidentel	17
Annexe QUELQUES DOCUMENTS CONSULTÉS.....	18

1. Impact des rejets en situation normale

1.1. Synthèse des résultats

L'étude a été menée au moyen du modèle décrit au §3.1 ci-dessous. Les paramètres utilisés dans ce modèle y sont détaillés. Son choix a été précédé d'une analyse approfondie des domaines de validités de différents modèles.

Les résultats, exprimés en dose efficace annuelle par emplacement, sont synthétisés sur la carte de la page suivante. Elle est établie pour un rejet annuel, régulièrement réparti dans la durée, de 575 GBq de carbone 11, de 150 GBq de fluor 18 et de 25 GBq d'oxygène 15.

Il y apparaît qu'en aucun emplacement ouvert aux personnes de la population la limite réglementaire posée à l'article R1333-11 du code de la santé publique ne peut être atteinte. Le respect de la limite de 1 mSv par an en dose efficace assure aussi le respect des limites en doses équivalentes spécifiées pour des parties du corps car l'exposition est homogène.

Le respect de cette limite est garanti avec de bonnes marges de sécurité. En effet la précision du modèle utilisée est admise pour être meilleure qu'un facteur 10. On note qu'aucune partie de la population n'approche de 0,1 mSv dans le résultat. Par ailleurs le modèle a été utilisé en plaçant tous les curseurs dans une position raisonnablement pénalisante, la marge de sécurité vis-à-vis de la limite est donc très supérieure à celle qui vient d'être évoquée.

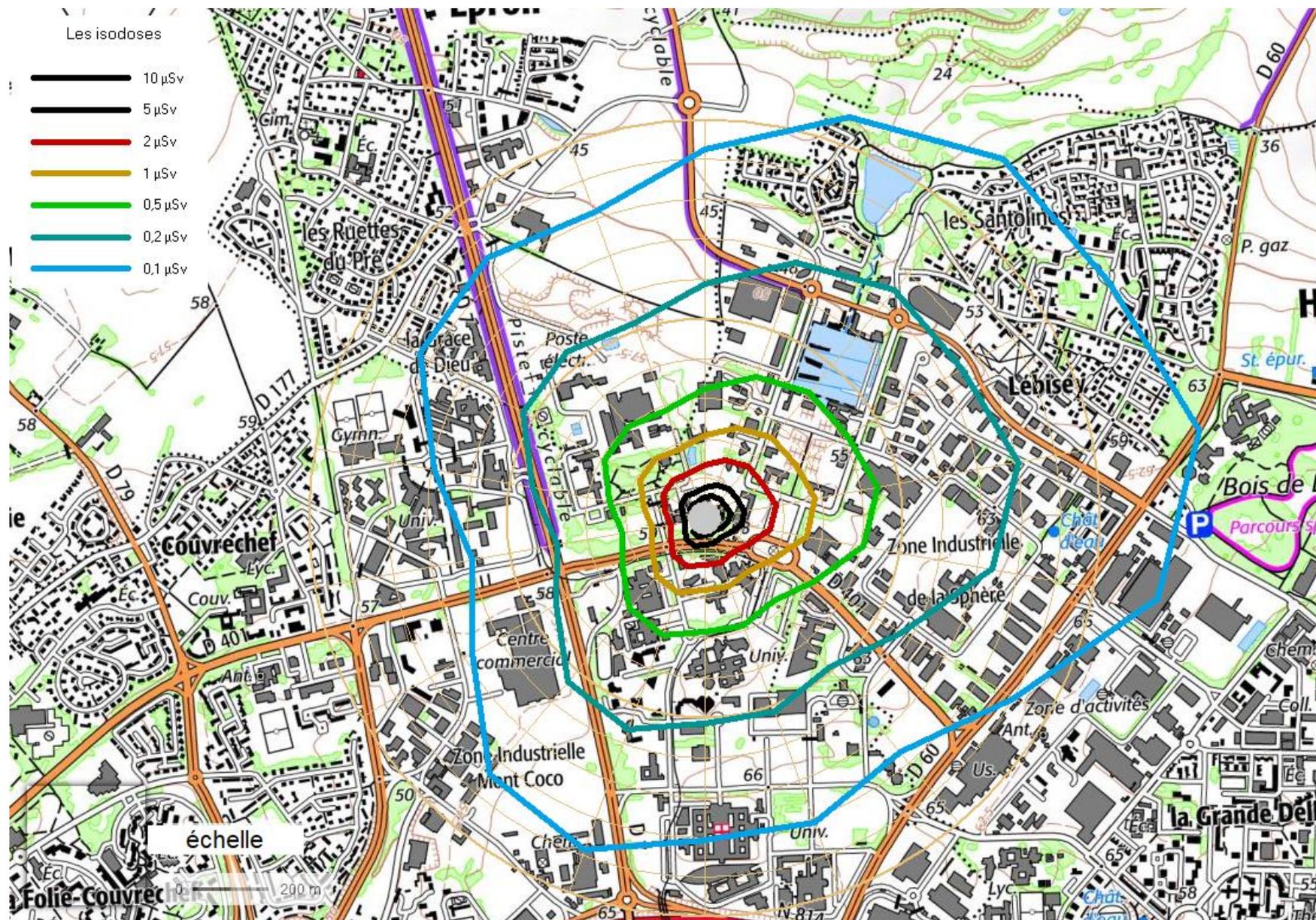
En deçà de la limite réglementaire, un indicateur mérite d'être considéré. Il s'agit du repère qui figure à l'annexe VII de la directive 2013/59/Euratom (« critères d'exemption et de libération ») paragraphe 3-e : « *Aux fins d'exemption de l'obligation de notification ou aux fins de libération (...) pour les radionucléides artificiels : la dose efficace pouvant être reçue par une personne du public, en raison de la pratique faisant l'objet d'une exemption est de l'ordre de 10 µSv ou moins par an* ». Ce critère se trouve être respecté en tout point où des personnes de la population séjournent pour ce qui concerne les rejets permanents.

Conformément à l'article R1333-23 des « personnes représentatives » ont été identifiées. Elles font l'objet du paragraphe suivant. Pour ces personnes représentatives, le constat général du respect des limites réglementaires est confirmé. Les résultats sont explicités sous la forme des différentes composantes de la dose annuelle. Un moyen d'apprécier la sensibilité à la distance est joint, sous la forme de la courbe montrant la variation de la dose annuelle en fonction de la distance, dans l'azimut où se trouve la personne représentative.

1.2. La confiance à porter aux résultats

L'analyse d'un événement réel, développée au §3.4, permet de confirmer la précision suffisante du modèle adopté.

Le modèle utilisé n'est pas conçu pour évaluer l'impact au voisinage immédiat du point source (voir §3.3). Le voisinage immédiat de la source est le domaine clos sous gardiennage du campus Jules Horowitz, où des dispositifs de surveillance permettent de connaître la réalité de l'exposition.



L'incertitude en fonction de la distance est directement liée à l'incertitude attachée au résultat pour le calcul à une distance précisée. En pratique, il est vain de vouloir distinguer deux points séparés d'une vingtaine de mètres (voir §3.3).

Les rejets sont réalisés par l'intermédiaire de trois cheminées situées à une dizaine de mètres l'une de l'autre. Vu d'un point éloigné, ceci est équivalent à l'attribution d'une surface à la source. Le rejet par une source surfacique est équivalent à un rejet par une source ponctuelle située en amont du vent de telle sorte que le nuage issu de la diffusion ait les dimensions de cette source. Par exemple, avec un vent de 5 m/s, pour un cercle de 5 m de rayon, cela serait équivalent à un éloignement de la source de 80 mètres du point d'impact. Cette équivalence à un éloignement supplémentaire entre la source et le point d'impact n'a pas été retenue dans la présente étude, ce qui va dans le sens de la construction de la marge de sécurité.

En Europe occidentale, la situation de « diffusion normale » est largement la plus courante. En l'absence de données météorologiques quantitatives sur ce point, de manière pénalisante, les situations de diffusion normale sont limitées à 50 % lors de leurs combinaisons avec les situations de « diffusion faible ».

1.3. Les résultats pour les « personnes représentatives »

Le secteur d'étude est un cercle d'un kilomètre autour de Cyceron. Il est matérialisé sur la carte de la page précédente par des cercles de distance (tous le 100 m) et des droites d'azimut (tous les 20° d'angle) de couleur bistre.

Sur cette même carte, les courbes isodoses appellent l'attention sur les points sensibles.

Ces doses présentées ci-après sont des doses efficaces qui s'ajoutent à l'exposition naturelle. A titre indicatif la partie de l'exposition naturelle due au rayonnement ambiant est de 630 μSv par an au niveau de la balise Téléray de l'IRSN située sur la terrasse du bâtiment des services administratifs de la préfecture du Calvados, au centre de la ville de Caen. Les composantes naturelles par ingestion et inhalation s'y ajoutent.

Pour les quartiers d'habitation, la présence d'adultes et d'enfants pendant la totalité de l'année est prise en compte.

Dans le cas des immeubles professionnels, des durées de présence sont proposées, la présence d'enfants n'est pas envisagée. Toutefois on note que la dose à l'adulte et la dose à l'enfant ne diffèrent que par la dose par inhalation, or, il se trouve qu'une DPUI plus élevée est partiellement compensée par un débit respiratoire plus faible : les différences en doses efficaces sont faibles. Par ailleurs, pour plus de réalisme un facteur de présence fonction de la destination de l'immeuble est introduit.

Dans tous les cas le calcul suppose que les personnes ne bénéficient pas de la protection du bâtiment dont elles disposent, ce qui est pénalisant. La distance retenue est la distance du bâtiment le plus proche dans un ensemble (ce qui est pénalisant).

Dans tous les cas la courbe d'évolution de la dose en fonction de la distance pour l'azimut est établie pour une présence pendant 100% du temps.

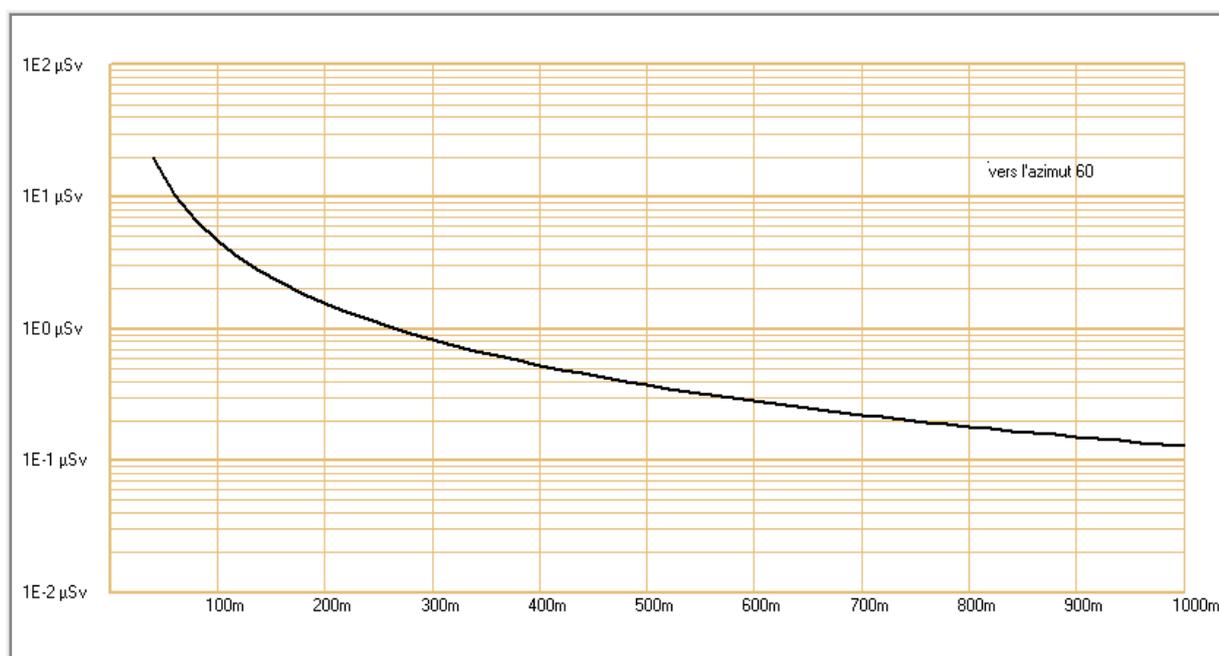
a) Le quartier de Lebisey à Hérouville Saint Clair :

Position : azimut : 060, distance : 900 m

Ce quartier est situé sous le vent dominant en provenance de la position de Cyceron

Doses en microsieverts par an :

Dose	adulte	enfant de 10 ans	enfant de 1 an	nouveau-né
inhalation	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
immersion	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$
dépôt sec	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$
dépôt humide	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
total	0,15 μ Sv	0,16 μ Sv	0,16 μ Sv	0,14 μ Sv

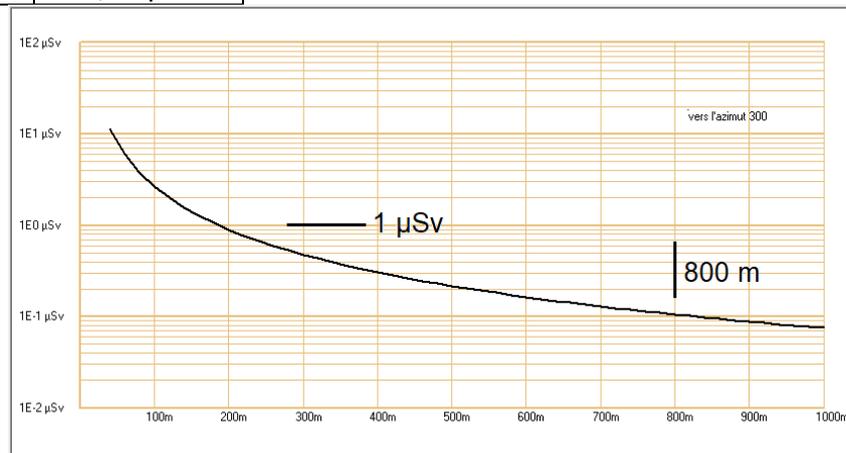


b) Le quartier de La Grace de Dieu à Epron

Position : azimut : 300, distance : 800 m

Dose	adulte
inhalation	$2,1 \cdot 10^{-2}$
immersion	$5,9 \cdot 10^{-2}$
dépôt sec	$2,3 \cdot 10^{-2}$
dépôt humide	$1,5 \cdot 10^{-3}$
total	0,11 μ Sv

	μ Sv
Enfant de 10 ans	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Enfant de 1 an	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Nouveau-né	$9,7 \cdot 10^{-2}$

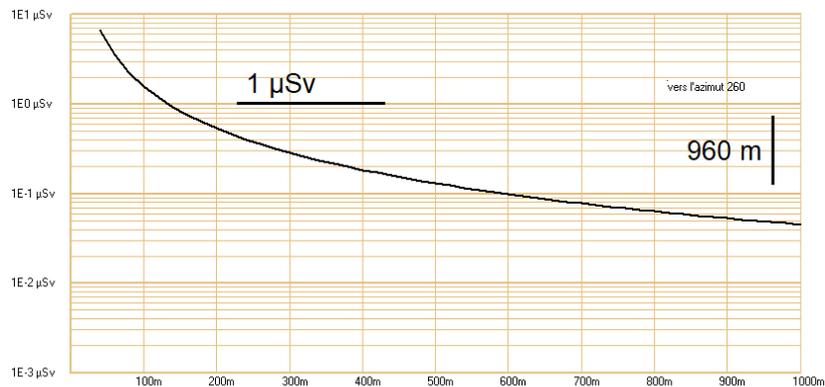


c) Le quartier de Couvrechef à Caen

Position : azimut : 260, distance : 960 m

Dose	adulte
inhalation	$9,7 \cdot 10^{-3}$
immersion	$2,7 \cdot 10^{-2}$
dépôt sec	$1,1 \cdot 10^{-2}$
dépôt humide	$8,9 \cdot 10^{-4}$
total	0,048 μ Sv

	μ Sv
Enfant de 10 ans	$5,0 \cdot 10^{-2} \mu$ Sv
Enfant de 1 an	$5,0 \cdot 10^{-2} \mu$ Sv
Nouveau-né	$4,4 \cdot 10^{-2} \mu$ Sv

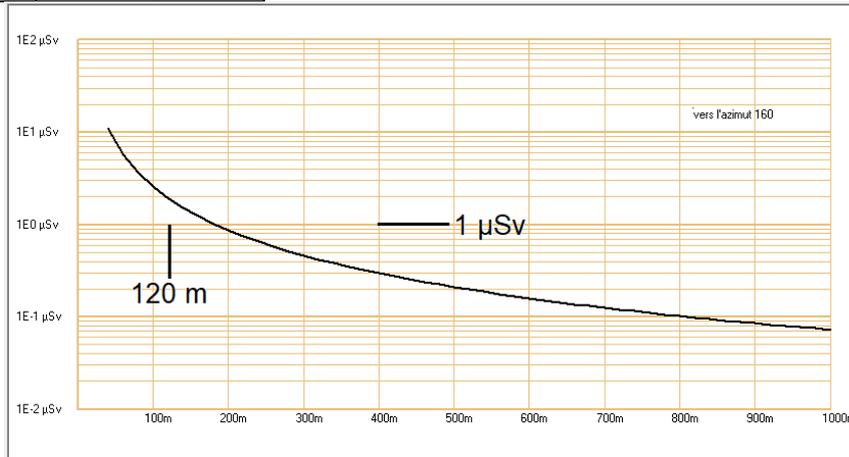


d) Les locaux de l'IAE

Position : azimut : 160, distance : 120 m

Il s'agit d'un centre de formation supérieure pour adultes, il comporte une résidence étudiante.

Dose	100% du temps
inhalation	$3,9 \cdot 10^{-1}$
immersion	$1,1 \cdot 10^0$
dépôt sec	$4,3 \cdot 10^{-1}$
dépôt humide	$6,0 \cdot 10^{-3}$
total	1,9 μ Sv

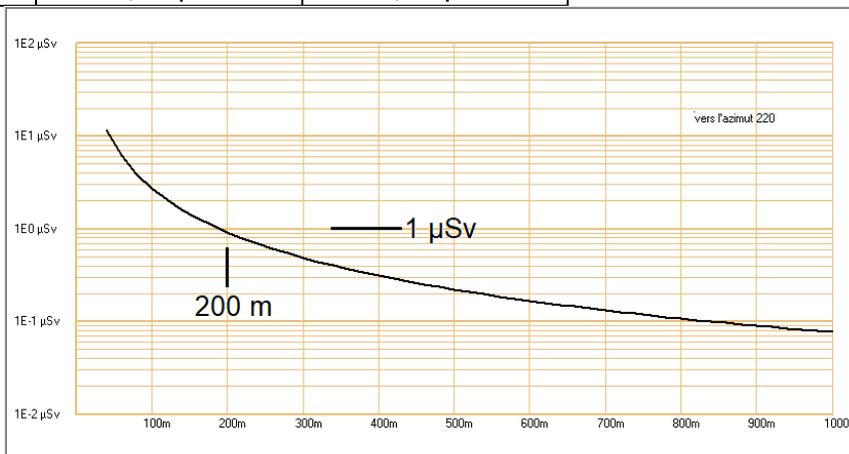


e) Le centre d'apprentissage

Position : azimut : 240, distance : 200 m

Le taux de présence de 30 % est adopté pour tenir compte des contraintes du personnel encadrant. Les élèves ne sont présents qu'une fraction de l'année.

Dose	100% du temps	
inhalation	$1,9 \cdot 10^{-1}$	
immersion	$5,2 \cdot 10^{-1}$	
dépôt sec	$2,0 \cdot 10^{-1}$	
dépôt humide	$4,3 \cdot 10^{-3}$	30% du temps
total	0,92 μ Sv	0,28 μ Sv

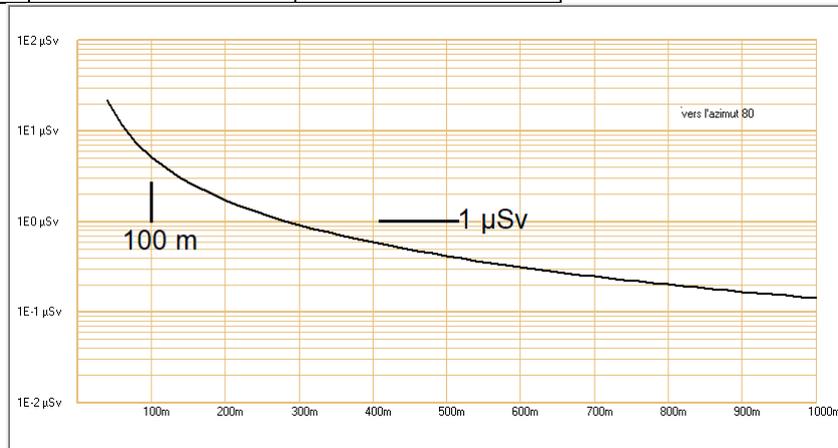


a) L'hôtel Mercure

Position : azimut : 080, distance : 100 m

Le séjour des passagers étant bref (quelques jours dans l'année), il n'est pas pris en compte. Le taux de présence du personnel hôtelier est pris à 35 heures par semaine, soit 21% du temps.

Dose	100 % du temps	
inhalation	$1,0 \cdot 10^0$	
immersion	$2,9 \cdot 10^0$	
dépôt sec	$1,2 \cdot 10^0$	
dépôt humide	$1,1 \cdot 10^{-2}$	21 % du temps
total	5,1 μ Sv	1,1 μ Sv



2. Impact de rejets en cas d'accident

2.1. Synthèse des résultats en situation d'accident

L'étude a été menée au moyen des modèles décrits au §3.2 ci-dessous adaptés aux cas des vents fort d'une part et des vents faibles d'autre part.

a) Choix du terme source

Le terme source choisi est le plus pénalisant imaginable dans le domaine qui ne peut pas être exclu avec certitude. Il est calé sur le rejet complet de la production maximale de fluor 18 : 133 GBq.

Or la production maximale de fluor 18 est supérieure en activité à celle du carbone 11 (100 GBq pour ce dernier). De surcroît, à activité identique, le fluor 18 est plus pénalisant que le carbone 11 : il est susceptible de se déposer au sol (le carbone 11 est sous forme de dioxyde de carbone) et sa DPUI par inhalation est environ 3 fois plus élevée.

Toutefois seul un événement hors norme non identifié à ce jour pourrait provoquer un tel rejet (un incendie accompagné d'événements aggravants indépendants). Le fluor est préparé sous la forme d'un liquide stable.

b) Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en dose efficace par accident. Ils sont présentés sous la forme de réseaux de courbes établies en fonction de la distance. Chacune de ces courbes correspond à une situation météorologique définie en fonction de la vitesse du vent et de la stabilité atmosphérique. Ces courbes sont indépendantes de la direction : cette dernière n'y interviendrait que pour la probabilité correspondante de la situation météorologique considérée, dont les extrêmes ne sont séparés que d'un facteur inférieur à 5 (rose des vents au §3.1).

Ces réseaux de courbe sont à considérer avec la combinaison des probabilités associées à chaque situation météorologique qui sont, en première approximation, les suivantes :

Les directions de vents :

Secteur impacté	NE	SSW	WNW	autres
Probabilité	41 %	16 %	14 %	29%
Origine du vent	200 à 280	340 à 040	080 à 160	-

Les vitesses de vents :

Vitesse en m/s	$V < 1,5$	$1,5 < V < 4,5$	$4,5 < V < 8$	$8 < V$
Probabilité	9 %	51 %	33 %	7 %

Situations de stabilité :

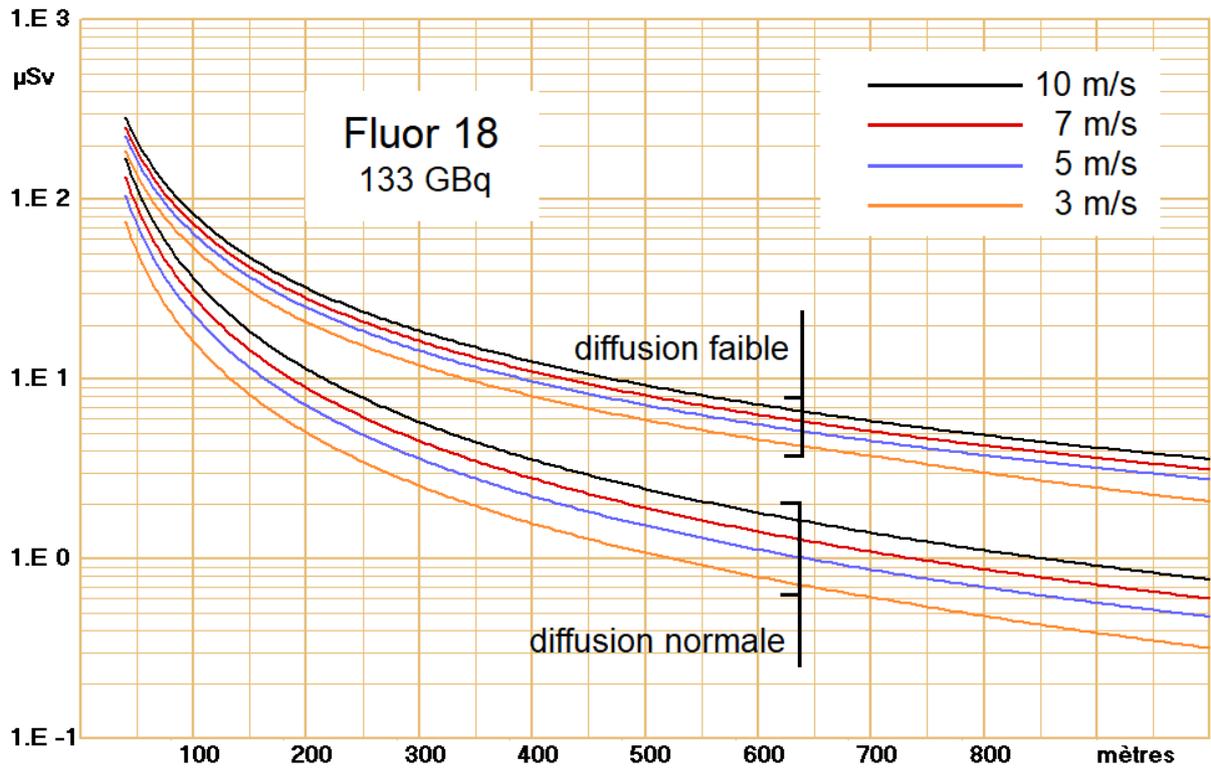
Diffusion	normale	faible
Probabilité	50 %	50 %

(Répartition pénalisante)

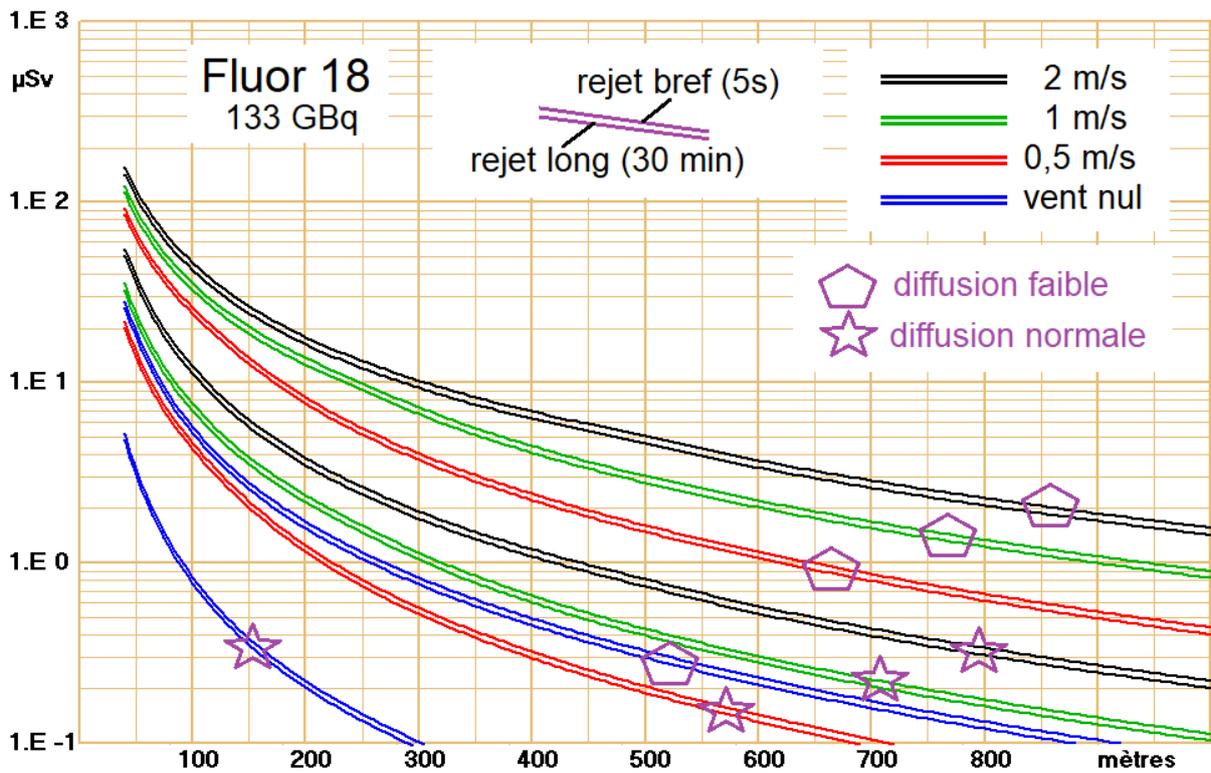
c) Au regard de la limite réglementaire

L'examen des réseaux de courbes montre, qu'à une distance de 100 m et au-delà, aucune dose n'atteint 0,1 mSv. Cela laisse une marge confortable vis-à-vis de la limite de 1 mSv, bien qu'ait été adopté un terme source, certes encore possible, mais très pénalisant.

En situation de vent fort



En situation de vent faible



2.2. Confiance à porter aux résultats

Les observations établies au §1.2 ci-dessus restent valides.

2.3. Examen de cas de « personnes représentatives »

Deux cas sont examinés :

- Le quartier le plus proche, en raison de la présence d'enfant,
- Les locaux de travail les plus proches.

Ils ne correspondent pas aux secteurs de plus forte probabilité d'impact, mais ils fournissent des valeurs de doses supérieures, en raison de leur relative proximité à la source, en comparaison des autres emplacements de même nature.

a) Le quartier de La Grace de Dieu à Epron

Position : azimut : 300 (WNW), distance : 800 m

Calcul pour la situation météorologique extrême et très peu probable : diffusion faible et vent de 10 m/s

Dose	adulte	enfant de 10 ans	enfant de 1 an	nouveau-né
inhalation	1,0	1,0	1,0	1,0
immersion	1,3	1,3	1,3	1,3
dépôt sec	2,6	2,6	2,6	2,6
total	4,9 µSv	4,9 µSv	4,9 µSv	4,9 µSv

Calcul pour la situation météorologique la plus probable : diffusion normale et vent de 5 m/s

Dose	adulte	enfant de 10 ans	enfant de 1 an	nouveau-né
inhalation	0,15	0,15	0,15	0,15
immersion	0,19	0,19	0,19	0,19
dépôt sec	0,37	0,37	0,37	0,37
total	0,71 µSv	0,71 µSv	0,71 µSv	0,71 µSv

b) L'hôtel Mercure

Position : azimut : 080 (SSE), distance : 100 m

Calcul pour deux situations météorologiques : l'extrême et très peu probable (diffusion faible et vent de 10 m/s) et la plus probable (diffusion normale et vent de 5 m/s)

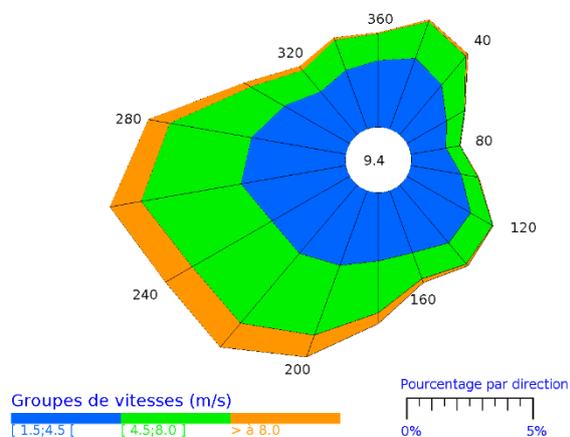
L'extrême	
Dose	adulte
inhalation	18
immersion	22
dépôt sec	43
total	83 µSv

La plus probable	
Dose	adulte
inhalation	4,9
immersion	6,1
dépôt sec	12
total	23 µSv

3. Les modèles de transferts atmosphériques utilisés

3.1. Le modèle pour les rejets permanents :

a) La rose des vents



La rose des vents ci-dessus est celle établie par Météo-France, à la station de Caen-Carpiquet pour la période de 2001 à 2020.

La position de cette station est :

- Latitude : 49°10'47" N
- Longitude : 000°27'22" W
- Altitude : 67 m

Les vents indiqués ont été relevés à une hauteur de 10 m et moyennés sur 10 min.

En raison d'une part, de la proximité entre la station météorologique (8 km) et le site de Cyceron, et d'autre part, l'absence de relief entre ces deux points, cette rose des vents est utilisée en l'état pour l'étude d'impact.

Dans le modèle, chacun des groupes de vitesses de vents est représenté par un vent moyen choisi au 2/3 supérieur de l'intervalle concerné afin de rester pénalisant mais sans excès. Ces vitesses représentative sont citées au §3.1.b ci-dessous.

b) Description du modèle

Le modèle utilisé pour les rejets permanent est celui proposé par A. Doury pour des rejets réguliers de très longue durée. Il se prête à la combinaison des nombreuses situations météorologiques vécues par une installation source de rejets.

Il consiste à considérer une source d'émission permanente au débit de rejet constant et uniforme en direction horizontale.

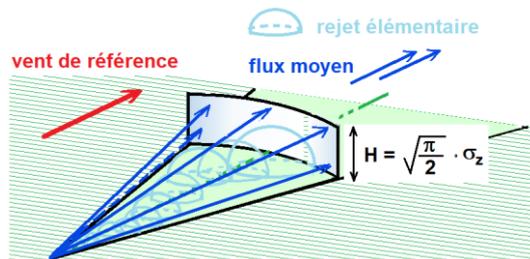
Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 175320

Manquants : 371

Dir.	[1.5;4.5 [[4.5;8.0 [> 8.0 m/s	Total
20	3.0	1.5	+	4.6
40	2.6	1.5	0.1	4.2
60	1.8	0.8	+	2.7
80	1.4	0.5	+	2.0
100	2.0	0.7	+	2.7
120	2.9	1.0	+	3.9
140	3.0	1.1	+	4.2
160	2.6	1.1	0.2	3.9
180	2.7	2.1	0.4	5.2
200	3.1	3.0	0.9	7.0
220	3.5	3.6	1.2	8.4
240	3.6	3.6	1.2	8.4
260	4.2	4.0	1.2	9.5
280	3.8	3.3	0.9	7.9
300	3.0	1.5	0.3	4.8
320	2.2	1.1	0.2	3.6
340	2.5	1.3	0.1	3.9
360	2.7	1.0	+	3.7
Total	50.6	32.8	7.2	90.6
[0;1.5 [9.4

La quantité de polluant dans un secteur angulaire de transport est conservée. La décroissance radioactive et l'appauvrissement par les dépôts au sol sont négligés, ce qui est pénalisant. A partir de



ce débit et de considérations géométriques, on établit le flux de polluant, dans le secteur angulaire concerné, à travers la surface cylindrique centrée à la source et dont la hauteur est fonction de la météorologie et de la distance parcourue par le polluant. Cette hauteur est établie de telle sorte que la concentration du polluant au sol soit celle du modèle de diffusion gaussienne, que

la concentration sur cette hauteur soit constante et, bien entendu, que la quantité de polluant circulant soit conservée. Le flux à travers la surface étant établi, la concentration en est déduite en considérant l'effet de la vitesse d'entraînement par le vent.

c) Modalités d'application du modèle

Ce modèle est appliqué en considérant un rejet au niveau du sol, avec effet de « réflexion » sur le sol, ce qui revient à doubler la concentration au sol. Ce choix est pénalisant.

Ce modèle est appliqué à chacun des 144 vents caractérisés. Ce sont les 18 secteurs directionnels de 20° chacun et les 4 classes de vitesses des vents mentionnées dans la rose des vents, répartis entre 2 classes de stabilité atmosphériques (diffusion normale et diffusion faible). En l'absence de données précises sur la proportion de temps dans chacune des classes, une fraction de 50% a été attribuée à chacune d'elles, ce qui revient à favoriser la classe la moins fréquente qui est aussi la plus pénalisante (diffusion faible).

Cela revient à établir le coefficient de transfert atmosphérique (CTA) de chacun des 144 vents. Une moyenne pondérée de la concentration de polluant (l'activité volumique) est alors disponible pour chaque distance dans chacune des 18 directions. La concentration en un point étant établie, en sont déduits :

- La dose en exposition interne, à partir de la DPUI du radionucléide et du débit respiratoire de la personne, en fonction de son âge,
- La dose en exposition externe par le nuage, le coefficient adopté étant celui proposé par la base de données ECRIN de l'IRSN,
- La dose en exposition externe par les « dépôts secs » au sol, ces derniers étant évalués à partir d'une activité surfacique permanente. Cette dernière résulte de l'équilibre entre une « vitesse de dépôt » qui caractérise les dépôts par les turbulences atmosphériques et une durée de rémanence liée à la décroissance radioactive. La vitesse de dépôt retenue est de 5 mm/s.
- La dose en exposition externe par les « dépôts humides » qui résultent du lavage de l'épaisseur du nuage par la pluie. Le dépôt ainsi réalisé est ensuite traité comme le dépôt sec.

Ces résultats peuvent être représentés sur une carte en joignant les points de même de concentration (la carte du §1.1 ci-dessus). Ils peuvent aussi être présentés sous la forme de courbes en fonction de la distance au point de rejet : la pente de cette courbe est un des éléments de l'appréciation de l'incertitude qui affecte la concentration au point considéré.

La confiance portée aux résultats de ce modèle provient de l'effet d'accumulation statistique au cours de l'année : chaque vent est pris en compte au lieu considéré avec sa probabilité (confondue avec la fréquence constatée sur les 10 dernières années).

On note par ailleurs l'absence de singularité, susceptible de briser l'effet statistique d'éloignement, telle qu'une barre d'immeuble, dans le rayon d'étude de 1 km.

3.2. Le modèle pour les rejets accidentels

a) Le choix des modèles

Les rejets accidentels sont traités au moyen d'un modèle de rejet ponctuel, le modèle gaussien de Doury. Dans ce modèle les écarts types sont fonction de l'âge de la bouffée, les fonctions de représentation et leurs coefficients figurent dans le rapport IPSN cité en annexe.

L'évaluation des concentrations en polluants est réalisée différemment selon qu'il s'agit d'un rejet sous vent nul ou très faible ou bien d'un rejet sous vent fort.

Pour les vitesses de vents nulles ou faibles, le rejet est décomposé en bouffées élémentaires successives qui sont déplacées par advection. Chacune est superposée à toutes les autres au point d'intérêt, la concentration de chacune correspondant à son état respectif de dilution à cet instant et à cet endroit.

Ce modèle a l'avantage de faire apparaître l'effet de la durée du rejet. Mais l'emploi pratique de cet algorithme est limité par la capacité des outils de calcul : une vitesse vent élevée appelle des pas de calculs en temps plus courts donc plus nombreux.

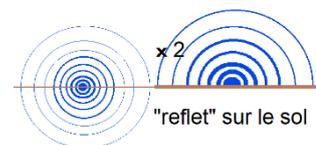
Les vitesses élevées sont traitées sous la forme d'une bouffée unique qui contient la totalité de l'activité rejetée. Ceci est évidemment pénalisant puisque cela ignore la dilution de la partie la plus ancienne du rejet, ce qui apparaît bien sur les courbes tracées au moyen du modèle pour vent nul ou léger (voir §2.1.c ci-dessus).

Chacun de ces modèles aboutit à une activité volumique intégrée dans la durée, au point d'intérêt.

Par nature un accident survient à un moment imprévisible. Une étude prospective qui ne considérerait qu'une seule situation météorologique serait donc d'un intérêt restreint. Les modèles utilisés se prêtent bien à l'exploration d'un grand nombre de situations et à leur représentation sous la forme de réseaux de courbes exprimant la dose en fonction de la distance et des conditions météorologiques.

b) Les modalités d'emploi des modèles

Dans tous les cas le rejet est supposé réalisé au niveau du sol, avec réflexion sur le sol, ce qui revient à doubler la concentration du nuage au point considéré. La personne représentative est placée sur l'axe de circulation du cœur du nuage, c'est-à-dire à l'emplacement le plus pénalisant.



En chaque point de la trajectoire du nuage, les grandeurs suivantes sont évaluées :

- La dose en exposition interne par inhalation :

Le débit de dose correspondant à l'accroissement instantané de la dose engagée par inhalation par unité de temps est proportionnel à l'activité volumique. Le coefficient de proportionnalité est le produit de la DPUI pour l'âge de la personne représentative et le radionucléide concerné, avec le débit respiratoire de cette personne. Ce débit de dose est intégré sur la durée de passage du nuage. Cela revient à multiplier l'activité volumique intégrée pendant le passage du nuage par le coefficient de proportionnalité issu de la PUI et du débit respiratoire.

- La dose en exposition externe par immersion dans le nuage :

L'exposition externe par le nuage est établie selon le même principe que la dose par inhalation, en utilisant le facteur de conversion idoine proposé dans la base ECRIN de l'IRSN pour le radionucléide concerné.

- La dose en exposition externe par le dépôt au sol

Seule la composante due au dépôt sec est considérée. La composante due au dépôt humide ne pourrait être prise en compte que sous forme probabiliste. Mais surtout, sa valeur moyenne sur une année est de l'ordre du vingtième de la valeur moyenne de la précédente, c'est-à-dire d'un ordre de grandeur inférieur à l'incertitude qui affecte cette dernière.

L'activité surfacique du dépôt sec est déduite de l'activité intégrée par l'intermédiaire de la « vitesse de de dépôt » (prise à 0,005 m/s). L'irradiation se poursuit ensuite pendant la durée de décroissance de ce dépôt initial. La dose à la personne représentative suppose son exposition de ce dépôt jusqu'à son évanescence totale par décroissance. Elle est évaluée par conversion au moyen du facteur de la base ECRIN pour les activités surfaciques.

3.3. Le choix d'un modèle gaussien

- a) Limites des modèles gaussiens en distance

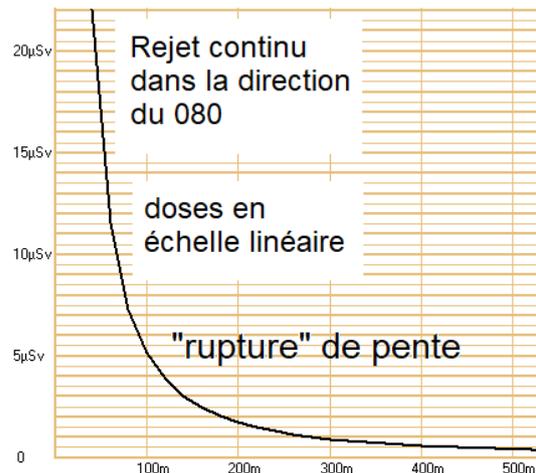
Les modèles gaussiens reposent tous sur des écarts-types qui tendent vers l'infini lorsque la distance à la source tend vers zéro. Ils perdent leur validité au voisinage de la source. Cela traduit le fait que l'effluent n'a pas rencontré assez de turbulences de faibles dimensions pour se former en un nuage dont la concentration décroît grossièrement du centre vers le bord. C'est le domaine des modèles lagrangiens où une particule est suivie dans son déplacement.

Cette limite peut être grossièrement appréciée par la rupture de la pente de la courbe représentant la concentration au centre. Par exemple, en utilisant la corrélation qui décrit σ_x et σ_z dans le modèle de Doury, on trouve la variation suivante de la concentration avec la distance :

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = (2.k_x + k_z) \frac{\Delta x}{x} \approx 3 \frac{\Delta x}{x}$$

On voit l'emballement de ce taux de croissance en dessous de 100 m :

10 m	20 m	50 m	100 m	200 m
300 %	150 %	60 %	30 %	15 %



Dans le cas considéré les distances hors de la validité du modèle se trouvent dans une enceinte fermée et gardiennée non ouverte au public. Cette limite n'est donc pas rédhibitoire.

b) Limites en fonction de l'environnement

Le modèle gaussien pourrait être pris en défaut par une singularité de l'environnement, disposition d'immeuble canalisant le flux d'air ou barre en bloquant la circulation. Cette singularité ne se rencontre pas au voisinage de Cyceron. La hauteur des immeubles les plus proches est assez faible pour induire une erreur d'un facteur 10. La marge vis-à-vis de la limite réglementaire apparaissant dans les calculs est supérieure à cette éventuelle perte.

Cette faiblesse des modèles gaussiens n'est donc pas non plus rédhibitoire en l'occurrence.

c) La démarche recommandée par l'AIEA

Pour les réacteurs nucléaires, l'AIEA recommande d'étudier le rejet au moyen d'un modèle simple et de ne passer à un modèle « lourd » que s'il apparaît que les marges vis à vis des limites fixées sont étroites. En l'occurrence la condition qui dispense du calcul lourd est assurée.

d) Des limites des moyens « lourds »

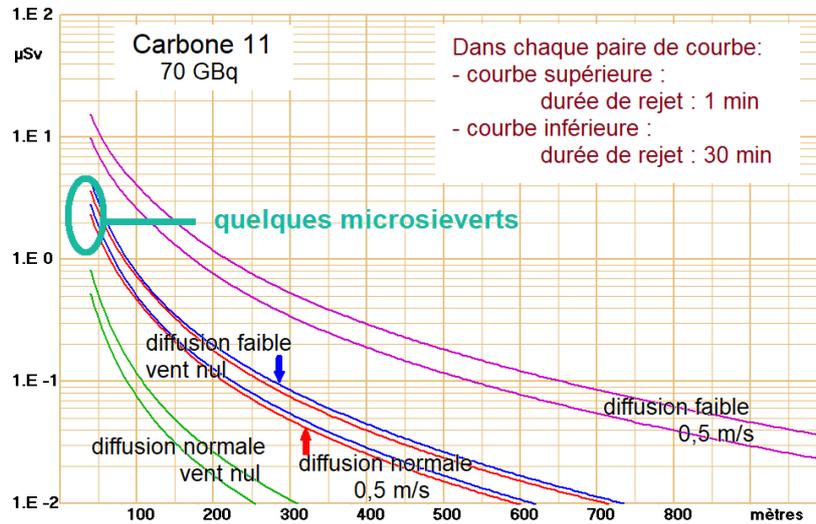
Un modèle dit « intégral » établit un champ de vecteurs « vent » à partir de conditions aux limites et d'obstacles locaux. Dans ce champ eulérien, il fait évoluer par des méthodes lagrangiennes la bouffée émise en lui attribuant simultanément une dispersion gaussienne pour tenir compte des turbulences à petite échelle. Il en résulte que le seul avantage d'un modèle « intégral », par rapport au suivi de l'exposition sur l'axe du centre du nuage gaussien est de faire apparaître les zones avec un accroissement notable de dépôt sec au sol. Or, on constate que ces modèles « intégraux » sont le plus souvent mis en œuvre avec une vitesse de dépôt unique. Il se trouve que cette vitesse apparente de dépôt turbulent varie d'un facteur supérieur à 100 en fonction d'un grand nombre de paramètres : stabilité atmosphérique, nature chimique de la substance, granulométrie si elles sont sous forme d'aérosols, rugosité du sol, pour ne citer que les paramètres que l'on trouve dans les modèles courants destinés à évaluer la vitesse de dépôt. L'irradiation par le dépôt au sol étant la composante principale de la dose lors d'un rejet de fluor, il en résulte que cette incertitude majeure fait perdre le bénéfice attendu du modèle lourd.

e) Le modèle de Pasquill

Le modèle de Pasquill est celui qui est préféré dans les pays anglo-saxon. Il n'a pas été retenu ici, car les données météorologiques réellement disponibles ne permettent pas d'établir les situations de stabilité de Pasquill. Il en résulte que la décision de la répartition de ces conditions de stabilité relève seulement du dire d'expert. (Au lieu des 7 conditions de Pasquill, le modèle de Doury ne retient que la « diffusion normale » et la « diffusion faible », elles-mêmes peu accessibles à partir des données météorologiques locales publiées)

3.4. Un test pratique du modèle de rejet accidentel

Un rejet notable ponctuel de carbone 11 s'est produit le 7 février 2023 en situation d'absence de vent. Le rapport de cet ESR conclut que la dose maximale est de quelques microsievert (moins de 3 μSv) sur le site de Cyceron. Cet ordre de grandeur se retrouve par application du modèle utilisé pour les études d'accidents, bien qu'il s'agisse alors d'une extrapolation hors de son domaine d'emploi normal :



Annexe

QUELQUES DOCUMENTS CONSULTÉS

Textes réglementaires

- Code de la santé publique :
 - Art. R1333-23 : la personne représentative
 - Art. R1333-24 : la méthode de calcul
- Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (encore en vigueur à la date de l'étude)

Textes sub-réglementaires

- Directive 2013/59/Euratom du conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants
- Circulaire du 10 mai 2021, récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. – 1.1.2 La dispersion atmosphérique

Cours universitaires de mécanique des fluides

(Pour saisir la confiance qui peut être accordée aux différents types de modèles, notamment ceux qui prétendent à une résolution avancée des équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides)

- R. Comolet : mécanique expérimentale des fluides, tome 1 - statique et dynamique des fluides non-visqueux
- Renée Gatignol : Introduction à la mécanique des fluides
- Richard Feynman : Le cours de physique – chapitres 40 et 41 (consacrés à la mécanique des fluides en analogie avec l'électromagnétisme)
- John Hubbart et Beverly West, traduction de Véronique Gautheron : Equations différentielles et systèmes dynamiques (en raison du caractère profondément non linéaire des équations de la mécanique des fluides)

Généralités relatives aux modèles de rejets atmosphériques

- Les Techniques de l'Ingénieur – BN3907 – Philippe Renaud : Transfert des radionucléides dans l'air, les sols et les cours d'eau
- Les Techniques de l'Ingénieur – BN3908v2 – Philippe Renaud : Transfert des radionucléides dans les denrées alimentaires
- Les Techniques de l'Ingénieur – IN65 v1 – Franck Jourdain : Modélisation des transferts atmosphériques de polluants (2007)
- INERIS – Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels – Dispersion atmosphérique (mécanismes et outils de calcul) – Ω12 (16/03/2021)

- INERIS – Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentés – Dispersion atmosphérique (mécanismes et outils de calcul) – Ω12 (16/03/2021)
- Rapport IRSN n°2022-00193 – Eléments méthodologiques pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation cyclotron

Descriptions de modèles opérationnels

- IAEA Safety Report 19 – Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment
- F. Pasquill – Atmospheric Diffusion – The Dispersion of Windborne material from Industrial and other Sources
- André DOURY _ « Le Vademecum des transferts atmosphériques »
CEA / IPSN / DES (département de sûreté nucléaire), rapport DSN n°440 de juillet 1981, révision de février 1992

Autres sources de données

- International Commission on Radiological Protection, n°23, (Report of the Task Group on Reference Man)
- Cyceron : « Étude des doses reçues par les travailleurs présents en laboratoires le 7 février 2023 »