

Bureau Veritas
Service Risques Industriels
16 Chemin BP 26
69 571 DARDILLY CEDEX

Tél. 04 72 29 32 67
Fax. 04 78 35 63 10



Evaluation de risque sanitaire radiologique Site de Béthune

INDICE	DATE	EMETTEUR	VERIFICATEUR
0	21 mai 2012	Gautier VINCENT Marion FOURNIER	Emilie COQUEUX
1	15 octobre 2013	Gautier VINCENT Marion FOURNIER	Emilie COQUEUX
2	07 février 2018	Emilie COQUEUX	-

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	3
1. CONTEXTE ET MISE A JOUR	4
1.1. Contexte.....	4
1.2. Mise à jour – Indice 1.....	4
1.3. Mise à jour – Indice 2.....	5
2. METHODE	6
3. DESCRIPTIONS DE L'INSTALLATION	7
3.1. Présentation de l'installation.....	7
3.2. Description des effluents rejetés.....	8
4. SENSIBILITE DE L'ENVIRONNEMENT ET POPULATION POTENTIELLEMENT EXPOSEES	9
4.1. Sensibilité de l'environnement (radioactivité).....	9
4.2. Descriptif de la population exposée	10
4.2.1 Recensement des populations	10
4.2.2 Populations sensibles.....	12
5. IMPACT DES REJETS RADIOLOGIQUES SUR L'HOMME	15
5.1. Généralités.....	15
5.2. Point de rejet.....	16
5.3. Description des rejets	16
5.3.1 Scénario n°1	16
5.3.1 Scénario n°2	17
5.3.2 Scénario n°3	17
5.3.4 Conclusion des termes sources	18
5.4. Evaluation de l'impact radiologique	19
5.4.1 Méthodologie	19
5.4.2 Hypothèses	19
5.4.3 Résultats	21
5.5. Hypothèses et sensibilité	22
5.5.1 Introduction	22
5.5.2 Incertitudes sur l'identification et la quantification des émissions	22
5.5.3 Incertitudes liées au modèle de dispersion atmosphérique	23
5.5.4 Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs.....	23
5.5.5 Conclusion sur les incertitudes.....	23
6. SYNTHESE	24
7. ANNEXE 1 – ROSE DES VENTS	25
8. ANNEXE 2 – CARTES D'ISO-ACTIVITES	26
9. ANNEXE 3 – DESCRIPTIF DU MODELE DE DISPERSION ARIA IMPACT D'ARIA TECHNOLOGIES	29

Glossaire

AAA	Advanced Accelerator Applications
AIEA	International Atomic Energy Agency
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
ERS	Evaluation des Risques Sanitaires
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
ICPE	Installations classées pour la protection de l'environnement
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

1. Contexte et mise à jour

1.1. Contexte

La société la société Advanced Accelerator Applications (A.A.A) S.A est un établissement pharmaceutique spécialisé dans la fabrication de radio-isotopes à partir d'un accélérateur de particules (cyclotron). Ces radioéléments sont commercialisés dans les services de médecine nucléaire.

Compte tenu de la durée de vie courte de ces radioéléments, le marché a une structure très régionale : le produit est fabriqué, transporté et utilisé quelques heures après.

Suite à une augmentation des capacités de production, la société A.A.A souhaite évaluer les impacts radiologiques sur la santé pour la population vivant autour du site, en fonctionnement normal, pour diverses situations.

Cette Evaluation des Risques Sanitaires radiologique est spécifique au site de Béthune.

N.B.

En 2004, la société A.A.A a réalisé un dossier de demande d'autorisation, dans le cadre de la réglementation ICPE, pour le site de Saint-Genis Pouilly. Ce dossier comportait une évaluation du risque sanitaire radiologique.

En 2008, ce site est passé à déclaration. De ce fait une telle étude n'est plus obligatoire dans un cadre réglementaire.

La société A.A.A a cependant souhaité réaliser une évaluation des risques sanitaires radiologiques pour l'ensemble de ses sites ayant des rejets radioactifs (Saint-Genis Pouilly, Saint-Cloud, Béthune, Troyes et Marseille) pour évaluer le niveau de risque pour les populations.

1.2. Mise à jour – Indice 1

Suite à la lecture de ce rapport, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a demandé différents compléments d'information (annexe au CODEP-DTS-2013-039344).

Ces demandes et les réponses associées sont présentées ci-dessous :

1. **Demande** : *les conditions météorologiques retenues doivent être complétées par les conditions de stabilités météorologiques et de précipitation associées à chaque rose des vents.*

Réponse : Les roses des vents de Météo France ne fournissant pas la classe de stabilité, les calculs ont été réalisés en situation neutre (classe D de Pasquill), ce qui correspond à la situation la plus fréquente en zone tempérée. Elle correspond aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel ouvert.

La modélisation à partir de la rose des vents ne permet pas la prise en compte de la pluie. Cette condition de modélisation est pénalisante car elle néglige le lessivage des radioéléments par la pluie, ce qui surestime les activités obtenues.

Modification du chapitre: 6.4.2

2. **Demande** : *les groupes de références retenus pour les études d'impact doivent être présentés. Doivent notamment être prises en compte les conditions de dispersion atmosphérique des rejets, la localisation des populations dans l'environnement des sites et leurs habitudes de vie.*

Réponse :

Dans le cadre de cette étude, il a été retenu deux voies d'exposition :

- par inhalation (exposition interne)
- et par exposition externe au panache.

Ces expositions ont été calculées sur la base de l'activité modélisée au point le plus pénalisant du domaine d'étude et pour une exposition continue. Il s'agit donc d'un cas majorant et donc « enveloppe » de l'ensemble de la population susceptible d'être exposée.

Compte tenu de la nature du radionucléide et des voies d'expositions retenues, les habitudes de vies et en particulier de consommation ne rentrent pas dans le calcul d'évaluation de l'exposition.

Modification des chapitres: 5.1, 6.3.3, 6.4.3, 7

3. **Demande** : *l'exposition externe au panache ne doit pas être négligée sans justification.*

Réponse : l'exposition externe au panache a été rajoutée.

Modification des chapitres : 6.4

1.3. MISE A JOUR – INDICE 2

Dans le cadre du renouvellement et de demande de modification de l'autorisation ASN du site AAA de Béthune, l'ASN demande à ce que les scénarii sur la description des rejets soient mis à jour.

Cette mise à jour a été réalisée au chapitre : 5.3

Notons que ces modifications n'ont pas d'influence sur l'activité maximale rejetée annuellement.

2. Méthode

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact radiologique sur la santé des populations du site d'A.A.A de Béthune en fonctionnement normal et de comparer les résultats obtenus aux limites réglementaires. Cette évaluation se base sur les recommandations et sur les guides de l'IRSN et de l'AIEA.

L'étude se décompose en plusieurs étapes qui sont les suivantes :

- description de l'installation,
- description du site et de son environnement,
- impact sanitaire des rejets radioactifs (identification des dangers, évaluation de l'exposition et caractérisation des risques).

Conformément à l'article R1333.8 du Code de la Santé Publique, la limite de dose efficace annuelle totale, toutes voies d'exposition et tous isotopes confondus doit être inférieure à 1 mSv/an pour les personnes du public (hors exposition à la radioactivité naturelle et hors pratiques médicales). L'évaluation de l'impact radiologique sera donc réalisée vis-à-vis de cette dose limite.

Il est à noter que cette dose limite doit tenir compte non seulement de la dose due à l'installation d'A.A.A mais également de la dose due aux autres installations ayant des rejets radioactifs. En l'absence de valeurs de dose dues à ces installations, seule la dose due à A.A.A est quantifiée. L'évaluation de la dose due au site de A.A.A permet cependant d'apprécier l'importance de l'impact des rejets.

L'estimation de l'impact dosimétrique est réalisée pour les classes d'âge représentatives de la population locale, à savoir le bébé, l'enfant de 1 an, l'enfant de 10 ans et l'adulte.

La dose efficace annuelle reçue par les individus du public est la somme de la dose efficace reçue en une année du fait d'une exposition externe et de la dose efficace engagée due aux radionucléides incorporés au cours de cette même année. La dose efficace engagée due à l'incorporation de radionucléides est utilisée dans les estimations prospectives de dose pour les membres du public. Dans ces cas, une durée d'intégration de 50 ans est recommandée par la CIPR pour les adultes. Pour les nouveau-nés et les enfants, la durée d'intégration est de 70 ans.

3. Descriptions de l'installation

3.1. Présentation de l'installation

Créée en mars 2002, la A.A.A est un établissement pharmaceutique spécialisé dans la fabrication de médicaments radiopharmaceutiques utilisés dans les services hospitaliers de Médecine nucléaire disposant d'un système d'imagerie perfectionné appelé tomographie d'émission de positon (TEP).

Afin de produire les radio-isotopes nécessaires pour ces radiopharmaceutiques, la société A.A.A dispose d'un accélérateur de particules (cyclotron).

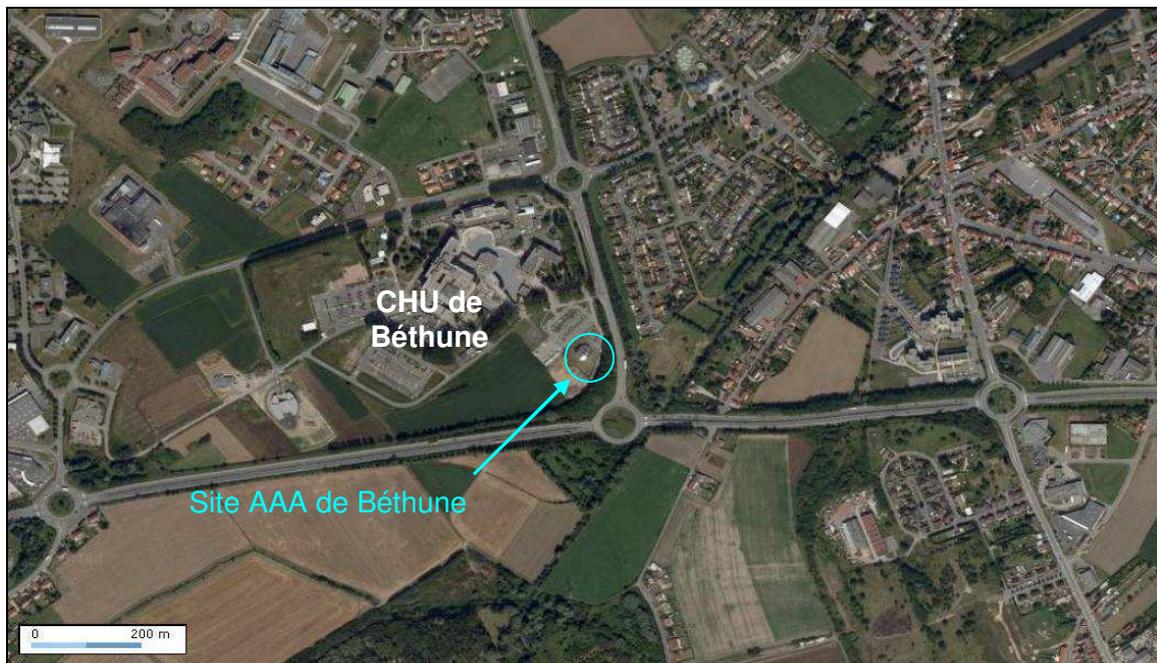
L'exploitation du cyclotron est aujourd'hui dédiée entièrement à la fabrication de Fluor 18 qui est utilisé principalement pour le marquage du FDG. Le [18F]FDG, commercialisé dans les services de médecine nucléaire est utilisé pour le dépistage de cellules cancéreuses.

Le site est implanté sur la commune de Béthune. Le bâtiment est constitué de quatre zones :

- La zone cyclotron dédiée à la fabrication du fluor 18.
- La zone des laboratoires dédiée à la production stérile de molécules marquées, commercialisées en Médecine Nucléaire et à la production non stérile de molécules marquées (activités de recherche).
- La zone des bureaux dédiée à l'administratif.
- Le local technique, installé en toiture du bâtiment existant, abrite le groupe froid et la centrale de traitement d'air.

La localisation du site est repérée sur l'extrait de carte ci-après (Coordonnées Lambert II Etendu : Latitude (Y) Nord – 2 613 320m et Longitude (X) – 623 887m).

Figure n°1 : localisation de la société A.A.A à Béthune



3.2. Description des effluents rejetés

Du fait de son activité de production d'un radioélément, la société A.A.A. a mis en place des procédures de contrôle des rejets qu'ils soient liquides ou gazeux. La radioactivité des effluents liquides est confinée sur le site pendant la période de décroissance. Les meilleures techniques disponibles ont été mises en place (conception des équipements et modalités de fabrication) afin de réduire les émissions atmosphériques. La radioactivité résiduelle dans les rejets atmosphériques est mesurée en continu.

Concernant la gestion des déchets, le laboratoire A.A.A. a mis en place des procédures strictes de tri des déchets (déchets non dangereux, déchets dangereux et déchets contenant du Fluor-18).

4. Sensibilité de l'environnement et population potentiellement exposées

4.1. SENSIBILITE DE L'ENVIRONNEMENT (RADIOACTIVITE)

Le principal site « nucléaire » à proximité de l'installation de Béthune est la centrale nucléaire de Gravelines (EDF), située à environ 65 km au nord-ouest du site AAA.

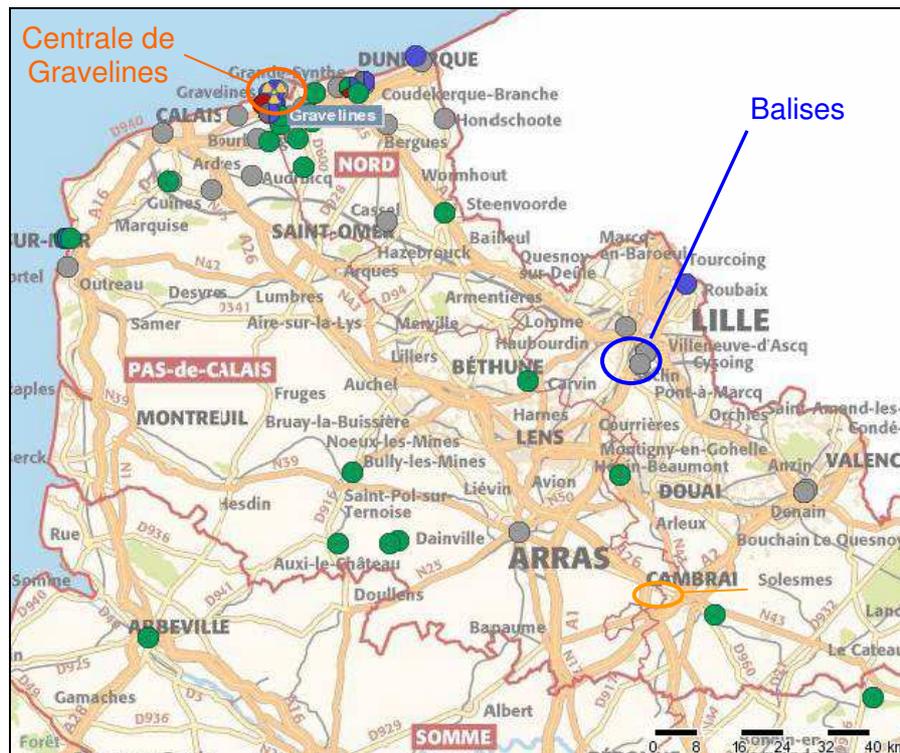
La balise du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN la plus proche du site est celle de Lille, à 25 km au nord-est du site AAA.

Cette balise fournit des débits d'équivalents de dose moyen en nanoSv par heure. Ces débits sont compris, pour l'année 2011, entre 75 et 90 nSv/h. En France, ces débits sont compris entre 10 et 250 nSv/h selon les régions.

Il peut donc être considéré que ces débits d'équivalents de dose moyen sont normaux.

Sur la base de 8 776 heures dans une année, une estimation peut être effectuée pour déterminer une dose annuelle. Cette dose serait comprise entre de 0,66 et 0,79 mSv/an.

Figure n°2 : localisation des balises du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN



4.2. DESCRIPTIF DE LA POPULATION EXPOSEE

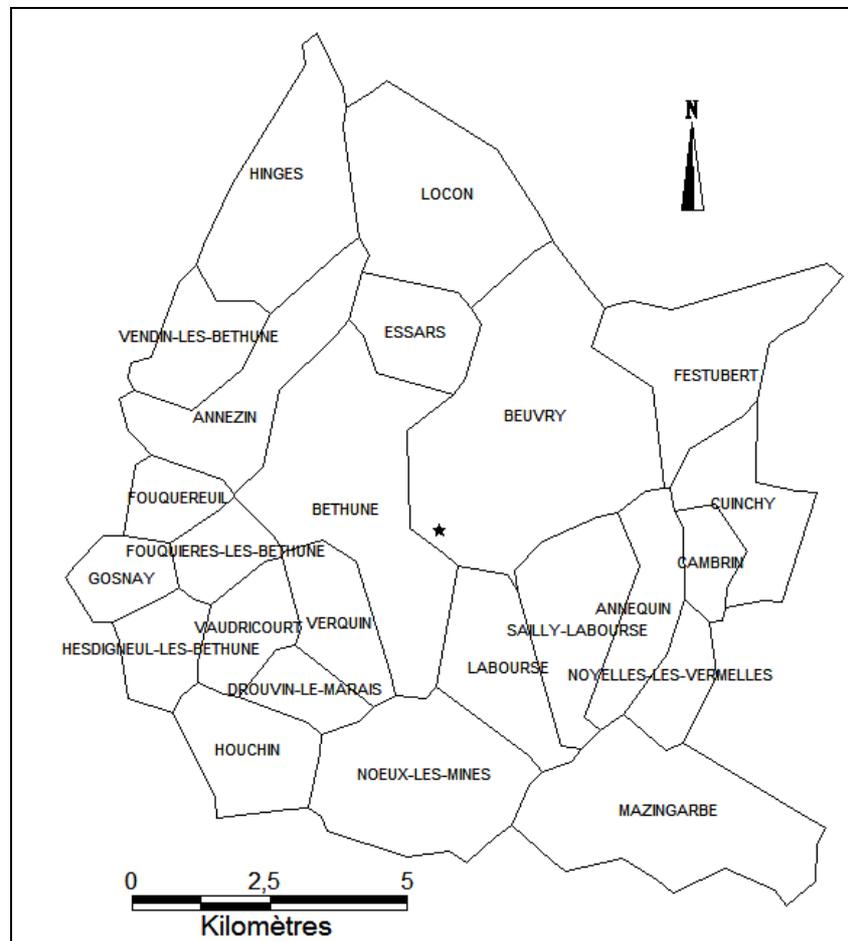
4.2.1 Recensement des populations

Le domaine étudié doit être suffisamment grand pour que les obstacles (bâtiments, arbres) puissent être considérés comme faisant partie du terrain et pour contenir les panaches calculés.

Nous prendrons un domaine d'un rayon de 5 km centré sur l'installation.

La figure n°3 présente la zone et les 24 communes toutes localisées sur le département du Pas-de-Calais (62).

Figure n°3 : Communes concernées par le domaine d'étude de 5 km de rayon autour du site



L'INSEE a fourni les données de population du recensement de 2008 (données les plus récentes) pour les communes de la zone étudiée.

Le tableau ci-dessous fournit les données de population du recensement de 2008 sur les 24 communes comprises dans le domaine.

COMMUNE	DEPARTEMENT	POPULATION TOTALE
FOUQUEREUIL	62 – Pas-de-Calais	1 187
LABOURSE	62 – Pas-de-Calais	2 215
CUINCHY	62 – Pas-de-Calais	1 766
NOYELLES-LES-VERMELLES	62 – Pas-de-Calais	2 102
VAUDRICOURT	62 – Pas-de-Calais	914
ANNEQUIN	62 – Pas-de-Calais	2 320
BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	25 697
BEUVRY	62 – Pas-de-Calais	8 944
CAMBRIN	62 – Pas-de-Calais	993
DROUVIN-LE-MARAIS	62 – Pas-de-Calais	527
ESSARS	62 – Pas-de-Calais	1 642
FESTUBERT	62 – Pas-de-Calais	1 259
GOSNAY	62 – Pas-de-Calais	1 063
HESDIGNEUL-LES-BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	815
HINGES	62 – Pas-de-Calais	2 192
HOUCHIN	62 – Pas-de-Calais	715
MAZINGARBE	62 – Pas-de-Calais	7 487
SAILLY-LABOURSE	62 – Pas-de-Calais	2 151
VENDIN-LES-BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	2 402
VERQUIN	62 – Pas-de-Calais	3 273
ANNEZIN	62 – Pas-de-Calais	5 585
FOUQUIERES-LES-BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	1 097
LOCON	62 – Pas-de-Calais	2 388
NOEUX-LES-MINES	62 – Pas-de-Calais	12 133

Tableau n°1 : donnée de population (source : <http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/>)

4.2.2 Populations sensibles

Le tableau suivant présente la répartition des enfants par âge (moins de 6 ans) dans les communes présentes dans un rayon de 5 km autour du site.

☞ *Répartition des enfants de moins de 6 ans*

Le détail des populations en fonction de l'âge est donné dans le tableau suivant :

COMMUNE	DEPARTEMENT	ENFANTS DE MOINS DE 3 ANS	ENFANTS DE 3 A 5 ANS	TOTAL ENFANTS DE MOINS DE 6 ANS
LABOURSE	62 – Pas-de-Calais	87	107	194
NOYELLES-LES-VERMELLES	62 – Pas-de-Calais	109	125	234
ANNEQUIN	62 – Pas-de-Calais	108	119	227
BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	931	911	1842
BEUVRY	62 – Pas-de-Calais	373	350	723
HINGES	62 – Pas-de-Calais	89	86	175
MAZINGARBE	62 – Pas-de-Calais	360	336	696
SAILLY-LABOURSE	62 – Pas-de-Calais	116	102	218
VENDIN-LES-BETHUNE	62 – Pas-de-Calais	75	87	162
VERQUIN	62 – Pas-de-Calais	131	141	272
ANNEZIN	62 – Pas-de-Calais	226	199	425
LOCON	62 – Pas-de-Calais	72	83	155
NOEUX-LES-MINES	62 – Pas-de-Calais	480	521	1001

Tableau n°2 : répartition des enfants de moins de 6 ans

Nota : les tableaux détaillés sont disponibles sur des territoires comptant au moins 2 000 habitants.

☞ *Etablissements sanitaires*

Le tableau suivant présente la liste des établissements sanitaires et leur capacité théorique pour les communes situées dans la zone d'influence du site (délimitée par le dixième de la concentration maximale : zone bleue sur les cartes présentes en Annexe 2).

- Centre de soins (hôpitaux, maisons de retraite (EHPAD))

COMMUNES	TYPE DE STRUCTURE	CAPACITE AUTORISEE
BEUVRY	EHPAD MARIE CURIE (maison de retraite)	60
	CENTRE PIERRE CURIE ARATHERAD BEUVRY	nr
	EHPAD RESIDENCE DE FRANCE	14
	CLINIQUE MED CHIR AMBROISE PARE	nr
	Établissement Soins Longue Durées CH BETHUNE	nr
	Centre de Santé Polyvalent SSM BEUVRY GOSSELIN	nr

COMMUNES	TYPE DE STRUCTURE	CAPACITE AUTORISEE
BETHUNE	CH BETHUNE	nr
	CLINIQUE ANNE D'ARTOIS	nr
	EHPAD F. DEGEORGE	32
	EHPAD DU CH DE BETHUNE	10
	EHPAD LE CLOS DES DEUX RIVIERES	69
LABOURS E	EHPAD LES HÉLIANTINES	29

Tableau n °3 : établissements sanitaires – centre de soins

- Crèches, garderies et halte-garderie

COMMUNES	TYPE DE STRUCTURE	CAPACITE AUTORISEE
BEUVRY	HALTE-GARDERIE	30
BETHUNE	CRECHE COLLECTIVE VERQUIGNEUL	15
	HALTE GARDERIE	12
	HALTE GARDERIE VERQUIGNEUL	12
	HALTE-GARDERIE PIERRE LOTI	60
LABOURS E	HALTE GARDERIE " L'ILE AUX ENFANTS"	18

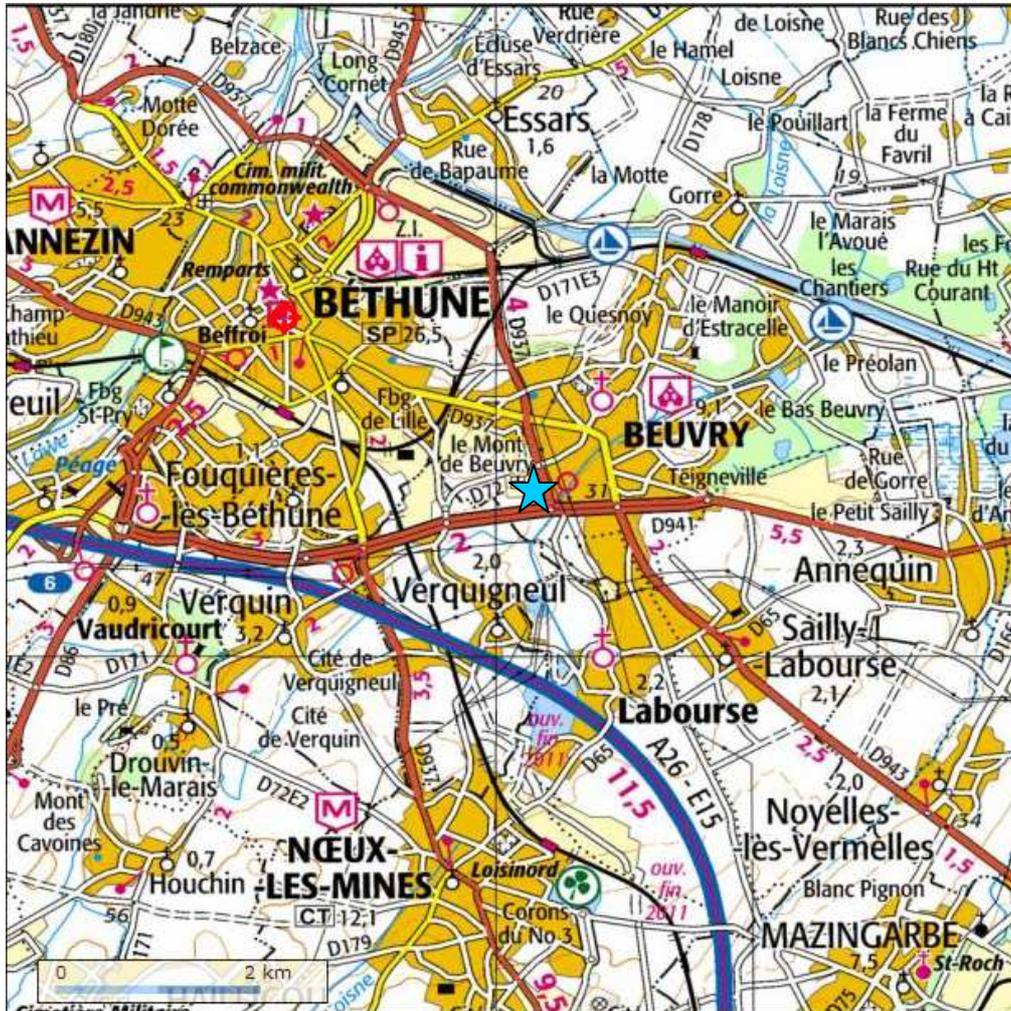
Tableau n °4 : établissements sanitaires – crèches, garderies et halte-garderie

nr : Non renseigné.

Source : <http://finess.sante.gouv.fr/index.jsp>

Nota : Pour la modélisation, nous prendrons en compte un carré de 10 km x 10 km centré sur le point d'émission du site AAA.

Figure n°4 : domaine d'étude de 10 km x 10 km pris en compte pour la modélisation



 Site AAA de Bethune

5. Impact des rejets radiologiques sur l'Homme

5.1. Généralités

L'évaluation de l'impact radiologique des rejets gazeux sur l'homme en fonctionnement normal est réalisée avec le logiciel ARIA Impact interfacé avec AERMOD. Ce logiciel permet de réaliser des études d'impact en fonctionnement normal pour les rejets atmosphériques. Il s'agit d'un modèle « à bouffées » (gaussien) pour les vents calmes. Ce modèle a été développé pour déterminer les iso-concentrations et les iso-dépôts statistiques pour des expositions chroniques. Il fait parti des modèles recommandés par l'INERIS pour les études d'impact sur la santé.

Dans le cas de l'étude de dispersion d'un radioélément, la décroissance de l'activité est prise en compte grâce au paramètre de demi-vie.

Concernant les effluents liquides potentiellement radioactifs, ces derniers sont confinés sur le site jusqu'à décroissance des radioéléments. Par conséquent le risque d'exposition interne par ingestion sur les populations n'est pas retenu.

Concernant les effluents gazeux potentiellement radioactifs, le risque d'exposition de la population est retenu car :

- Le module de synthèse est susceptible de présenter des traces de fluor 18 sous forme gazeuse provenant de la phase liquide (on admet qu'un certain pourcentage de la phase liquide est susceptible de passer sous forme gazeuse lors de cette étape de synthèse) ;
- Il existe une voie de transfert de cette phase gazeuse vers l'environnement du fait du réseau d'extraction aéraulique du module de synthèse ;
- Bien que ce réseau soit pourvu d'un système de récupération des gaz du module (qui a pour but de temporiser le rejet au sein d'un isolateur confiné afin d'obtenir la décroissance du fluor 18) le rejet final est susceptible de présenter une activité résiduelle.

S'agissant d'effluents gazeux de radioéléments ayant une période de demi-vie courte, deux voies de contamination ont été considérées :

- L'exposition interne par inhalation du panache.
- L'exposition externe au panache.

En effet, les voies de contaminations par l'exposition externe aux dépôts radioactifs au sol et l'exposition interne par ingestion d'aliments contaminés ne sont pas considérées comme pertinentes du fait de demi-vie courte et de la forme gazeuse des radioéléments.

5.2. Point de rejet

Les rejets gazeux radioactifs s'effectuent au niveau de la cheminée du site de Béthune. Les caractéristiques de ce point de rejet ainsi que les conditions de rejets et la localisation géographique (X,Y) en coordonnées Lambert II étendu sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Données	Point de rejet
X (m)	623 543
Y (m)	2 613 517
Hauteur (m)	10,5
Débit (m ³ /h)	9 000
Surface (m ²)	0,41
Température (°C)	20
Vitesse d'éjection (m/s)	6,1

Tableau n°5 : Caractéristiques du point de rejet des effluents gazeux

5.3. Description des rejets

Les effluents gazeux produits par l'installation durant son exploitation en fonctionnement normal contiennent du fluor 18.

Plusieurs scénarios ont été retenus afin de représenter la situation actuelle et des situations à venir.

5.3.1 Scénario n°1

Le scénario 1 correspond à la situation actuelle sur le site de Béthune.

Concernant les rejets de **fluor 18**, il est estimé un rejet moyen de l'ordre **1000 GBq/an**. Il s'agit de la situation actuelle avec un processus bien contrôlé (1003 GBq rejeté en 2017) et un retour d'expérience de 20 ans au niveau industriel, de 10 ans sur le site de Béthune, dont plus de 7 ans pour la molécule [18F]-fluorométhylcoline (Iasochole puis Fluorocholeline AAA).

Ce rejet est déterminé sur la base des rejets quotidiens, l'activité de recherche et développement étant quasi nulle depuis 5 ans. L'estimation qui suit repose sur la valeur moyenne des rejets mesurés sur l'année 2017.

Les résultats de mesures de la radioactivité sur les rejets quotidiens actuels permettent d'estimer que :

- l'activité de production de [18F]-FDG conduit à un rejet moyen de l'ordre de **38 GBq/an**. En 2017, 427 productions de [18F]-FDG ont été réalisées.
- l'activité de production de [18F]-fluorométhylcoline (FCH) conduit à un rejet moyen de l'ordre de **868 GBq/an**. En 2017, 196 productions de [18F]-FCH ont été réalisées.
- l'activité de production de [18F]-Florebetapir (AV45) conduit à un rejet moyen de l'ordre de **94 GBq/an**. Lorsque des étapes de séchages sont réalisées, le rejet moyen par synthèse est de 1 GBq. Sinon la synthèse rejette en moyenne 200 MBq en situation normale. En 2017, 106 productions de [18F]-AV45 ont été réalisées. Il est à noter que le procédé de séchage n'est plus réalisé depuis la fin de l'année 2017. Par conséquent, le rejet moyen lié à cette molécule sera de l'ordre de 25 GBq/an pour les

années à venir (en considérant un rythme de production identique à 2017, la tendance étant à une réduction du nombre de production.

La somme des activités rejetées en 2017 par les 3 molécules est de 1000 GBq/an. La valeur réelle est de 1003 GBq. La molécule [18F]-fluorométhylcoline représente 87% des rejets annuels.

5.3.1 Scénario n°2

Le scénario 2 correspond à une situation limite où toutes les synthèses de FDG et FCH rejettent 300 MBq et 7 GBq respectivement. Ces valeurs correspondent aux seuils d'actions correctives mises en place pour diminuer les rejets de synthèse.

Avec un rythme de 4 productions par jour (capacité maximale), composée de 16 FDG par semaine et 4 FCH par semaine (48 semaines par an – soit 240 jours de productions), il est estimé un rejet moyen de l'ordre **1500 GBq/an**. Ce rejet est déterminé sur la base des rejets quotidiens de :

- [18F]-FDG. En considérant la valeur seuil de 300 MBq rejetée par synthèse, il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'AV45 (une production d'AV45 à 200 MBq est remplacée par une production de FDG à 300 MBq). La quantité de rejets totale liés au FDG est alors d'environ **154 GBq/an**.
- [18F]-FCH. En considérant la valeur seuil de 7 GBq rejetée par synthèse, La quantité de rejets totale liés au FCH est alors d'environ **1344 GBq/an**.

La somme des deux estimations est de **1498 GBq/an**, d'où la valeur seuil de 1500 GBq/an.

Dans ce scénario, la molécule [18F]-fluorométhylcoline représente 90% des rejets annuels.

5.3.2 Scénario n°3

Le scénario 3 correspond à une situation liée à une éventuelle augmentation de la production de [18F]-fluorométhylcoline, molécule impactant le plus fortement les rejets en fluor 18. La quantité de rejet est normale (5 GBq/synthèse pour le FCH, 0.1 GBq pour le FDG). Le rythme hebdomadaire de production considéré pour ce scénario est de 12 FDG et 8 FCH, soit une production de FCH multipliée par 2 par rapport au scénario 2.

Dans ce cas de figure, il est estimé un rejet moyen de l'ordre **2000 GBq/an**. Le détail du calcul est basé sur 384 productions de FCH et 576 productions de FDG. Le résultat numérique est de 1978 GBq/an, d'où la valeur seuil de 2000 GBq/an retenue pour ce scénario.

Dans ce scénario, la molécule [18F]-fluorométhylcoline représente 96% des rejets annuels.

5.3.4 Conclusion des termes sources

Les activités maximales annuelles des radionucléides rejetés par la cheminée sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Radionucléides		Activité maximale annuelle rejetée (GBq/an)		
		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Fluor 18	¹⁸ F	1 000	1 500	2 000
		Scénario 1 Pourcentage	Scénario 2 Pourcentage	Scénario 3 Pourcentage
[18F]-fluorométhylcoline		87%	90%	96%

Tableau n°6 : Terme source pour les rejets gazeux et pourcentage associé à la production de la molécule [18F]-fluorométhylcoline

Les données relatives à ce radioélément et nécessaire à l'évaluation de l'impact radiologiques des populations sont reprises dans le tableau n°7. Il s'agit :

- Du coefficient de dose par inhalation pour l'organisme entier qui est issu de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elle considère un temps d'intégration de 50 ans pour l'adulte et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de 0,9 m³.h⁻¹ et de 0,2 m³.h⁻¹.
- Du coefficient de dose externe par panache qui est issu du rapport Federal Guidance report n°12 de 1993.

Les coefficients de dose par inhalation pour l'organisme entier sont issus de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de 50 ans pour l'adulte et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de 0,9 m³.h⁻¹ et de 0,2 m³.h⁻¹.

		Fluor 18
Période		1,83 h 6 586 s
Coefficient de dose par inhalation pour l'organisme entier (Sv.Bq-1)	Enfant (1-2 ans)	3,1.10 ⁻¹⁰
	Adulte	5,9.10 ⁻¹¹
Coefficient de dose externe par panache pour l'organisme entier (Sv.Bq-1.s.m-3)	-	4,9.10 ⁻¹⁴

Tableau n°7 : Caractéristiques des radioéléments

A titre d'information, ce radioéléments est un radionucléide de groupe 4, c'est-à-dire qu'il appartient au groupe des radionucléides de radiotoxicité faible (Décret 66-450 du 20 juin 1966 modifié).

5.4. Evaluation de l'impact radiologique

5.4.1 Méthodologie

L'évaluation de l'impact radiologique des rejets gazeux sur l'homme en fonctionnement normal est réalisée avec le logiciel ARIA IMPACT (version 1.6).

Ce logiciel permet d'élaborer des statistiques météorologiques et de déterminer l'impact des émissions rejetées par une ou plusieurs sources ponctuelles, linéiques ou surfaciques. Il permet d'utiliser des données météorologiques (rose des vents, données horaires sur une ou plusieurs années...) pour évaluer la dispersion des polluants de façon plus représentative. En effet, pour un fonctionnement des installations constant d'une année sur l'autre, des données météorologiques ponctuelles pourraient biaiser l'évaluation de la dispersion.

Cette simulation a pour objectif de fournir des ordres de grandeur des activités des radioéléments et de montrer l'influence de la climatologie du site sur les activités.

Le code ARIA permet de modéliser plusieurs sources de rejets gazeux simultanées. Dans le cadre de cette étude un seul point de rejet est considéré. Il est présenté dans le Tableau n°3, la hauteur des rejets à la cheminée est de 10,5 m.

Afin d'évaluer l'impact sur l'homme, deux classes d'âge (enfant 1-2 ans et adulte) sont prises en compte.

N.B. Du fait des voies d'exposition étudiées (exposition par inhalation et par exposition externe au panache) et du choix de se baser sur les activités modélisées au point le plus pénalisant du domaine d'étude, il n'est pas retenu un groupe de référence spécifique.

En effet, la prise en compte de l'activité modélisée au niveau d'un groupe de référence ne pourrait conduire à une activité supérieure.

Compte tenu de la nature des radionucléides et des voies d'exposition retenues, les habitudes de vie (consommation...) ne rentrent pas dans le calcul d'évaluation de l'exposition.

5.4.2 Hypothèses

Base de données site

L'ensemble des données relatives au site étudié sont renseignées dans ARIA. Il comprend :

- la localisation des émissions,
- la hauteur d'émission,
- le diamètre d'émission,
- la température du rejet,
- les caractéristiques des polluants étudiés (période...).

Terme source

Les données renseignées dans le code sont les radionucléides, leur forme physico chimique et l'activité annuelle des rejets. Un point de rejet est associé au terme source. Le terme source a été présenté au paragraphe 5.3. Les rejets annuels maximaux sont considérés afin d'être conservatif.

Points de calcul (groupe de référence)

Les points de calculs considérés pour l'impact radiologique des rejets gazeux correspondent aux maxima obtenus sur l'ensemble de l'aire d'étude.

Conditions météorologiques

Les paramètres les plus importants pour les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont :

- la direction du vent,
- la vitesse du vent,
- la température extérieure,
- la stabilité de l'atmosphère.

Ces paramètres, variables dans le temps et dans l'espace, résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de la rugosité, de l'occupation des sols).

Justification du choix des données météorologiques :

Nous avons utilisé les données Météo France jugées les plus représentatives du site selon Météo-France : la rose des vents d'Arras (62) établie sur la période 1991-2000.

Cette rose des vents présente 2 directions privilégiées : vents du sud-ouest, vents du nord-est. La rose des vents figure en annexe 1.

Nota : La modélisation à partir de la rose des vents ne permet pas la prise en compte de la pluie. Cette condition de modélisation est pénalisante car elle néglige le lessivage des radionucléides par la pluie, ce qui surestime les activités modélisées dans l'atmosphère.

Hypothèses de calcul

Nous avons pris en compte les hypothèses de calcul suivantes :

- Reconstitution des profils de vents à partir de la stabilité,
- Reconstitution des profils de température à partir de la stabilité,
- Modèle de surhauteur du panache : formulation de Holland
- Modèle de calcul des écart-type : Pasquill
- Pas de prise en compte du relief

La formule de surhauteur du panache :

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, on peut prendre en compte une sur-hauteur du panache. En effet, les fumées vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. ARIA Impact permet de prendre en compte la sur-hauteur d'origine thermique et d'origine dynamique (le rabattement du panache par vent fort est simulé).

Pour le calcul de la sur-hauteur, ARIA Impact contient les formules données par Briggs, Anfossi, Holland (cf. annexe 3).

Dans cette étude, nous avons retenu la formule de Holland qui est de façon générale une formulation pessimiste et adaptée aux cheminées d'une hauteur supérieure à 20 m.

La température d'éjection des gaz étant peu élevée (20°C), l'effet de sur-hauteur sera vraisemblablement peu significatif.

La formule des écarts-type (modèle de dispersion) :

La dispersion du polluant autour de sa trajectoire nécessite la connaissance des écarts-type. Les écarts-type sont les paramètres qui pilotent la diffusion du panache (cf. annexe 3). Dans cette étude, nous avons utilisé les écarts-type de Pasquill (modèle standard).

Le modèle permet également de prendre en compte les *vents calmes*. Pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants, cette option a été retenue, ainsi que la prise en compte du phénomène de « downwash » qui correspond au *rabattement du panache* lié au bâti de la cheminée.

Conditions de stabilité :

Les roses des vents de Météo France ne fournissant pas la classe de stabilité, les calculs ont été réalisés en situation neutre (classe D de Pasquill), ce qui correspond à la situation la plus fréquente en zone tempérée. Elle correspond aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel ouvert.

Instants de calcul

Les calculs sont réalisés sur le long terme à 50 ans pour l'adulte et à 70 ans pour l'enfant et le bébé conformément aux recommandations de la CIPR afin de tenir compte des effets induits par les radionucléides inhalés sur le long terme.

5.4.3 Résultats

Les activités maximales obtenues par le modèle de dispersion sont reprises dans le tableau ci-dessous. Les cartes d'iso-activités pour les différents radioéléments figurent en annexe 2.

Scénario	Fluor 18
Scénario 1	0,36
Scénario 2	0,556
Scénario 3	0,742

Tableau n°8 : Activités maximales (Bq.m⁻³)

Le tableau n°9 présente les valeurs de doses efficaces :

- Par inhalation, pour l'enfant de 1-2 ans en considérant une durée d'intégration de 70 ans, et pour l'adulte en considérant une durée d'intégration de 50 ans ;
- Par exposition externe au panache ¹.

¹ Déterminer sur la base de l'équation Dose efficace = Aair * CDpan * t * Ftp. Avec Aair : concentration atmosphérique, CDpan : coefficient de dose externe au panache, t : 1 an, Ftp : Fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à la voie d'exposition (1).

Scénario	Contribution des voies d'atteinte	Enfant 1-2 ans	Adulte
Scénario 1	Exposition par inhalation	$1,96.10^{-4}$	$1,68.10^{-4}$
	Exposition au panache	$5,57.10^{-4}$	$5,57.10^{-4}$
	Total	$7,53.10^{-4}$	$7,25.10^{-4}$
Scénario 2	Exposition par inhalation	$3,02.10^{-4}$	$2,59.10^{-4}$
	Exposition au panache	$8,60.10^{-4}$	$8,60.10^{-4}$
	Total	$1,16.10^{-3}$	$1,12.10^{-3}$
Scénario 3	Exposition par inhalation	$4,03.10^{-4}$	$3,45.10^{-4}$
	Exposition au panache	$1,15.10^{-3}$	$1,15.10^{-3}$
	Total	$1,55.10^{-3}$	$1,49.10^{-3}$

Tableau n°9 : Dose efficace par voie d'exposition pour les rejets gazeux (mSv/an)

En conclusion, la dose maximale reçue par les populations lors du rejet des effluents radioactifs de l'installation A.A.A est largement inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique.

5.5 Hypothèses et sensibilité

5.5.1 Introduction

Cette Evaluation du Risque Sanitaire (ERS) radiologique a été conduite en utilisant dans un principe de prudence et de proportionnalité, les méthodes et les données recommandées par les organismes experts.

Néanmoins, la démarche d'ERS s'accompagne nécessairement d'une part d'incertitudes qui proviennent de lacunes ou d'imprécisions des données et de l'obligation de fixer des hypothèses.

Les hypothèses ont été fixées autant que possible dans le sens de la sécurité, dans le but de privilégier une surestimation des risques radiologiques.

Les principales sources d'incertitudes qui sous-estiment ou surestiment les risques sont :

- Les incertitudes sur l'identification et la quantification des émissions,
- Les incertitudes liées au modèle de dispersion atmosphérique utilisé,
- Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs.

Il n'est pas envisageable actuellement de quantifier l'incertitude sur le risque sanitaire final. L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales incertitudes, certaines surestiment le risque, d'autres le sous-estiment.

L'évaluation quantitative du risque sanitaire est une estimation du risque potentiel fondé sur les connaissances à la date d'élaboration de l'étude et sur un certain nombre d'hypothèses.

5.5.2 Incertitudes sur l'identification et la quantification des émissions

L'inventaire des sources d'émissions, des radioéléments susceptibles d'être émis et de la quantification des flux émis a été réalisé sur la base du retour d'expérience de la société A.A.A.

5.5.3 Incertitudes liées au modèle de dispersion atmosphérique

Ces incertitudes proviennent :

- des hypothèses concernant les données d'entrée du modèle,
- du modèle lui-même, qui utilise une formulation mathématique réductrice des phénomènes physiques mis en œuvre lors des phénomènes de transport et de dispersion des polluants.

Les hypothèses d'entrée du modèle sont :

- le choix de la station météorologique la plus représentative, mais pas implantée exactement sur le site,
- les discontinuités des directions de vent (+/- 10°),
- l'utilisation d'une table de contingence nébulosité x vitesse de vent pour déterminer des classes de stabilité discontinues,
- le choix d'une valeur d'albédo identique pour l'année (non prise en compte des périodes de neige par exemple),
- le choix d'un coefficient de rugosité unique pour l'ensemble des domaines (prairies, zones d'habitat ou urbaines, forêts).

Le modèle de type gaussien avec un modèle à « bouffée » pour prendre en compte les vents faibles (\leq à 1 m/s).

Les principales incertitudes du modèle sont :

- un manque de précision à moins de 100 m de la source (se traduisant en général par une surestimation de l'exposition),
- la non prise en compte des obstacles en champ proche.

5.5.4 Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs

Nous avons considéré de façon pénalisante que les populations étaient exposées 24 h/24 pendant la vie entière.

Il n'est pas tenu compte des déplacements en dehors du domaine d'étude, ni dans le domaine d'étude.

De nombreux facteurs relatifs à la diversité génétique (métabolisme, sensibilité au polluant, ...), au mode de vie (régime alimentaire, sédentarité,...), à l'état de santé (immunodéficience, ...) ne peuvent être intégrés dans l'étude de risque sanitaire.

5.5.5 Conclusion sur les incertitudes

Les hypothèses prises pour les valeurs des variables d'entrée de l'Evaluation du Risque Sanitaire et les coefficients de sécurité pris à chaque étape du processus, rendent peu probable une sous-estimation du risque pour les populations.

Rappelons que la dose maximale reçue par la population est un indicateur évalué avec les connaissances techniques du moment.

6 Synthèse

Conformément à l'article R1333.8 du Code de la Santé Publique, la limite de dose efficace annuelle totale, toutes voies d'exposition confondues doit être inférieure à 1 mSv/an pour les personnes du public (hors exposition à la radioactivité naturelle et hors pratiques médicales).

Sur la base des recommandations et des guides de l'IRSN et de l'AIEA, une évaluation de la dose maximale reçue par les populations lors du rejet des effluents radioactifs de l'installation A.A.A a été réalisée.

Cette dose a été estimée, au maximum, à $4,03 \cdot 10^{-4}$ mSv/an pour l'enfant. Elle est largement inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique.

Il convient de noter qu'une estimation de la dose annuelle reçue par les populations vivant autour du site de Béthune, sur la base des données du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN, a été estimée entre 0,66 et 0,79 mSv/an. La contribution des rejets du site de A.A.A à cette dose annuelle est inférieure à 0,1%.

7 Annexe 1 – Rose des vents



NORMALES DE ROSE DE VENT

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1991-2000

Référence du client :126022

ARRAS (62)

Indicatif : 62873001, alt : 100 m., lat : 50°16'00"N, lon : 02°51'48"E

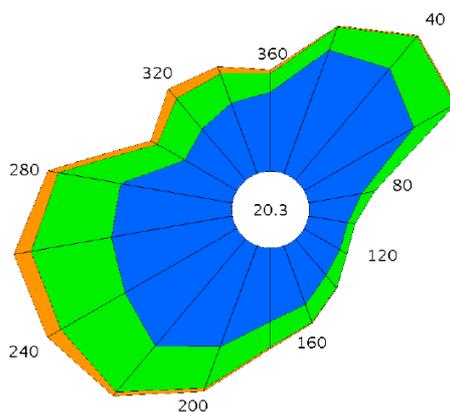
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition

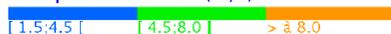
Nombre de cas étudiés : 29224

Manquants : 2247

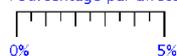


Dir.	[1.5;4.5[[4.5;8.0[> 8.0 m/s	Total
20	4.5	0.8	+	5.3
40	4.9	1.4	+	6.4
60	4.3	1.6	+	5.9
80	1.8	0.4	+	2.3
100	1.3	0.3	+	1.6
120	1.4	0.3	0.0	1.7
140	1.6	0.6	+	2.2
160	2.1	0.6	+	2.8
180	2.5	0.9	+	3.4
200	3.7	1.5	0.1	5.3
220	4.7	2.0	0.2	7.0
240	4.4	2.5	0.5	7.4
260	4.1	2.8	0.6	7.5
280	3.8	2.1	0.3	6.3
300	2.0	1.1	0.3	3.4
320	2.3	1.3	0.4	4.0
340	2.6	1.0	0.3	3.9
360	2.7	0.6	0.1	3.5
Total	54.7	21.9	3.1	79.7
[0;1.5[20.3

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord
le signe + indique une fréquence non nulle mais inférieure à 0.1%

Page 1/1

Edité le : 02/03/2012 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Direction de la Production
42 avenue Gustave Coriolis 31057 Toulouse Cedex
Fax : 05 61 07 80 79 – Email : climattheque@meteo.fr

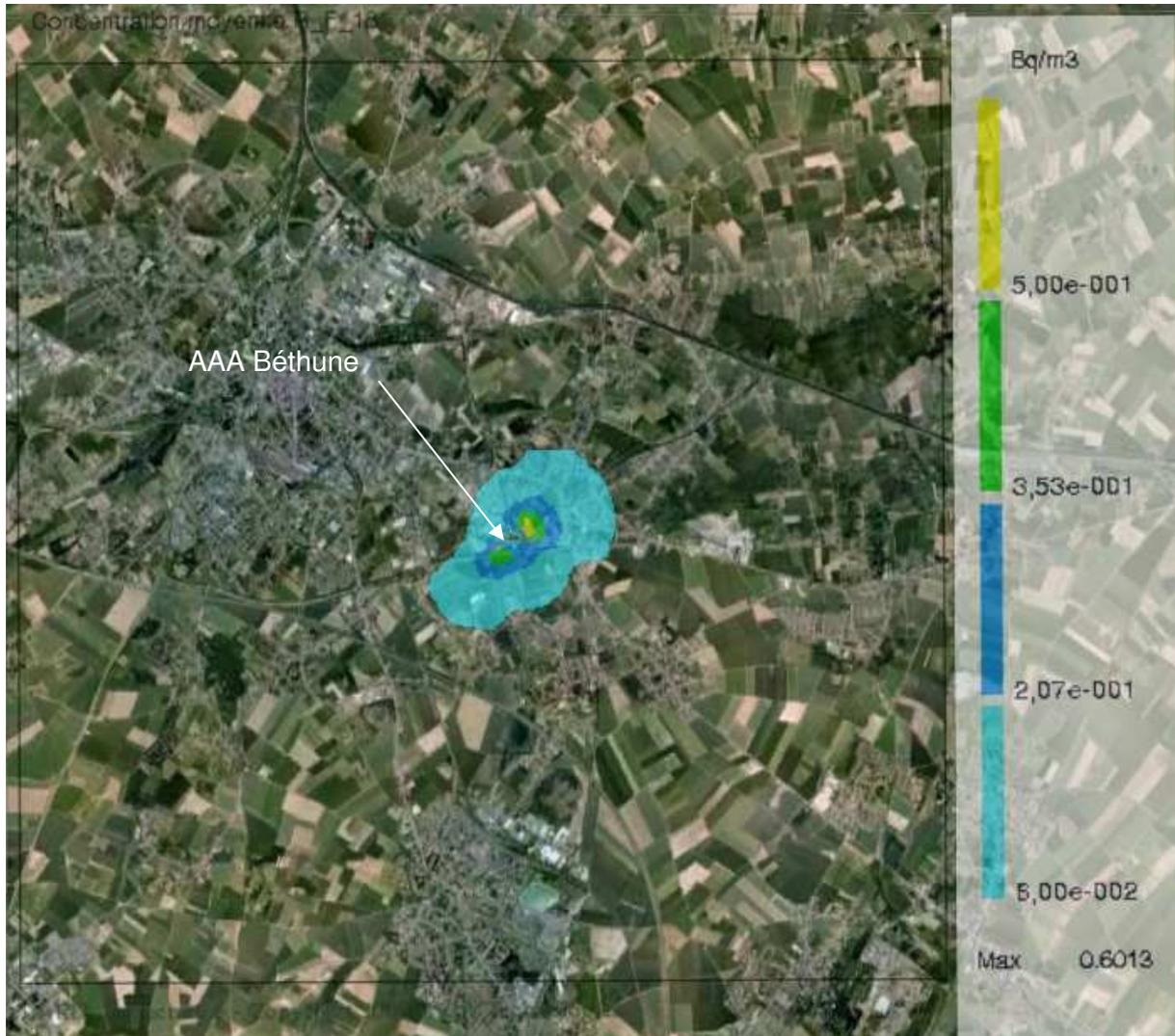
8 Annexe 2 – Cartes d'iso-activités

➤ Scénario 1 : Fluor 18



☞ Le point où la concentration est maximale est situé à environ 220 m à l'est de la source d'émission.

➤ **Scénario 2 : Fluor 18**



☞ Le point où la concentration est maximale est situé à environ 220 m à l'est de la source d'émission.

➤ **Scénario 3 : Fluor 18**



☞ Le point où la concentration est maximale est situé à environ 220 m à l'est de la source d'émission.

9 Annexe 3 – Descriptif du modèle de dispersion ARIA IMPACT d'ARIA Technologies

© ARIA Technologies 2001

page 1

Modèle numérique ARIA Impact

Le logiciel ARIA Impact est un modèle gaussien statistique cartésien. Pour le calcul des retombées au sol de polluants, il permet de prendre en compte deux types de polluants :

- les effluents gazeux passifs,
- les poussières sensibles aux effets de la gravité.

Le programme effectue les calculs individuellement pour chacune des sources (sources ponctuelles, linéiques et surfaciques) et somme pour chaque espèce les contributions de toutes les sources de même type. Il permet de prendre en compte une description de la granulométrie en dix classes et l'appauvrissement du panache au cours de sa progression.

De plus, pour les vents faibles, un modèle à bouffées gaussiennes permet de calculer les concentrations au sol. Les hypothèses de calcul de ce modèle sont les suivantes:

- la turbulence est homogène dans les basses couches,
- la mesure du site est représentative de l'ensemble du domaine de calcul,
- la densité des polluants est voisine de celle de l'air,
- la composante verticale du vent est négligeable devant la composante horizontale,
- le régime permanent est instantanément atteint.

Ces hypothèses sont généralement majorantes et permettent une visualisation rapide des ordres de grandeurs de la pollution sur des domaines de 1 à 30 km.

Chacun des paramètres déterminants dans l'estimation de la pollution atmosphérique modélisée par ARIA Impact est détaillé ci-après.

1. LE TERRAIN

Sans être un modèle tridimensionnel, ARIA Impact permet de prendre en compte l'influence du relief de façon simplifiée. En effet, la prise en compte du relief est basée sur des modélisations qui suivent les principes suivants :

On suppose que l'axe du panache se trouve à une hauteur h par rapport au sol.

- Si l'axe du panache passe au dessus d'un relief de hauteur $h_t < h$:
 - ⇒ En atmosphère neutre ou instable : la hauteur de l'axe du panache est $h + h_t/2$
 - ⇒ En atmosphère stable : la hauteur de l'axe du panache ne varie pas
- Si l'axe du panache passe au dessous d'un relief de hauteur $h_t > h$:
 - ⇒ En atmosphère neutre ou instable : la hauteur de l'axe du panache est $h_t + h/2$
 - ⇒ En atmosphère stable : la hauteur de l'axe du panache est fixée à une valeur limite égale à dix mètres.

Il faut noter que cette formulation est pénalisante en cas de vent stable.

2. LE DOMAINE D'ETUDE

Le domaine d'étude doit être suffisamment grand :

- pour que les obstacles (bâtiments, arbres, etc..) puissent être considérés comme faisant partie de la rugosité du terrain,
- pour contenir les panaches calculés.

Dans le cas où le domaine contient plusieurs cheminées, les panaches sont calculés indépendamment les uns des autres. Les concentrations de chaque cheminée s'additionnent en tous les points du calcul. Le fait de ne pas prendre en compte les interférences possibles entre chaque panache est majorant pour la détermination de la concentration car la surhauteur est sous-évaluée.

3. LE REGIME

La formulation du gaussien rectiligne se démontre pour un régime permanent. Il faut remarquer qu'un régime permanent est majorant par rapport à un régime transitoire.

Il est donc nécessaire que les variations des données météorologiques soient suffisamment lentes par rapport à la propagation du panache. Un moyen simple d'apprécier la période T à prendre est d'effectuer le calcul :

$$T \approx L/U$$

où L est la taille du domaine et U la vitesse du vent.

4. LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE

La propagation du panache est supposée s'effectuer dans une couche de l'atmosphère homogène, débutant du sol et suffisamment haute pour ne pas gêner l'expansion verticale du panache.

La turbulence est représentée par une classe qui permet de choisir une paramétrisation "des écarts-type" (dimensions verticales et horizontales du panache). Cette paramétrisation traduit mathématiquement l'expansion verticale et horizontale du panache. Ainsi, une inversion thermique débutant du sol et contenant la totalité du panache sera une atmosphère stable ou très stable (classe E ou F de Pasquill).

La turbulence ayant deux origines, l'une thermique et l'autre mécanique, il est nécessaire de disposer des indications suivantes :

- une mesure de vent pour évaluer la turbulence d'origine mécanique,
- des informations concernant le rayonnement (solaire et infrarouge) : la position astronomique du soleil (heure dans l'année) et la couverture nuageuse (nébulosité en 1/8) pour apprécier la turbulence d'origine thermique.

La turbulence mécanique est prépondérante par vent fort et a tendance à rendre l'atmosphère thermiquement neutre. La turbulence thermique conduit à de fortes instabilités lorsque le sol est surchauffé et que le vent laisse s'établir la convection naturelle.

Dans le cas d'un calcul simple d'initialisation manuelle des données météorologiques, la classe de stabilité est soit fournie par l'utilisateur, soit déduite des données météorologiques introduites. Dans le cas des roses des vents saisies manuellement, les données de départ sont fournies par un fichier de données météorologiques comportant souvent plusieurs années de mesures. Ces mesures sont des mesures réelles, la classe de stabilité est donc estimée à partir de ces mesures.

Les méthodes de détermination disponibles dans le logiciel sont décrites pour la formulation de Pasquill. Pour ce qui concerne les autres formulations, les correspondances entre classes sont utilisées. Elles sont résumées dans le tableau suivant :

Pasquill	A	B	C	D	E	F
Briggs	A	B	C	D	E	F
Doury	DN	DN	DN	DN	DF	DF
Brookhaven	A	B2	B1	C	D	D

Cependant, dans ARIA Impact, les différentes classes de stabilité ne sont pas représentées par une lettre mais par un chiffre. La correspondance est la suivante:

- **Classes de Pasquill et Briggs:**

A	B	C	D	E	F
1	2	3	4	5	6

- **Classes de Doury:**

DF	DN
1	2

- **Classes de Brookhaven:**

A	B2	B1	C	D
1	2	3	4	5

➤ **Méthode dite "Rayonnement - Vent"**

Cette méthode utilise le rayonnement net le jour et la nébulosité la nuit. Elle est préconisée par le Guide de sûreté de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Le schéma est le suivant :

JOUR				NUIT		
Vitesse	Rayonnement net (W/m ²)			Rayonnement=0, Nébulosité N(1/8)		
m/s	>600	>300	<=300	3/8<N<8	N<=3/8	N=8
< 1	A	A	B	F	F	D
1-2	A	B	B	E	F	D
2-4	A	B	C	E	F	D
4-6	B	C	C	D	E	D
6-7	C	C	D	D	D	D
>=7	C	D	D	D	D	D

Si la nébulosité est indisponible, le ciel est supposé clair (Nébulosité <=3/8).

➤ **Méthode dite "Gradient de température"**

Cette méthode nécessite la connaissance de la température à deux niveaux de hauteur différents afin de pouvoir calculer le gradient de température. Une fois la détermination effectuée, la correspondance entre gradient thermique et classe de stabilité se fait de la manière suivante :

Gradient (Deg/100m)	Classe
G < -1.9	A
-1.9 < G < -1.7	B
-1.7 < G < -1.5	C
-1.5 < G < -0.55	D
-0.55 < G < 1.5	E
1.5 < G	F

➤ **Méthode dite "Sigma Direction"**

Cette méthode repose sur la connaissance de l'écart type de la fluctuation de la direction du vent. Une fois ce paramètre physique déterminé, la correspondance entre écart type et classe de stabilité se fait de la manière suivante :

Ecart type (Deg)	Classe
Sd < 5	F
5 < Sd < 10	E
10 < Sd < 15	D
15 < Sd < 20	C
20 < Sd < 25	B
25 < Sd	A

➤ **Méthode dite "Jour-Nuit"**

Cette méthode pallie les éventuelles invalidations des deux méthodes précédentes. Elle permet de déterminer une classe de stabilité même quand le rayonnement ou la nébulosité n'est pas disponible. Elle utilise une classification fonction du jour et de la nuit ainsi que de la vitesse du vent. Le schéma est le suivant :

Vitesse (m/s)	Jour	Nuit
< 5	C	E
5-6	D	E
>6	D	D

➤ **Méthode dite "Gradient de température et humidité"**

La prise en compte de l'humidité (U) peut s'avérer importante.

La méthode proposée est alors la suivante :

1- Si $U < 10\%$

$G \leq -1,13^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	A
$-1,13 < G \leq -1,03^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	B
$-1,03 < G \leq -0,91^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	C
$-0,91 < G \leq -0,37^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	D
$-0,37 < G \leq +0,78^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	E
$+0,78^{\circ}\text{C}/100\text{m} < G$	=>	F

2- Si $10 \leq U < 20\%$

$G \leq -1,18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	A
$-1,18 < G \leq -1,05^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	B
$-1,05 < G \leq -0,91^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	C
$-0,91 < G \leq -0,22^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	D
$-0,22 < G \leq +1,12^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	E
$+1,12^{\circ}\text{C}/100\text{m} < G$	=>	F

3- Si $20 \leq U < 30\%$

$G \leq -1,39^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	A
$-1,39 < G \leq -1,18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	B
$-1,18 < G \leq -0,97^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	C
$-0,97 < G \leq -0,16^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	D
$-0,16 < G \leq +1,25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	E
$+1,25^{\circ}\text{C}/100\text{m} < G$	=>	F

4- Si $30 \leq U < 40\%$

$G \leq -1,61^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	A
$-1,61 < G \leq -1,33^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	B
$-1,33 < G \leq -1,00^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	C
$-1,00 < G \leq -0,10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	D
$-0,10 < G \leq +1,32^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	E
$+1,32^{\circ}\text{C}/100\text{m} < G$	=>	F

5- Si $40 \leq U < 50$

$G \leq -1,82^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	A
$-1,82 < G \leq -1,48^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	B
$-1,48 < G \leq -1,04^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	C
$-1,04 < G \leq -0,04^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	=>	D

-0,04 <G <= +1,39°C/100m	=>	E	
+1,39°C/100m <G	=>	F	
6- Si 50 <= U < 60 %			
G <= -1,62°C/100m	=>	B	
-1,62 <G <= -1,00°C/100m	=>	C	
-1,00 <G <= +0,02°C/100m	=>	D	
-0,02 <G <= +1,46°C/100m	=>	E	
+1,46°C/100m <G	=>	F	
7- Si 60 <= U < 70 %			
G <= -1,77°C/100m	=>	B	
-1,77 <G <= -1,16°C/100m	=>	C	
-1,16 <G <= +0,08°C/100m	=>	D	
+0,08°C/100m <G	=>	E	
8- Si 70 <= U < 80 %			
G <= -1,25°C/100m	=>	C	
-1,25°C/100m <G	=>	D	
9- Si 80 <= U < 100 %			
G <= -1,40 C/100m	=>	C	
-1,40°C/100m <G	=>	D	
10- Si U=100%	=>	D	

5. LES ECARTS-TYPE

Les calculs des écarts-type de dispersion σ_y , σ_z sont effectués par ARIA Impact avec les mêmes formules pour les deux modèles (gaz et particules). Il est toutefois possible de choisir entre plusieurs types de formulation, aussi bien pour σ_y que σ_z .

La dispersion du polluant autour de sa trajectoire nécessite la connaissance des écarts-type. Les distributions gaussiennes des polluants sont caractérisées par les "écarts-type" horizontaux et verticaux.

Le choix des écarts-type, paramètres qui pilotent la diffusion du panache, est un problème délicat qui renferme une part d'empirisme relativement importante. Ces paramètres doivent être adaptés au site étudié. Pour évaluer la valeur des écarts-type, il faut prendre en compte les éléments suivants :

- plus le terrain est accidenté et contient des obstacles, plus la rugosité est importante,
- plus la rugosité est importante, plus la turbulence (conditions météorologiques égales par ailleurs) est élevée,
- plus la turbulence est élevée, plus les écarts-type sont importants,
- plus les écarts-type sont importants, plus vite le panache se disperse, plus vite le panache atteindra le sol (cas d'un rejet élevé).

Pour les écarts-type de dispersion des panaches, on peut utiliser les formulations suivantes :

- (1) **PASQUILL - TURNER** : formulation standard.
- (2) **BRIGGS OPEN COUNTRY**, pour les sites de campagne peu accidentés.
- (3) **BRIGGS URBAN**, pour les sites urbanisés où le mélange vertical est très fort.
- (4) **DOURY**, formulation du Commissariat à l'Energie Atomique français.
- (5) **BROOKHAVEN**, formulation du Brookhaven National Laboratory.

Les formules utilisées, en fonction de la distance sous le vent des émissions et de la classe de stabilité, ont été établies pour des durées d'échantillonnage de 10 mn. Cependant, on peut facilement obtenir des concentrations moyennes tri-horaires, au plus, à partir de durées d'échantillonnage de 10 mn.

Variables significatives :

x = distance à la source sous le vent

σ_y = écart-type horizontal perpendiculaire à l'axe du panache

σ_z = écart-type vertical perpendiculaire à l'axe du panache

➤ **Pasquill - Turner**

Pour $x < 1$ kilomètre :

Classe	σ_y	σ_z
A	$0,215 x^{0,858}$	$0,01 + 0,467 x^{1,89}$
B	$0,155 x^{0,889}$	$0,103 x^{1,11}$
C	$0,105 x^{0,903}$	$0,066 x^{0,915}$
D	$0,068 x^{0,908}$	$0,0315 x^{0,822}$
E	$0,050 x^{0,914}$	$0,0232 x^{0,745}$
F	$0,034 x^{0,908}$	$0,0144 x^{0,727}$

Pour $x > 1$ kilomètre, les valeurs des écarts-type changent pour les classes E et F :

Classe	σ_y	σ_z
E	$0,050 x^{0,914}$	$- 0,126 + 0,1480 x^{0,150}$
F	$0,034 x^{0,908}$	$- 0,017 + 0,0312 x^{0,306}$

➤ **Briggs**

Il existe deux formulations possibles des écarts-type de Briggs :

- BRIGGS OPEN COUNTRY : pour les sites de campagne peu accidentés,
- BRIGGS URBAN : pour les sites urbanisés où le mélange vertical est très fort.

Le choix entre ces deux formulations se fait selon la rugosité du site :

- Si la rugosité est inférieure à 0,5 m : les calculs sont réalisés avec la formule de Briggs Open Country,
- Si la rugosité est supérieure à 0,5 m : les calculs sont réalisés avec la formule de Briggs Urban.

a) Briggs Open Country

Classe	σ_y	σ_z
A	$0,22 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,20 x$
B	$0,16 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,12 x$
C	$0,11 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,08 x (1 + 0,0002 x)^{-1/2}$
D	$0,08 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,06 x (1 + 0,0015 x)^{-1/2}$
E	$0,06 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,03 x (1 + 0,0003 x)^{-1}$
F	$0,04 \times (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,016 x (1 + 0,0003 x)^{-1}$

b) Briggs Urban

Classe	σ_y	σ_z
A - B	$0,32 \times (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,024 x (1 + 0,001 x)^{-1/2}$
C	$0,22 \times (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,20 x$
D	$0,16 \times (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,14 x (1 + 0,0003 x)^{-1/2}$
E - F	$0,11 \times (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,08 x (1 + 0,0015 x)^{-1/2}$

➤ **Doury**

Cette formulation est basée non pas sur la distance du panache à la source, mais sur le temps de transfert du panache depuis la source. Pour un panache gaussien rectiligne, la distance et le temps de transfert sont liées par la vitesse du vent. Cette formulation repose sur deux classes : diffusion faible et diffusion normale.

• **Ecarts-type de la classe diffusion faible :**

Temps de transfert	σ_y	σ_z
0-240 sec	$0.405 t^{0.859}$	$0.2 t^{0.5}$
240-97000 sec	$0.135 t^{1.130}$	$0.2 t^{0.5}$
97000-508000 sec	$0.463 t$	$0.2 t^{0.5}$
508000-1300000 sec	$0.65 t^{0.824}$	$0.2 t^{0.5}$
>1300000 sec	$200000 t^{0.5}$	$0.2 t^{0.5}$

• **Ecarts-type de la classe diffusion normale :**

Temps de transfert	σ_y	σ_z
--------------------	------------	------------

0-240 sec	0.405 t ^{0.859}	0.42 t ^{0.814}
240-3280 sec	0.135 t ^{1.130}	1.0 t ^{0.685}
3280-97000 sec	0.135 t ^{1.130}	20 t ^{0.5}
97000-508000 sec	0.463 t	20 t ^{0.5}
508000-1300000 sec	6.5 t ^{0.824}	20 t ^{0.5}
>1300000 sec	200000 t ^{0.5}	20 t ^{0.5}

➤ **Brookhaven**

Classe	σ_y	σ_z
A - B1	0.40 x 0.91	0.41 x 0.91
B2	0.36 x 0.86	0.33 x 0.86
C	0.32 x 0.78	0.22 x 0.78
D	0.31 x 0.71	0.06 x 0.71

Dans les modèles de dispersion gaussienne, les écarts-type de Pasquill¹ sont couramment utilisés. Ils sont fonction de la distance parcourue par le polluant depuis la source d'émission et de la stabilité de l'atmosphère. Ces lois d'évolution sont résumées dans les figures a et b.

L'examen de ces figures montre bien que l'évolution de la taille des écarts-type horizontaux et verticaux est plus rapide en classe de forte diffusion (classe A de Pasquill) qu'en classe de faible diffusion (classe F de Pasquill) puisque la courbe correspondant à la classe A est située au-dessus de la courbe correspondant à la classe F (diagrammes avec échelles logarithmiques).

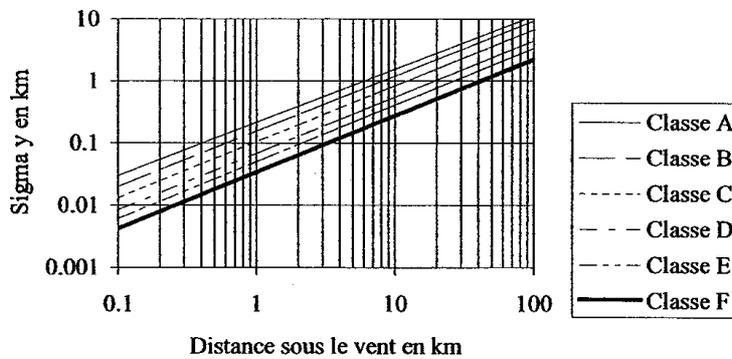


Figure a : Ecarts-type horizontaux en fonction de la distance parcourue depuis la source pour chaque classe de stabilité de Pasquill

¹ Guide sûreté de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique - page 50

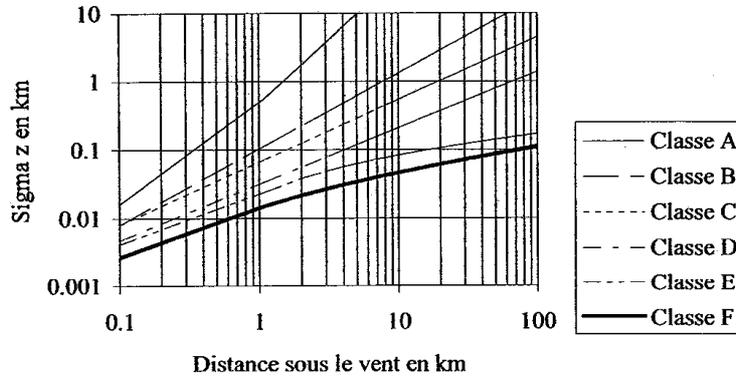


Figure b : Ecarts-type verticaux en fonction de la distance parcourue depuis la source pour chaque classe de stabilité de Pasquill

➤ **Cas des vents faibles**

Dans le cas des vents faibles, un modèle à bouffées gaussiennes : DIFFUS permet de calculer les concentrations au sol.

Le modèle DIFFUS modélise le transport et la diffusion des polluants en mettant en œuvre deux fonctions bien distinctes :

- Le calcul de la trajectoire du polluant (transport par le vent),
- Le calcul de la dispersion du polluant autour de sa trajectoire et de l'impact en différents points du maillage.

La dispersion du polluant est simulée par l'émission régulière de "bouffées" partant de la source que l'on peut comparer aux bouffées issues de la pipe d'un fumeur. La continuité du panache est assurée par la cadence faible de l'émission des bouffées (quelques dizaines de secondes) et par une méthode de calcul intégrant la concentration entre deux bouffées consécutives. La trajectoire du panache est alors représentée par le déplacement du centre des bouffées dans le temps. A chaque instant, les bouffées vont se déplacer en fonction du vent.

On considère que la vitesse horizontale du vent du polluant est celle du vent considéré au point de positionnement de la bouffée. La vitesse de déplacement vertical du polluant est celle du vent plus une vitesse de gravité " v_g ". Cette vitesse de gravité " v_g " simule l'effet de gravité sur les particules de polluant. Elle a pour effet d'incliner l'axe du panache vers le sol comme l'illustre la figure suivante.

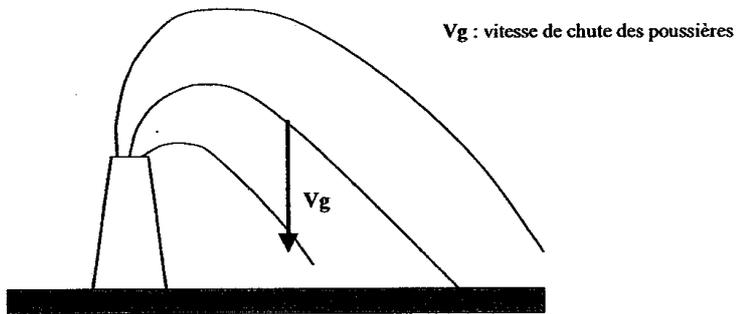


Schéma représentant l'influence d'une vitesse de chute sur l'axe d'un panache de polluant

Le transport du polluant en un point du maillage (x, y, z) à un instant donné "t" pendant un intervalle de temps dt vérifie les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} dx &= u(x, y, z, t)dt \\ dy &= v(x, y, z, t)dt \\ dz &= [w(x, y, z, t) - Vg]dt \end{aligned} \right\} (1)$$

où :

dx, dy, dz : définissent le déplacement du nuage selon les trois axes du domaine pendant l'intervalle de temps dt

$\left. \begin{aligned} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{aligned} \right\}$ Ce sont les trois composantes du vent au point (x, y, z) du domaine à l'instant t du calcul.

Vg : Vitesse éventuelle de gravité du polluant (si le diamètre de la particule est important)

Pour les gaz, la vitesse de chute est nulle.

En ce qui concerne les poussières, leur vitesse de chute est calculée en fonction de la granulométrie des poussières et de leur densité. Pour évaluer la vitesse de chute des poussières en fonction de la granulométrie, nous avons utilisé la loi de Stokes² :

$$Vg = \frac{2r^2 g \rho_p}{9\mu}$$

où :

μ : Viscosité de l'air (= $1,8 \cdot 10^{-4}$ g/s/cm)
 ρ_p : Densité de la particule
 r : Rayon de la particule
 g : Constante de gravité (= $9,81$ m/s²)

² Handbook on atmospheric dispersion, R. Hannah - page 67

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Néanmoins, lorsque les rejets sont chauds ou qu'ils ont une vitesse d'éjection importante, une sur-élévation de la hauteur de rejet peut être prise en compte (cf. § 2.7).

Pour simuler la dispersion, l'émission est découplée en un grand nombre de "bouffées" élémentaires. Les bouffées ont une taille qui évolue dans le temps en fonction de leur distance par rapport à la source et de la stabilité de l'atmosphère. Le centre de la bouffée est un point de la trajectoire du polluant. Autour de ce point, la concentration de la bouffée est supposée répartie de façon gaussienne (plus de polluant vers le centre de la bouffée que sur les bords de la bouffée).

Les distributions gaussiennes des polluants sont caractérisées par les écarts-type horizontaux et verticaux.

Pour le calcul classique, ces écarts-type vont évoluer dans le temps pour modéliser la diffusion du panache dans l'air ambiant. La loi d'évolution des bouffées suit les règles de Pasquill³ qui sont classiquement utilisées dans les modèles de dispersion gaussienne. Ces évolutions sont fonction de la distance parcourue par la bouffée depuis son départ de la source et de la stabilité de l'atmosphère.

Ce type de modélisation utilisant des bouffées est exactement identique à une modélisation gaussienne classique lorsque le vent est supposé uniforme sur tout le domaine de calcul (sans vitesse verticale du vent), le terrain plat et le débit constant.

A chaque bouffée est attribuée une concentration (ou masse) de polluant en fonction du débit de la source au moment où la bouffée quitte la source.

L'impact au sol (concentration ou dépôt) est la somme des contributions de chaque bouffée.

Soient les caractéristiques d'une bouffée i à un instant t : $[x_i, y_i, z_i, (t - t_e)_i, M_i]$

On peut écrire la formulation gaussienne donnant la concentration en un point quelconque (x, y, z) due à cette bouffée :

$$C = \frac{M_i}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{h_i}^2 \sigma_w} \exp \left[-\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{2\sigma_{h_i}^2} - \frac{(z - z_i)^2}{2\sigma_w^2} \right]$$

La concentration totale s'obtient alors en sommant les contributions de chacune des bouffées situées sur les trajectoires. Pour un instant de tracé t , on prend sur chaque trajectoire émise antérieurement à t la première bouffée d'âge $(t - t_e)_i \geq t$.

L'ensemble de ces bouffées constitue la ligne d'émission.

Toutefois, il est important de préciser que le temps de calcul pour un site ayant beaucoup de vent calme est plus long que s'il n'en possédait pas.

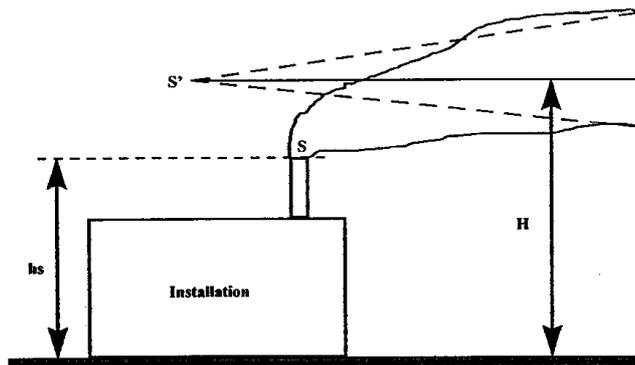
³ Guide sûreté de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique - page 50

6. LE CHOIX DE LA FORMULATION DE LA SURHAUTEUR

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, on peut prendre en compte une surélévation du panache. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. Tout se passe comme si l'émission des rejets se faisait à une hauteur réelle d'émission (hauteur de la cheminée) augmentée de la surhauteur due aux conditions d'éjection.

Dans ARIA Impact, la surhauteur d'origine thermique et la surhauteur dynamique est prise en compte.

Dans la recherche d'une estimation rapide, on ne prend pas en compte la phase intermédiaire entre la sortie de la cheminée et la phase de transport-diffusion où les caractéristiques thermodynamiques du panache et de l'air ambiant se confondent. Dans les simulations, on remplace donc la source réelle S par la source virtuelle et ponctuelle S'. La distance horizontale entre S et S' est négligeable devant la distance de S ou S' au point de calcul. Il convient donc de déterminer la hauteur limite et la distance à partir de laquelle cette hauteur est atteinte.



La hauteur effective H est calculée comme la somme de la hauteur géométrique de la source (e.g. cheminée), notée h_s et de la surélévation (ou surhauteur) du panache ("plume rise" des anglo-saxons) notée ΔH :

$$H = h_s + \Delta H$$

Pour le calcul de la surélévation, ARIA Impact contient les formules données par Briggs, par Anfossi ainsi que la formulation de Holland, de Stumke, de Concawe et de Cube.

VARIABLES SIGNIFICATIVES :

VARIABLE	DESCRIPTION	UNITE
Cp	chaleur spécifique de l'air à pression constante	J/kg/K
d	diamètre interne de la cheminée	m
Fb	paramètre de flottabilité à l'émission	m ⁴ /s ³
Fm	paramètre de quantité de mouvement à l'émission	m ⁴ /s ²
g	accélération due à la gravité	m/s ²
Q	puissance à l'émission	Watt
ρa	densité de l'air	kg/m ³
ρn	densité des gaz émis	kg/m ³
s	mesure de la stabilité thermique de l'atmosphère (carré de la fréquence de BRUNT-VAISALA)	1/s ²
θ(z)	profil de température potentielle	K
Ta	température de l'air ambiant	K
Tp	température des gaz à l'émission	K
U	Vitesse du vent	m/s
Vp	vitesse d'émission de système	m/s
x	distance sous le vent à partir de la source	m
x*	distance de stabilisation du panache	m
z	hauteur du panache/sol	m
zinit	hauteur de la source/sol	m
Dc	écart critique de température (critère de sélection effet thermique/effet dynamique)	K
DH	total surhauteur	m
DHb	surhauteur due aux effets de flottabilité	m
DHm	surhauteur due aux effets dynamiques	m
D	débit calorifique	C/s

➤ **Formule de Concawe**

Cette méthode est utilisée pour des vents de module supérieur à 1 m/s. Dans le cas contraire, il est préférable d'utiliser la formule de Briggs.

- Calcul du débit calorifique en calorie par seconde :

$$D = 226,19 \cdot V_p \cdot d \cdot \pi \cdot (T_p - T_o) \cdot 0,25$$

- Calcul de la surhauteur :

$$DH = 0,175 \cdot \frac{\sqrt{D}}{U^{0,75}}$$

➤ **Formule de Briggs**

C'est un critère qui permet de distinguer un jet d'un panache chaud. Ce critère (EPA 86) s'appuie sur les travaux de Briggs et consiste à comparer l'écart de température entre le panache et l'air à un écart critique au delà duquel les effets de flottabilité sont prépondérants.

- Paramètre de flottabilité à l'émission :

$$Fb = \frac{gQ}{\pi\rho_\alpha C_p T_a} \approx \frac{g(T_p - T_a)V_p}{T_p}$$

- Paramètre de quantité de mouvement à l'émission :

$$Fm = \frac{\rho_p}{\rho_\alpha} V_p U \approx V_p U$$

- Mesure de la stabilité thermique de l'atmosphère :

$$s = \frac{g}{T_p} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

- Calcul de l'écart de température critique Dc :

- Atmosphère neutre ou instable :

$$\begin{aligned} .Fb > 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 & \quad Dc = \frac{0,0297T_p V_p^{1/3}}{d^{2/3}} \\ .Fb \leq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 & \quad Dc = \frac{0,00575T_p V_p^{2/3}}{d^{1/3}} \end{aligned}$$

- Atmosphère stable :

$$Dc = 0,01958T_p V_p s^{1/2}$$

Si $Dc > (T_p - T_a)$ alors les effets de flottabilité sont prépondérants.

- Distance de stabilisation :

- Atmosphère neutre ou instable :

Effets de flottabilité prépondérants :

$$\begin{aligned} .Fb > 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 & \quad x^* = 49Fb^{3/8} \\ .Fb \leq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 & \quad x^* = 119Fb^{2/5} \end{aligned}$$

Effets dynamiques prépondérants :

$$x^* = \frac{4d(V_p + 3U)^2}{V_p U}$$

- Atmosphère stable :

Effets de flottabilité prépondérants :

$$x^* = \frac{\pi U}{\sqrt{s}}$$

Effets dynamiques prépondérants :

$$x^* = \frac{\pi U}{2\sqrt{s}}$$

- Formulation de la surhauteur :

- Atmosphère neutre ou instable :

Effets de flottabilité prépondérants :

$$DHb_{(x)} = 1,6 \frac{Fb^{1/3} \min(x, x^*)^{2/3}}{U}$$

Effets dynamiques prépondérants :

$$DHm_{(x)} = 2 \frac{Fm^{1/3} \min(x, x^*)^{2/3}}{U^{2/3}}$$

La valeur limite est la suivante:

$$DH_{\max} = 400 \frac{Fb}{U^3}$$

Dans le cas d'atmosphère instable ou neutre, la formule de surhauteur correspond au minimum entre la valeur limite et la surhauteur:

$$DH = \min(DH_{\max}, DH)$$

- Atmosphère stable :

Effets de flottabilité prépondérants :

$$DHb_{(x)} = 2,6 \left(\frac{Fb}{sU} \left(1 - \cos \left(\frac{\sqrt{s} \min(x, x^*)}{U} \right) \right) \right)^{1/3}$$

Effets dynamiques prépondérants :

$$DHm_{(x)} = 2,6 \left(\frac{Fm}{\sqrt{s}U} \left(\sin \left(\frac{\sqrt{s} \min(x, x^*)}{U} \right) \right) \right)^{1/3}$$

La fonction "min" signifie le plus petit des deux arguments entre parenthèses.

N.B. Pour prendre en compte les effets de flottabilité cumulés aux effets dynamiques, il convient de faire la somme des cubes :

$$DH(x) = \sqrt[3]{DHb_{(x)}^3 + DHm_{(x)}^3}$$

➤ **Formule de Anfossi**

- Paramètre de flottabilité à l'émission (équivalent à celui de Briggs) :

$$Fb = \frac{gQ}{\pi \rho_a C_p T_a} \approx \frac{g(T_p - T_a) V_p}{T_p}$$

- Mesure de la stabilité thermique de l'atmosphère :

$$s = \frac{g}{T_p} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

- Formulation de la surhauteur :

$$DH_{(x)} = 2,6 \frac{Fb^{1/3} x^{2/3}}{U} \left(\frac{x^2 S}{V^2} - 4,3 \right)^{-1/3}$$

➤ **Formule de Holland**

$$DH = 1,5 \frac{d V_p}{U} + 2,7 \frac{V_p d^2}{U} \frac{T_p - T_a}{T_p}$$

Cette formule ne tient compte que d'une capacité de surélévation ou de rabattement dynamique et elle ne dépend pas de la stabilité.

➤ **Formule de Stumke**

Cette formule n'est valable que dans le cas où le module de la vitesse du vent est supérieur à 1 m/s. Dans le cas contraire, il est préférable d'utiliser la formule de Briggs.

$$DH = 1,5.d \cdot \frac{V_p}{U} + \frac{\Omega}{U} \text{ avec}$$

$$\Omega = 118.d^{1,5} \cdot \left(1 + \frac{T_p + T_a}{T_p}\right)^{0,25}$$

➤ **Formule de Cude**

Cette formule est une formule qui, comme la formule de Briggs permet de prendre en compte une surélévation du panache fonction de la distance à la source. Elle calcule également une déflexion du panache pour le gaz des gaz plus lourds que l'air. Lorsque cette option est choisie, la vitesse de chute gravitaire du panache est alors celle calculée par Cude et non la formule de Stokes (cf § 2.11). Cette méthode est surtout valable pour les vents de vitesse supérieure ou égale à 2 m/s.

- Surélévation maximale du panache due à l'effet de jet (effet dynamique) :

$$DH \text{ max} = \frac{V_p d}{0,32U} \left(\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)^{0,5} \text{ où :}$$

ρ_g est la masse volumique du gaz à la température de rejet. Elle est déduite de la masse volumique aux conditions normales de température et de pression donnée par l'utilisateur dans la description des polluants émis.

ρ_a est la masse volumique de l'air.

La surélévation du panache est la plus petite valeur entre $2 \cdot$ (distance du point à la source) et la surélévation maximale DHmax. Cette surélévation maximale du panache est atteinte à la distance DHmax/2 de la source.

- Inclinaison du panache due à la gravité du gaz :

L'angle θ d'inclinaison du panache par rapport à l'horizontale est donné par la formule suivante :

$$\text{tg}(\theta) = -\frac{AF_1(x_1)}{t_1} \text{ où :}$$

A est un paramètre fonction du temps : $A = 9,42 \frac{gN(\rho_g - \rho_a)}{\rho_g U^4}$ avec g la constante de gravité, N le débit de la source.

t_1 est une constante de temps arbitrairement choisie à 200 s

$F_1(x_1)$ est une fonction donnée par le tableau suivant avec $x_1 = \frac{t_1}{A}$

x_1	$x_1 \times 10^{-3}$	$x_1 \times 10^{-2}$	$x_1 \times 10^{-1}$	x_1	$x_1 \times 10$	$x_1 \times 10^2$	$x_1 \times 10^3$
1	0,0059	0,0323	0,170	0,767	2,33	4,50	6,79
1,2	0,0067	0,0370	0,193	0,852	2,49	4,68	6,97
1,4	0,0075	0,0414	0,215	0,930	2,64	4,83	7,13
1,6	0,0083	0,0456	0,235	1,00	2,75	4,97	7,26
1,8	0,0091	0,0497	0,255	1,07	2,86	5,08	7,38
2,0	0,0098	0,0537	0,274	1,13	2,95	5,19	7,48
2,5	0,0116	0,0632	0,319	1,27	3,16	5,41	7,71
3,0	0,0133	0,0721	0,360	1,39	3,33	5,59	7,89
3,5	0,0149	0,0806	0,398	1,50	3,48	5,74	8,04
4,0	0,0164	0,0887	0,434	1,59	3,61	5,88	8,18
4,5	0,0179	0,0965	0,469	1,68	3,72	5,99	8,29
5,0	0,0194	0,104	0,501	1,76	3,82	6,10	8,40
6,0	0,0222	0,119	0,532	1,90	4,00	6,28	8,58
7,0	0,0249	0,132	0,619	2,03	4,15	6,43	8,74
8,0	0,0274	0,145	0,671	2,14	4,28	6,57	8,87
9,0	0,0299	0,158	0,720	2,24	4,40	6,69	8,99
10,0	0,323	0,170	0,767	2,33	4,50	6,79	9,09

Pour $x_1 < 10^{-3}$, $F_1(x_1) = 1,054x_1^{0,75}$

Pour $x_1 > 10^3$, $F_1(x_1) = \text{Log}(x_1) - 0,12$

7. CALCUL DE LA HAUTEUR DE LA COUCHE DE MELANGE

La hauteur de couche de mélange est un facteur déterminant dans le calcul de la concentration au sol. En effet, tout comme le panache se réfléchit au sol, le panache se réfléchit sur la couche de mélange qui joue le rôle de limite « imperméable » entre une couche turbulente et une couche non turbulente. Les concentrations en dessous de la hauteur de la couche de mélange sont donc beaucoup plus importantes si cette dernière est prise en compte.

La détermination de la hauteur de la couche de mélange est principalement issue du pré-processeur METPRO (PAINE 1988) qui a été mis au point par l'agence EPA (Environmental Protection Agency, USA). Le paragraphe suivant présente le principe de la méthode, les suivants présentent les formules utilisées.

➤ Principe

Durant les heures diurnes, le rayonnement net de chaleur est divisé entre le flux de chaleur 'sensible', le flux de chaleur latent, et les flux de chaleur au sol (voir figure 4, STULL, 1988). Le bilan d'énergie peut se résumer simplement par l'expression :

$$R_n = H + LE + G$$

où

R_n : Rayonnement net
 H : Flux de chaleur de surface
 LE : Flux latent de chaleur
 G : Flux de chaleur au sol

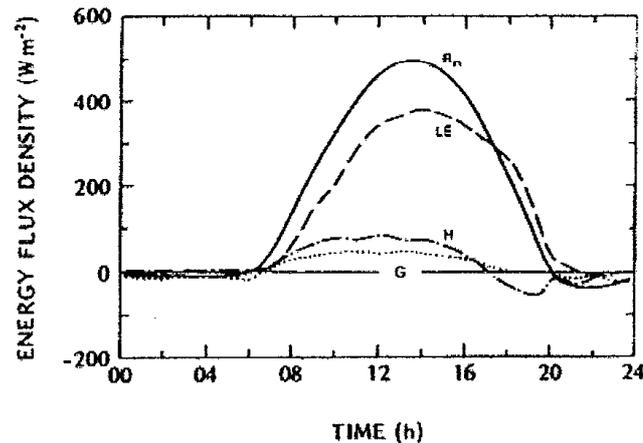


Figure 1 : Bilan des composantes énergétiques (Oke 1978)

Le calcul de **flux sensible est proportionnel à l'intensité de la turbulence** dans la couche de surface ainsi que l'épaisseur de la couche limite. La méthode consiste à **estimer le flux de chaleur sensible horaire** afin de déterminer la hauteur de couche de mélange durant les périodes de convection. La nuit, le flux de chaleur descendant est estimé à partir de la vitesse du vent et des informations sur la couverture nuageuse.

En conditions instables le bilan d'énergie (indiqué dans l'équation de bilan ci dessus) et la connaissance du vent à 10m permettent d'obtenir, suivant Holstag et Van Ulden (1983), le flux de chaleur sensible, la vitesse de frottement u_* , la longueur de Monin-Obukhov L_{mo} . Lors de conditions stables, la vitesse de frottement u_* , et la longueur de Monin-Obukhov L_{mo} sont déterminées par la formulation de Venkatram (1980).

➤ **Détermination de la couche de mélange en périodes de convection**

Avec des flux de chaleur positifs au sol (lors de conditions d'ensoleillement) et en présence de vent, nous avons à la fois de la turbulence mécanique et des phénomènes de convection. Le bilan d'énergie turbulente montre que l'énergie turbulente d'origine mécanique décroît rapidement avec l'altitude du fait qu'elle est proportionnelle au cisaillement de vent. A l'inverse la génération de convection de chaleur varie lentement avec l'altitude.

Cela induit que le sommet de la couche limite diurne est déterminé par les paramètres décrivant la convection de chaleur, particulièrement le flux de chaleur de surface.

Une équation simple pour z_i dans les conditions de convection peut être déduit du bilan d'énergie de chaleur (première loi de la thermodynamique). Considérons la Figure 2, où nous supposons une inversion par la courbe AB qui représente la distribution verticale avant le lever du soleil (temps t_0).

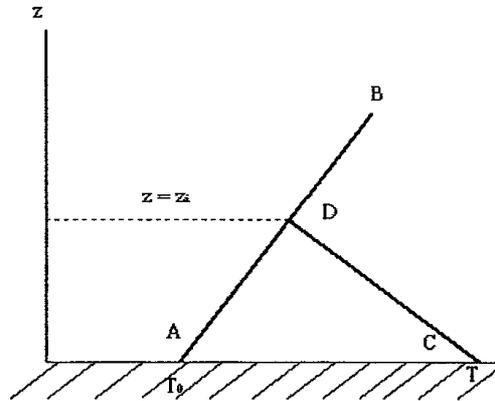


Figure 2 : Illustration de la hauteur d'inversion (d'après Panofsky et Dutton). La courbe AB représente le profil de température avant le lever du soleil, la courbe CDB le profil après le réchauffement des premières couches atmosphériques près du sol.

Le principe de la méthode consiste à supposer que le réchauffement crée à un temps t une couche adiabatique, DC, du sol jusqu'à une altitude z_i . Si T_0 est appelée la température initiale de surface nommons T la température de surface au temps t . La géométrie de la figure conduit à :

$$\gamma_d - \gamma = \frac{T - T_0}{h} \quad (1)$$

où γ et γ_d correspondent respectivement au gradient vertical de température au lever du soleil et au gradient adiabatique.

Si H est le flux de chaleur de surface la conservation de l'énergie de chaleur peut être représentée par :

$$\int_{t_0}^t H dt = \frac{c_p \rho h (T - T_0)}{2} \quad (2)$$

De [1] et [2] on déduit (Panofsky et Dutton, 1984) :

$$h = \left(\frac{2 \int_{t_0}^t H dt}{c_p \rho (\gamma_d - \gamma)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

où c_p est la chaleur spécifique à pression constante (autour de $1000 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) et ρ la densité de l'air.

➤ **Détermination de la couche de mélange en périodes nocturnes**

Pour des périodes nocturnes ou de fortes stabilité la hauteur de la couche limite est modélisé en utilisant une expression développée par Nieuwstadt (1981) (et issue des travaux de Zilitinkevich (1972)) :

$$\frac{h}{L_{mo}} = \frac{0.3u_*}{1 + 1.9 \frac{h}{L_{mo}}}$$

où f est le paramètre de Coriolis ($f \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

Dans des conditions de fortes neutralités (L_{mo} très important) cela revient à utiliser :

$$h = \frac{0.3u_*}{fL_{mo}}$$

qui est une solution largement utilisée dans les conditions de neutralité.

8. USAGE DES DONNEES DE SOL

Comme indiqué précédemment la détermination des grandeurs caractéristiques de la couche de surface : L_{mo} , u_* et la hauteur de couche de mélange est effectuée à partir d'une connaissance des paramètres sols suivant :

- hauteur de rugosité z_0 ,
- rapport de Bowen,
- albédo.

Le rapport de Bowen représente le rapport entre le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente à la surface. Tel que l'on peut s'y attendre, le rapport de Bowen est plus petit au-dessus des surfaces humides où la grande partie de l'énergie s'en va en évaporation et plus grand au-dessus des surfaces sèches où la plus grande partie de l'énergie s'en va sous forme de chaleur sensible. Les valeurs typiques varient autour de 5 ou plus au-dessus des régions semi-arides (STULL, 1988), 0.5 au-dessus des pâturages et des forêts, 0.2 au-dessus de vergers irrigués, 0.1 au-dessus de la mer et même quelques valeurs sont négatives au-dessus des oasis. L'indice d'albédo est le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi sur le

rayonnement solaire incident. Les valeurs d'albédo varient de 0.95 environ pour une surface neigeuse, à 0.1 pour des zones forestières jusqu'à 0.05 pour des zones au sol noires et humides.

Ces trois paramètres, hauteur de rugosité z_0 , rapport de Bowen, et albédo, peuvent être déduits de la matrice d'usage du sol. Les données d'usage du sol sont constituées par des matrices bidimensionnelles qui attribue une valeur numérique pour chaque classe existante sur tous les points du maillage. Prenons un exemple où on suppose que l'on est en présence de 5 types de terrains, la table de correspondance entre les classes existantes et les valeurs numériques peut être celle ci :

présence d'eau :	1
forêt :	2
prairie :	3
culture :	4
habitat urbain :	5

Le calcul des valeurs du rapport de Bowen, d'albédo et de rugosité, qui peuvent être rassemblées sous forme de matrice bidimensionnelle, se fait par une table de correspondance. Il nécessite la connaissance ponctuelle de l'usage du sol, en chaque point pour la période de simulation choisie. Dans cet exemple on fait référence à une période printanière et les valeurs attribuées de Bowen, d'albédo et de rugosité sont les suivantes :

landuse	bowen-ratio	albédo	z_0
1	0.1	0.12	0.0001
2	0.7	0.12	1.3
3	0.4	0.18	0.05
4	0.5	0.16	0.3
5	1	0.14	0.6

On notera que les valeurs fortes du rapport de Bowen correspondent à des sols urbains, les valeurs majeures d'albédo à des prairies et les valeurs de z_0 aux zones forestières.

Le calcul de la hauteur de la couche de mélange est systématiquement fait au moment de l'import des données météorologiques dès que l'on dispose des informations de température et d'un indicateur de stabilité (rayonnement net, rayonnement global ou nébulosité). Les paramètres suivants sont alors stockés : hauteur de couche de mélange (nommée ZI), longueur de Monin (nommée LMONIN), vitesse de frottement (nommée USTAR).

9. LA TAILLE DES PARTICULES

Le diamètre des poussières doit être compris entre 5 µm et 200 µm pour que la loi calculant la vitesse de chute (Stokes) soit applicable.

10. LES GAZ

Dans ARIA Impact, les gaz sont supposés chimiquement inertes.

11. LA CONCENTRATION AU SOL

La concentration du polluant au sol se détermine en fonction de divers paramètres définis dans cette annexe dont : la valeur des écarts-type, la taille des particules, la vitesse du vent, la hauteur de la cheminée...

Compte tenu des hypothèses considérées dans cette étude, la solution de l'équation de transport-diffusion dans l'atmosphère s'écrit pour un polluant sous forme gazeuse :

$$C(x, y, z = 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{x}{\sigma_y} \right)^2 \right] \times V \quad [4]$$

$$\text{où : } V = \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

- $C(x, y, 0)$: Concentration en polluant (g/m^3)
 $(x, y, 0)$: Coordonnées du point dans un système de coordonnées ayant pour origine la projection au sol de la source, et dont l'axe Ox est orienté dans la direction du vent (m)
U : Vitesse du vent (m/s)
Q : Débit de la source (g/s)
 σ_y, σ_z : Ecarts-type de dispersion horizontale et verticale (m)
H : Hauteur effective du panache par rapport au sol (m)

Pour le modèle de calcul de la dispersion et des retombées de poussières, la concentration au sol est calculée comme la somme des contributions des N classes définissant la granulométrie et dans lesquelles les poussières sont réparties. Il permet de prendre en compte une description de la granulométrie en dix classes et l'appauvrissement du panache au cours de sa progression.

Le calcul est effectué de la manière suivante :

$$C(x, y, z=0) = \sum_{j=1}^{j=N} C_j(x, y, 0)$$

et

$$C_j(x, y, 0) = \frac{Q_j}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{x}{\sigma_y} \right)^2 \right] \times \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{H_j}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

avec :

- N : Nombre de classes de granulométrie
- Q_j : Débit de polluant pour la classe j (g/s)
- H_j : Hauteur efficace du panache pour la classe j (m)

La hauteur H_j , correspondant à la hauteur efficace du panache, pour une particule j est calculée en fonction de la distance à la source x, et du vent horizontal U. Elle vaut :

$$H_j = H - V_{gj} \frac{x}{U}$$

V_{gj} (en m/s) est la vitesse de chute gravitaire des particules de type j (classe de taille) :

$$V_{gj} = \frac{d_j^2 g (\rho_p - \rho_a)}{18\mu}$$

avec :

- d_j : diamètre des particules de classe j (m)
- g : accélération de la pesanteur (m/s^2)
- ρ_p : masse volumique des poussières (kg/m^3)
- ρ_a : masse volumique de l'air (kg/m^3)
- μ : viscosité dynamique de l'air = $1.8 \cdot 10^{-5} kg/m.s$

La vitesse de gravité simule l'effet de gravité sur les particules de polluant. Elle a pour effet d'incliner l'axe du panache vers le sol.

Q_j (en g/s) est un terme-source qui s'appauvrit compte tenu des dépôts survenus entre la source et le point de calcul. $Q_j(x)$ est alors discrétisé suivant l'axe Ox, parallèle au vent, en une suite de valeurs $Q_{j,i}$ correspondant à des intervalles de distance indexés par i.

Q_j à la distance i vaut :

$$Q_{j,i} = Q_{j,i-1} - D_{j,i-1}$$

$D_{j,i-1}$ est le dépôt au sol des poussières de la classe j jusqu'à la distance $i-1$. Il est calculé d'après la formule suivante :

$$D_{j,i-1} = \int_{i-1}^{\infty} \sqrt{2\pi} \sigma_y V_{gj} C_{j,i-1} dx$$

Influence de la hauteur de couche de mélange :

Lorsque l'on veut prendre en compte la hauteur de couche de mélange, on suppose en fait que le panache se reflète sur la couche de mélange de la même façon que sur le sol. Ceci revient à rajouter des termes supplémentaires au terme V de l'équation [4] qui devient alors :

$$V = \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{2iz_i + H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \text{Exp} \left[-0,5 \left(\frac{2iz_i - H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right)$$

où z_i est la hauteur de couche de mélange.