

ENSP

ECOLE NATIONALE DE
LA SANTE PUBLIQUE

RENNES

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2005

ETUDES D'IMPACT SUR LE SITE NUCLEAIRE DU TRICASTIN A L'AIDE DU LOGICIEL COMODORE

Présenté par :

Marion SAINT-OUEN
Ingénieur de l'Ecole Nationale
Supérieure de Chimie de Lille

Lieu du mémoire :

COGEMA Pierrelatte

Référent professionnel :

M. Jany PETIT
Directeur 3SE BUC
Coordinateur 3SE Tricastin
COGEMA

Référent pédagogique :

M. Jean CARRE
Professeur ENSP

R e m e r c i e m e n t s

Ce mémoire a pu être accompli grâce à la disponibilité et la sollicitude d'un grand nombre de personnes auxquelles je tiens particulièrement à témoigner ma gratitude.

Merci tout d'abord à M. Jany PETIT de m'avoir permis d'effectuer ce mémoire.

Un merci particulier à M^{me} Anne GIORDANETTO, pour m'avoir encadrée pendant ce séjour à la COGEMA, et pour son aide à la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes les personnes avec lesquelles j'ai été amenée à travailler : M^{me} Marion BARBARIN, M. Frédéric BRUN M. François GARNIER, M. Philippe HECKEL, M. Gilles PERRIER, M^{me} Paule ROCHEREAU, M^{elle} Nathalie ROLAND, M^{elle} Sandrine SABONNADIÈRE, M. Guy SOULAVIE.

Merci aux membres du service Division Technique dans son ensemble, pour m'avoir accueillie dans leur service, et d'avoir fait en sorte que ce mémoire se passe dans un cadre chaleureux.

Merci à M. Jean CARRE, mon référent pédagogique, qui a toujours répondu présent pour répondre à mes questions malgré l'éloignement.

Merci enfin, à tous les stagiaires : Audrey, Flavien, Jehan-Julien, Joël, Noémie, Solenne, et tous les autres, d'avoir fait en sorte que ce stage soit une expérience enrichissante autant d'un point de vue humain que professionnel.

Bonne continuation à tous !

S o m m a i r e

INTRODUCTION.....	2
1 CONTEXTE.....	3
1.1 Place du site du Tricastin dans le cycle du combustible nucléaire en France.....	3
1.2 Risques associés aux rejets d'effluents radioactifs.....	6
1.3 Contexte réglementaire	11
1.4 Le rôle de la modélisation dans les études d'impact	13
2 PRESENTATION DU MODELE COMODORE.....	15
2.1 Voies d'exposition prises en compte.....	15
2.2 Les codes utilisés.....	16
2.3 Comparaison avec le modèle issu des DARPE actuellement utilisé sur le site.....	23
3 IMPACT RADIOLOGIQUE DE L'ETABLISSEMENT COGEMA	24
3.1 Description de COGEMA.....	24
3.2 Description de l'environnement	25
3.3 Estimation de l'impact dosimétrique des rejets pour l'année 2004.....	28
3.4 Comparaison avec les résultats issus du modèle DARPE	35
3.5 Discussion.....	36
3.6 Conclusion	37
3.7 Surveillance de l'environnement.....	37
4 ADAPTATION DE COMODORE AUX ERS	38
4.1 Synthèse des hypothèses retenues par l'INERIS.....	38
4.2 Utilisation de COMODORE pour les ERS.....	44
4.3 Tests.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	52
BIBLIOGRAPHIE.....	55
LISTE DES ANNEXES	I

Liste des sigles utilisés

ADEME	: Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADN	: Acide Désoxyribose Nucléique
AIEA	: Agence Internationale de l'Energie Atomique
ALARA	: As Low As Reasonably Achievable
ANDRA	: Agence National pour la gestion des Déchets Radioactifs
ASN	: Autorité de Sûreté Nucléaire
ATSDR	: Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BCOT	: Base Chaude Opérationnelle du Tricastin
Bq	: Becquerel
BU	: Business Unit
CEA	: Centre d'Etude Atomique
CIPR	: Commission Internationale de Protection Radiologique
CTA	: Coefficient de Transfert Atmosphérique
CNPE	: Centre National de Production d'Electricité
DAC	: Demande d'Autorisation de Création
DARPE	: Demande d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau
DJA	: Dose Journalière Admissible
DJE	: Dose Journalière d'Exposition
DGSNR	: Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection
EDF	: Electricité De France
ENSP	: Ecole Nationale de la Santé Publique
ERI	: Excès de Risque Individuel
ERS	: Evaluation des Risques Sanitaires
FBFC	: Franco-Belge de Fabrication de Combustible
GB	: Georges Besse
Gy	: Gray
ICPE	: Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
INB	: Installation Nucléaire de Base
INBS	: Installation Nucléaire de Base classée Secrète
INERIS	: Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INSEE	: Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
InVS	: Institut national de Veille Sanitaire
IRSN	: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
MES	: Matières En Suspension
MWe	: Méga Watt électrique
OEHHA	: Office of Environmental Health Hazard Assessment
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
OPRI	: Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants
REP	: Réacteur à Eau sous Pression
SAGE	: Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE	: Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDEI	: Société de Distribution d'Eaux Intercommunales
STEC	: Station de Traitement des Effluents Chimiques
Sv	: Sievert
QD	: Quotient de Danger
UDG	: Usine de Diffusion Gazeuse
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation
URE	: Usine de Récupération et d'Elaboration
US-EPA	: United States' Environmental Protection Agency
VTR	: Valeur Toxicologique de Référence

INTRODUCTION

Les établissements du site nucléaire du Tricastin sont amenés dans le cadre de l'estimation des conséquences des rejets de leurs installations en fonctionnement normal, à évaluer les transferts de contamination dans l'environnement, ainsi que les transferts par la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme.

Cette évaluation se faisait jusqu'à présent, pour le volet radiologique, à l'aide d'un tableur Excel, réalisé de manière commune pour les différents établissements du site en 2000/2001 dans le cadre de leurs Demandes d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau (DARPE). Afin de répondre à de nouvelles exigences en matière d'assurance de la qualité, le groupe AREVA a, depuis, décidé de les équiper d'un logiciel spécifique de calcul d'impact radiologique. Le choix du groupe s'est porté sur un logiciel, développé initialement pour le Groupe Radioécologique Nord-Cotentin en charge du suivi du site de COGEMA La Hague : le logiciel COMODORE. Son adaptation pour le site du Tricastin a été confiée à la société HEMISPHERE.

Ce mémoire a été réalisé au sein de COGEMA Pierrelatte pendant la phase de prise en main de COMODORE par les différents établissements du site. Son objectif principal a été de dégager les différences entre les deux modèles de calcul d'impact radiologique et de les interpréter en termes d'enjeux sanitaires. Pour ce faire, les codes insérés dans COMODORE ont tout d'abord été étudiés et comparés à ceux issus des DARPE. Puis, après avoir choisi et introduit dans le logiciel les paramètres nécessaires à son fonctionnement, le calcul d'impact a été lancé pour les principaux radionucléides rejetés en 2004 par l'établissement COGEMA. Enfin, compte-tenu de la volonté des établissements du Tricastin de recourir à un outil unique pour l'estimation de l'impact des rejets radiologiques et chimiques, la possibilité d'utiliser COMODORE à cet effet a été discutée sous deux angles : sa pertinence et sa faisabilité.

Remarque :

Compte tenu de l'état d'avancement de COMODORE à ce jour, le logiciel n'a pu être testé dans sa version définitive. Les résultats présentés ici sont issus de la version en date du **15 juillet 2005**.

1 CONTEXTE

1.1 Place du site du Tricastin dans le cycle du combustible nucléaire en France

1.1.1 Le cycle du combustible en France

Le cycle du combustible (Cf. ANNEXE 1) débute avec l'extraction du minerai d'uranium et s'achève avec le stockage des divers déchets radioactifs provenant des combustibles irradiés ou des opérations industrielles mettant en œuvre des matières radioactives :

- **Extraction du minerai et conversion en UF₆** : L'uranium est relativement répandu dans l'écorce terrestre, à raison de 3 grammes par tonne en moyenne. Il est extrait de mines à ciel ouvert ou souterraines, principalement en Australie, au Canada ou au Kazakhstan. Les roches sont d'abord concassées et finement broyées et l'uranium est extrait par différentes opérations chimiques. Le concentré ainsi fabriqué a l'aspect d'une pâte appelée "yellow cake" en raison de sa couleur. Il contient environ 75% d'uranium. Ce "yellow cake" subit ensuite une transformation chimique pour devenir un gaz, l'UF₆ ou hexafluorure d'uranium.
- **Enrichissement et fabrication du combustible** : L'uranium 235 est le seul isotope de l'uranium capable de subir la fission dans les réacteurs nucléaires actuels. La proportion d'atomes d'uranium 235 dans l'uranium naturel n'est que de 0,7%. Or, les Réacteurs à Eau sous Pression REP (les plus répandus en France et dans le monde actuellement) utilisent comme combustible un uranium contenant entre 3 et 5% d'uranium 235. Il faut donc enrichir l'uranium naturel. Le procédé d'enrichissement le plus utilisé est la "diffusion gazeuse". Il consiste à faire diffuser un grand nombre de fois l'UF₆ gazeux à travers des parois poreuses appelées « barrières » laissant passer préférentiellement l'isotope 235 de l'uranium contenu dans le gaz, augmentant ainsi, à chaque passage, la proportion de cet isotope fissile dans l'UF₆. L'hexafluorure d'uranium est séparé par ce procédé en deux flux, l'un relativement riche en uranium 235, l'autre appauvri. L'hexafluorure d'uranium enrichi est ensuite transformé en oxyde d'uranium pour permettre la fabrication des assemblages de combustibles dans les usines de FBFC. Les assemblages sont alors introduits dans le cœur du réacteur où ils délivrent de l'énergie par fission des noyaux d'uranium 235.
- **Retraitement et stockage des déchets** : Après une période de l'ordre de quatre ans, le combustible usé est extrait du réacteur pour refroidir en piscine, d'abord sur le site de la centrale, puis dans l'usine de retraitement COGEMA de La Hague. L'uranium et le plutonium des combustibles usés sont séparés des produits de fission et des autres actinides et sont conditionnés en vue de leur entreposage pour une réutilisation ultérieure. Les déchets radioactifs sont stockés en surface, pour les moins actifs d'entre eux, ou entreposés dans l'attente d'une solution définitive de stockage. Le plutonium issu du retraitement peut être utilisé pour fabriquer du combustible pour les réacteurs à neutrons rapides, ou du combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) utilisé dans des REP de 900 MWe du parc français, dans l'usine MELOX de Marcoule.

La grande majorité des usines du cycle du combustible font partie du groupe AREVA, qui comprend principalement les groupes COGEMA et Framatome-ANP. Les usines de fabrication de combustibles à base d'uranium sont exploitées par FBFC, filiale de Framatome-ANP. Les Installations Nucléaires de Base du cycle du combustible sont rattachées aux « Business Units » de COGEMA : BU Chimie, Enrichissement, Traitement et Recyclage (Cf. ANNEXE 1).

1.1.2 Statut des installations

A) Les Installations Nucléaires de Base (INB)

Les installations nucléaires sont réglementairement classées dans différentes catégories selon les quantités ou les activités des matières radioactives mises en œuvre. Les principales installations nucléaires fixes, dénommées « Installations Nucléaires de Base » (INB), sont définies par le décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963 qui en fixe les catégories :

- Réacteurs nucléaires à l'exception de ceux faisant partie d'un moyen de transport ;
- Accélérateurs de particules ;
- Usines de séparation, de fabrication ou de transformation de substances radioactives ;
- Usines de fabrication de combustibles nucléaires, de traitement de combustibles irradiés ou de conditionnement de déchets radioactifs ;
- Installations destinées au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de substances radioactives, y compris les déchets.

Les trois derniers types d'installations ne relèvent toutefois de la réglementation des INB que lorsque la quantité ou l'activité totale des substances radioactives est supérieure à un seuil fixé par arrêté conjoint des ministres chargés de l'Environnement, de l'Industrie et de la Santé.

Enfin, du fait de leur activité liée à la défense nationale, certaines installations peuvent obtenir le statut d'Installation Nucléaire de Base classée Secrète (INBS).

B) Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)

Les installations susceptibles de présenter des dangers et nuisances pour l'environnement sont régies par la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 modifiée, relative aux ICPE (loi qui figure dorénavant aux articles L. 511-1 à L. 517-2 du code de l'environnement). Ces installations, sont soumises à un régime dérogatoire lorsqu'elles sont implantées au sein du périmètre d'une INB. Le décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963 modifié relatif aux installations nucléaires établit en effet la distinction, précisée par un avis du Conseil d'Etat du 4 octobre 1983, entre les « équipements qui font partie d'une Installation Nucléaire de Base » et les ICPE comprises dans le périmètre d'une INB :

- Les « équipements qui font partie d'une Installation Nucléaire de Base » sont ceux qui constituent un élément de cette installation nécessaire à son exploitation ; ils relèvent des articles 2 et 3 du décret du 11 décembre 1963 et sont soumis à la procédure applicable aux INB ;
- Les installations classées comprises dans le périmètre d'une INB sont celles qui n'ont pas de lien nécessaire avec elle ; elles sont régies par les dispositions de la loi du 19 juillet 1976, à trois particularités près, précisées à l'article 6 bis du décret du 11 décembre 1963 :
 - Les ministres chargés de la sûreté nucléaire sont substitués aux préfets pour l'octroi des autorisations ;
 - Les demandes d'autorisation d'exploiter peuvent s'appuyer sur le dossier d'enquête publique remis lors de la création de l'INB, et l'autorisation peut être accordée par le décret autorisant l'INB ;
 - Les prescriptions techniques auxquelles l'exploitant doit se conformer sont notifiées par les ministres chargés de la sûreté nucléaire.

Pour ces installations, les agents de la DGSNR se substituent aux agents des DRIRE pour assurer la surveillance prévue par la loi du 19 juillet 1976, pour les installations en relevant.

1.1.3 Le site du Tricastin

A) Présentation générale

Le site nucléaire du Tricastin est situé dans la plaine de Pierrelatte au cœur de la vallée du Rhône, entre les villes de Montélimar et d'Orange (Cf. ANNEXE 1). S'étendant sur 600 hectares, il est situé sur les communes de Pierrelatte (26), St-Paul-Trois-Châteaux (26) et Bollène (84). Ce site rassemble des laboratoires de recherche et des unités de production d'électricité avec EDF (CNPE), le cycle du combustible nucléaire à travers COGEMA, FBFC, CEA, COMURHEX et EURODIF Production, ainsi que des entreprises liées au secteur nucléaire telles que SOCATRI, CERCA et BCOT.

B) Description des établissements AREVA du site

a) *Les usines de conversion et de traitement de l'uranium : établissements COMURHEX et COGEMA*

L'usine COMURHEX de Pierrelatte effectue la deuxième étape de conversion de l'uranium commencée à l'usine COMURHEX de Malvési. L'usine transforme le tétrafluorure d'uranium (UF_4) en hexafluorure d'uranium (UF_6). Elle produit également de l' UF_4 à partir d'uranium de retraitement en provenance de COGEMA La Hague. Les autres activités développées par COMURHEX concernent la fabrication de molécules fluorées (ClF_3 , WF_6 , F_2N_2) destinées aux industries automobiles (étanchéité des réservoirs d'essence des véhicules) et microélectroniques.

L'usine COGEMA Pierrelatte transforme, par défluoration, l'hexafluorure d'uranium appauvri (UF_6), en oxyde d'uranium appauvri (U_3O_8), chimiquement stable (installation W). Cette transformation s'accompagne de production d'acide fluorhydrique (HF) commercialisable. Elle s'occupe également de la conversion en oxyde, du nitrate d'uranyle issu du retraitement des combustibles usés (installation TU2 et TU5). Enfin, elle effectue la production de dioxyde d'uranium appauvri (UO_2) pour les combustibles MOX (installation TU2). Outre cette activité de chimie de l'uranium, les autres activités développées par COGEMA concernent l'entretien et la maintenance, le programme de démantèlement et d'assainissement des Usines de Diffusion Gazeuse (UDG) le soutien technique et la recherche avec les installations du CEA/VALRHO et de l'IRSN (Cf. ANNEXE 2 pour l'inventaire des installations).

b) *L'usine d'enrichissement de l'uranium EURODIF*

L'usine EURODIF Production de Pierrelatte, nommée Georges Besse (GBI), effectue l'enrichissement isotopique par le procédé de diffusion gazeuse. Ce procédé doit être remplacé à terme par l'ultracentrifugation (projet GBII). Ce projet a fait l'objet d'un débat public qui s'est terminé le 20 octobre 2004 et n'a pas fait apparaître d'opposition. Cette installation fera l'objet d'une enquête publique dans le courant 2005 dans le cadre de l'instruction de la Demande d'Autorisation de Création. La mise en service des unités de production prévues devrait s'échelonner entre 2007 et 2016.

c) *L'installation d'assainissement et de récupération d'uranium : SOCATRI*

SOCATRI, filiale de EURODIF S.A. propose une gamme de prestations dans les domaines de la décontamination et du démantèlement, le traitement des effluents, le traitement, le conditionnement et l'entreposage de déchets banals et spécifiques, la maintenance de matériels nucléaires. Elle accueille sur son site la BCOT d'EDF (Base Chaude Opérationnelle du Tricastin) et le centre ANDRA " Petits Producteurs " pour lequel elle réalise le reconditionnement des déchets hospitaliers et ceux des laboratoires.

d) *L'usine Franco-Belge de Fabrication de Combustible : FBFC*

L'usine FBFC réalise des éléments mécaniques pour assemblages combustibles dans un atelier mécanique. Les installations de fabrication d'éléments destinés aux assemblages de combustibles nucléaires ont été arrêtées et sont en cours de démantèlement.

1.2 Risques associés aux rejets d'effluents radioactifs

1.2.1 Effets sanitaires des rayonnements ionisants

A) Rappels sur la radioactivité

a) L'atome

Tous les atomes sont constitués d'un noyau central formé de particules élémentaires, les protons et les neutrons formant le noyau, et d'un nuage périphérique composé d'un cortège d'électrons. Un élément chimique est un ensemble d'atomes comportant le même nombre de protons. Il est désigné par un symbole d'une ou deux lettres.

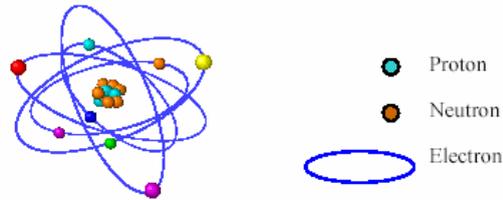


Figure 1. Constitution de l'atome

Les atomes d'un élément chimique comportant un nombre différent de neutrons sont des isotopes de cet élément. Un atome est appelé par le nom de son élément chimique suivi du nombre total de ses nucléons (somme des protons et des neutrons). Les propriétés chimiques d'un atome dépendent seulement du nombre et de la disposition des électrons dans son nuage ; tous les isotopes d'un même élément ont donc les mêmes propriétés chimiques. Cependant, la légère différence de masse de leur noyau fait que leurs propriétés physiques diffèrent quelque peu.

b) La radioactivité, propriété naturelle de certains atomes

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables. Cependant, certains atomes ont des noyaux instables, ce qui est dû à un excès soit de protons, soit de neutrons, ou encore à un excès des deux. Ils sont dits radioactifs et sont appelés radio-isotopes ou radionucléides.

Les noyaux d'atomes radioactifs se transforment spontanément en d'autres noyaux d'atomes, radioactifs ou non. Ainsi, de noyau radioactif en noyau radioactif, l'uranium 238 tend à se transformer en une forme stable, le plomb 206. Cette transformation irréversible d'un atome radioactif en un autre atome est appelée désintégration. Elle s'accompagne d'une émission de différents types de rayonnements.

Une source radioactive est caractérisée par trois paramètres indépendants :

- **Son activité** : nombre de désintégrations se produisant par unité de temps, proportionnelle au nombre d'atomes radioactifs présents et exprimée en Becquerel (Bq). L'activité radioactive est telle qu'une radioactivité de 1 Bq correspond à la désintégration de 1 noyau en 1 seconde au sein d'une matière radioactive. Elle est donnée par la relation :

$$A = \frac{dN}{dt}$$

A : activité radioactive en Bq
dN : nombre de désintégration sur une période donnée
dt : période élémentaire en seconde

- **Sa période (ou demi-vie)** : durée au bout de laquelle son activité a diminué de moitié ;
- **La nature et l'énergie transportée des rayonnements émis.**

c) Les différents types de désintégrations

En se désintégrant, un noyau radioactif peut produire différents rayonnements :

- **Le rayonnement α** qui est constitué d'un noyau d'hélium comprenant 2 protons et 2 neutrons. Il porte 2 charges positives (exemple de l'uranium 238) ;
- **Le rayonnement β^-** qui est constitué d'un électron chargé négativement (exemple du thorium 234) ;
- **Le rayonnement β^+** qui est constitué d'un positon (particule de même masse que l'électron mais chargée positivement) ;
- **Le rayonnement γ** qui est une onde électromagnétique comme la lumière visible ou les rayons X mais plus énergétique. Ce rayonnement suit souvent une désintégration α ou β (exemple du cobalt 60).

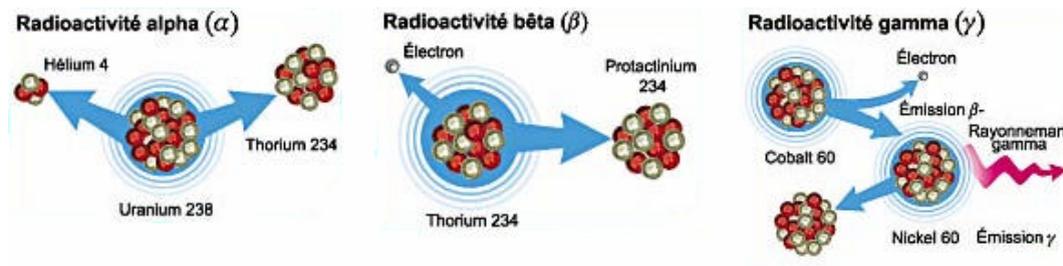


Figure 2. Les différents types de rayonnements

Ces rayonnements transfèrent assez d'énergie aux électrons de la matière pour les arracher de leur atome. Ils sont dits ionisants. Outre les rayonnements α , β^+ , β^- et γ Les rayonnements ionisants regroupent également les rayonnements cosmiques, les rayonnements X, les neutrons libres.

Les autres rayonnements sont appelés rayonnements non ionisants et comprennent les ondes électromagnétiques les moins énergétiques.

B) Risques liés aux rayonnements ionisants

a) Pénétration des rayonnements ionisants dans la matière

Par leur énergie, les rayonnements ionisants sont pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent traverser la matière. Cependant, le pouvoir de pénétration est différent pour chacun d'entre eux :

- **Particules α** : Pouvoir de pénétration très faible dans l'air, une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium ;
- **Particules β^-** : Pouvoir de pénétration faible, ils peuvent parcourir quelques mètres dans l'air et sont arrêtés par une plaque d'aluminium de quelques millimètres ;
- **Rayonnements γ et X** : Pouvoir de pénétration très grand, fonction de l'énergie du rayonnement ; ils peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger ;
- **Neutrons** : Pouvoir de pénétration dépendant de leur énergie ; une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine arrête les neutrons.

b) Les effets biologiques des rayonnements ionisants

Les deux types d'irradiation

Selon la manière dont les rayonnements atteignent l'organisme, on distingue deux modes d'exposition : externe ou interne, définies ci-après.

- **L'irradiation externe** : Elle a lieu lorsque l'organisme se trouve exposé à des sources de rayonnements extérieures. Elle peut concerner une partie ou la totalité de celui-ci et cesse dès qu'il n'est plus sur la trajectoire des rayonnements.
- **L'irradiation interne** : Elle intervient lorsque des substances radioactives ont pu pénétrer par inhalation, par ingestion ou par blessure de la peau, et se distribuent ensuite dans l'organisme. Elle ne cesse que lorsque les substances radioactives ont disparu de l'organisme par élimination naturelle et décroissance radioactive ou par traitement. Tous les radioéléments ne sont pas éliminés naturellement à la même vitesse et certains peuvent s'accumuler dans des organes spécifiques (os, foie...) avant d'être évacués du corps. Pour chacun des éléments radioactifs, est définie, en plus de sa période radioactive, une période biologique, temps au bout duquel la moitié de son l'activité a été éliminée par l'organisme.

La mesure de l'irradiation

Pour rendre compte de la nocivité plus ou moins grande des rayonnements à dose absorbée égale, il a fallu introduire pour chacun d'eux un "facteur de qualité". En multipliant la dose absorbée (en gray) par ce facteur, on obtient une mesure de l'effet biologique d'un rayonnement reçu que l'on appelle la dose équivalente (en sievert). Cependant, le risque biologique n'est pas uniforme pour l'ensemble de l'organisme. Il dépend de la radiosensibilité de l'organe irradié et les spécialistes définissent une nouvelle dose, la dose efficace (aussi exprimée en sievert) qui tient compte de ces différences de sensibilité des organes.

- **Dose absorbée** : Elle mesure la quantité d'énergie absorbée par unité de masse de tissu :

$$D_T = \frac{dE}{dm}$$

D_T	: énergie reçue par unité de masse en Gy
dE	: énergie moyenne communiquée par le rayonnement ionisant à la matière dans un volume élémentaire en J
dm	: masse de matière contenue dans cet élément de volume en kg

- **Equivalent de dose** : La dose équivalente, correspond au produit de la dose absorbée par un facteur de qualité radiologique W_r qui représente la nocivité du type de rayonnement. A énergie égale, les effets biologiques sont plus importants et plus destructeurs dans le cas des rayonnements α que des rayonnements β ou γ .

$$H_{T,r} = \sum_r W_r \times D_{T,r}$$

$H_{T,r}$: dose équivalente à un tissu ou un organe T en Sv
W_r	: facteur de pondération radiologique pour le rayonnement r (sans unité)
$D_{T,r}$: moyenne pour l'organe ou le tissu T de la dose absorbée du rayonnement r.

La dose équivalente totale est donnée par la formule :

$$H_T = \sum_r H_{T,r}$$

H_T	: dose équivalente totale en Sv
$H_{T,r}$: dose équivalente à un tissu ou un organe en Sv

- **Dose efficace** : La dose efficace s'adresse quant à elle au corps entier. Elle correspond à la somme de ces équivalents de dose à un organe et pour chaque type de tissu considéré :

$$E = \sum W_T \times H_T$$

E	: dose efficace en Sv
W_T	: facteur de pondération pour l'organe ou le tissu T de la dose absorbée du rayonnement r
H_T	: dose équivalente totale en Sv

Les effets

Quand une dose de rayonnement est reçue rapidement (quelques minutes à quelques heures) l'organisme a moins de chance d'être en mesure de réparer les dommages subis. Les effets biologiques risquent donc d'être plus importants. On parle ici de dose aiguë. Par contre, si la dose est étalée dans le temps (quelques jours à quelques années) l'organisme a alors davantage de temps pour réparer ses dommages. On parle alors de dose chronique. De la même façon qu'une brûlure aura des conséquences différentes selon qu'elle atteigne le corps entier ou seulement une de ses parties, l'irradiation de l'organisme entier est plus grave qu'une atteinte à un organe particulier du corps. En outre, certains organes sont plus sensibles que d'autres. Dans certains cas, les rayonnements peuvent toucher des molécules importantes telles que l'ADN, dans d'autres cas, des molécules de moindre importance. Les tissus les plus sensibles sont la moëlle osseuse, les organes génitaux, les intestins et la peau.

Les effets biologiques se répartissent en deux catégories : les effets déterministes et les effets stochastiques.

- **Les effets déterministes** (ou à seuil) se produisent systématiquement lorsque l'organisme est soumis à une certaine dose de rayonnement. Ces effets se manifestent de quelques minutes à plusieurs semaines après l'irradiation. Leur gravité varie selon la dose reçue, la nature des organes irradiés et l'étendue de la zone du corps exposée aux rayonnements.
- **Les effets stochastiques** (ou effets sans seuil) ne sont pas liés à une dose précise. On sait que ces effets apparaissent en cas d'exposition à de fortes doses, mais lorsqu'il s'agit de doses plus faibles, on n'a pas établi avec précision dans quelle mesure ils sont susceptibles d'apparaître. Les effets stochastiques peuvent se manifester chez la personne irradiée elle-même, sous forme de cancer par exemple, ou peut-être chez ses descendants. Dans ce dernier cas on parle d'effets héréditaires. Ceux-ci risquent d'apparaître si les testicules ou les ovaires ont été irradiés. Étant donné la complexité des mécanismes en cause, il est difficile d'en prévoir avec exactitude les conséquences chez l'être humain. On n'a jamais observé de tels effets, même chez les personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki. Par mesure de prudence, on suppose que la probabilité d'apparition des effets héréditaires augmente également avec l'intensité de la dose reçue.

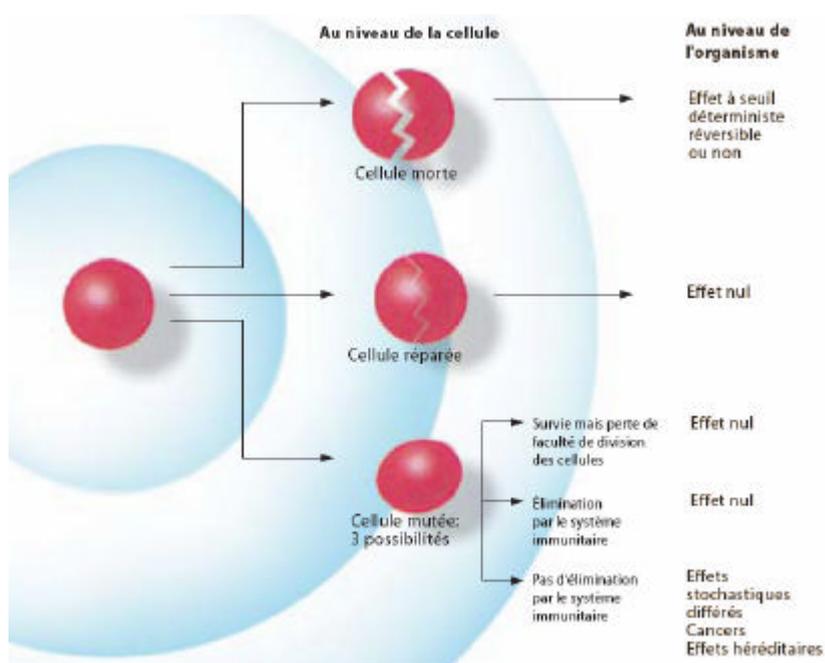


Figure 3. Les effets biologiques des rayonnements ionisants

Établis au plan international, les objectifs sanitaires de la radioprotection visent à éviter l'apparition des effets déterministes, mais aussi à réduire les probabilités d'apparition de ces cancers radio-induits.

Evaluation des risques sanitaires liés aux rayonnements ionisants

Dans une optique de gestion du risque, il est fait appel à la technique de l'évaluation des risques qui, au moyen de calculs, permet, en extrapolant les risques observés aux plus fortes doses, d'estimer les risques encourus lors d'une exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants. Pour ces estimations, a été adoptée sur le plan international l'hypothèse prudente d'une relation linéaire sans seuil entre l'exposition et le nombre de décès par cancer. Ainsi, une estimation du nombre de cancers attribuables aux expositions aux rayonnements ionisants peut être calculée, en utilisant une extrapolation linéaire sans seuil de la relation observée à des doses élevées. La légitimité de ces estimations reste cependant controversée au niveau scientifique. Dans ce contexte, et sur la base des travaux scientifiques de l'UNSCEAR, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR60) a publié des coefficients de risque de décès par cancer dû aux rayonnements ionisants, soit 5% par sievert pour la population générale.

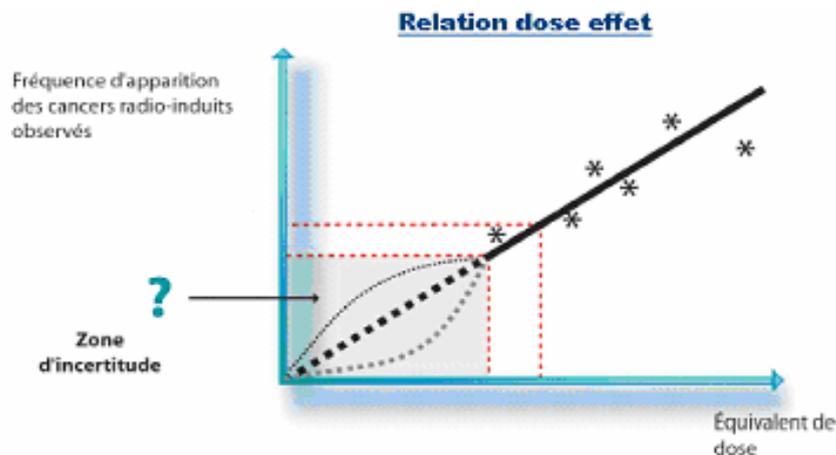


Figure 4. Diagramme de relation linéaire sans seuil

1.2.2 Le risque chimique

Au risque inhérent aux rejets vers l'environnement de substances non radioactives pouvant présenter une toxicité chimique, et lié au fonctionnement de toute installation industrielle (métaux lourds, NO_x ,...), peut s'ajouter, dans le cas du fonctionnement d'une installation nucléaire, un risque lié à la toxicité chimique des radioéléments. **En effet, parallèlement à leur toxicité radiologique, certains radioéléments peuvent présenter une toxicité chimique.** Il convient de déterminer ce qui relève de la toxicité chimique de ce qui relève de la toxicité radiologique :

- Pour les éléments radioactifs à longue période radioactive, la toxicité chimique est un risque beaucoup plus élevé que la toxicité radiologique : c'est le cas pour l'uranium naturel (U) pour lequel la toxicité chimique se rapproche d'un métal lourd, du béryllium (Be) ou encore du rubidium (Ru).
- Certains métaux ou métalloïdes, non toxiques à faibles concentrations, peuvent le devenir à fortes concentrations ou sous leur forme radioactive. C'est le cas du cobalt (Co) pouvant agir comme génotoxique, du sélénium (Se), du technétium (Tc) ou encore de l'iode (I).

Sauf pour l'uranium, les effets liés à la toxicité chimique des radioéléments restent encore mal connus à ce jour.

1.3 Contexte réglementaire

Les installations nucléaires sont soumises à un cadre réglementaire très strict, principalement marqué par les règles de radioprotection définies par la directive EURATOM 96/29 du 13 mai 1996 [10], transposée en droit français notamment par le décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, ainsi qu'au décret n° 95-540 du 4 mai 1995 modifié relatif aux rejets d'effluents liquides et gazeux et aux prélèvements d'eau des INB [9].

1.3.1 La réglementation en radioprotection

A) Les instances de régulations

Au niveau international, l'organisme central de radioprotection est la CIPR. Elle se base sur la veille scientifique réalisée par l'UNSCEAR pour édifier les doctrines ou des applications pratiques qui serviront de recommandations aux réglementations nationales. Dans le cas des états de l'Union Européenne, les recommandations de la CIPR sont recueillies par la Commission Européenne qui a le pouvoir de fixer des mesures légales communes à tous les états membres soit par règlements, soit par directives. En France, l'instance chargée du contrôle de la sûreté nucléaire est l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Elle est chargée notamment de définir les objectifs généraux de sûreté et de radioprotection, de vérifier la conformité des modalités proposées par les exploitants avec les objectifs définis et enfin de contrôler la mise en œuvre des dispositions.

B) Incidence de la directive EURATOM 96/29

La directive EURATOM 96/29 du 13 mai 1996, dite directive « normes de base », fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements. Elle abroge les directives antérieures et impose une mise en vigueur dans les Etats membres avant le 13 mai 2000. La directive EURATOM a pour base scientifique les recommandations de la CIPR60 de 1990 formulées par un collège international d'experts en radioprotection.

En France, une mise à jour complète des dispositions législatives et réglementaires concernant la radioprotection contenues dans le Code de la Santé Publique a été entreprise. La partie législative a été actualisée en 2001 par l'ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001 qui a introduit dans les textes français, notamment le code de la Santé Publique, les dispositions législatives découlant de la directive. Ses décrets d'application, décrets n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, et n° 2003-461, relatif à certaines dispositions réglementaires du code de la santé publique, ont également été actualisés. Ils renforcent notamment les trois principes fondamentaux de la radioprotection que sont :

- La justification qui s'applique à toute nouvelle pratique en tenant compte du rapport avantages/détriments ;
- L'optimisation qui implique que les expositions soient maintenues au niveau le plus faible raisonnablement possible compte-tenu des facteurs économiques et sociaux (principe ALARA) et qui introduit également la notion de contrainte de dose ;
- La limitation car les limites de dose préconisées ont été diminuées.

Cette directive contient une mesure capitale qui est l'abaissement du seuil limite d'exposition aux rayonnements ionisants. La somme des doses efficaces reçues par une personne du public du fait des différentes pratiques passe de $5\text{mSv}\cdot\text{an}^{-1}$ à $1\text{mSv}\cdot\text{an}^{-1}$ (limite qui peut être moyennée sur 5 ans) au nom de la limitation des doses individuelles. En outre, une des nouveautés de la directive EURATOM 96/29, reprise en France par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 [1] réside dans l'utilisation des définitions des grandeurs et des unités, ainsi que les valeurs de pondération radiologiques et tissulaires qui figurent

dans les recommandations de la CIPR60. Pour l'estimation de la dose efficace, il est fait l'usage des valeurs et corrélations définies par la directive. Les doses sont estimées de façon aussi réalistes que possible pour l'ensemble de la population et pour les groupes de référence, c'est-à-dire les groupes comprenant des individus dont l'exposition à une source est assez uniforme et représentative de celle des individus qui, parmi la population, sont particulièrement exposés à ladite source. Les doses calculées comprennent notamment :

- Les doses dues à l'irradiation externe avec indication, le cas échéant, de la qualité des rayonnements en cause ;
- L'incorporation de radionucléides avec indication de leur nature et au besoin de leur état physique et chimique et détermination des activités et des concentrations de ces radionucléides.

Les éléments intermédiaires du calcul de dose, résultant de l'incorporation de radionucléides, correspondent à des coefficients de dose incorporés par inhalation et par ingestion pour le public, et pour différentes tranches d'âge, ainsi que pour les travailleurs avec différents paramètres correspondant aux conditions d'exposition considérées.

1.3.2 Les procédures d'autorisations [2]

- A) Demande d'Autorisation de Création (DAC) et Demande d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau (DARPE)

La législation et la réglementation françaises interdisent l'exploitation d'une installation nucléaire sans autorisation. Dans ce cadre, les INB sont actuellement réglementées, en l'attente d'une loi spécifique des activités nucléaires, par le décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963 modifié pris pour l'application de la loi n° 61-842 du 2 août 1961 modifiée relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs. Ce décret prévoit notamment une procédure de Demande d'Autorisation de Création (DAC) suivie d'une série d'autorisations délivrées lors des principales étapes marquant la vie de ces installations : chargement en combustible ou mise en actif, mise en service, mise à l'arrêt définitif, démantèlement.

Les INB sont également soumises aux prescriptions du décret n° 95-540 du 4 mai 1995 pris pour l'application, d'une part de la loi du 2 août 1961 précitée, d'autre part de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 modifiée sur l'eau (art. L. 210-1 à L. 217-1 du code de l'environnement). Ce décret, modifié notamment par l'article 3 du décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, fixe le régime d'autorisation des rejets d'effluents liquides et gazeux et des prélèvements d'eau de ces installations. Cette autorisation concerne les effluents radioactifs liquides et les effluents radioactifs gazeux. Elle tient compte de la radioactivité ainsi que des caractéristiques chimiques de ces deux types d'effluents radioactifs. Par ailleurs, le fonctionnement de la plupart des installations nucléaires nécessite également, dans le milieu environnant et selon les cas, des prélèvements d'eau et des rejets d'effluents liquides et gazeux non radioactifs. Une même autorisation, délivrée au niveau ministériel, réglemente les rejets d'effluents liquides et gazeux radioactifs et non radioactifs, ainsi que les prélèvements d'eau d'une INB considérée. La procédure, explicitée par deux circulaires interministérielles (Santé, Industrie, Environnement) des 6 novembre 1995 et 20 mai 1998, est menée sur le fondement d'une seule et même demande établie en conséquence ; le service instructeur étant dans tous les cas la DGSNR. Les règles de procédure du décret précité s'appliquent également aux installations classées incluses dans le périmètre d'une INB.

Outre divers documents et plans, DARPE et DAC se doivent de contenir une étude d'impact sanitaire comportant un volet radioactif et un volet chimique.

B) Le volet sanitaire des études d'impact

Les principaux textes pouvant avoir une incidence sur le contenu du volet sanitaire des études d'impact sont : (Cf. ANNEXE 3 pour précisions)

- Le décret du 4 mai 1995 modifié et sa circulaire d'application du 20 mai 1998 ;
- L'arrêté du 26 novembre 1999 ;
- La loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 modifiée sur l'eau.

a) *Impact sanitaire des rejets radioactifs*

L'impact sanitaire des rejets radioactifs est évalué par calcul au travers de la dose efficace reçue par une population de référence et comporte habituellement les quatre étapes suivantes :

- 1°) description et quantification des effluents produits**
- 2°) description de l'environnement**
- 3°) estimation de l'impact dosimétrique des rejets prévus sur la population**
- 4°) définition des modalités de surveillance des rejets et de l'environnement**

Un guide méthodologique a été élaboré par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), afin de faciliter l'évaluation des dossiers de Demande d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau déposés par les exploitants d'INB, pour ce qui concerne les rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux et l'étude de leur impact radiologique [24].

b) *Impact sanitaire des rejets non radioactifs*

L'impact sanitaire des rejets non radioactifs est estimé par une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). L'EQRS comporte habituellement les quatre étapes suivantes :

- 1°) identification des dangers**
- 2°) choix des Valeurs Toxicologiques de Références (VTR)**
- 3°) évaluation de l'exposition des populations**
- 4°) caractérisation des risques sanitaires**

Deux guides font référence pour la démarche EQRS en France : le guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact de l'InVS [19] et le guide méthodologique d'évaluation des risques sanitaires de l'INERIS [12].

1.4 Le rôle de la modélisation dans les études d'impact

L'étape d'évaluation de l'exposition des populations est présente à la fois dans le volet radiologique et chimique de l'étude d'impact sanitaire. Elle nécessite de déterminer des concentrations dans les différents compartiments environnementaux avec lesquels l'homme est amené à entrer en contact. Cette étape peut faire appel à la mesure et/ou à la modélisation. Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients. La mesure directe dans les conditions du site permet d'intégrer la complexité de tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques mais pose des problèmes de limites de détection, de représentativité de l'échantillonnage et d'incertitude. En outre elle fournit une indication globale qui intègre la pollution historique du site ou les apports des autres sources de pollution ; elle ne permet donc pas d'évaluer la part strictement attribuable au fonctionnement d'une installation. L'approche par modélisation est donc souvent nécessaire. Elle permet d'estimer les concentrations aux points d'exposition éloignés des points d'échantillonnage, en prenant en compte les phénomènes de transport. Elle permet de représenter l'évolution des concentrations lorsque l'approche considérant les concentrations constantes au cours du temps n'est plus adaptée. Elle permet également de prédire les concentrations faibles, inférieures aux

limites de détection, mais qui peuvent néanmoins causer des effets toxiques. La prédiction de la concentration obtenue à un terme donné, en cas d'installation nouvelle est aussi possible. Enfin, contrairement au mesurage qui donne une image de l'exposition multisources liée à une substance (exposition cumulée), la modélisation permet de calculer une exposition strictement attribuable au site.

Deux types d'outils de modélisation sont disponibles à l'heure actuelle : il peut s'agir de logiciels permettant de modéliser les phénomènes de dispersion ou d'équations présentées dans un simple guide méthodologique [15]. Actuellement, les codes utilisés par les établissements du Tricastin pour l'estimation de l'impact dosimétrique de leurs installations sont issus de leurs dossiers DARPE datant de 2000/2001 : les données utilisées ne sont pas toujours référencées. Pour résoudre ce problème et afin de répondre à de nouvelles exigences en matière d'assurance qualité, le groupe AREVA a depuis décidé d'équiper ses établissements du sud-est de la France d'un logiciel spécifique de calcul d'impact radiologique. Le choix du groupe s'est porté sur un logiciel, développé initialement pour le Groupe Radioécologique Nord-Cotentin en charge du suivi du site de COGEMA La Hague : le logiciel COMODORE. Son adaptation pour le site du Tricastin a été confiée à la société HEMISPHERE Ce mémoire intervient pendant la phase de prise en main de COMODORE par les différents établissements du site. Les résultats présentés ici sont issus de la version de COMODORE du 15 juillet 2005.

2 PRESENTATION DU MODELE COMODORE

COMODORE est une synthèse de trois logiciels validés par l'IRSN que sont ACADIE, COTRAM4 et SQUAREJ. Le logiciel se présente comme un outil simple de calcul de doses efficaces liées aux rejets gazeux et liquides des installations.

2.1 Voies d'exposition prises en compte

Les voies d'exposition prises en compte par le modèle COMODORE sont les suivantes :

- Pour les rejets gazeux :
 - Exposition externe au panache ;
 - Exposition externe au dépôt ;
 - Exposition interne par inhalation ;
 - Exposition interne par ingestion d'aliments et de sol contaminés par les dépôts.
- Pour les rejets liquides : exposition interne par ingestion d'aliments, d'eau ou de sol contaminés par irrigation avec l'eau du canal

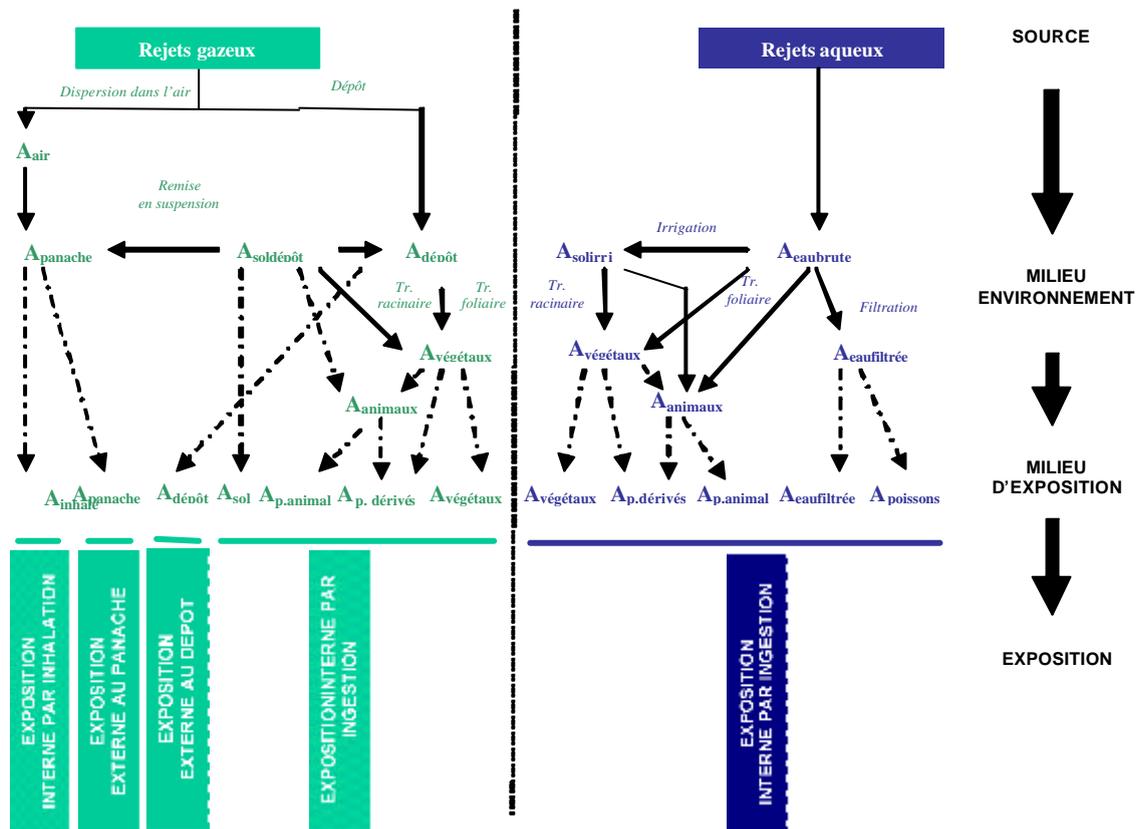


Figure 5. Transferts et voies d'exposition pris en compte dans COMODORE

Les aliments considérés pour la voie ingestion sont :

- Pour les végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, céréales ;
- Pour les aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, poissons, lait de vache ;
- Pour les produits dérivés : produits laitiers et vin ;
- L'eau du canal filtrée.

2.2 Les codes utilisés

2.2.1 Modélisation des transferts entre les milieux

a) Coefficients de Transfert Atmosphériques et dépôts [21],[27]

Le modèle de dispersion utilisé pour le calcul des coefficients de transfert atmosphérique (CTA) est le modèle de Doury qui prend comme solution de l'équation de diffusion une distribution gaussienne à trois dimensions. Parmi les variantes du modèle gaussien de la méthodologie européenne, l'approche par les écarts types de Doury a été préférée à celle des classes de Pasquill/Smith/Hosker. Les CTA obtenus selon les deux approches sont comparables grâce à la table de correspondance Doury-Pasquill. La dispersion des radionucléides dans l'atmosphère sur l'ensemble de l'année est traitée par le module de calcul COTRAM qui a été inséré dans le logiciel. Il s'agit d'un modèle gaussien à bouffées. Le calcul des CTA prend en compte l'appauvrissement du panache par dépôt sec et par dépôt humide ainsi que le phénomène de réflexion sur le sol. Pour un radionucléide donné, la concentration atmosphérique moyenne annuelle s'écrit :

$$A_{air}(r, \mathbf{q}, z) = CTA_{moyen}(r, \mathbf{q}, z) \times Q_{gaz}$$

A_{air}	: concentration atmosphérique moyenne annuelle en Bq.m ³
r, θ, z	: coordonnées polaires du point de calcul
CTA_{moyen}	: coefficient de transfert atmosphérique annuel moyen en Bq.m ³ par Bq.s ⁻¹ rejeté
Q_{gaz}	: débit de rejet dans l'atmosphère moyen annuel en Bq.s ⁻¹

Le dépôt des radionucléides est dû aux échanges turbulents air-sol et à la gravité (« dépôt sec ») ainsi qu'à l'entraînement par les précipitations (« dépôt humide »). Le débit de dépôt sec moyen annuel est proportionnel à la concentration atmosphérique moyenne annuelle. Il s'écrit :

$$D_s(r, \mathbf{q}) = A_{air}(r, \mathbf{q}, z) \times V_d$$

D_s	: débit de dépôt sec moyen annuel en Bq.m ² .s ⁻¹
A_{air}	: concentration atmosphérique moyenne annuelle en Bq.m ³
V_d	: vitesse de dépôt par temps sec en m.s ⁻¹

Le débit de dépôt humide moyen annuel s'écrit :

$$D_h(r, \mathbf{q}) = \int_0^{h_p} \Lambda_p \times CTA_{pluie}(r, \mathbf{q}) \times Q_{gaz} dz$$

D_h	: débit de dépôt humide moyen annuel en Bq.m ² .s ⁻¹
Λ_{air}	: taux de lavage par les précipitations en s ⁻¹
CTA_{pluie}	: coefficient de transfert atmosphérique annuel moyen par temps de pluie en Bq.m ³ par Bq.s ⁻¹ rejeté
h_p	: hauteur de la couche lessivée par la pluie
Q_{gaz}	: débit de rejet dans l'atmosphère moyen annuel en Bq.s ⁻¹

La valeur par défaut de la vitesse de dépôt par temps sec est fixée à 5.10⁻³m.s⁻¹ pour les radionucléides (hors tritium et carbone 14). La valeur par défaut du taux de lavage par les précipitations est de 2.10⁻⁴s⁻¹ pour les sites français ; elle correspond à une pluie moyenne de 2mm.h⁻¹.

b) Transferts dans la biosphère [22],[23]

Activité de l'eau

Le logiciel fait l'hypothèse d'une dilution instantanée des radionucléides dans l'eau du canal sur toute la largeur et la hauteur du cours d'eau.

L'activité moyenne annuelle de l'eau brute est donnée par la formule suivante :

$$A_{\text{eau brute}} = \frac{Q_{\text{moyen}}}{D_{\text{moyen}}}$$

$A_{\text{eau brute}}$: activité volumique annuelle de l'eau brute en Bq.m ³
Q_{moyen}	: débit d'activité rejetée en rivière moyenné sur une année en Bq.s ⁻¹
D_{moyen}	: débit moyenné de la rivière sur une année en m ³ .s ⁻¹

La concentration moyenne pendant la période d'irrigation de l'eau brute est déterminée en prenant en compte le débit de la rivière sur la période d'irrigation :

$$A_{\text{eau irrig}} = \frac{Q_{\text{irrig}}}{D_{\text{irrig}}}$$

$A_{\text{eau irrig}}$: activité volumique de l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m ³
Q_{irrig}	: débit d'activité rejetée en rivière pendant la période d'irrigation en Bq.s ⁻¹
D_{irrig}	: débit moyenné de la rivière pendant la période d'irrigation en m ³ .s ⁻¹

L'activité de l'eau filtrée est calculée en fonction du taux de fixation sur les Matières En Suspension (MES) et de l'activité de l'eau brute :

$$A_{\text{eau filtrée}} = \frac{A_{\text{eau brute}}}{(1 + K_d \times C_{\text{MES}})}$$

$A_{\text{eau filtrée}}$: activité volumique annuelle moyenne de l'eau filtrée en Bq.m ³
$A_{\text{eau brute}}$: activité volumique annuelle dans l'eau brute en Bq.m ³
K_d	: coefficient de partage des radioéléments entre l'eau et les MES en m ³ .kg ⁻¹
C_{MES}	: concentration en MES de la rivière en kg.m ⁻³

Activité du sol

➤ Activité due aux dépôts

L'activité du sol due aux dépôts est obtenue en intégrant, sur le temps de fonctionnement de l'installation, l'équation qui combine les débits de dépôt par temps sec et par temps de pluie avec les pertes par décroissance radioactive et migration dans le sol :

$$A_{\text{sol dépôt}} = (D_s + D_h) \times \frac{1 - \exp[-(I_m + I) \times t_f]}{(I_m + I) \times r_0 \times P_r}$$

$A_{\text{sol dépôt}}$: activité du sol due aux dépôts en Bq.kg ⁻¹
D_s	: débit de dépôt sec en Bq.s ⁻¹ .m ²
D_h	: débit de dépôt humide en Bq.s ⁻¹ .m ²
λ_m	: constante de migration de l'élément dans le sol en s ⁻¹
λ	: constante de décroissance radiologique du radionucléide en s ⁻¹
t_f	: temps de fonctionnement de l'installation en s
ρ_0	: masse volumique du sol sec en kg.m ⁻³
P_r	: profondeur de l'horizon racinaire en m

➤ Activité du sol due à l'irrigation

Les sols sont contaminés suite à l'irrigation des cultures avec l'eau de la rivière. Les parties aériennes des végétaux retiennent une partie de l'eau. L'autre, non retenue, se dépose à la surface du sol et migre ensuite dans le sol par lixiviation.

Le sol peut également être appauvri en éléments radioactifs par deux autres phénomènes, à savoir : l'extraction de l'activité par les cultures antérieures et exportées lors des récoltes ou le renouvellement du sol par érosion.

Afin de rendre compte de l'appauvrissement de l'horizon racinaire, un phénomène de migration est modélisé. Cette migration prend en compte les trois phénomènes décrits ci-dessus.

La concentration dans les sols irrigués est donnée par la formule suivante :

$$A_{solirrig} = A_{eau brute} \times V_{irrig} \times \frac{1 - \exp[-(I_m + I) \times t_f]}{(I_m + I) \times r_0 \times P_r}$$

$A_{solirrig}$: activité du sol irrigué en Bq.kg ⁻¹
$A_{eau brute}$: activité volumique annuelle dans l'eau brute en Bq.m ³
V_{irrig}	: débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m ³ .s ⁻¹ .m ²
λ_m	: constante de migration dans le sol de l'élément en s ⁻¹
λ	: constante de décroissance radiologique du radionucléide en s ⁻¹
t_f	: temps de fonctionnement de l'installation en s
ρ_0	: masse volumique du sol sec en kg.m ³
P_r	: profondeur de l'horizon racinaire en m

Activité des végétaux

Après dispersion dans l'atmosphère, les radionucléides se déposent sur le sol et sur les parties aériennes des végétaux, conduisant finalement aux deux grandes voies de transfert vers le végétal que sont le transfert foliaire et le transfert racinaire.

➤ Activité due au transfert foliaire ou direct

Une partie du dépôt peut être retenue par les feuilles des végétaux. Une partie des radionucléides ainsi déposés est absorbée par la surface foliaire et transférée à la partie comestible.

La fraction du dépôt retenue sur les parties aériennes du végétal est modélisée par le *rapport de captation*. On considère que le franchissement des enveloppes externes des parties aériennes du végétal s'effectue sans perte d'activité et donc que l'activité déposée sur les parties aériennes se répartit par dilution dans le végétal.

Un *facteur de translocation*, rapport de l'activité massique entre la partie comestible et la biomasse du végétal, permet d'obtenir l'activité massique dans les parties comestibles.

Entre l'instant où les particules radioactives se déposent sur le végétal et la récolte du végétal, trois phénomènes contribuent à la diminution de la radioactivité, à savoir : une décroissance radioactive ; un phénomène mécanique (lessivage par la pluie des parties aériennes du végétal) ; un phénomène biologique (dilution par croissance du végétal). Ces deux derniers phénomènes sont modélisés à l'aide d'une seule constante appelée *constante de décroissance biomécanique*.

Les équations donnant la concentration dans les parties comestibles des végétaux par voie foliaire à la récolte pour les rejets liquides et gazeux sont les suivantes :

○ Pour les rejets liquides :

$$A_{vég.foliaireirrig} = A_{eauirrig} \times V_{irrig} \times R_h \times F \times \frac{1 - \exp[-(I_{bm} + I) \times t_{vég}]}{(I_{bm} + I) \times r}$$

$A_{vég.foliaireirrig}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg ⁻¹
$A_{eauirrig}$: activité volumique dans l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m ³
V_{irrig}	: débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m ³ .s ⁻¹ .m ²
R_h	: rapport de captation humide du végétal (sans unité)
F	: facteur de translocation (sans unité)
λ_{bm}	: constante biomécanique de l'élément en s ⁻¹
λ	: constante de décroissance radiologique du radionucléide en s ⁻¹
$t_{vég}$: temps de croissance du végétal en s
r	: rendement de culture en kg _{fruits} .m ²

- Pour les rejets gazeux :

$$A_{\text{vég.foliairedépôt}} = (D_s \times R_{cs} + D_h \times R_{ch}) \times F \times \frac{1 - \exp[-(I_{bm} + I) \times t_{\text{vég}}]}{(I_{bm} + I) \times r}$$

$A_{\text{vég.foliairedépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg ⁻¹
D_s	: débit de dépôt sec en Bq.s ⁻¹ .m ²
D_h	: débit de dépôt humide en Bq.s ⁻¹ .m ²
R_s	: rapport de captation sec du végétal (sans unité)
R_h	: rapport de captation humide du végétal (sans unité)
F	: facteur de translocation (sans unité)
λ_{bm}	: constante biomécanique de l'élément en s ⁻¹
λ	: constante de décroissance radiologique du radionucléide en s ⁻¹
$t_{\text{vég}}$: temps de croissance du végétal en s
r	: rendement de culture en kg _{frais} .m ²

➤ Activité due au transfert racinaire ou indirect

Cette activité est calculée à partir de l'activité du sol :

- Pour les rejets liquides :

$$A_{\text{vég.racinaireirrig}} = A_{\text{solirrig}} \times F_{\text{rac}}$$

$A_{\text{vég.racinaireirrig}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg ⁻¹
A_{solirrig}	: activité massique du sol irrigué Bq.kg ⁻¹
F_{rac}	: facteur de transfert racinaire en kg _{sol} .kg _{frais} ⁻¹ .

- Pour les rejets gazeux :

$$A_{\text{vég.racinaireépôt}} = A_{\text{soldépôt}} \times F_{\text{rac}}$$

$A_{\text{vég.racinaireépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg ⁻¹
$A_{\text{soldépôt}}$: activité surfacique déposée sur le sol Bq.m ⁻²
F_{rac}	: facteur de transfert racinaire en kg _{sol} .kg _{frais} ⁻¹ .

Cas particuliers :

- Pour les rejets liquides : **³H, C¹⁴**

L'intégration du tritium par le végétal est calculée à l'aide d'une modélisation spécifique : la concentration de tritium dans le végétal est strictement proportionnelle à la teneur en eau du végétal :

$$A_{\text{vég}^3\text{H}} = A_{\text{eau brute}} \times \text{TAU}$$

$A_{\text{vég}^3\text{H}}$: activité du végétal due au tritium en Bq.kg ⁻¹
$A_{\text{eau brute}}$: activité volumique annuelle moyenne de l'eau brute en Bq.m ³
TAU	: teneur en eau par unité de masse du végétal en m ³ .kg ⁻¹

Pour le carbone 14, il est fait l'hypothèse que l'apport par irrigation est remis à disposition du végétal, du fait de l'émanation de CO₂ du sol et qu'il est incorporé via la photosynthèse. Le logiciel fait l'hypothèse majorante que le flux de carbone 14 émané du sol est égal à la totalité de l'apport par irrigation :

$$A_{\text{vég}^{14}\text{C}} = \frac{A_{\text{eauirrig}} \times V_{\text{irrig}} \times f \times f_v}{j_c}$$

$A_{\text{vég}^{14}\text{C}}$: activité du végétal due au carbone 14 en Bq.kg ⁻¹
A_{eauirrig}	: activité de l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m ³
V_{irrig}	: débit d'irrigation en m ³ .m ² .s ⁻¹
f	: fraction du flux carboné provenant du sol participant à la photosynthèse (sans unité)
f_v	: fraction de carbone dans le végétal frais en kg _C .kg _{frais} ⁻¹
j_c	: flux de carbone (sous forme CO ₂) provenant du sol en kg.m ² .s ⁻¹

o Pour les rejets gazeux : ^3H , C^{14} et gaz rares

Pour le tritium, le carbone 14 et les gaz rares, il est admis que le milieu terrestre et les organismes vivants se mettent rapidement en équilibre et que l'activité spécifique des organismes vivants est la même que celle de l'atmosphère au point considéré. On a :

$$A_{\text{vég}^{14}\text{C}, ^3\text{H}, \text{rares}} = A_{\text{air}} \times F_{\text{vc}}$$

$A_{\text{vég}^{14}\text{C}, ^3\text{H}, \text{rares}}$: activité du végétal due au carbone 14, au tritium ou aux gaz rares en Bq.kg^{-1}

A_{air} : activité volumique annuelle moyenne de l'air en Bq.m^{-3}

F_{vc} : facteur de concentration au végétal pour le radionucléide considéré en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$

Activité des produits d'origine animale

Le transfert de la contamination aux animaux se fait par ingestion d'aliments et de sol contaminés. La voie d'atteinte par exposition interne par inhalation n'est pas retenue. Le logiciel prend en compte la fraction exogène des végétaux ingérés par les animaux. Cette fraction traduit le fait que ces végétaux peuvent provenir de zones non contaminées. La concentration dans les aliments d'origine animale est obtenue à partir de l'activité ingérée par l'animal et d'un facteur de transfert à l'aliment d'origine animale :

$$A_{\text{p. animal}} = \left[\left(\sum_{\text{veg}} (A_{\text{vég. foliaire}} + A_{\text{vég. racinaire}}) \times Q_{\text{vég.}} \times [1 - E_x] \times \frac{D_{\text{conso}}}{12} \times \exp[-I \times t_{\text{stock}}] \right) + A_{\text{sol}} \times Q_{\text{sol}} + A_{\text{eau}} \times \frac{Q_{\text{eau}}}{1000} \right] \times F_{\text{animal}}$$

$A_{\text{vég. foliaire}}$: activité massique des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg^{-1}

$A_{\text{vég. racinaire}}$: activité massique des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg^{-1}

$Q_{\text{vég. animal}}$: consommation de végétal par l'animal kg.frais.j^{-1}

A_{sol} : activité massique du sol en Bq.kg^{-1}

Q_{sol} : consommation de sol par l'animal kg.frais.j^{-1}

$A_{\text{eau brute}}$: activité de l'eau brute en Bq.m^{-3}

Q_{eau} : consommation d'eau par l'animal L.j^{-1}

E_x : fraction exogène du végétal (sans unité)

λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s^{-1}

t_{stock} : temps de durée de stockage du végétal en s

F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en Bq.kg.frais^{-1} par Bq.ingéré.j^{-1}

L'activité du lait de la vache est donnée par l'équation suivante :

$$A_{\text{lait}} = A_{\text{vache}} \times F_{\text{vache-lait}}$$

A_{lait} : activité massique du lait en Bq.L^{-1}

A_{vache} : activité massique de la vache Bq.kg^{-1}

$F_{\text{vache-lait}}$: facteur de transfert de la vache au lait en kg.L^{-1}

Cas particuliers : ^3H , C^{14} et gaz rares

o Pour les rejets liquides : C^{14}

$$A_{\text{vég}^{14}\text{C}} = \frac{A_{\text{eau irrig}} \times V_{\text{irrig}} \times f \times f_a}{j_c}$$

$A_{\text{vég}^{14}\text{C}}$: activité du végétal due au carbone 14 en Bq.kg^{-1}

$A_{\text{eau irrig}}$: activité de l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m^{-3}

V_{irrig} : débit d'irrigation en $\text{m}^3.\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

f : fraction du flux carboné provenant du sol participant à la photosynthèse (sans unité)

f_a : fraction de carbone dans le produit animal en kg.c.kg

j_c : flux de carbone (sous forme CO_2) provenant du sol en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

o Pour les rejets gazeux : ^3H , C^{14} et gaz rares

Pour les rejets gazeux de tritium, le carbone 14 et les gaz rares, il est admis que l'activité spécifique dans les organismes vivants est la même que celle de l'atmosphère au point considéré. On a ainsi :

$$A_{\text{p. animal}^{14}\text{C}, ^3\text{H}, \text{rares}} = A_{\text{air}} \times F_{\text{vc}}$$

$A_{\text{p. animal}^{14}\text{C}, ^3\text{H}, \text{rares}}$: activité du produit animal due au carbone 14, au tritium ou aux gaz rares en Bq.kg^{-1}

A_{air} : activité volumique annuelle moyenne de l'air en Bq.m^{-3}

F_{vc} : facteur de concentration au produit animal pour le radionucléide considéré en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$

Activité des produits dérivés

Les produits dérivés pour la région du sud-est sont les produits laitiers et le vin. Un effet de concentration est pris en compte pour le calcul de leur activité :

- Pour les produits laitiers :

$$A_{p.laitiers} = A_{lait} \times F_{lait-p.laitiers}$$

$A_{p.laitiers}$: activité massique des produits laitiers en Bq.kg⁻¹
 A_{lait} : activité massique du lait en Bq.L⁻¹
 $F_{lait-p.laitiers}$: facteur de transfert du lait aux produits laitiers en L.kg⁻¹

- Pour le vin :

$$A_{vin} = A_{fruits} \times F_{fruits-vin}$$

A_{vin} : activité massique du vin en Bq.L⁻¹
 A_{fruits} : activité massique des fruits en Bq.kg⁻¹
 $F_{fruits-vin}$: facteur de transfert des fruits au vin en kg.L⁻¹

Activité des produits de la pêche

Il est fait l'hypothèse de l'équilibre de la faune fluviale avec l'eau. Le logiciel ne prend en compte ni la diversité du monde des poissons, ni la diversité de la faune dans la rivière. Il est supposé également que l'eau de la rivière ingérée par les poissons est filtrée par l'intermédiaire des branchies. C'est donc la concentration de l'eau filtrée qui est prise en compte dans le transfert aux parties comestibles des poissons :

$$A_{p.pêche} = A_{eaufiltrée} \times F_c$$

$A_{p.pêche}$: activité des produits de la pêche en Bq.kg⁻¹
 $A_{eaufiltrée}$: activité volumique annuelle moyenne de l'eau filtrée en Bq.m³
 F_c : facteurs de transfert aux produits de la rivière en m³.kg⁻¹

2.2.2 Estimation du niveau d'exposition des populations

A) Exposition externe

a) Exposition externe au panache

L'activité du panache est donnée en supposant qu'une partie du dépôt est remise en suspension par l'intermédiaire d'un coefficient de remise en suspension :

$$A_{panache} = A_{air} + F_{remise.suspension} A_{soldépôt}$$

$A_{panache}$: activité du panache Bq.m³
 A_{air} : activité de l'air Bq.m³
 $F_{remise.suspension}$: facteur de remise en suspension en m⁻¹
 $A_{soldépôt}$: activité surfacique déposée sur le sol Bq.m²

La dose efficace d'une personne qui séjourne sous le panache est estimée dans la dernière année de fonctionnement de l'installation ; l'effet de protection des bâtiments est pris en compte :

$$E_{exp.panache} = \sum_i A_{panache} \times F_{d.externepanache} \times (t_{int} \times f_{p.panache} + t_{ext}) \times 365 \times 24 \times 3600$$

$E_{exp.panache}$: dose reçue par irradiation externe d au panache en Sv
 $A_{panache}$: activité volumique annuelle moyenne du panache en Bq.m³
 $F_{d.externepanache}$: facteur de dose irradiation externe au panache en Sv.s⁻¹ par Bq.m³
 t_{int} : temps passé à l'intérieur de l'habitation en fraction d'année
 t_{ext} : temps passé à l'extérieur de l'habitation en fraction d'année
 $f_{p.panache}$: facteur de protection vis-à-vis du panache (sans unité)

b) *Exposition externe au dépôt*

Le calcul de la dose efficace annuelle par exposition aux dépôts s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$E_{\text{exp.dépôt}} = \sum_i A_{\text{soldépôt}} \times F_{\text{d.externedépôt}} \times (t_{\text{int}} \times f_{\text{p.dépôt}} + t_{\text{ext}}) \times r_0 \times P_r \times 365 \times 24 \times 3600$$

$E_{\text{exp.dépôt}}$: dose reçue par irradiation externe au dépôt en Sv
$A_{\text{soldépôt}}$: activité du sol due aux dépôts en Bq.kg ⁻¹
$F_{\text{d.externepanache}}$: facteur de dose irradiation externe au panache en Sv.s ⁻¹ par Bq.m ²
t_{int}	: temps passé à l'intérieur de l'habitation en fraction d'année
t_{ext}	: temps passé à l'extérieur de l'habitation en fraction d'année
$f_{\text{p.dépôt}}$: facteur de protection vis-à-vis du dépôt (sans unité)
ρ_0	: masse volumique du sol sec en kg.m ³
P_r	: profondeur de l'horizon racinaire en m

B) Exposition interne

a) *Exposition interne par ingestion*

La dose efficace annuelle par ingestion est donnée par :

$$E_{\text{int.ingestion}} = A_{\text{ingérées}} \times F_{\text{d.interneingestion}}$$

$E_{\text{exp.dépôt}}$: dose reçue par ingestion en Sv
$A_{\text{ingérées}}$: activités ingérées annuellement en Bq
$F_{\text{d.interneingestion}}$: facteur de dose ingestion en Sv.Bq ⁻¹

o Pour les rejets gazeux :

$$A_{\text{ingérées}} = \sum_i C_i \times Q'_i \times (1 - E_x) \times F \times \left[\frac{D_{\text{conso}}}{12} + \left(1 - \frac{D_{\text{conso}}}{12}\right) \times \exp(-\lambda \times t_{\text{stock}}) \right] + A_{\text{solidépôt}} \times Q_{\text{sol}}$$

o Pour les rejets liquides :

$$A_{\text{ingérées}} = \sum_i C_i \times Q'_i \times (1 - E_x) \times F \times \left[\frac{D_{\text{conso}}}{12} + \left(1 - \frac{D_{\text{conso}}}{12}\right) \times \exp(-\lambda \times t_{\text{stock}}) \right] + A_{\text{poisson}} \times Q'_{\text{poisson}} \times (1 - E_x) + A_{\text{filtrée}} \times \frac{Q'_{\text{eau}}}{1000} + A_{\text{solirrig}} \times Q_{\text{sol}}$$

$A_{\text{ingérées}}$: activités ingérées annuellement en Bq
$A_{i, \text{nom}}$: activité des produits (i pour végétaux, produits d'origine animale et produits dérivés) en Bq.kg ⁻¹ ou Bq.L ⁻¹
$Q'_{i, \text{nom}}$: quantité de produits ingérés (i pour végétaux, produits d'origine animale et produits dérivés) en kg.an ⁻¹ ou L.an ⁻¹
E_x	: fraction exogène du végétal (sans unité)
F	: taux d'autoconsommation
λ	: constante de décroissance radiologique du radionucléide en s ⁻¹
t_{stock}	: temps de durée de stockage du végétal en s
D_{conso}	: durée de consommation en mois

b) *Exposition interne par inhalation*

La dose efficace engagée par inhalation associée à une année de fonctionnement de l'installation s'écrit :

$$E_{\text{int.inhalation}} = A_{\text{panache}} \times V_{\text{respi}} \times F_{\text{inhalée}} \times F_{\text{d.interneinhalation}}$$

$E_{\text{int.inhalation}}$: dose reçue par irradiation interne par inhalation en Sv
A_{panache}	: activité volumique annuelle moyenne du panache en Bq.m ³
V_{respi}	: fraction inhalée par l'humain dans l'année en m ³
t_{ext}	: temps passé à l'extérieur de l'habitation en fraction d'année
$F_{\text{d.int.inhalation}}$: facteur de dose irradiation interne par inhalation en Sv.Bq ⁻¹

C) Dose totale

L'impact dosimétrique de l'ensemble des radionucléides sur un individu est obtenu en sommant les doses associées à toutes les voies d'atteinte pour tous les radionucléides.

2.2.3 Valeurs retenues pour les différents coefficients

Un certain nombre de radionucléides était déjà intégrés dans COMODORE avant son adaptation pour les établissements du Tricastin. La recherche des coefficients pour les nouveaux radionucléides s'est faite dans la littérature en favorisant les coefficients issus des publications IRSN. Cette recherche a été menée de manière conjointe entre les établissements du Tricastin et COGEMA Marcoule. Lorsqu' aucune valeur n'a pu être trouvée dans la littérature, ce sont les valeurs fournies par les dossiers DARPE qui ont été intégrées dans COMODORE.

L'ANNEXE 4 indique les références des valeurs prises pour chacun des paramètres entrant en jeu dans le calcul d'impact. Il y est indiqué également lorsque cela a pu être trouvé dans la littérature la plage de valeurs usuellement rencontrée pour chacun des paramètres.

2.3 Comparaison avec le modèle issu des DARPE actuellement utilisé sur le site

2.3.1 Voies d'exposition

COMODORE prend en compte des voies d'exposition supplémentaires par rapport au modèle issu des DARPE : l'ingestion de sol contaminé par irrigation ou par dépôt, l'ingestion d'œufs et l'ingestion de produits dérivés (produits laitiers et vin). Les voies d'exposition prises en compte ainsi que les aliments considérés dans chacun des modèles sont résumés dans les tableaux de l'ANNEXE 5.

2.3.2 Codes

A) Modélisation des transferts entre les milieux

COMODORE réalise une description plus fine des transferts entre les milieux que le modèle issu des DARPE ; il permet notamment :

- Pour le calcul de l'activité du panache, la prise en compte de la remise en suspension des particules déposées sur le sol ;
- Pour le calcul de l'activité de l'eau d'irrigation, la prise en compte d'un débit de canal spécifique à la période correspondant à la période d'irrigation (saison sèche) ;
- Par l'intermédiaire du facteur de translocation, le calcul de l'activité dans les parties comestibles (donc réellement ingérées) des végétaux ;
- Enfin, de faire intervenir dans le calcul des activités ingérées par l'animal ou l'homme les paramètres de durée de stockage, de durée de consommation et de fraction exogène pour les produits d'origine animale ou les végétaux.

Les phénomènes pris en compte dans les deux modèles pour le calcul des activités des différents compartiments de la biosphère sont résumés en ANNEXE 6. L'ANNEXE 7 présente quant à elle les équations utilisées.

B) Estimation de l'impact dosimétrique

COMODORE permet d'effectuer le calcul de dose efficace pour six classes d'âge de population : nourrisson (< à 1an), enfant de 1 à 2 ans, enfant de 2 à 7 ans, enfant de 7 à 12 ans, enfant de 12 à 17 ans, et adulte de plus de 17 ans. Ce calcul n'était effectué jusqu'à présent que pour l'adulte.

3 IMPACT RADIOLOGIQUE DE L'ETABLISSEMENT COGEMA

L'estimation de l'impact radiologique de l'établissement COGEMA Pierrelatte à l'aide de COMODORE a été réalisée conformément à la méthodologie prescrite par le guide de l'IRSN [23] et comporte ainsi les quatre étapes définies au paragraphe 1.3.2.B. b.

Cette partie présente les résultats pour les rejets de l'année 2004 des radionucléides suivants : uranium et descendants (^{232}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{233}Pa), produits de fission (^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{125}Sb) et thorium (^{228}Th , ^{231}Th , ^{234}Th). Les résultats du tritium (^3H) et du carbone 14 (^{14}C) ne sont pas présentés ici.

3.1 Description de COGEMA

3.1.1 Généralités

L'établissement de COGEMA Pierrelatte (850 personnes) est composé d'une INBS et de plusieurs installations indépendantes (Cf. ANNEXE 2).

3.1.2 Emissions de COGEMA

A) Rejets liquides

Les rejets aqueux de l'établissement COGEMA sont les suivants [13] :

- **Rejets du process** susceptibles de contenir de l'uranium et d'autres radioéléments et substances chimiques. Ces rejets de process sont collectés par la station de traitement des effluents liquides (STEC) avant rejet dans le canal de Donzère-Mondragon ;
- **Les eaux et les fluides de refroidissement** : ces rejets contiennent des produits anti-corrosion en faible quantité. Après utilisation (une à plusieurs purges par an), ils sont récupérés et rejoignent après contrôle le bassin tampon du réseau des eaux pluviales, puis le canal de Donzère-Mondragon ;
- **Les eaux usées sanitaires** évacuées dans le canal de Donzère-Mondragon via les stations d'épuration de l'installation ;
- **Les eaux pluviales** pouvant potentiellement contenir à l'état de traces de l'uranium et des fluorures à en raison du lessivage de l'air ambiant et du sol du site. Elles rejoignent le bassin tampon du réseau des eaux pluviales, puis le canal de Donzère-Mondragon.

B) Rejets gazeux

Les rejets atmosphériques de l'établissement COGEMA sont les suivants [13] :

- **Rejets de process** susceptibles de contenir de l'uranium et d'autres radioéléments et substances chimiques.
- **La ventilation des locaux.**

L'ensemble de ces rejets est **exclusivement canalisé et émis à l'atmosphère via des cheminées.**

C) Rejets solides

Les rejets solides ne sont pas intégrés à cette présente étude d'impact.

3.2 Description de l'environnement [6]

3.2.1 Caractéristiques générales de l'environnement terrestre

Le site est situé dans la plaine de Pierrelatte au cœur de la vallée du Rhône, entre les villes de Montélimar au nord et d'Orange au sud. Elle est limitée à l'ouest par le plateau ardéchois et le massif de Pont-Saint-Espirit, à l'est par le Tricastin et le massif d'Uchaux. Le climat régional est de type méditerranéen de transition, dominé par l'influence prépondérante des vents de secteur Nord parmi lesquels le mistral joue un rôle important en desséchant et en assainissant l'atmosphère.

3.2.2 Caractéristiques générales de l'environnement aquatique

A) Hydrologie locale

L'hydrologie naturelle de la région repose sur le Rhône et ses affluents. Les eaux du Rhône ont été partiellement détournées dans le canal de Donzère-Mondragon. La longueur du canal est de 28km, sa largeur varie entre 125 et 145m et sa profondeur d'eau entre 10 et 18m. Le site est situé sur l'île formée par le Rhône et le canal.

a) *Le contre canal*

Les eaux des affluents de la rive gauche du Rhône sont collectées par le contre-canal de rive gauche qui draine en outre, les fuites du canal. Passant en siphon sous le canal, elles s'écoulent alors par le contre canal de rive droite. Celui-ci ne doit pas descendre au dessous de $5\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ car il réalimente la nappe phréatique en aval du site. En saison sèche, ce débit n'est pas atteint et le complément est pris dans le canal lui-même. Lors de fortes précipitations, les affluents de la rive gauche du Rhône sont transformés en torrents et le contre canal, qui les collecte, ne suffit plus pour les évacuer. Pour assurer aux eaux un débouché vers le Rhône, un canal a été creusé, rejoignant le cours inférieur du Lauzon et drainant au passage l'ancienne plaine de la Gaffière.

b) *Mayre Rousse et Mayre Girard*

La Mayre Rousse draine les eaux pluviales du Nord du site du Tricastin. Elle se jette dans le réseau d'eau pluviale de COGEMA, puis dans le canal de Donzère-Mondragon, ou dans la Mayre Girard située au sud de l'établissement.

c) *Le lac du Trop Long*

Ce lac, créé par le non remblaiement des fouilles effectuées au moment de la construction de l'usine EURODIF et de la centrale EDF, est alimenté par la nappe phréatique.

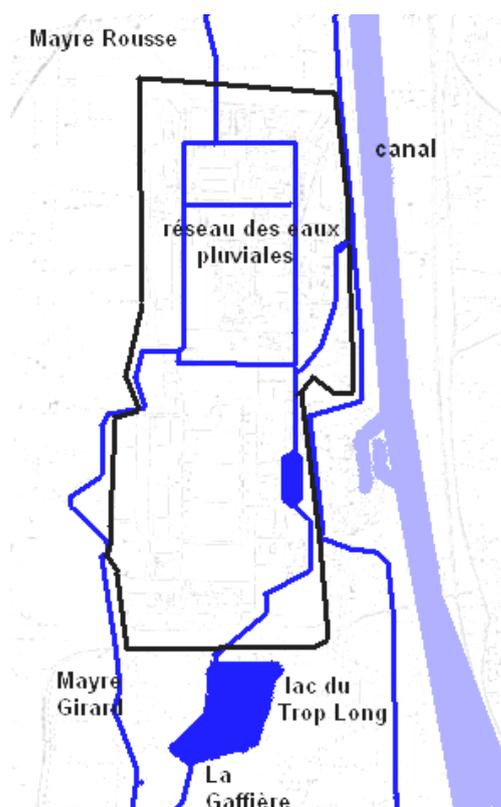


Figure 6. Hydrologie du site du Tricastin

B) Hydrogéologie locale

La nappe alluviale du Rhône entre Donzère et Mondragon présente les 4 composantes suivantes :

- Une couche de limon, constituée d'éléments calcaires plus ou moins argileux ;
- Une couche d'alluvions de 10 m, formés de galets, de graviers et de sable ;
- Les marnes plaisanciennes imperméables de 40m, limite inférieure de la nappe ;
- Le substratum formé par le crétacé.

La géométrie du réservoir aquifère est simple : elle se résume en un dépôt quasi horizontal, d'extension latérale importante et d'épaisseur relativement constante (5 à 10m). Au niveau du site, la nappe est alimentée à concurrence de 70% par le canal de Donzère-Mondragon et de 30% par les pluies.

C) Utilisation de l'eau

L'utilisation des eaux en aval du site nucléaire du Tricastin se fait en majorité à partir des nappes superficielles ou profondes.

Alimentation en eau potable

En ce qui concerne les prélèvements d'eau destinée à la consommation humaine, la totalité des captages est implantée dans la nappe alluviale. Le premier captage d'eau superficielle situé en aval du pôle du Tricastin est situé sur la commune de Fourques dans le Gard (100 km en aval). Les captages les plus proches du site sont les suivants :

- Pierrelatte : un captage nommé « captage des Plantades » ;
- St-Paul-Trois-Châteaux : un captage principal nommé « captage des Gonsards » à l'ouest, un captage nommé « captage des Allènes » à l'est, et environ vingt ouvrages de captage sur le coteau de St-Restitut ;
- Bollène et Lapalud : deux captages communs à Mornas nommés « captage du Grand Mornas » et « captage des Roulettes ».

Leur profondeur est donnée par le tableau suivant :

Dépt	Commune	Captage	Profondeur	Source
84	Mornas	GRAND MOULAS	13 à 32m	SDEI Bollène
84	Mornas	LA ROULETTE	15 à 26m	SDEI Bollène
26	Pierrelatte	LES PLANTADES	15m environ	SDEI Bollène
26	St-Paul-Trois-Châteaux	GONSARD	10 à 15m	SAUR St-Paul-Trois-Châteaux

Tableau 1. Profondeur des captages les plus proches du site

Compte-tenu de la faible profondeur de la nappe phréatique, un grand nombre de puits seraient encore exploités dans la région (450 à 500 dans un périmètre de l'ordre d'une dizaine de km autour du site d'après la DARPE [6], chiffres qui n'ont pas pu être vérifiés). L'eau puisée est utilisée en grande partie pour l'irrigation. Elle est également susceptible d'alimenter des populations en eau.

Bien que soumis à déclaration sanitaire auprès des autorités sanitaires (art. 10 du règlement et article 20 du décret n°89-3), aucun recensement de ces puits n'est disponible auprès des services des DDASS du Vaucluse ou de la Drôme pour les communes de Pierrelatte, Bollène, Lapalud et St-Paul-Trois-Châteaux, les plus proches du site. La comparaison entre le nombre d'abonnements au réseau d'eau potable et le nombre de logements pour ces communes indique cependant que cette pratique est pourtant bien réelle au niveau de la commune de Lapalud (Cf. Tableau suivant).

Dépt.	Commune	Nombre de logements (tous types confondus) [18]	Nombre d'abonnements au réseau d'eau potable en 2005	Inventaire communal (bâtiments publics, commerces,...) [18]
84	Bollène	5854	6377	139
84	Lapalud	1345	1348	56
26	Pierrelatte	5293	5512	108
26	St-Paul-Trois-Châteaux	2964	-	-

Tableau 2. Comparaison entre le nombre d'abonnements au réseau d'adduction et le nombre de logements

Activités industrielles

Les établissements de COGEMA, EURODIF et le Centre Nationale de Production d'Electricité d'EDF prélèvent de l'eau du canal de Donzère-Mondragon. Certains établissements industriels de la région s'approvisionnent également en eau à partir de la nappe (dont COGEMA).

Activités agricoles (irrigation)

L'eau utilisée pour l'irrigation des cultures provient en majorité de la nappe. Son usage est étroitement lié à la nature du sol et à son niveau par rapport à la nappe phréatique. L'irrigation est gérée par des groupements.

Activités nautiques

Le canal de Donzère-Mondragon sert de voie de navigation fluviale mais on ne dénombre aucune installation de tourisme ou de loisir sur la totalité de son parcours. Le lac du Trop-Long est une base de loisirs fréquentée par les véliplanchistes, les baigneurs et les pêcheurs.

3.2.3 Caractéristiques générales de l'environnement humain

A) Populations

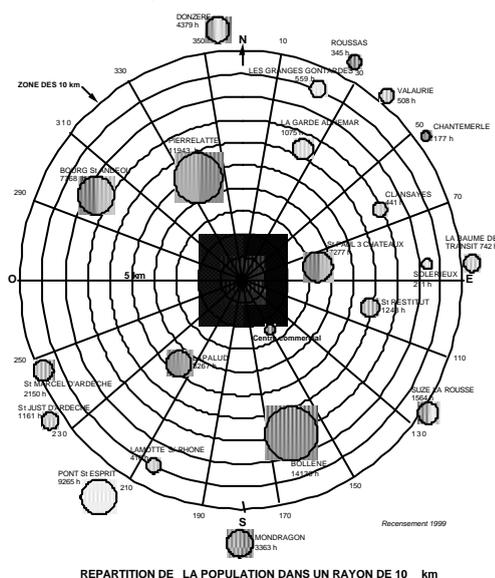


Figure 7. Répartition de la population autour du site [18]

Les données qui suivent proviennent du recensement INSEE de 1999 [18].

La densité démographique moyenne dans un rayon de 10 km autour du site est de 203,5 habitants/km².

Quatre communes situées dans un rayon de 10 km dépassent 5 000 habitants. Il s'agit de Bollène (14 130 hbts), Pierrelatte (11 943 hbts), Bourg-Saint-Andéol (7 768 hbts) et Saint-Paul-Trois-Châteaux (7 277 hbts).

Le périmètre immédiat du site n'accueille que très peu de tourisme et se trouve à l'écart des grands rassemblements provoqués par les festivals d'été (Orange, Avignon, Vaison-La Romaine).

B) Activités

a) Activités industrielles

Les autres industries présentes aux alentours du site nucléaire du Tricastin oeuvrent dans les secteurs de la construction (cimenterie, usines de parpaings et de béton moulé), de l'équipement industriel (chaudronnerie), des réfractaires, des Gaz industriels (Air Liquide) et des équipements spécifiques (surgélation, fabrique de revêtement de sols et de murs).

b) Activités agricoles

Outre son caractère industriel, la région de Pierrelatte a conservé néanmoins un caractère agricole important. Les principales productions sont les vignes, les céréales (blé, maïs, seigle,...) et les cultures sous serres (tomates, fleurs et plantes ornementales arrosée avec l'eau de la nappe). On retrouve aussi des productions de légumes frais, de pommes de terre, d'oléagineux, et quelques vergers.

Peu d'élevages sont présents autour du site du Tricastin (quelques bovins, ovins ou porcins). Il n'y a plus de production laitière aux alentours. Une zone piscicole est présente au Nord-Ouest du site. Des anguilles, pêchées dans les étangs du littoral, y sont élevées. L'eau des bassins provient de la nappe.

3.3 Estimation de l'impact dosimétrique des rejets pour l'année 2004

Remarque :

Les différents facteurs ou coefficients retenus pour l'établissement COGEMA sont regroupés en ANNEXE 8 (méthodologie de choix au paragraphe 2.2.3).

3.3.1 Spectre et activités rejetées

Les rejets gazeux et liquides de COGEMA pour l'année 2004 ont été les suivants :

A) Rejets gazeux

Eléments	ISOTOPE	Emetteur	Activité rejetée (Bq.an ⁻¹)		
			INB	INBS	INB+INBS
			2004	2004	2004
Uranium	U 232	alpha	9,34E+03	3,87E+04	4,81E+04
	U 234	alpha	2,57E+05	1,06E+06	1,32E+06
	U 235	alpha	9,73E+03	4,03E+04	5,01E+04
	U 236	alpha	1,87E+03	7,74E+03	9,61E+03
	U 238	alpha	1,25E+05	5,16E+05	6,41E+05
Transuraniens	Pu 239	alpha	1,48E+04	6,13E+04	7,61E+04
	Np 237	alpha	9,34E+03	3,87E+04	4,81E+04
	Pa 233	béta	2,95E+04	7,87E+04	1,08E+05
Produits de fission	Tc99	béta	3,80E+04	1,02E+05	1,40E+05
	Ru106	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
	Cs 137	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
	Ru 103	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
	Ce 144	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
	Zr 95	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
	Sb 125	béta	2,09E+04	5,57E+04	7,66E+04
Thorium	Th 228	alpha	9,34E+03	3,87E+04	4,81E+04
	Th 234	béta	3,93E+05	1,05E+06	1,44E+06
	Th 231	béta	3,07E+04	8,20E+04	1,13E+05
Total			1,05E+06	3,45E+06	4,50E+06

Tableau 3. Rejets gazeux radioactifs de l'établissement COGEMA pour l'année 2004 (hors tritium et carbone 14)

B) Rejets liquides

Eléments	ISOTOPE	Emetteur	Activité rejetée (Bq.an ⁻¹)		
			INB	INBS	INB+INBS
			2004	2004	2004
Uranium	U 232	alpha	5,60E+06	-	5,60E+06
	U 234	alpha	1,39E+08	4,13E+09	4,27E+09
	U 235	alpha	5,38E+06	2,00E+08	2,05E+08
	U 236	alpha	1,12E+06	6,00E+07	6,11E+07
	U 238	alpha	6,87E+07	2,12E+09	2,19E+09
Transuraniens	Np237	alpha	3,00E+07	5,80E+08	6,10E+08
	Pu239	alpha	-	7,00E+07	7,00E+07
	Pa233	béta	9,33E+06	1,01E+09	1,02E+09
Produits de fission	Tc99	béta	-	3,50E+10	3,50E+10
	Ru106	béta	1,68E+08	4,00E+07	2,08E+08
	Cs 137	béta	1,68E+08	2,00E+07	1,88E+08
	Autre PF	alpha	2,99E+07	1,00E+08	1,30E+08
Thorium	Th 231	béta	5,41E+07	2,50E+08	3,04E+08
	Th234	béta	6,94E+08	5,16E+09	5,85E+09
Total			1,38E+09	4,98E+10	5,11E+10

Tableau 4. Rejets liquides radioactifs de l'établissement COGEMA pour l'année 2004 (hors tritium et carbone 14)

3.3.2 Détermination du groupe de référence

Le groupe de référence est défini comme le groupe de population dont l'exposition à la source radioactive donnée et selon une voie d'atteinte donnée est raisonnablement homogène et représentative de celles des individus les plus exposés (définition de l'AIEA).

A) Rejets gazeux

Dans le cadre des DARPE, 16 groupes de personnes (lotissements) susceptibles de constituer un groupe de référence ont été localisés aux abords du Tricastin en tenant compte de la distance et de l'azimut par rapport aux différents établissements. Une modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets gazeux par le logiciel COTRAM4 à partir des données météorologiques fournies par la station du Tricastin pour l'année 2004 [7] (Cf. ANNEXE 9), a permis de retenir les groupes de référence pour lesquels les concentrations volumiques étaient les plus importantes. Le calcul a été mené pour 15 vitesses de vent (0,5 à plus de 14m.s⁻¹), 18 secteurs (de 0° à 360° par secteur de 20°), une hauteur de 10m et une vitesse de dépôt de 5.10⁻³m.s⁻¹.

Remarque :

Les calculs de dispersion et de dépôt étaient réalisés jusqu'à maintenant, dans le cadre du calcul d'impact radiologique avec le modèle issu des DARPE, avec le logiciel COTRAM2 en négligeant l'influence des bâtiments et en regroupant les émissaires de rejets (Cf. ANNEXE 10) pour la localisation des émissaires de rejets gazeux de COGEMA) :

- Sous une source localisée au niveau de l'URE de hauteur 38m pour les rejets de l'installation TU5 ;
- Sous une source localisée au niveau de l'URE de hauteur 10m pour les rejets des autres usines.

Ces mêmes simplifications ont été retenues ici. Les activités volumiques pour **1 Bq rejeté**, résultant des rejets à 10 et 38 m et des CTA associés, ainsi que les débits de dépôt correspondants sont répertoriés ci-après.

Groupe de référence	Azimut (°)	Distance (m)	Activité volumique (Bq.m ⁻³) 10m	Activité volumique (Bq.m ⁻³) 38m	Débit de dépôt (Bq.m ⁻² .s ⁻¹) 10m	Débit de dépôt (Bq.m ⁻² .s ⁻¹) 38m
Faveyrolles	338	2500	3,41E-07	1,89E-07	1,87E-09	1,11E-09
La Croisière	188	6800	7,21E-07	2,54E-08	3,69E-09	1,29E-10
Près Guérinés	173	3000	3,01E-06	4,09E-07	1,53E-08	2,13E-09
Clos du Bonnot	177	2200	4,95E-06	1,73E-06	2,52E-08	9,08E-09
La ferme des Gitans	208	2520	3,70E-06	1,94E-06	1,82E-08	1,00E-08

Tableau 5. Activité volumiques et débits de dépôts pour 1Bq.s⁻¹ rejeté¹

L'activité volumique et les débits de dépôts sont maximaux pour **le groupe du Clos de Bonnot**. Ce groupe est choisi comme groupe de référence.

B) Rejets liquides

Les valeurs obtenues dans la suite de l'étude s'appliquent à une population qui se nourrit exclusivement de produits cultivés sur des terres irriguées par de l'eau du canal. Cette population est située à l'aval du point de rejet, jusqu'au point de jonction du canal avec le Rhône. **Les habitants du Clos du Bonnot en font partie.**

3.3.3 Evaluation des transferts par les différents vecteurs

A) Dispersion dans le milieu récepteur

a) CTA et dépôts

Le tableau ci-dessous résume, pour l'ensemble des rejets gazeux de l'établissement, les activités volumiques et les activités surfaciques de dépôt au « Clos de Bonnot » :

Elément	Isotope	Emetteur	Activité rejetée (Bq)	Activité volumique de l'air (Bq.m ⁻³)	Activité surfacique des dépôts totaux (Bq.m ⁻² .s ⁻¹)
Uranium	U 232	alpha	4,81E+04	6,60E-09	3,36E-11
	U 234	alpha	1,32E+06	1,81E-07	9,25E-10
	U 235	alpha	5,01E+04	6,87E-09	3,50E-11
	U 236	alpha	9,61E+03	1,32E-09	6,72E-12
	U 238	alpha	6,41E+05	8,79E-08	4,48E-10
Transuraniens	Pu 239	alpha	7,61E+04	1,04E-08	5,32E-11
	Np 237	alpha	4,81E+04	6,60E-09	3,36E-11
	Pa 233	béta	1,08E+05	1,40E-08	7,14E-11
Produits de fission	Tc99	béta	1,40E+05	1,81E-08	9,22E-11
	Ru106	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
	Cs 137	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
	Ru 103	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
	Ce 144	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
	Zr 95	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
	Sb 125	béta	7,66E+04	9,91E-09	5,05E-11
Thorium	Th 228	alpha	4,81E+04	6,60E-09	3,36E-11
	Th 234	béta	1,44E+06	1,87E-07	9,51E-10
	Th 231	béta	1,13E+05	1,46E-08	7,43E-11
Total			4,50E+06	6,00E-07	3,06E-09

Tableau 6. Activités volumiques et surfaciques au Clos du Bonnot, rejets 2004 (hors tritium et carbone 14)

¹ Ne sont présentés ici que les 5 groupes de référence pour lesquels ces valeurs sont les plus importantes.

b) Dispersion dans la biosphère

Le débit du canal moyenné sur l'année 2004 est de $1071\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Le débit moyen du canal pendant la période de juin à septembre (considérée comme période d'irrigation) est de $809\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ [5]. Le débit d'irrigation retenu est de $1,6.10^{-8}\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

Les rations ingérées quotidiennement par chaque animal sont données ci-dessous [11] :

	Foin	Herbe	Mais	Lait	Eau	Terre
Vache	1,17	37,75	11,08	0,00	20,00	0,70
Veau	0,00	0,00	0,00	16,00	0,00	0,46
Bœuf	1,20	38,80	10,00	0,00	20,00	0,70
Mouton	1,20	7,76	0,00	0,00	4,00	0,32
Porc	0,00	0,00	2,50	10,00	0,00	0,00
Volaille	0,00	0,00	0,06	0,00	0,20	0,01

Tableau 7. Rations alimentaires journalières des animaux et ingestion de sol par inadvertance en $\text{kg}.\text{j}^{-1}$ ou $\text{L}.\text{j}^{-1}$

Une durée de stockage est prise en compte pour le foin et le maïs ($t_{\text{stock}}=5$ mois), pour les autres végétaux, le stockage avant ingestion par les animaux n'est pas considéré. Les aliments ingérés par les animaux sont supposés consommés tout au long de l'année ($D_{\text{conso}}=12$ mois). Enfin, il est fait l'hypothèse qu'ils proviennent uniquement de la zone contaminée ($E_x=0$).

3.3.4 Estimation du niveau d'exposition des populations

A) Hypothèses retenues

Dans un premier temps et afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à l'aide de COMODORE avec ceux issus du calcul d'impact 2004 avec le modèle DARPE, les produits dérivés, les œufs et le sol ingéré par inadvertance n'ont pas été intégrés dans les rations alimentaires. Le temps de fonctionnement de l'installation est pris égal à 30 ans.

Les rations alimentaires considérées pour l'homme sont données ci-dessous :

	<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Céréales	0,0	3,6	3,6	5,9	6,3	6,7
Lég. racines	0,0	28,6	28,6	37,6	42,1	37,6
Lég. fruits	0,0	26,9	26,9	30,2	32,8	42,0
Lég. feuilles	0,0	9,8	9,8	10,6	13,7	20,4
Viande de bœuf	0,0	9,4	9,4	13,7	15,0	13,3
Viande de mouton	0,0	2,2	2,2	3,6	3,1	4,7
Viande de porc	0,0	9,9	9,9	13,1	14,8	18,0
Viande de volaille	0,0	4,4	4,4	8,6	9,8	10,5
Viande de veau	0,0	2,4	2,4	3,5	3,8	3,4
Lait de vache	265,0	92,2	92,2	79,8	69,6	61,0
Œuf	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Produits laitiers	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eau de boisson	0,0	383,0	383,0	440,0	440,0	440,0
Poissons	0,0	5,0	5,0	6,0	6,0	7,1
Terre	0,0	0,002	0,002	0,001	0,000 5	0,000 5

Tableau 8. Rations ingérées par les différentes classes d'âge de population en $\text{kg}.\text{an}^{-1}$ ou $\text{L}.\text{an}^{-1}$

Pour l'adulte, les rations alimentaires proviennent de l'étude sur la consommation alimentaire ZEAT Méditerranée de l'étude INSEE 91 [17].

Les données fournies par l'INSEE sont celles d'un individu sans distinction d'âge. Elles ont été utilisées en l'état pour la classe d'âge adulte. Pour les autres classes d'âge, la base de données CIBLEX qui fournit des rations alimentaires journalières pour différentes classes d'âge a été utilisée. Les valeurs INSEE ont ainsi été estimées, pour les classes d'âge [2-7ans], [7-12ans] et [12-17ans], en appliquant pour chaque type d'aliment, les mêmes rapports que ceux calculés entre chacune de ces classes pour les valeurs CIBLEX. En absence d'information concernant la classe [1-2ans], ses rations alimentaires ont été prises égales à celles de la classe [2-7ans]. Enfin, pour le nourrisson, une consommation quotidienne de 1L de lait a été prise en compte. Ce lait a été assimilé à du lait de vache.

Les rations intégrées ont été considérées comme étant des rations autoconsommées ($F=1$). Pour le calcul des activités ingérées par l'homme, les hypothèses suivantes ont été retenues : aucune durée de stockage ($t_{stock}=0$) ; les aliments ingérés ont été considérés consommés tout au long de l'année ($D_{conso}= 12$ mois) ; enfin, ils ont été considérés comme provenant uniquement de la zone contaminée ($E_x=0$). Concernant l'exposition au dépôt et au panache, les hypothèses retenues sont :

- Pas de protection vis-à-vis du panache ($f_{p,panache}=1$) ;
- Une protection vis-à-vis du dépôt ($f_{p,dépôt} = 0,1$) ;
- Un facteur de remise en suspension de $1.10^{-5}m^{-1}$.

Enfin, le budget espace-temps pris pour chaque classe d'âge, et les débits respiratoires retenus ont été les suivants :

	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
intérieur	80,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
extérieur	20,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%

Tableau 9. Budget espace temps des différentes classes d'âge de population

	< 1an	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
débit respiratoire ($m^3.an^{-1}$)	1080	1900	3200	5600	6500	8100

Tableau 10. Débits respiratoires des différentes classes d'âge de population [4]

B) Résultats

a) Dose efficace annuelle due aux rejets gazeux

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Clos du Bonnot	Dose efficace annuelle en $mSv.an^{-1}$					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	6,71E-07	1,03E-06	6,86E-07	7,98E-07	9,01E-07	7,42E-07
inhalation	3,31E-05	5,82E-05	6,50E-05	7,67E-05	9,55E-05	9,34E-05
exposition interne	3,38E-05	5,92E-05	6,56E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,43E-05
panache	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11
dépôt	1,66E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
exposition externe	1,67E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
total général gaz	3,38E-05	5,93E-05	6,57E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,44E-05

Tableau 11. Dose efficace annuelle due aux rejets gazeux, COMODORE, COGEMA 2004

Clos du Bonnot	Part de chaque voie					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	2,0%	1,7%	1,0%	1,0%	0,9%	0,8%
inhalation	98,0%	98,2%	98,9%	98,9%	99,0%	99,0%
exposition interne	100,0%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
panache	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
dépôt	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
exposition externe	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général gaz	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tableau 12. Part de chaque voie d'exposition dans la dose efficace annuelle due aux rejets gazeux, COMODORE, COGEMA 2004

La dose efficace reçue par les différentes classes d'âge de population est majoritairement due à l'inhalation (part de la dose efficace totale > à 98%).

L'adulte correspond au groupe de population le plus impacté avec une dose efficace annuelle due aux rejets gazeux de $9,44 \cdot 10^{-5}$ mSv.

b) Dose efficace annuelle due aux rejets liquides

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Clos du Bonnot		Dose efficace annuelle en mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,00E+00	3,74E-07	4,15E-06	3,70E-06	3,92E-06	3,53E-06
	p.animal	7,59E-04	1,64E-04	8,98E-05	7,14E-05	6,12E-05	4,30E-05
	poisson	0,00E+00	2,19E-03	1,14E-03	7,81E-04	4,45E-04	4,33E-04
	eau	0,00E+00	1,40E-05	8,85E-06	7,98E-06	7,48E-06	5,23E-06
total général liquide		7,59E-04	2,37E-03	1,24E-03	8,64E-04	5,17E-04	4,85E-04

Tableau 13. Dose efficace annuelle due aux rejets liquides, COMODORE, COGEMA 2004

Clos du Bonnot		Part de chaque aliment					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,0%	0,0%	0,3%	0,4%	0,8%	0,7%
	p.animal	100,0%	6,9%	7,2%	8,3%	11,8%	8,9%
	poisson	0,0%	92,5%	91,7%	90,4%	86,0%	89,3%
	eau	0,0%	0,6%	0,7%	0,9%	1,4%	1,1%
total général liquide		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tableau 14. Part de chaque type d'aliment dans la dose efficace annuelle due aux rejets liquides, COMODORE, COGEMA 2004

Pour le nourrisson, la dose efficace est entièrement due à l'ingestion de lait issue de la vache contaminée.

La dose efficace reçue par les autres classes d'âge de population est majoritairement due à l'ingestion de poissons pêchés dans le canal (part de la dose efficace totale > à 85%).

L'enfant de 1 à 2 ans correspond au groupe de population le plus impacté avec une dose efficace annuelle due aux rejets gazeux de $7,59 \cdot 10^{-4}$ mSv.

c) Dose efficace annuelle globale

Pour les rejets gazeux ou liquides, la dose totale efficace reçue par les différentes classes de population est due à plus de 90% aux rejets de l'INBS (Cf. ANNEXE 11).

En considérant que le groupe de référence du Clos de Bonnot peut être sous influence potentielle des rejets liquides, l'évaluation globale des conséquences sur ce groupe pour les rejets 2004 de COGEMA Pierrelatte est donnée ci-dessous :

Clos du Bonnot	Dose efficace annuelle en mSv.an ⁻¹					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
total gaz	3,38E-05	5,93E-05	6,57E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,44E-05
total liquide	7,59E-04	2,37E-03	1,24E-03	8,64E-04	5,17E-04	4,85E-04
total général	7,93E-04	2,43E-03	1,31E-03	9,41E-04	6,13E-04	5,79E-04

Tableau 15. Dose efficace annuelle globale, COMODORE, COGEMA 2004

La dose efficace reçue par les autres classes d'âge de population est majoritairement due au rejets liquides (part de la dose efficace totale > à 80%).

L'enfant de 1 à 2 ans correspond au groupe de population le plus impacté avec une dose efficace annuelle à l'ensemble des rejets de $2,43 \cdot 10^{-3}$ mSv.

Enfin, les radionucléides ayant le plus fort impact (sur la dose efficace totale) sur les populations sont le technétium 99 (⁹⁹Tc) pour le nourrisson et le thorium 234 (²³⁴Th) pour les autres groupes (Cf. ci contre).

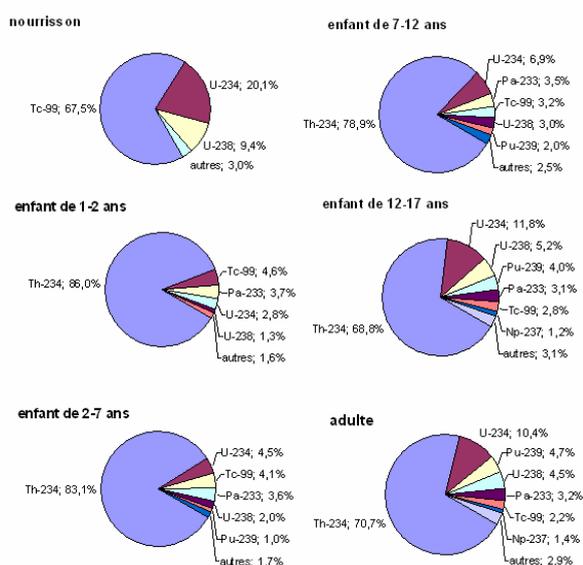


Figure 8. Part des radionucléides sur la dose efficace totale

Les valeurs obtenues sont à comparer à la limite annuelle de dose de 1mSv préconisée par la directive n° 96-29 d'EURATOM pour les personnes du public. Le tableau ci-dessous présente le pourcentage de cette limite :

Clos du Bonnot	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
Pourcentage de la limite de 1mSv	0,08%	0,24%	0,13%	0,09%	0,06%	0,06%

Tableau 16. Pourcentage de la limite EURATOM (1mSv)

La contribution des rejets COGEMA en équivalent de dose correspond à une fraction extrêmement réduite de cette limite et ceci pour tous les groupes de population.

Remarque :

Comme indiqué au paragraphe 3.2.2C), des personnes sont susceptibles de s'alimenter à partir d'eau de nappe provenant de leurs puits. En prenant les valeurs de concentrations de l'eau de nappe en aval du site (piézomètre WN 5 d'EURODIF)², le calcul d'impact nous donne les résultats suivants (Cf. ANNEXE 12) :

	Dose efficace annuelle en mSv.an ⁻¹					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
total général gaz	3,38E-05	5,93E-05	6,57E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,42E-05
total général liquide	7,59E-04	5,83E-02	3,71E-02	3,29E-02	3,03E-02	2,20E-02
total général	7,9E-04	5,8E-02	3,7E-02	3,3E-02	3,0E-02	2,2E-02
part de la limite de 1mSv	0,1%	5,8%	3,7%	3,3%	3,0%	2,2%

Tableau 17. Dose efficace annuelle, avec prise en compte d'ingestion d'eau de nappe

L'impact calculé reste très en-dessous de la limite de 1mSv.

3.4 Comparaison avec les résultats issus du modèle DARPE

La comparaison des résultats trouvés avec COMODORE et le tableur DARPE actuellement utilisé sur le site a pu être réalisée pour l'adulte (le calcul de l'impact aux autres classes d'âge n'étant pas réalisé pour le moment avec le tableur DARPE). Les résultats se trouvent en ANNEXE 13.

La dose efficace totale calculée pour l'adulte pour l'année 2004 est du même ordre de grandeur pour les deux modèles (5,79.10⁻⁴mSv avec COMODORE contre 6,78.10⁻⁴mSv avec le tableur DARPE).

La part de la dose efficace imputable aux rejets gazeux augmente avec le recours à COMODORE (passage de 3% de la dose efficace totale à plus de 20%). La part due aux rejets liquides diminue d'autant (passage de 97% à moins de 80%).

Pour les rejets gazeux, la voie majoritaire est l'inhalation quelque soit le modèle utilisé. Néanmoins, les hypothèses adoptées avec COMODORE font en sorte que celle-ci devient quasiment unique (elle atteint 99% de la dose efficace due au rejets gazeux contre 60,7% pour le tableur DARPE) ; plusieurs explications peuvent être proposées :

- L'augmentation des activités calculées pour le panache avec la prise en compte de la remise en suspension des particules déposées sur le sol ;
- La diminution des activités transférées aux végétaux avec la prise en compte d'un facteur de translocation (ie. d'un facteur de transfert aux parties réellement comestibles de la plante) ;
- Des différences pour les radionucléides entre les valeurs choisies pour les facteurs communs aux deux modèles (facteur de transfert racinaire, transfert aux produits d'origine animale, au lait), des différences au niveau des facteurs de dose.

Pour les rejets liquides, on observe une augmentation très importante de l'impact dû à l'ingestion de poisson (89,3% de l'impact total dû aux rejets liquides contre 0,1% avec le tableur DARPE).

² La valeur prise correspond à la moyenne sur les années 2002 à 2004 des concentrations en uranium mesurées mensuellement, soit 7,7µg.L⁻¹. Le calcul des concentrations pour les autres radionucléides s'est faite au prorata des quantités rejetées. La concentration en uranium de l'eau filtrée du canal calculée par COMODORE correspond quant à elle à 2,50.10⁻³µg.L⁻¹.

Plusieurs explications peuvent être proposées :

- Les facteurs de concentrations dans le poisson rentrés dans COMODORE (supérieurs parfois d'un facteur 10^3 à ceux du tableur DARPE) ;
- La diminution des activités transférées aux végétaux avec la prise en compte du facteur de translocation ;
- Des différences pour les radionucléides entre les valeurs choisies pour les facteurs communs aux deux modèles (facteur de transfert racinaire, transfert aux produits d'origine animale, au lait), des différences au niveau des facteurs de dose.

3.5 Discussion

A) Influence des rations alimentaires

Jusqu'à présent les rations alimentaires utilisées pour l'estimation de l'impact radiologique étaient issues de l'enquête nationale INSEE91. Compte-tenu des spécificités de ses groupes de référence (petit groupe, rural), les établissements du Tricastin ont confié au bureau d'étude BEGEAT le soin de réaliser une enquête alimentaire auprès d'un groupe critique (principalement des retraités et des anciens agriculteurs possédant un jardin) afin d'obtenir des rations alimentaires autoconsommées enveloppes. Cette étude a débuté en juillet 2004 et s'est terminée en mai 2005 à raison d'une semaine d'enquête par saison. Elle a été conduite sur un échantillon de 25 ménages (75 l'été). Il a ainsi été mis en évidence une **forte consommation**, notamment de produits locaux associée à un **fort taux d'autoconsommation pour les produits fortement consommés**.

Le calcul de l'impact radiologique a été lancé à l'aide de COMODORE en insérant ces nouvelles rations. Les rations intégrées sont les rations autoconsommées en l'état pour l'adulte, pour les autres classes d'âge, elles ont été pondérées par le ratio CIBLEX (Cf. ANNEXE 14). Les résultats obtenus sont regroupés en ANNEXE 15.

	Dose efficace annuelle en mSv/an					
	COMODORE					
	>1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Clos du Bonnot						
total général impact gaz	3,38E-05	5,87E-05	6,62E-05	7,80E-05	9,70E-05	9,48E-05
total général liquide	0,00E-00	8,38E-04	4,53E-04	3,27E-04	2,15E-04	1,94E-04
total général	3,38E-05	8,96E-04	5,19E-04	4,05E-04	3,12E-04	2,88E-04
évolution / rations DARPE	-95,0%	-61,7%	-60,4%	-56,9%	-49,1%	-51,3%

Tableau 18. Dose efficace annuelle totale, prise en compte des rations BEGEAT (sans oeuf, produits dérivés)

La prise en compte de ces nouvelles rations diminue nettement l'impact calculé des rejets de COGEMA (abaissement pouvant atteindre 95% dans le cas du nourrisson).

B) Prise en compte de l'ingestion des produits dérivés, des œufs et du sol

Le calcul a été lancé pour les rations INSEE91 et pour celles de l'étude BEGEAT.

	Dose efficace annuelle en mSv.an ⁻¹					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
Clos du Bonnot						
total gaz	3,38E-05	5,96E-05	6,59E-05	7,77E-05	9,85E-05	9,44E-05
total liquide	7,59E-04	2,41E-03	1,27E-03	8,90E-04	5,47E-04	4,95E-04
total général	7,93E-04	2,47E-03	1,34E-03	9,67E-04	6,46E-04	5,89E-04
évolution / sans p. dérivés, œufs, sol	0,0%	+1,6%	+2,3%	+2,8%	+5,4%	+1,7%

Tableau 19. Dose efficace annuelle globale, rations alimentaires INSEE91 (DARPE) avec p. dérivés, œufs et sol

Clos du Bonnot	Dose efficace annuelle en mSv/an					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
total général impact gaz	3,38E-05	6,02E-05	6,63E-05	7,82E-05	9,72E-05	9,49E-05
total général liquide	0,00E+00	8,63E-04	4,67E-04	3,44E-04	2,35E-04	2,06E-04
total général	3,38E-05	9,23E-04	5,33E-04	4,22E-04	3,32E-04	3,01E-04
évolution / sans p. dérivés, œufs, sol	0,0%	+3,0%	+2,7%	+4,2%	+6,4%	+4,5%

Tableau 20. Dose efficace annuelle globale, rations alimentaires BEGEAT avec p. dérivés, oeufs et sol

Les résultats détaillés sont regroupés respectivement en ANNEXE 16 et en ANNEXE 17.

La prise en compte de l'ingestion de ces aliments et du sol a peu d'influence sur la dose efficace finale (augmentation inférieure à 7%). La part de cette augmentation revient majoritairement à l'insertion du lait dans les rations alimentaires. La prise en compte de l'ingestion de sol a un effet nul sur le résultat final.

3.6 Conclusion

La contribution des rejets COGEMA en équivalent de dose correspond à une fraction extrêmement réduite de la limite de 1mSv préconisée par la directive EURATOM 96/29 et ceci pour tous les groupes de population et pour tous les scénarii testés.

Les doses doivent être estimées de façon aussi réalistes que possible pour l'ensemble de la population et pour les groupes de référence, c'est-à-dire les groupes comprenant des individus dont l'exposition à une source est assez uniforme et représentative de celle des individus qui, parmi la population, sont particulièrement exposés à ladite source (directive Euratom 96/29). Le **principe de prudence** pour les évaluations consiste à adopter des hypothèses majorantes, en l'absence de données pertinentes. COGEMA ayant réalisée une étude alimentaire sur ses populations de référence, il semble important que ces nouvelles rations soient désormais utilisées pour le calcul de l'impact radiologique.

Parmi les nouvelles voies d'exposition prises en compte par COMODORE, l'ingestion de sol peut être négligée. La voie ingestion de produits dérivés a un effet faible sur le résultat de l'impact final pour les radionucléides considérés ; il conviendra cependant de s'assurer qu'il en est de même pour le tritium et le carbone 14.

3.7 Surveillance de l'environnement

Pour l'ensemble de l'établissement, la surveillance actuelle de l'environnement est décrite dans le dossier DARPE de l'INBS déposé en 2000. Elle est effectuée suivant un programme de prélèvements et de contrôles dont les points, la nature et les fréquences ont été précisés par l'OPRI :

- Contrôle du rayonnement gamma ambiant et de la dosimétrie externe ;
- Contrôle des activités α , β des aérosols de l'air et de la teneur en uranium des précipitations ;
- Contrôle de l'activité β des végétaux ;
- Contrôle des eaux souterraines et des eaux de surface pour les teneurs en uranium et l'activité β .

4 ADAPTATION DE COMODORE AUX ERS

L' Evaluation des Risques Sanitaires liés à la toxicité chimique des rejets de COGEMA a été conduite par l'INERIS en 2005 conformément à la méthodologie décrite dans le paragraphe 1.3.2B)b). Cette présente partie débute par une synthèse des premiers résultats fournis par l'INERIS (la version finale n'est pas disponible à l'heure actuelle). Synthèse des hypothèses retenues par l'INERIS [13]

4.1.1 Identification des dangers

L'inventaire qualitatif et quantitatif des substances émises à l'atmosphère et dans les eaux a été réalisé par l'INERIS sur la base des données transmises par COGEMA. Un choix de traceurs sanitaires basés sur les quantités émises d'une part, et les toxicités propres des substances d'autre part, ont permis de retenir pour l'étude : **l'uranium, le fluor, le mercure et les oxydes d'azote (NO_x)** :

	Substance	Flux annuel (g.an ⁻¹)
Rejets gazeux	Uranium	INBS : 3,00E03 INB : 1,00E03
	Fluor	INBS : 1,02E07
	NO _x	INBS : 6,23E07 INB : 9,6E07
Rejets liquides	Uranium	INBS : 1,05E06 INB : 9,00E03
	Fluor	INBS : 1,05E08
	mercure	INBS : 5,00E03

Tableau 21. Traceurs de risque sanitaire, quantité rejetée (valeurs limites réglementaires) en g.an⁻¹

- **Uranium** : Les installations de COGEMA émettent l'uranium sous la forme de fluorure d'uranyle (UO₂F₂), qui compte parmi les sels d'uranium les plus solubles. L'exposition à ce composé peut se faire par inhalation ou par ingestion. Par inhalation et par ingestion, les effets corrélés à l'exposition chronique aux sels d'uranium sont principalement des effets rénaux. Concernant les effets cancérigènes potentiels, les sels solubles d'uranium n'ont pas fait l'objet d'une évaluation de cancérogénicité. Pour ce qui concerne les effets sur la reproduction et le développement, aucune donnée n'est disponible chez l'homme.
- **Fluor** : L'exposition au fluorure d'hydrogène et aux ions fluorures peut se faire par inhalation ou par ingestion. Concernant l'inhalation, le fluorure d'hydrogène est un irritant puissant pour les poumons et peut avoir des effets néfastes sur la fonction cardio-vasculaires. Par ingestion, une exposition soutenue aux fluorures peut entraîner chez les enfants une fluorose dentaire voire squelettique. Concernant le potentiel cancérigène, les études chez l'homme n'ont apportées aucune preuve de la cancérogénicité potentielle des fluorures. Ils sont classés dans le groupe 3 du CIRC (substances ne pouvant être classées quant à la cancérogénicité pour l'homme). Enfin, aucune étude sur l'homme n'a révélée d'effets sur la reproduction et le développement.
- **Mercure** : Le mercure peut se présenter sous une grande variété d'états physiques et chimiques. Que ce soit par inhalation (vapeur de mercure) ou par ingestion (méthylmercure surtout), les effets de l'exposition chronique au mercure sont des troubles du système nerveux central. Des effets sur les reins ont été observés pour les composés inorganiques. Du point de vue cancérogène, le méthylmercure est classée 2B par le CIRC (cancérogène possible pour l'homme). Enfin, des effets sur la reproduction sont également notés.
- **Oxydes d'azote** : On parle d'oxydes d'azote (NO_x) pour désigner l'ensemble (NO+NO₂). L'exposition au NO_x se fait majoritairement par inhalation. Les effets associés à une exposition chronique au NO_x sont des effets respiratoires touchant particulièrement les personnes sensibles (enfants, asthmatiques,).

4.1.2 Choix des Valeurs Toxicologiques de Références (VTR)

Les bases de données [29] consultées quant au choix de ces VTR ont été celles de l'Agence américaine de l'environnement, (US-EPA), de l'Agence américaine des substances toxiques et du registre des maladies (ATSDR), de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). En l'absence de données pour certaines substances, les bases de données de Santé Canada, de l'Institut national de santé publique des Pays-Bas et de l'OEHHA ont été consultées. Les critères utilisés pour retenir une VTR ont été les suivants :

- Source et qualité des données ;
- Voies d'exposition et durée d'exposition considérée ;
- Type d'études et date ;
- Cohérence des facteurs de sécurité utilisés dans l'élaboration de la VTR.

Lorsque plusieurs VTR étaient disponibles pour une substance donnée, la VTR la plus protectrice a été retenue. Les VTR choisies sont regroupées dans le tableau suivant :

	Effets à seuil		Effets sans seuil	
	Inhalation VTR en mg.m^{-3}	Ingestion VTR en $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$	Inhalation VTR en $(\text{mg.m}^{-3})^{-1}$	Ingestion VTR en $(\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1})^{-1}$
Uranium	0,3 (ATSDR)	0,6 (OMS)	<i>Pas d'effet sans seuil</i>	<i>Pas d'effet sans seuil</i>
HF/F	1 (OMS)	60 (US-EPA)	<i>Pas d'effet sans seuil</i>	<i>Pas d'effet sans seuil</i>
Mercure	<i>Expo non concernée</i>	0,1 (US-EPA)	<i>Expo non concernée</i>	<i>Pas d'effet sans seuil</i>
NO_x	40 (OMS)	-	<i>Pas d'effet sans seuil</i>	-

Tableau 22. VTR retenues

4.1.3 Evaluation de l'exposition des populations

A) Voies d'exposition prises en compte

Les voies d'exposition retenues ont été les suivantes :

Modèles	Voies d'exposition	Aliments considérés
rejets gazeux	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition interne : inhalation, ingestion d'aliments contaminés par les dépôts, ingestion de sol contaminé par les dépôts 	<ul style="list-style-type: none"> • Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, fruits, céréales, grains, foin • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, lait de vache
rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition interne : ingestion d'aliments contaminés par irrigation, ingestion de sol contaminé par irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, fruits, céréales, grains, foin • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, lait de vache, poisson

Tableau 23. Voies d'exposition prises en compte dans l'ERS INERIS de COGEMA

B) Concentrations dans les milieux

a) Modélisation de la dispersion atmosphérique

ADMS3 (Atmospheric Dispersion Modelling system, version 3.1.10) est le logiciel utilisé par l'INERIS dans le cadre de la réalisation des ERS des établissements AREVA du Tricastin. Il s'agit d'un modèle gaussien dit de "seconde génération" validé par l'outil européen d'évaluation "Model Validation Kit".

Le domaine d'étude choisi a été une zone de 8km de rayon centré sur le site COGEMA-Pierrelatte et plus particulièrement sur la cheminée de l'URE. Les données météorologiques utilisées sont les données tri-horaires de Météo-France pour la période de 2001 à 2003 (station de Donzère pour la température et la pluviométrie, station de Montélimar pour le vent et la nébulosité). Les données topographiques du site n'ont pas été intégrées à la modélisation. La rugosité du sol a été fixée à 0,7 (valeurs usuelles : 0,001m pour une mer calme et 1,5m pour une grande ville). 17 émissaires gazeux ont été pris en compte pour la modélisation de la dispersion atmosphérique. Il a été considéré que les bâtiments avaient une influence sur la dispersion atmosphérique lorsque leur hauteur dépassait le tiers de la hauteur de la cheminée. Enfin, deux voies de dépôt ont été distinguées : le dépôt sec et le dépôt humide des particules (dépôt des gaz négligé). Ces phénomènes s'accompagnent logiquement d'un appauvrissement du panache en particules au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source. Cet effet est directement répercuté sur le terme source introduit dans le modèle : le débit considéré prend la forme suivante :

$$Q_{\text{mod}}(x) = q_d(x) \times Q_{\text{initial}}$$

x : distance à la source
 q_d : facteur d'appauvrissement

Le dépôt sec est calculé à partir d'une vitesse de dépôt :

$$F(x, y) = V_d \times C(x, y, 0)$$

F(x,y) : flux déposé au sol par unité de surface
 V_d : vitesse de dépôt
 C(x,y,0) : concentration au niveau du sol

Avec :

$$V_d = \frac{V_t}{1 - \exp\left(-\frac{V_t}{r}\right)}$$

V_d' est représenté par l'inverse d'un terme de résistance : $V_d' = \frac{1}{r}$ où $r = r_a + r_b + r_c$.

r_a : résistance aérodynamique, qui dépend des paramètres atmosphériques
 r_b : résistance de « sous couche » qui dépend de la rugosité du terrain et des caractéristiques de la particule
 r_{ac} : résistance de surface qui dépend de la couverture du sol et de la chimie de l'élément

Le dépôt humide est caractérisé par un coefficient de lessivage, étroitement lié à la granulométrie des particules : $\Lambda = a \times P^b$ où P désigne le taux de précipitations et a et b sont déterminés de façon empirique. Les valeurs de a et b utilisées dans le calcul (respectivement $1,0 \cdot 10^{-4}$ et $6,4 \cdot 10^{-1}$ correspondent au taux de lessivage moyen d'un panache constitué de gaz et de particules de dimensions variées.

Les valeurs modélisées ont été comparées aux valeurs issues de la surveillance environnementale :

- **Pour le fluor**, les valeurs de dépôts modélisées sont très supérieures à celles mesurées ;
- **Pour l'uranium**, les concentrations modélisées sont inférieures à ces valeurs conformément à ce que l'on pouvait attendre dans la mesure où seuls les rejets de COGEMA sont modélisés alors que COMURHEX, GBI et SOCATRI sont également largement émetteurs de fluor à l'atmosphère.

	Dépôts mesurés en 2003 Station HYD	Dépôts modélisés (ADMS3)
Clos du Bonnot Uranium (mg.m ² .an ⁻¹)	65,1	52,7
Fluorures (mg.m ² .an ⁻¹)	33,3	125,5

Tableau 24. Comparaison des valeurs de dépôt mesurées par ADMS3 et mesurées (station HYD)

b) Transferts dans la biosphère

Les équations utilisées sont issues du « Human Health Risk Assessment Protocol » (HHRAP) de l'US-EPA [28].

Concentration de l'eau

Les valeurs de concentrations de l'eau du canal en uranium et en fluor sont issues du suivi environnemental. Pour le mercure, la valeur de l'eau du canal est une valeur calculée (pas de mesure disponible) à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{\text{eau brute}} = \frac{Q_{\text{moyen}}}{D_{\text{min}}}$$

$C_{\text{eau brute}}$: concentration de l'eau brute en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Q_{moyen}	: quantité rejetée en rivière moyennée sur une année en $\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$
D_{moyen}	: débit moyenné de la rivière sur une année en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Concentration du sol

Il est fait l'hypothèse que l'ensemble des dépôts et la moitié des apports de l'arrosage s'accumulent sans aucune perte, du type lixiviation, dégradation ou érosion.

- o Pour les rejets gazeux :

$$C_{\text{sol dépôt}} = \frac{(D_s + D_h) \times t_f}{r_0 \times P_r}$$

$C_{\text{sol dépôt}}$: concentration du sol due aux dépôts en $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
D_s	: débit de dépôt sec en $\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2$
D_h	: débit de dépôt humide en $\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2$
t_f	: temps de fonctionnement de l'installation en s
ρ_0	: masse volumique du sol sec en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
P_r	: profondeur de l'horizon racinaire en m

- o Pour les rejets liquides :

$$C_{\text{sol irrig}} = 0,5 \times \frac{C_{\text{eau brute}} \times V_{\text{irrig}} \times t_f}{r_0 \times P_r}$$

$C_{\text{sol irrig}}$: concentration du sol due à l'irrigation en $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
$C_{\text{eau brute}}$: concentration de l'eau du canal en polluant $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
V_{irrig}	: débit d'irrigation moyen par unité de surface en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2$
t_f	: temps de fonctionnement de l'installation en s
ρ_0	: masse volumique du sol sec en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
P_r	: profondeur de l'horizon racinaire en m

Deux types de sol sont considérés : un sol bêché où se trouve les racines des légumes ($P_r = 2.10^{-1}\text{m}$) et un sol bêché ou labouré pouvant servir de terrain de jeu à des enfants (les polluants s'accumulent alors dans le premier centimètre, $P_r = 1.10^{-2}\text{m}$).

Concentration des végétaux

- Concentration due au transfert foliaire ou direct : considérée uniquement pour les rejets gazeux :

$$C_{\text{vég.foliaire dépôt}} = D_t \times R_{ct} \times \frac{1 - \exp[-I_p \times t_{\text{vég}}]}{I_p \times r}$$

$C_{\text{vég.foliaire dépôt}}$: concentration des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
D_t	: débit de dépôt total en $\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2$
λ_p	: coefficient de perte sur la surface de la plante en s^{-1}
$t_{\text{vég}}$: temps de croissance du végétal en s
r	: rendement de culture en $\text{kg}_{\text{sec}}\cdot\text{m}^2$

➤ Concentration due au transfert racinaire ou indirect

○ Pour les rejets liquides :

$$C_{\text{vég.racinaire irrig}} = C_{\text{sol irrig}} \times F_{\text{rac}}$$

$C_{\text{vég.racinaire irrig}}$: concentrations des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg^{-1}
 $C_{\text{sol irrig}}$: concentration du sol due à l'irrigation en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 F_{rac} : facteur de transfert racinaire en $\text{kg}_{\text{sol}}.\text{kg}_{\text{frais}}^{-1}$.

○ Pour les rejets gazeux :

$$A_{\text{vég.racinaire dépôt}} = A_{\text{sol dépôt}} \times F_{\text{rac}}$$

$C_{\text{vég.racinaire dépôt}}$: concentration des parties consommables du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg^{-1}
 $C_{\text{sol dépôt}}$: concentration du sol due aux dépôts en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 F_{rac} : facteur de transfert racinaire en $\text{kg}_{\text{sol}}.\text{kg}_{\text{frais}}^{-1}$.

Concentrations des produits d'origine animale

Les concentrations dans les produits animaux ont été estimées à partir de la quantité de polluant ingérée par l'animal à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{p,\text{animal}} = \left[\left(\sum_{\text{veg}} (C_{\text{vég.foliaire}} + C_{\text{vég.racinaire}}) \times Q_{\text{vég}} \times [1 - E_x] \times \frac{D_{\text{conso}}}{12} + C_{\text{sol}} \times Q_{\text{sol}} + C_{\text{eau}} \times \frac{Q_{\text{eau}}}{1000} \right) \times F_{\text{animal}} \right]$$

$C_{\text{vég.foliaire}}$: concentration des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 $C_{\text{vég.racinaire}}$: concentration des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 $Q_{\text{vég-animal}}$: consommation de végétal par l'animal $\text{kg}_{\text{sec}}.\text{j}^{-1}$
 C_{sol} : concentration du sol en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 Q_{sol} : consommation de sol par l'animal $\text{kg}_{\text{frais}}.\text{j}^{-1}$
 $C_{\text{eau brute}}$: concentration de l'eau brute en $\mu\text{g.m}^{-3}$
 Q_{eau} : consommation d'eau par l'animal $\text{kg}_{\text{frais}}.\text{j}^{-1}$
 E_x : fraction exogène du végétal (sans unité)
 F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en $\mu\text{g.kg}_{\text{frais}}^{-1}$ par $\mu\text{g}_{\text{ingéré}}.\text{j}^{-1}$

Concentrations des produits de la pêche

$$C_{p,\text{pêche}} = C_{\text{eau brute}} \times F_c$$

$C_{p,\text{pêche}}$: concentration des produits de la pêche en $\mu\text{g.kg}^{-1}$
 $C_{\text{eau brute}}$: concentration annuelle moyenne de l'eau brute en $\mu\text{g.m}^{-3}$
 F_c : facteurs de transfert aux produits de la rivière en $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$

c) Calcul de la Dose Journalière d'Exposition (DJE)

La DJE est calculée à l'aide des formules suivantes :

$$DJE = \frac{\sum_{i,j} C_i \times Q_j}{P} \times F$$

$DJE_{i,j}$: dose journalière d'exposition liée à une exposition au milieu i par la voie d'exposition j en $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
 C_i : concentration d'exposition relative au milieu i en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ou en $\mu\text{g.L}^{-1}$
 Q_j : quantité journalière de milieu administré par la voie j en $\text{kg}.\text{j}^{-1}$ ou $\text{L}.\text{j}^{-1}$
 F : fréquence d'exposition (sans unité)
 P : poids corporel de la cible en kg

Si plusieurs milieux sont concernés, la DJE totale est calculée : $DJE = \sum_{i,j} DJE_{i,j}$

Dans le cas de polluants atmosphériques et pour la voie unique d'exposition par inhalation, la dose d'exposition correspond à la concentration moyenne inhalée :

$$CI = \left(\sum_{i,j} C_i \times t_i \right) \times F$$

- CI : concentration moyenne inhalée en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^3$
 C_i : concentration de polluant dans l'air inhalé pendant la fraction de temps t_i en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^3$
 t_i : fraction de temps d'exposition à la concentration C_i pendant une journée (sans unité)
 F : fréquence d'exposition (sans unité)

4.1.4 Caractérisation des risques sanitaires

La caractérisation du risque pour les toxiques non cancérigène lié à une exposition via l'ingestion s'exprime par un Indice de Risque (IR) :

$$IR = \frac{DJE}{DJT}$$

- DJE : Dose Journalière d'Exposition en $\mu\text{g} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{kg}_{\text{poids corporel}}^{-1}$
 DJT : Dose Journalière Tolérable (ou VTR) en $\mu\text{g} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{kg}_{\text{poids corporel}}^{-1}$

Lorsque le risque est lié à une exposition via l'inhalation, l'IR est déterminé par la

formule :

$$IR = \frac{CI}{CJT}$$

- CI : Concentration Inhalée en $\mu\text{g} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
 DJT : Dose Journalière Tolérable (ou VTR) en $\mu\text{g} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$

L'IR est calculé pour chacun des traceurs de risque sanitaire. La valeur repère pour l'appréciation du risque sanitaire est fixée à 1 : lorsque le risque est inférieur à 1, le risque est considéré comme non préoccupant en l'état actuel des connaissances. En première approche, la somme des IR est également calculée. Cependant, en toute rigueur, elle peut fournir une indication sur les effets cumulés des risques uniquement si les effets respectifs des substances qui contribuent au risque concernent **le même organe cible et se font via le même mécanisme**. Le calcul a été effectué par l'INERIS pour les trois classes d'âge suivante : enfant de 2 à 7 ans, enfant de 7 à 12 ans et adulte de plus de 17 ans.

Le temps de fonctionnement de l'installation a été pris égal à 70 ans. Pour les quatre traceurs de risques sanitaires, le risque calculé est maximal pour les habitants du Clos de Bonnot, les valeurs trouvées sont données dans le tableau suivant :

Clos du Bonnot	IR 2-7 ans	IR 7-12 ans	IR adulte
Inhalation			
Uranium	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Fluor	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$
Oxydes d'azote	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
Somme des IR	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Ingestion			
Uranium	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Fluor	Mesure : $4,4 \cdot 10^{-1}$ Modélisation : 1,51	Mesure : $2,7 \cdot 10^{-1}$ Modélisation : $9,2 \cdot 10^{-1}$	Mesure : $1,3 \cdot 10^{-1}$ Modélisation : $4,2 \cdot 10^{-1}$
Mercurure	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Somme des IR	$6,8 \cdot 10^{-1}$ (<i>F mesure</i>) $1,7$ (<i>F modélisation</i>)	$4,4 \cdot 10^{-1}$ (<i>F mesure</i>) $1,1$ (<i>F modélisation</i>)	$2,3 \cdot 10^{-1}$ (<i>F mesure</i>) $5,2 \cdot 10^{-1}$ (<i>F modélisation</i>)

Tableau 25. IR trouvés pour le groupe Clos du Bonnot

L'INERIS conclut ainsi que : « **pour tous les groupes de population, les risques sanitaires liés à l'ingestion des traceurs de risques sanitaires non cancérigènes émis par les installations de COGEMA Pierrelatte sont non préoccupants en l'état actuel des connaissances** ».

4.2 Utilisation de COMODORE pour les ERS

4.2.1 Pertinence

La caractérisation de l'exposition des populations est une étape commune à la méthodologie d'évaluation des risques sanitaires pour les substances chimiques et à la méthodologie du calcul d'impact radiologique. Utiliser un seul logiciel pour cette étape semble donc tout à fait envisageable. L'adéquation entre l'objectif fixé et le choix du logiciel COMODORE nécessite cependant de se pencher sur les codes qui régissent ce dernier et d'en vérifier la pertinence pour l'évaluation des risques sanitaires des substances chimiques afin d'en fixer les limites et les contraintes.

A) Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants chimiques par COTRAM4

a) *Les différents modèles de dispersion de polluants chimiques disponibles*

De manière générale, les modèles les plus utilisés pour les études de rejets chimiques industriels sont les modèles gaussiens. Leur degré de maturité apparaît satisfaisant pour les applications visées et ils ont fait l'objet de nombreux tests de validation et d'inter-comparaison. Ce type de modèle permet de multiplier les simulations à partir d'un grand nombre de situations météorologiques et se révèle bien adapter aux objectifs d'une évaluation de la dispersion atmosphérique sur le long terme (généralement une ou plusieurs années). Les modèles gaussien de première génération (dont COTRAM4 fait partie) présentent néanmoins un certain nombre de limitations : vent faible, modélisation en champ proche, gaz inerte,... Les modèles de seconde génération allient la simplicité de la formulation des modèles de première génération tout en bénéficiant des dernières avancées de la technologie (prise en compte de la turbulence atmosphérique de la couche de surface par exemple). Les modèles eulériens tridimensionnels trouvent leur application dans le traitement numérique de situations plus complexes (zones de fort relief, impact en champ proche, prise en compte des sources diffuses). Ils sont plus lourds à mettre en œuvre. Enfin, les modèles lagrangiens constituent une bonne alternative pour le calcul de dispersion de rejets de cheminées dans des environnements construits ou à fort relief. Le tableau suivant nous présente les logiciels les plus connus, actuellement utilisés :

Type de modèle	Nom
Gaussien de première génération	<i>ISCT3, ISCLT3, ARIA Impact</i>
Gaussien de seconde génération	<i>AERMOD, ADMS3</i>
Eulérien tridimensionnel	<i>ANSWER, MERCURE ou ARIA Local, FLUINDYN Panache, DFA</i>

Tableau 26 Logiciels reconnus pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants chimiques [12]

b) *Domaine de validité de COTRAM4*

La validité du modèle s'étend de 500m à 30km. Les distances entre les groupes de référence étudiés varient entre 2100 et 6800m, par conséquent ces valeurs correspondent bien au domaine de validité du modèle.

c) *Adaptabilité des hypothèses simplificatrices de COTRAM4*

Dans le cadre de l'estimation de l'impact des rejets radiologiques, la modélisation de la dispersion atmosphérique est réalisée en faisant un certain nombre de simplifications. Il convient d'étudier quelle peut être leur influence sur le résultat de la modélisation de la dispersion des polluants chimiques.

Non prise en compte de la surélévation du panache

La surélévation du panache est un phénomène dû à la fois à la vitesse d'éjection des polluants gazeux en sortie de cheminée et à la différence de température entre ces polluants et l'air ambiant. Compte-tenu des vitesses d'émission relativement faibles (entre 2,8 et 19,2 m.s⁻¹) et du faible écart de température entre les polluants rejetés et l'air ambiant ($\approx 5^{\circ}\text{C}$), cette surélévation semble pouvoir être négligée pour COGEMA.

Non prise en compte de la typographie du site

Le sol où se trouve le site du Tricastin et ses populations de référence ne présente pas d'irrégularité particulière, sa côte NGF (Niveau Général Français) est comprise entre 48 et 51m. L'hypothèse d'un terrain idéalement plat semble bien adaptée à la problématique.

Non prise en compte de la rugosité du sol

Le modèle gaussien traduit la présence d'obstacles, de la végétation sous la forme d'un paramètre global de rugosité. Pour COTRAM4, les écart-types de Douiry ont été calés sur des terrains de rugosité très variée donc non spécifique au site du Tricastin et de ses populations de référence. L'influence de ce paramètre ne peut être estimé.

Non prise en compte de l'influence des bâtiments

D'une manière générale, on considère que les bâtiments ont une influence sur la dispersion atmosphérique lorsque ceux-ci dépassent le tiers de la hauteur d'une cheminée. Compte-tenu de la hauteur des rejets des établissements du Tricastin, cette influence est bien réelle.

Hauteur de rejet (m)	
min	max
4 ¹	38

¹ exutoire prochainement rehaussé à 10m conformément à la législation

Tableau 27. Hauteur des rejets gazeux COGEMA

La complexité des écoulements autour d'obstacles isolés peut être illustrée par l'écoulement autour d'un bâtiment cubique.

- **Amont de l'obstacle :**
Accroissement de la concentration, l'augmentation du temps d'exposition et la présence de zones de circulation ;
- **Aval de l'obstacle :**
Décroissance de la concentration, augmentation du temps d'exposition, diminution de la largeur du nuage et homogénéité verticale de la concentration.

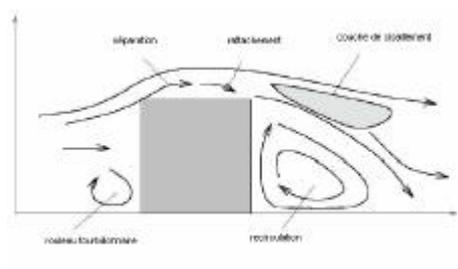


Figure 9. Ecoulement en présence d'un obstacle isolé

COTRAM4, en ne prenant pas en compte ce phénomène aura donc plutôt tendance à surestimer les concentrations volumiques par rapport à la réalité.

Regroupement des émissaires/hauteurs

Dans le cadre de l'évaluation sanitaire de l'impact des rejets radiologiques, pour chaque établissement, a été faite l'hypothèse d'un émissaire unique de hauteur moyenne. Pour COGEMA, ces émissaires sont parfois éloignés de plus de d'un kilomètre, l'influence d'une telle hypothèse a donc été regardée de plus près. Les CTA obtenus par COTRAM4 ont été comparés pour les 3 scénarii suivants :

- Scénario 1 : Rejets assimilés à une source unique localisée au niveau de l'URE de hauteur 38m pour les rejets de TU5 et 10m pour les autres rejets ;
- Scénario 2 : Rejets assimilés à une source unique localisée au niveau de l'URE, hauteurs réelles ;
- Scénario 3 : Rejets, positions et hauteurs réelles.

Les résultats sont donnés en ANNEXE 18. Le regroupement des émissaires semble avoir peu d'impact sur les CTA obtenus par COTRAM4 pour les groupes de référence étudiés (rapports du même ordre de grandeur pour les trois scénarii).

B) Bilan

Les conditions d'utilisation des établissements du site du Tricastin correspondent bien au domaine de validité de COTRAM4. D'autre part, les simplifications utilisées jusqu'alors par l'établissement COGEMA, ont peu d'influence sur les résultats de la modélisation de la dispersion des polluants chimiques. Par volonté de simplicité et par souci de rester homogène avec la méthode utilisée pour le volet radiologique, la modélisation de la dispersion des polluants chimiques de COGEMA se fera donc préférentiellement en assimilant les rejets à une source unique localisée au niveau de l'URE de hauteur 38m pour les rejets de TU5 et 10m pour les autres rejets.

Il semblerait que COTRAM4 surestime les CTA par rapport à des modèles plus perfectionnés. Afin de quantifier cette surestimation, des tests d'intercomparaison ont été réalisés avec le logiciel ADMS3 utilisé par l'INERIS dans le cadre de la réalisation des ERS des rejets chimiques des établissements du Tricastin. Pour COTRAM4, le calcul a été mené pour les rejets NOX, HF et uranium de COGEMA, le dépôt a été négligé (V_d choisie = $0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Les conditions météorologiques prise sont celles de la station du Tricastin pour la période de 2001 à 2003. Les CTA obtenus pour ces trois séries de tests, et les rapports de CTA entre les deux outils sont présentés dans les tableaux en ANNEXE 19. Comme on pouvait s'y attendre, ces résultats montrent que, dans le cas des rejets de COGEMA et pour les 8 groupes de référence traités, les CTA calculés avec COTRAM4 sont toujours supérieurs à ceux calculés par ADMS3 :

- Pour les groupes de références situés au Clos du Bonnot, aux Près Guérinés et à Cité 4, ils sont très supérieurs pour les NOX et le HF, les rapports de CTA entre les deux outils étant presque toujours supérieurs à 30 et pouvant atteindre 64,5 (scénario 1, HF pour le Clos du Bonnot). Le fait de se rapprocher des conditions réelles de rejets (localisation et hauteurs réelles), permet de diminuer ce rapport, qui reste cependant élevé.
- Pour les autres groupes, les CTA donnés par COTRAM4 bien que supérieurs à ceux d'ADMS3, le sont dans un rapport moins important (inférieur à 20). Pour les groupes situés à Faveyrolles et Cité 3, ce rapport est même inférieur à 10 pour toutes les substances.

Ces résultats peuvent avoir un impact non négligeable sur le résultat final du calcul de risque (surestimation).

Remarque :

Le GT chimique du Groupe Radioécologique Nord-Cotentin a réalisé en 2001, des tests identiques afin d'étudier la possibilité de recourir à COTRAM2 pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets chimiques de COGEMA La Hague [20]. Les résultats de la modélisation atmosphérique des rejets chimiques et/ou radiologiques, des installations COGEMA du site de La Hague ont été comparés pour les trois outils : PHAST, ADMS3 et COTRAM2. Il a trouvé que pour PHAST et ADMS3, les rapports entre les CTA calculés avec les deux outils sont très proches (variant d'environ 1,1 à 3) ; alors que les écarts entre les CTA calculés respectivement par ADMS3 (ou PHAST) et COTRAM2 sont compris entre un facteur 5 et 25. Ces tests ont abouti à la validation du

recours à COTRAM pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets gazeux de COGEMA La Hague.

4.2.2 Modélisation des transferts dans le milieu

COMODORE comprend actuellement l'ensemble des équations nécessaires à la modélisation des transferts entre les milieux, pour les substances et les scénarii d'exposition retenus par l'INERIS dans le cadre de la réalisation de l'ERS de COGEMA. Celles-ci ont souvent un degré de perfectionnement plus grand (prise en compte de constantes d'appauvrissement pour le calcul de la concentration du sol, de l'influence du stockage, ...). Recourir à un modèle unique pour le calcul de l'impact radiologique et chimique des établissements du Tricastin s'inscrit dans une démarche de cohérence. Comment justifier le recours à deux codes différents pour la modélisation d'un même phénomène ? La lisibilité des dossiers avec un tel modèle serait facilitée pour les autorités et le public.

Deux approches différentes sont cependant actuellement utilisées pour l'évaluation de l'impact sanitaire des rejets des établissements du Tricastin. Pour les rejets radiologiques, l'estimation de l'impact est réalisée avec un souci de réalisme ; il s'agit pour les établissements d'estimer de la façon la plus proche possible de la réalité l'impact strictement attribuable à chacun des établissements en recourant principalement à des coefficients de transfert pour le calcul des activités dans les différents compartiments de la biosphère. Pour les rejets chimiques, la démarche est toute autre. Les hypothèses retenues par l'INERIS s'inscrivent plus dans une démarche maximisant les risques (les phénomènes de diffusion des polluants dans le sol sont par exemple négligés) ; les concentrations dans les milieux sont parfois issues de mesure dans l'environnement, intégrant à la fois les rejets de tous les établissements du site et le bruit de fond naturel. Il revient donc à la personne en charge de l'évaluation de l'impact des rejets chimiques pour chaque établissement de choisir quel est le type d'approche qu'il souhaite mener par la suite.

4.2.3 Faisabilité

- A) La nécessité de recourir à un logiciel spécifique de modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants chimiques

Pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets de COGEMA, il est apparu que le logiciel COTRAM4 surestimait très largement les concentrations atmosphériques et les dépôts pour le fluorure d'hydrogène et les dioxydes d'azote (valeurs modélisées supérieures aux valeurs issues du réseau de surveillance). Le fluorure d'hydrogène ($M=20$) est moins dense que l'air ($M=29$) à température ambiante mais la présence d'aérosol, et d'interactions chimiques dans le nuage peut conduire à un comportement de gaz dense. Or pour un gaz dense, les effets des forces de gravité sont prédominantes dans le champ proche au début de la dispersion, ce qui peut expliquer les résultats trouvés. Il en est de même pour les oxydes d'azote qui peuvent interagir avec d'autres substances présentes dans l'air. Cela peut avoir un effet non négligeable sur le risque calculé au niveau des groupes de référence (surestimation).

Le recours à la mesure directe permettrait d'intégrer la complexité de tous les phénomènes physiques et chimiques entrant en compte, c'est le choix qu'a réalisé l'INERIS dans le cadre de l'ERS chimique de COGEMA Pierrelatte pour la détermination des valeurs de dépôts de fluorure d'hydrogène. Cette démarche a l'avantage de ne pas sous-estimer les risques auxquels sont soumis les groupes de référence puisqu'elle fournit une indication globale du risque, intégrant à la fois la pollution historique du site et les apports des autres sources de pollution. Elle pose cependant des problèmes de limites de détection, de représentativité de l'échantillonnage et d'incertitude. En outre ;

elle ne permet pas d'évaluer la part strictement attribuable au fonctionnement d'une installation.

Dans l'optique de calculer un impact strictement attribuable à chaque établissement du site, il sera nécessaire de recourir à un autre logiciel de dispersion pour ces substances. De nombreux modèles sont disponibles actuellement sur le marché. Il conviendra dans le cas d'une acquisition future d'un de ces modèles, de s'assurer de la validité de son domaine d'utilisation avec le site du Tricastin, et d'étudier l'impact des simplifications éventuelles nécessaires à son fonctionnement sur les résultats modélisés (comparaison modélisation/mesures).

- B) La nécessité d'uniformité entre les hypothèses retenues pour les études d'impact radiologiques et les ERS chimiques, entre les données d'entrées de COMODORE pour chaque établissement

Jusqu'à présent, les volets radiologique et chimique des études d'impact de la COGEMA ont été réalisés de façon indépendante, entraînant une certaine hétérogénéité dans les hypothèses retenues. Le recours à un modèle unique dans le futur peut permettre de résoudre ce problème ; il nécessite cependant une réflexion globale sur la pertinence des choix effectués jusqu'alors, pour l'établissement COGEMA mais aussi pour les autres établissements présents sur le site (COMURHEX, EURODIF, SOCATRI, FBFC). La même démarche doit être également menée sur les données d'entrée du modèle COMODORE. Cette réflexion a débuté pour le volet radiologique ; elle se doit d'être poursuivie et doit être menée en intégrant le volet chimique. Les différences actuelles entre les deux volets sont données dans le tableau suivant :

	Impact radiologique	Impact chimique
Données		
Masse volumique du sol sec	1500	1300
Rations alimentaires	Nouvelles rations BEGEAT avec produits dérivés et sol	Rations INSEE91 x ratio CIBLEX ³ : les produits laitiers et le vin ne sont pas intégrés
Temps de fonctionnement de l'installation	30 ans	70 ans
Hypothèses		
Dépôt de particules pour le calcul de la concentration du panache	Pris en compte	Non pris en compte
Calcul des concentrations dans le canal	Prise en compte du débit moyen	Prise en compte du débit d'étiage
Phénomène de migration dans le sol	Pris en compte	Non pris en compte
Translocation (transfert aux parties comestibles des végétaux)	Prise en compte	Non prise en compte
Ingestion d'eau	Prise en compte	Non prise en compte ⁴
Groupes de population considérés	6 classes d'âge	3 classes d'âge

Tableau 28. Différences entre les deux types d'études d'impact, COGEMA

Remarque :

L'inhalation des animaux n'est à l'heure actuelle prise en compte dans aucun des volets pour les établissements du Tricastin. Cette voie est considérée par COGEMA Marcoule, qui a mis en évidence une influence non négligeable de cette voie sur les activités calculées au niveau du porc et surtout de la volaille. Des tests complémentaires pourraient être menés afin d'assurer ce résultat.

³ Le gibier est intégré à la catégorie volaille pour le volet chimique de l'étude sanitaire, contrairement aux rations INSEE jusqu'alors utilisées pour le volet radiologique

⁴ Un addenda au projet de dossier d'ERS pour l'établissement COGEMA a été demandé à l'INERIS, prenant en compte cette voie

- C) La nécessité d'insérer un module informatique spécifique au calcul d'impact chimique dans COMODORE

Part souci de simplicité d'utilisation, il serait judicieux en cas d'adaptation de COMODORE pour les ERS des rejets chimiques que le module concernant l'impact chimique apparaisse de manière distincte de celui de l'impact radiologique au niveau de l'écran d'accueil :



Figure 10. Ecran d'accueil souhaité en cas d'adaptation de COMODORE aux ERS

Sous l'icône impact chimique, on retrouverait alors les différentes étapes de l'ERS :



Figure 11. Icônes du module impact chimique

Icône ETUDE

Deux nouveaux types de données seront nécessaires :

- Le poids corporel des différentes classes d'âge de population nécessaire au calcul de la Dose Journalière d'Exposition qui s'exprime en $\mu\text{g}\cdot\text{j}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- Les Valeur Toxicologiques de Référence retenues pour chacun des traceurs de risque sanitaire nécessaire au calcul de l'Indice de Risque.

Icône rejet

Comme pour le calcul d'impact radiologique, la distinction sera faite entre les rejets gazeux et les rejets liquides.

Icône concentration

Les équations nécessaires au calcul des concentrations dans les différents compartiments de la biosphère sont données en ANNEXE 20.

Icône Dose Journalière d'Exposition

Les équations nécessaires au calcul de la DJE pour chacune des classes d'âge de population sont données en ANNEXE 20.

Icône risque

Les équations nécessaires au calcul de l'Indice de Risque pour chacune des classes d'âge de population sont données en ANNEXE 20.

4.3 Tests

Un tableur Excel a été réalisé durant ce mémoire reprenant l'ensemble des équations de transfert de COMODORE. Le calcul a été mené pour les traceurs de risques sanitaires retenus par l'INERIS avec les hypothèses retenues pour le calcul de l'impact radiologique, soit en intégrant les nouvelles rations alimentaires issue de l'étude BEGEAT sur les groupes de référence et en considérant l'ingestion d'eau du canal. Les CTA proviennent du code COTRAM4. Les coefficients utilisés sont donnés en ANNEXE 21. Les résultats sont présentés ci-après.

Clos du Bonnot	IR < 1an	IR 1-2ans	IR 2-7ans	IR 7-12ans	IR 12-17ans	IR adulte
Inhalation						
Uranium	$4,9.10^{-2}$	$4,9.10^{-2}$	$4,9.10^{-2}$	$4,9.10^{-2}$	$4,9.10^{-2}$	$4,9.10^{-2}$
Fluor	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Oxydes d'azote	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$	$3,3.10^{-1}$
Somme des IR	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Ingestion						
Uranium	0,0	$2,5.10^{-2}$	$1,3.10^{-2}$	$8,1.10^{-3}$	$5,9.10^{-3}$	$6,5.10^{-3}$
Fluor	0,0	$6,0.10^{-1}$	$2,9.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,4.10^{-1}$	$1,6.10^{-1}$
Mercur	0,0	$1,5.10^{-2}$	$9,0.10^{-3}$	$6,1.10^{-3}$	$3,7.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$
Somme des IR	0,0	$6,2.10^{-1}$	$3,0.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,4.10^{-1}$	$1,6.10^{-1}$

Tableau 29. IR calculé avec le tableur Excel (équations de COMODORE), CTA issus de COTRAM⁵

Comme on pouvait s'y attendre, l'indice de risque pour la voie d'exposition inhalation au fluor est supérieur à la valeur repère de 1. En insérant les CTA trouvés par l'INERIS dans le cadre de la réalisation de l'ERS pour COGEMA pour les rejets gazeux ; l'indice du fluor pour la voie inhalation passe sous la valeur repère de 1.

Clos du Bonnot	IR < 1an	IR 1-2ans	IR 2-7ans	IR 7-12ans	IR 12-17ans	IR adulte
Inhalation						
Uranium	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$
Fluor	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$
Oxydes d'azote	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$
Somme des IR	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$
Ingestion						
Uranium	0,0	$2,5.10^{-2}$	$1,3.10^{-2}$	$8,1.10^{-3}$	$5,9.10^{-3}$	$6,5.10^{-3}$
Fluor	0,0	$6,0.10^{-1}$	$2,9.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,4.10^{-1}$	$1,6.10^{-1}$
Mercur	0,0	$1,5.10^{-2}$	$9,0.10^{-3}$	$6,1.10^{-3}$	$3,7.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$
Somme des IR	0,0	$6,4.10^{-1}$	$3,0.10^{-1}$	$1,9.10^{-1}$	$1,5.10^{-1}$	$1,7.10^{-1}$

Tableau 30. IR calculé avec le tableur Excel basé (équations de COMODORE), CTA issus d'ADMS3⁶

Remarque :

En prenant les valeurs de concentrations de l'eau de nappe en fluor et en uranium au piézomètre WN 5 d'EURODIF⁷ (pas de valeurs de concentration de mercure disponible) :

Clos du Bonnot	IR < 1an	IR 1-2ans	IR 2-7ans	IR 7-12ans	IR 12-17ans	IR adulte
Inhalation						
Uranium	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$
Fluor	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$
Oxydes d'azote	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$
Somme des IR	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$
Ingestion						
Uranium	0,0	1,1	$6,1.10^{-1}$	$4,0.10^{-1}$	$2,4.10^{-1}$	$1,9.10^{-1}$
Fluor	0,0	$9,8.10^{-1}$	$5,1.10^{-1}$	$3,2.10^{-1}$	$2,3.10^{-1}$	$2,1.10^{-1}$
Mercur	0,0	$1,5.10^{-2}$	$9,0.10^{-3}$	$6,1.10^{-3}$	$3,7.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$
Somme des IR	0,0	2,1	1,1	$7,2.10^{-1}$	$4,7.10^{-1}$	$4,0.10^{-1}$

Tableau 31. IR avec eau de nappe, valeurs piézomètre WN5 (CTA issus d'ADMS3)

⁵ La concentration du panache (nécessaire au calcul du risque pour la voie inhalation) est égale à la somme de la concentration volumique de l'air et de la fraction du dépôt remis en suspension dans le cas du recours aux CTA de COTRAM4.

⁶ La concentration du panache est égale à la seule concentration volumique de l'air. La remise en suspension du dépôt n'est pas prise en compte dans le cas du recours aux CTA d'ADMS3.

⁷ $7,7\mu\text{g.L}^{-1}$ pour l'uranium et $283,3\mu\text{g.L}^{-1}$ pour le fluor (moyenne des mesures mensuelles entre 2002 et 2004). Les concentrations de l'eau filtrée du canal calculées par COMODORE correspondent quant à elle à $3,1.10^{-2}\mu\text{g.L}^{-1}$ pour l'uranium et à $3,1\mu\text{g.L}^{-1}$ pour le fluor.

Les indices de risque de la classe d'âge 1-2ans pour l'uranium et le fluor atteignent la valeur repère de 1. Pour l'uranium, il semblerait que la valeur de concentration mesurée au point n°5 soit particulièrement élevée du fait de la présence très proche de l'établissement SOCATRI. Le même calcul effectué avec les valeurs de concentration mesurées au point WN4⁸ nous donne les indices suivants :

Clos du Bonnot	IR < 1an	IR 1-2ans	IR 2-7ans	IR 7-12ans	IR 12-17ans	IR adulte
Inhalation						
Uranium	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$	$4,8.10^{-2}$
Fluor	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$	$1,8.10^{-1}$
Oxydes d'azote	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$	$8,3.10^{-2}$
Somme des IR	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$	$3,1.10^{-1}$
Ingestion						
Uranium	0,0	$3,1.10^{-1}$	$2,2.10^{-1}$	$1,5.10^{-1}$	$9,0.10^{-2}$	$7,4.10^{-2}$
Fluor	0,0	$8,4.10^{-1}$	$4,3.10^{-1}$	$2,7.10^{-1}$	$2,0.10^{-1}$	$2,1.10^{-1}$
Mercure	0,0	$1,5.10^{-2}$	$9,0.10^{-3}$	$6,1.10^{-3}$	$3,7.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$
Somme des IR	0,0	1,1	$6,5.10^{-1}$	$4,2.10^{-1}$	$2,9.10^{-1}$	$2,8.10^{-1}$

Tableau 32. IR avec eau de nappe, valeurs piézomètre WN4 (CTA issus d'ADSM3)

Conclusion :

Les risques calculés sont non préoccupants en l'état actuel des connaissances si l'on considère les rejets strictement attribuables à l'établissement COGEMA. En faisant l'hypothèse (majorante) que des personnes sont susceptibles de consommer uniquement de l'eau de la nappe sans traitement et en prenant les valeurs issues du suivi environnemental de l'établissement EURODIF, situé au sud du site du Tricastin, les indices de risques se rapprochent de 1 pour le fluor et l'uranium. Compte-tenu de l'incertitude au niveau de la valeur de la concentration de la nappe et de son influence potentielle sur le résultat du calcul du risque, il semble important d'engager des actions afin d'améliorer la prédiction du risque. Les établissements du Tricastin ont d'ors et déjà prévu l'installation d'un piézomètre au niveau du groupe de référence ce qui pourrait éliminer les incertitudes au niveau des concentrations de la nappe, un recensement des puits privés présents autour du site nucléaire serait également utile, enfin une étude portant sur les comportements des habitants de la région pourrait être envisagée.

⁸ 2,7µg.L⁻¹ pour l'uranium et 184,0 µg.L⁻¹ pour le fluor (moyenne des mesures mensuelles entre 2002 et 2004). Les concentrations de l'eau filtrée du canal calculées par COMODORE correspondent quant à elle à $3,1.10^{-2}$ µg.L⁻¹ pour l'uranium et à 3,1µg.L⁻¹ pour le fluor.

CONCLUSION GENERALE

COMODORE, dans son état actuel d'avancement présente toutes les équations et les données nécessaires à son fonctionnement pour les radionucléides testés dans ce présent mémoire : ^{232}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{233}Pa , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{125}Sb , ^{228}Th , ^{231}Th et ^{234}Th . Le calcul a été lancé à l'aide de COMODORE pour les rejets COGEMA de 2004 ; en équivalent de dose, ces rejets correspondent à une fraction extrêmement réduite de la limite EURATOM 96/29 qui est de 1mSv et ceci pour toutes les classes d'âge de population. Le résultat trouvé est très proche de celui obtenu à l'aide des codes utilisés jusqu'à présent et qui étaient issus des dossiers DARPE, la part imputable aux rejets gazeux augmente cependant très fortement avec COMODORE. L'insertion des nouveaux produits (produits dérivés et sol) a quant à lui peu d'influence sur le résultat final. COGEMA ayant réalisée une étude alimentaire sur ses populations de référence, il semble important que ces nouvelles rations soient désormais utilisées pour le calcul de l'impact radiologique ; la prise en compte de ces nouvelles rations diminue légèrement l'impact calculé par COMODORE. Compte-tenu de la durée de ce mémoire, un certain nombre d'éléments restent à tester. Pour les rejets de l'établissement COGEMA, l'estimation de l'impact dosimétrique des rejets de tritium et le carbone 14 sont encore à mener. L'influence des différents paramètres (produits dérivés, nouvelles rations alimentaires) pourra être évaluée de la même manière que pour les radionucléides testés ici. Enfin, il sera intéressant également de vérifier la robustesse du nouveau modèle liée à sa sensibilité vis-à-vis variations des paramètres d'entrée. Pour cela une analyse d'incertitude et de sensibilité pourra être menée. L'analyse d'incertitude, qui consiste à étudier l'impact sur le résultat final des variations existant sur les paramètres d'entrée aura pour but d'associer aux résultats du modèle un intervalle de confiance ; l'analyse de sensibilité permettra quant à elle d'identifier les données d'entrée qui pèsent le plus sur l'évaluation de l'exposition et donc d'orienter les investigations expérimentales à mener par la suite pour améliorer la prédiction du risque.

Le recours à un modèle unique pour l'estimation de l'impact des rejets radiologiques et chimiques des établissements du Tricastin semble pertinent. L'évaluateur du risque devra cependant décider sous quelle approche il désire se positionner (approche réaliste/approche maximisante) ; en outre cette décision devra être prise de manière conjointe avec les autorités en charge de la surveillance des installations. L'utilisation de COMODORE à cet effet n'est pas possible dans son état actuel d'avancement. Les CTA trouvés par le modèle de dispersion atmosphérique COTRAM4 pour le fluorure d'hydrogène et les NOX sont très supérieurs à ceux trouvés par un modèle tel que ADMS3, utilisé habituellement dans le cadre des Evaluations des Risques Sanitaires. Cela a un impact non négligeable sur le calcul de l'Indice de Risque pour ces substances. Afin d'évaluer l'impact strictement attribuable aux rejets de chaque établissement, il faudra donc recourir à un autre logiciel de modélisation de la dispersion atmosphérique. Il conviendra dans le cas d'une acquisition future d'un de ces modèles, de s'assurer de la validité de son domaine d'utilisation avec le site du Tricastin, et d'étudier l'impact des simplifications éventuelles nécessaires à son fonctionnement sur les résultats modélisés (comparaison modélisation/mesures). Pour la modélisation des transferts entre les milieux, COMODORE possède toutes les équations nécessaires ; utiliser un seul modèle demandera un ajustement de certaines données qui avaient été choisies de manière indépendante pour chaque volet de l'étude sanitaire ; le calcul de la Dose Journalière d'Exposition et des Indices de Risques demande l'introduction des poids corporel des populations cibles et des Valeurs toxicologiques de Référence retenues pour chaque substance traceur de risques sanitaires.

COMODORE ayant pour première vocation de devenir l'outil commun d'estimation de l'impact radiologique des installations des différents établissements AREVA du site nucléaire du Tricastin, il est important que des essais similaires à ceux effectués pour COGEMA Pierrelatte, soient réalisés pour chacun d'entre eux. Ce présent mémoire pourra servir de base de travail pour ces essais ; il est souhaitable cependant qu'une synthèse des résultats de ces tests soit réalisée dans l'avenir. D'une manière générale, il est important que les décisions prises concernant ce logiciel et son adaptation éventuelle pour les Evaluations des Risques Sanitaires des rejets chimiques, fassent intervenir tous les acteurs du site susceptibles d'avoir recours à COMODORE. Ce travail conjoint a débuté pour le volet radiologique ; il se doit d'être poursuivi.

BIBLIOGRAPHIE

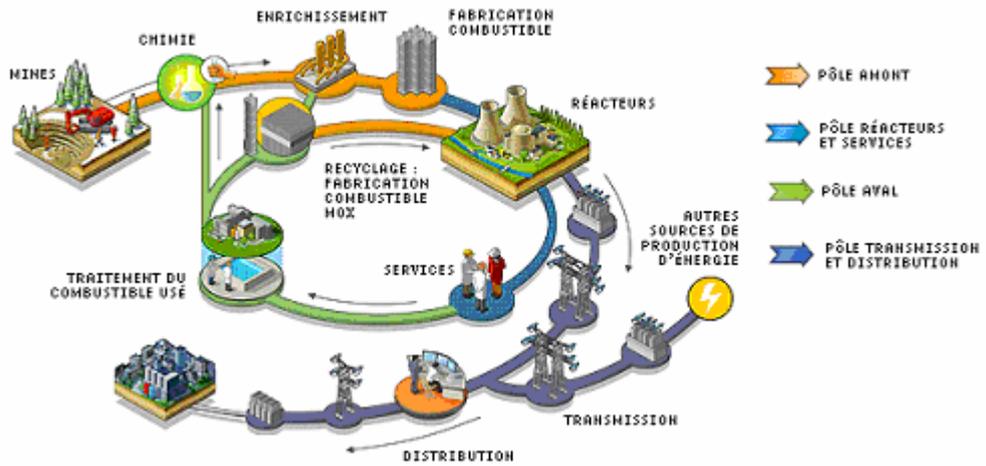
- [1] Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants
- [2] ASN, Rapport 2004, Chapitre 3 et 5, disponible sur le site : <http://www.asn.gouv.fr>
- [3] CEA DAM-Ile de France, Expertise des calculs, réalisés par COGEMA, de l'impact de l'installation Tricastin en fonctionnement normal, Rapport technique, 2004, 82p.
- [4] CIPR66, 1993
- [5] Compagnie Nationale du Rhône, bilan, 2004
- [6] COGEMA, Dossier de Demande d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau, 2000
- [7] COGEMA, Rapport d'activité 2004 de la station météorologique du Tricastin, 2005, 26p.
- [8] COMURHEX, Dossier de Demande d'Autorisation de Rejets et de Prélèvements d'Eau, 2000
- [9] Décret n° 95-540 du 4 mai 1995, Décret relatif aux rejets d'effluents liquides et gazeux et aux prélèvements d'eau des installations nucléaires de base, disponible sur le site : <http://www.legifrance.gouv.fr>
- [10] Directive 96/29/EURATOM du Conseil de l'Union Européenne du 13 mai 1996, fixant les normes relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultants des rayonnements ionisants, disponible sur le site : http://europa.eu.int/documents/eur-lex/index_fr.htm
- [11] EDF, Guide d'évaluation de l'impact des rejets radioactifs atmosphériques, 1999
- [12] INERIS, Evaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE, substances chimiques, 2003, 152p.
- [13] INERIS, Evaluation des risques sanitaires liés au fonctionnement de l'usine COGEMA Pierrelatte, rapport projet 1, 2005, 66p.
- [14] INERIS, Evaluation des risques sanitaires liés au fonctionnement de l'usine COMURHEX, rapport projet 1, 2005, 74p.
- [15] INERIS, Les modèles multimédia pour l'évaluation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations classées, Rapport final, 2001, 37p.
- [16] INERIS, Méthode pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, Dispersion atmosphérique : mécanisme et outil de calcul, 2002, 64p.

- [17] INSEE, Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires, 1991
- [18] INSEE, recensement 1999, disponible sur le site :
<http://www.insee.fr>
- [19] INVS, Guide pour l'examen du volet sanitaire des études d'impact, 2000 , 49p.
- [20] IPSN, Calculs des CTA et des débits de dépôt pour les rejets chimiques des installations de COGEMA-La Hague, Rapport DPRE/SERNAT/01-46, 2001, 31p.
- [21] IPSN, MONFORT M., Description des modèles du code COTRAM4 de calcul de coefficient de transfert moyen, Note technique DPEA/SECRI/01-42, 2001, 17p.
- [22] IPSN, MORIN A., FOCON 96 1.0, Notice théorique, Note technique SEGR/SAER/96-108 Indice 5, 1998,15p.
- [23] IPSN, MORIN A., SQUAREJ 2.5, Notice théorique, Note technique SEGR/SAER/95-74 Indice 6, 2000, 21p.
- [24] IRSN, Guide d'examen pour l'étude d'impact d'une Installation Nucléaire de Base fournie à l'appui des Demandes d'Autorisation de Rejets, Rapport/02-24, 2002, 52p.
- [25] Ministère du Travail et des Affaires Sociales, Evaluation de l'impact dosimétrique sur le public du fonctionnement normal des installations nucléaires de base autres que les stockage de déchets radioactifs, rapport du groupe de travail « Impact sanitaire des installations nucléaires », Indice 4, 1996, 56p.
- [26] PAU T., Paramètres de transfert de radionucléides dans l'environnement : Comparaison de bases utilisées dans les outils d'évaluation de l'exposition des populations, Mémoire ENSP, 2004, 93p.
- [27] ROMMENS C., MORIN A, MERLE-SZEREMETA A., Le modèle FOCON d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets radioactifs atmosphériques des installations nucléaires en fonctionnement normal, 1999, Radioprotection, Vol. 34, N°2, p-p. 195-209
- [28] US-EPA, Human Health risk assessment Protocol for hazardous waste combustion facilities, 1998 disponible sur le site :
http://www.weblakes.com/hh_protocol.html
- [29] Bases de données pour les Valeurs Toxicologiques de référence :
- Base portail ITER : <http://www.tera.org/iter>
- IRIS (US-EPA) : <http://www.epa.gov/ncea/iris.htm>
- OMS : <http://www.who.int/>
- CIRC : <http://www.iarc.fr>
- RIVM : <http://rivm.nl/>
- Santé Canada : <http://www.ec.gc.ca>

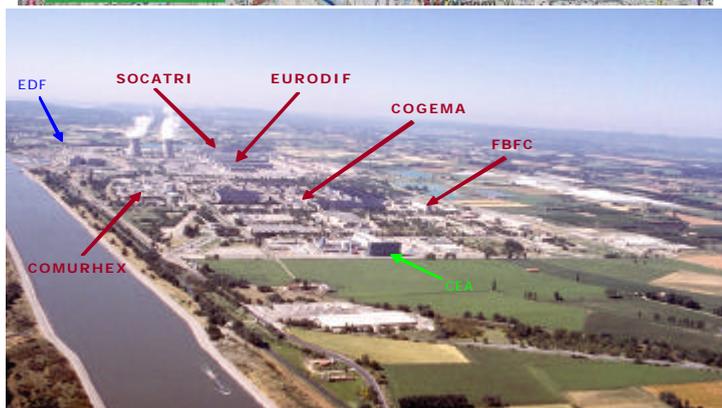
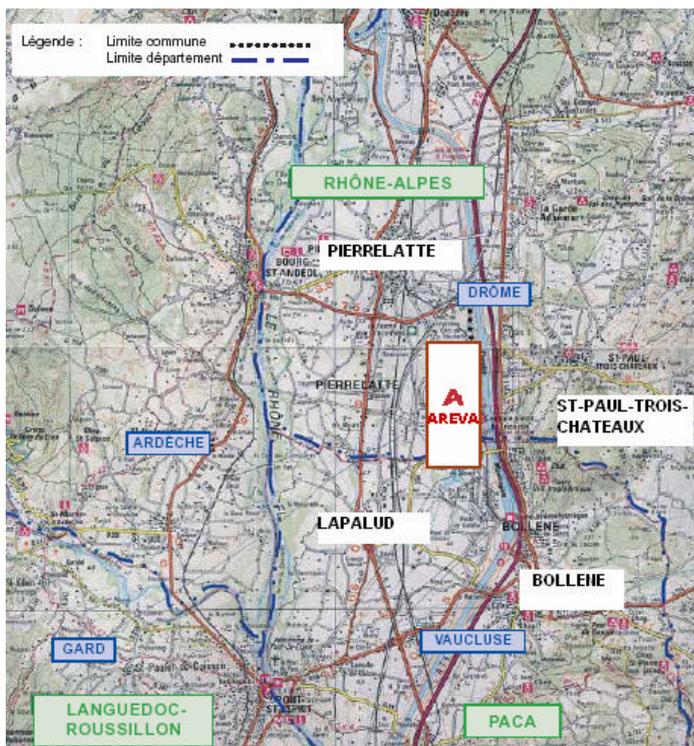
Liste des annexes

ANNEXE 1. GENERALITES.....	II
ANNEXE 2. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS DE COGEMA PIERRELATTE	III
ANNEXE 3. TEXTES INCIDENTS SUR LE CONTENU DES ETUDES D'IMPACT	IV
ANNEXE 4. REFERENCES DES VALEURS INTRODUITES DANS COMODORE	V
ANNEXE 5. COMPARAISON DES VOIES D'EXPOSITION PRISES EN COMPTE COMODORE / DARPE	VIII
ANNEXE 6. COMPARTIMENTS PRIS EN COMPTE POUR LE CALCUL DE L'IMPACT RADIOLOGIQUE	IX
ANNEXE 7. COMPARAISON EQUATIONS COMODORE / MODELE DARPE.....	XIII
ANNEXE 8. COEFFICIENTS UTILISES POUR LE CALCUL D'IMPACT DE L'ETABLISSEMENT COGEMA.....	XVI
ANNEXE 9. DONNEES METEOROLOGIQUES 2004	XX
ANNEXE 10. LOCALISATION DES EMISSAIRES GAZEUX COGEMA	XXI
ANNEXE 11. DOSE EFFICACE ANNUELLE, DETAIL PAR INSTALLATION.....	XXII
ANNEXE 12. RESULTATS AVEC EAU DE NAPPE	XXIII
ANNEXE 13. RESULTATS 2004 MODELE DARPE	XXIV
ANNEXE 14. PREMIERS RESULTATS DE L'ENQUETE ALIMENTAIRE BEGEAT SUR LES GROUPES DE REFERENCE DU TRICASTIN	XXV
ANNEXE 15. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES ETUDE SANS PRODUITS DERIVES ET ŒUFS	XXVI
ANNEXE 16. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES INSEE 91 AVEC PRODUITS DERIVES, ŒUFS, SOL.....	XXVII
ANNEXE 17. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES BEGEAT AVEC PRODUITS DERIVES, ŒUFS, SOL.....	XXVIII
ANNEXE 18. INFLUENCE DU REGROUPEMENT DES EMISSAIRES SUR LA MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLUANTS CHIMIQUES DE COTRAM4	XXIX
ANNEXE 19. ESSAIS D'INTERCOMPARAISON COTRAM/ADMS3	XXX
ANNEXE 20. EQUATIONS ET COEFFICIENTS RETENUS POUR L'EVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS CHIMIQUES	XXXI
ANNEXE 21. COEFFICIENTS RETENUS POUR L'EVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS CHIMIQUES	XXXIII

ANNEXE 1. GENERALITES



Le cycle du combustible



Localisation du site du Tricastin

ANNEXE 2. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS DE COGEMA PIERRELATTE

L'établissement COGEMA Pierrelatte est constitué d'une INBS et de plusieurs installations indépendantes :

	Activités	Installations
Installations de l'INBS	Chimie de l'uranium	<ul style="list-style-type: none"> • Usine de Recyclage et d'Élaboration (URE) • atelier TU2 • atelier de Transfert - Échantillonnage (TE) • atelier TU3 <u>à l'arrêt définitif</u>
	Entretien et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Atelier de Démontage Rouge (ADR) • Atelier de Traitement de Surface (ATS) • Atelier de Décontamination (ATDI) • Atelier de Maintenance des Conteneurs (AMC) • Atelier de Mécanique et de Montage (AMM) • atelier d'Électronique, Mesure, Informatique (EMI)
	Unités de soutien	<ul style="list-style-type: none"> • laboratoire principal • parcs de stockage • Station de Traitement des Déchets (STD) • station de Brûlage des Huiles et Solvants (BHS) • Station de Destruction Récipients et Produits Dangereux (SDRPD) • Station de Traitement des Effluents Chimiques (STEC)
	Autres installations	<ul style="list-style-type: none"> • Station de Produits Inflammables et Dangereux (SPID) • stockage ClF_3 • unités de production d'eau de réfrigération et d'eau glacée • station de production d'eau industrielle
	CEA/Valrho	<ul style="list-style-type: none"> • installations pilotes et laboratoires
Installations hors INBS	<ul style="list-style-type: none"> • usine TU5 ou INB N°155 et son parc d'entreposage P18 • usine W ou de défluoration des UF_6 appauvris et son parc de stockage P9 • stockage d'hydrogène, d'acide fluorhydrique, de potasse • stockage d'U_3U_8 appauvri dénommé P19 • stockage de trifluorure de chlore (ClF_3) 	

ANNEXE 3. TEXTES INCIDENTS SUR LE CONTENU DES ETUDES D'IMPACT

Incidence du décret du 4 mai 1995 modifié

L'article 8 est susceptible d'avoir une incidence sur l'étude d'impact radiologique :

Article 8-3 : il implique de préciser les quantités et compositions des effluents, en expliquant leurs origines, ainsi que leurs modalités de traitement et de rejet. Lorsque plusieurs installations sont concernées par l'étude d'impact, les caractéristiques sus-mentionnées doivent être fournies pour chaque installation .

Article 8-4 : les dispositions de cet article conduisent l'exploitant à présenter, dans son dossier de demande d'autorisation, un document d'incidence. Toutefois, les INB étant par ailleurs soumises aux dispositions de la loi n° 76-629 du 10 juillet modifiée relative à la protection de la nature et de son décret d'application n° 77-1141 du 12 octobre 1977 modifié, ce document est en pratique remplacé par une étude d'impact, selon la forme prévue par ce dernier décret.

Article 8dernier alinea : cet alinéa impose la prise en compte de l'impact sur le milieu aquatique ou sur l'atmosphère lié aux activités exercées à proximité de l'installation objet de la demande d'autorisation.

Incidence de la circulaire du 20 mai 1998

Elle contient certaines précisions pouvant avoir une incidence sur le périmètre de l'étude :

Au chapitre I, il est demandé d'utiliser prioritairement la possibilité de « placer dans une seule demande l'ensemble des opérations soumises à autorisation ou à déclaration devant être réalisées par le même exploitant sur un même site » ;

Au chapitre III § 2, il est précisé que, dans le cas où la demande concerne une modification sur un site existant, le renouvellement d'une autorisation ou la régularisation d'une situation le nécessitant, « les informations devant être fournies dans le dossier en application de l'article 8 du décret du 4 mai 1995 doivent également porter sur l'ensemble du site », y compris sur des opérations déjà autorisées, du moins en ce qui concerne leur lien direct de proximité ou fonctionnel. *Au même chapitre*, il est également indiqué que « le niveau de détail » à fournir dans le dossier de demande d'autorisation doit « être en proportion avec l'importance de l'impact des rejets d'effluents ».

Incidence de l'arrêté du 26 novembre 1999

Les *articles 8 et 15* de l'arrêté du 26 novembre 1999 fixent des principes respectivement sur les effluents gazeux et les effluents liquides :

- Les rejets radioactifs non contrôlés sont interdits ;
- Les installations sont conçues, exploitées et entretenues de manière à limiter les émissions d'effluents dans l'environnement. La circulaire du 17 janvier 2002 précise que « ce principe doit conduire l'exploitant d'une INB à privilégier les technologies propres, consistant à limiter, le plus en amont possible, la production des émissions polluantes. L'application de ce principe doit être telle que les actions conduisant à réduire la quantité ou la nocivité des effluents produits n'engendrent pas des déchets d'une nature ou d'une quantité telle que leur élimination poserait davantage d'inconvénient » ;
- Ces effluents doivent, dans toute la mesure du possible, être collectés à la source, canalisés et, si besoin, traités afin que les rejets correspondants soient maintenus aussi faibles que raisonnablement possible ;
- L'arrêté d'autorisation fixe des limites de rejets sur la base de l'emploi des meilleures technologies disponibles à un coût économiquement acceptable et des caractéristiques particulières de l'environnement du site.

Par ailleurs, les *articles 9 et 16* de l'arrêté du 26 novembre 1999 précisent les différentes catégories de radionucléides pour lesquelles une limite est fixée, en tant que de besoin, dans l'arrêté d'autorisation. Le dossier de demande d'autorisation doit donc fournir des informations pertinentes pour ces différentes catégories de radionucléides, comme cela est rappelé au paragraphe 4.1 de la circulaire du 17 janvier 2002. Enfin, les *articles 14-I et 22-II* traitent de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement que doit assurer l'exploitant, notamment pour suivre l'impact radiologique réel des installations. Le dossier de demande d'autorisation doit donc préciser les modalités de surveillance prévues dans ce cadre. La circulaire du 17 janvier 2002 énonce les objectifs de cette surveillance ; elle précise également que ne doit être pris en compte dans l'estimation de l'impact radiologique des rejets d'une INB, que les effluents effectivement rejetés dans l'environnement de l'installation, à l'exclusion de ceux transportés et traités dans une installation d'un autre site.

Livre II du titre 1^{er} du Code de l'environnement et ses textes d'application

Les *articles 3 et 5 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 modifiée sur l'eau* prévoient l'établissement respectivement de SDAGE et de SAGE. Les décisions prises dans le domaine de l'eau par les autorités administratives doivent être compatibles ou rendues compatibles avec les dispositions du SDAGE et du SAGE. Ceci s'applique en particulier aux rejets d'effluents liquides d'une INB vers un milieu récepteur couvert par un SAGE ou un SDAGE, comme rappelé par l'article 8 du décret n° 95-540 du 4 mai 1995 modifié.

ANNEXE 4. REFERENCES DES VALEURS INTRODUITES DANS COMODORE

VEGETAUX (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
facteur de transfert racinaire F_{rac}	0 à 200 $kg_{sol}.kg_{frais}^{-1}$	IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2 Be : JOSSET J., Synthèse bibliographique de certains facteurs de transfert et de certains coefficients de distribution, 1979 82Br : MASSET S., MONFORT M., GUETAT P., Rapport technique "Base de données radionucléides et biosphère de la suite de logiciels POIRE", Note technique ENV REMCI RBC CRE 04000338A , 2004 Na, Cl, Ga, As, Br, Y, Mo, Rh, In, La, Pr, Nd, Eu, Au, Bi et Fr : valeur minimale
facteur de translocation F	0 (pas de translocation) à 1 (translocation totale)	IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2
flux de carbone provenant du sol J_c	0 à 5 $kg.m^{-2}.s^{-1}$	IPSN, GARNIER LAPLACE J., ROUSSEL-DEBET S., CALMON P., Modélisation des transferts du carbone 14 émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site, Rapport SERE/98/003, 1998
fraction de flux carboné du sol participant à la photosynthèse f	0 à 1	IPSN, GARNIER LAPLACE J., ROUSSEL-DEBET S., CALMON P., Modélisation des transferts du carbone 14 émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site, Rapport SERE/98/003, 1998
masse volumique de sol sec ρ_0	-	EDF, Guide d'évaluation de l'impact des rejets radioactifs atmosphériques, 1999
proportion de carbone f_v	0 à 1 $kg_c.kg_{frais}^{-1}$	IPSN, GARNIER LAPLACE J., ROUSSEL-DEBET S., CALMON P., Modélisation des transferts du carbone 14 émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site, Rapport SERE/98/003, 1998
profondeur racinaire P_r	0 à 50cm	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997
rapport de captation R_c	0 (pas de captation) à 1 (captation totale)	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997
rendement cultural r	0 à 10 $kg_{frais}.m^{-2}$	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997
temps de croissance $t_{vég}$	-	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997
teneur en eau TAU	0 à 1 $m^3.kg^{-1}$	IPSN, METIVIER JM., BENEDETTI, JC., Recueil de données de paramètres radioécologiques, Synthèse bibliographique du facteur de transfert racinaire, Document SERE 94/039, 1994

RIVIERE (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
coefficient de distribution Kd	-	Federal report Guidance, Dose Coefficients from Federal Guidance Report 12, RSIC Data Library Collection - 167 Pm, Ra, Th, U : Radiation Protection 72, Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment nouveaux radionucléides : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2 Be, Na, P, S, Cl, Ca, Ni, Ga, As, Se, Br, Rb, Mo, Rh, In, Sn, Ba, La, Pr, Nd, Sm, Ir, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, Fr, Ac, Pa et Cf : valeur par défaut
facteur de transfert aux parties comestibles du poisson F _c	0 à 10 ⁵ j.kg ⁻¹	Handbook of parameters values for the prediction of radionuclide transfers in temperate environments, Technical Reports Series n°364 IAEA Vienna, 1994 nouveaux radionucléides : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2 Cl, Ca, Ga, As, Se, In, Sm, Ir, Au, Tl, Fr, Ac et Cf : valeur par défaut

PRODUITS D'ORIGINE ANIMALE (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
facteur de transfert au produit animal F _{animal}	0 jkg-1 à 10 jkg-1.	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997 Nouveaux radionucléides : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2 H, Y, Pr, Nd et Eu pour le bœuf, le lait et le porc, H et Eu pour la volaille et les oeufs, Y, Pr, Nd et Eu pour le lait de vache : IPSN, MORIN A., Bibliothèques des données nucléaires de base, des paramètres radioécologiques et des coefficients de dose, Note technique SEGR/SAER/00-35, 2000 Y, Pr et Nd pour la volaille, H pour le lait de vache : Handbook of parameters values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, Technical Reports Series n°364 IAEA Vienna, 1994 Cl : groupe Radiologique Nord Cotentin, Modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement, Vol. 3, 1999
proportion de carbone dans le produit animal f _a	0 à 1 kg de carbone par kg de produits frais.	IPSN, GARNIER LAPLACE J., ROUSSEL-DEBET S., CALMON P., Modélisation des transferts du carbone 14 émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site, Rapport SERE/98/003, 1998

PRODUITS DERIVES (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
facteur de reconcentration	0 (déconcentration) à 10 (concentration complète)	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997

NUCLEIDE (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
constante de décroissance radiologique λ	-	IPSN, MORIN A., AQUAREJ 2.5, Bibliothèques des données nucléaires de base, des paramètres radioécologiques et des coefficients de dose, Note technique SEGR/SAER/00-35, 2000
constante biomécanique λ_{bm}	0 s ⁻¹ (période de décroissance biomécanique infinie) à 8.02 10 ⁻⁶ s ⁻¹ (période de décroissance biomécanique de 1 jour, ce qui correspond à la récolte du végétal, 1 jour après le dépôt)	IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997 nouveaux radionucléides : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2
constante de migration λ_m	0 s ⁻¹ (période infinie) à 2.20 10 ⁻¹³ s ⁻¹	éléments à période supérieure à 8 jours : IRSN, C. IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997 nouveaux radionucléides : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22indice2 autres : valeur minimale par défaut

COEFFICIENT DE DOSE EFFICACE (données issues de la notice théorique d'HEMISPHERES en date de juillet 2005)

paramètre	plage de valeurs	source
exposition interne par ingestion $F_{d.int..ingestion}$	-	Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants
exposition interne par inhalation $F_{d.int..inhalation}$	-	Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants
exposition externe au dépôt $F_{d.ext..dépôt}$	-	Radiation Protection 72 – Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment
exposition externe au panache $F_{d.ext..panache}$	-	Radiation Protection 72 – Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment

**ANNEXE 5. COMPARAISON DES VOIES D'EXPOSITION PRISES EN COMPTE
COMODORE / DARPE**

Voies d'exposition COMODORE/DARPE

Modèles	COMODORE	Tableur DARPE
rejets gazeux	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition externe : panache et dépôt • Exposition interne : inhalation, ingestion d'aliments contaminés par les dépôts, ingestion de sol contaminé par les dépôts 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition externe : panache et dépôt • Exposition interne : inhalation, ingestion d'aliments contaminés par les dépôts
rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition interne : ingestion d'aliments contaminés par irrigation, ingestion de sol contaminé par irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition interne : ingestion d'aliments contaminés par irrigation

Aliments considérés COMODORE/DARPE

Modèles	COMODORE	Tableur DARPE
rejets gazeux	<ul style="list-style-type: none"> • Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, céréales, • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, poissons, lait de vache, oeufs • Produits dérivés : produits laitiers et vin 	<ul style="list-style-type: none"> Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, céréales • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, poissons, lait de vache
rejets liquides	<ul style="list-style-type: none"> • Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, céréales, • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, poissons, lait de vache, oeufs • Produits dérivés : produits laitiers et vin • Une eau filtrée provenant du canal 	<ul style="list-style-type: none"> • Végétaux : légumes fruits, légumes feuilles, légumes racines, céréales, • Aliments d'origine animale : viande de bœuf, de veau, de mouton, de porc, volaille, poissons, lait de vache • Une eau filtrée provenant du canal

ANNEXE 6. COMPARTIMENTS PRIS EN COMPTE POUR LE CALCUL DE L'IMPACT RADIOLOGIQUE

REJETS GAZEUX - COMODORE

air		dépôt								
	panache	remise en suspension								exposition externe
		particules	dépôt		captation / transfert foliaire					exposition externe
		migration, décroissance radiologique	sol superficiel		transfert racinaire		ingestion			ingestion
		migration, décroissance radiologique		sol profond	transfert racinaire					
		décroissance radiologique, biomécanique, temps de croissance			végétaux	translocation				
						parties comestibles des végétaux	ingestion			ingestion
						durée de stockage, de consommation, fraction exogène	animal	dilution ou concentration		
								produit animal	concentration	ingestion
									produits dérivés	ingestion
						durée de stockage, de consommation, fraction exogène		durée de stockage, de consommation, fraction exogène	durée de stockage, de consommation, fraction exogène	homme

REJETS LIQUIDES - COMODORE

eau canal	<i>filtration</i>		<i>irrigation</i>	<i>irrigation</i>	<i>captation humide/ transfert foliaire</i>					
	eau filtrée	<i>respiration</i>								<i>ingestion</i>
		poisson								<i>ingestion</i>
<i>migration, décroissance radiologique</i>			sol superficiel		<i>transfert racinaire</i>		<i>ingestion</i>			<i>ingestion</i>
<i>migration, décroissance radiologique</i>				sol profond	<i>transfert racinaire</i>					
<i>décroissance radiologique, biomécanique, temps de croissance</i>					végétaux	<i>translocation</i>	<i>ingestion</i>			
						parties comestibles des végétaux	<i>ingestion</i>			<i>ingestion</i>
						<i>durée de stockage, de consommation, fraction exogène</i>	animal	<i>dilution ou concentration</i>		
								produit animal	<i>concentration</i>	<i>ingestion</i>
									produits dérivés	<i>ingestion</i>
						<i>durée de stockage, de consommation, fraction exogène</i>		<i>durée de stockage, de consommation, fraction exogène</i>	<i>durée de stockage, de consommation, fraction exogène</i>	homme

REJETS GAZEUX – MODELE DARPE

air-panache	dépôt						exposition externe
	particules	dépôt	dépôt	captation / transfert foliaire			exposition externe
	<i>migration, décroissance radiologique</i>	sol superficiel		transfert racinaire			
	<i>migration, décroissance radiologique</i>		sol profond	transfert racinaire			
	<i>décroissance radiologique, biomécanique, temps de croissance</i>			végétaux	ingestion		ingestion
					animal	dilution ou concentration	
						produit animal	ingestion
							homme

REJETS LIQUIDES – MODELE DARPE

eau canal	<i>filtration</i>	<i>respiration</i>	<i>irrigation</i>	<i>irrigation</i>	<i>captation humide / transfert foliaire</i>			
	eau filtrée							<i>ingestion</i>
		poisson						<i>ingestion</i>
<i>migration, décroissance radiologique</i>			sol superficiel		<i>transfert racinaire</i>			
<i>migration, décroissance radiologique</i>				sol profond	<i>transfert racinaire</i>			
<i>décroissance radiologique, biomécanique, temps de croissance</i>					végétaux	<i>ingestion</i>		<i>ingestion</i>
						animal	<i>dilution ou concentration</i>	
							produit animal	<i>ingestion</i>
								homme

ANNEXE 7. COMPARAISON EQUATIONS COMODORE / MODELE DARPE

Activité	COMODORE	DARPE
Eau	$A_{\text{eaubrute}} = \frac{Q_{\text{moyen}}}{D_{\text{moyen}}}$ <p> <i>A_{eaubrute}</i> : activité annuelle de l'eau brute en Bq.m³ <i>Q_{moyen}</i> : débit d'activité rejetée en rivière moyenné sur une année en Bq.s⁻¹ <i>D_{moyen}</i> : débit moyenné de la rivière sur une année en m³.s⁻¹ </p> $A_{\text{eaufiltrée}} = \frac{A_{\text{eaubrute}}}{(1 + K_d \times C_{\text{MES}})}$ <p> <i>A_{eaufiltrée}</i> : activité volumique annuelle moyenne de l'eau filtrée en Bq.m³ <i>A_{eaubrute}</i> : activité volumique annuelle dans l'eau brute en Bq.m³ <i>K_d</i> : coefficient de partage des radioéléments entre l'eau et les MES en m³.kg⁻¹ <i>C_{MES}</i> : concentration en MES de la rivière en kg.m³ </p>	
Sol	<p>Dépôt</p> $A_{\text{soldépôt}} = (D_s + D_h) \times \frac{1 - \exp[-(I_m + I) \times t_f]}{(I_m + I) \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>A_{soldépôt}</i> : activité du sol due aux dépôts en Bq.kg⁻¹ <i>D_s</i> : débit de dépôt sec en Bq.s⁻¹.m² <i>D_h</i> : débit de dépôt humide en Bq.s⁻¹.m² <i>λ_{lix}</i> : constante de migration de l'élément dans le sol en s⁻¹ <i>λ</i> : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ <i>t_f</i> : temps de fonctionnement de l'installation en s </p> <p>Irrigation</p> $A_{\text{solirrig}} = A_{\text{eaubrute}} \times V_{\text{irrig}} \times \frac{1 - \exp[-(I_m + I) \times t_f]}{(I_m + I) \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>A_{solirrig}</i> : activité du sol irrigué Bq.kg⁻¹ <i>A_{eaubrute}</i> : activité volumique annuelle dans l'eau brute en Bq.m³ <i>V_{irrig}</i> : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² <i>λ_m</i> : constante de migration dans le sol de l'élément en s⁻¹ <i>λ</i> : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ <i>t_f</i> : temps de fonctionnement de l'installation en s <i>ρ₀</i> : masse volumique du sol sec en kg.m³ <i>P_r</i> : profondeur de l'horizon racinaire en m </p>	<p>Dépôt</p> $A_{\text{soldépôt}} = (D_s + D_h) \times \frac{1 - 2 \times \exp[-(I_m + I)]}{\ln(2) \times (I_m + I) \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>A_{soldépôt}</i> : activité du sol due aux dépôts en Bq.kg⁻¹ <i>D_s</i> : débit de dépôt sec en Bq.s⁻¹.m² <i>D_h</i> : débit de dépôt humide en Bq.s⁻¹.m² <i>λ_{lix}</i> : constante de lixiviation de l'élément dans le sol en s⁻¹ <i>λ</i> : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ </p> <p>Irrigation</p> $A_{\text{solirrig}} = A_{\text{eaubrute}} \times V_{\text{irrig}} \times \frac{1 - 2 \times \exp[-(I_m + I) \times t_f]}{\ln(2) \times (I_m + I) \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>A_{solirrig}</i> : activité du sol irrigué en Bq.kg⁻¹ <i>A_{eaubrute}</i> : activité volumique annuelle dans l'eau brute en Bq.m³ <i>V_{irrig}</i> : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² <i>λ_m</i> : constante de migration dans le sol de l'élément en s⁻¹ <i>λ</i> : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ <i>ρ₀</i> : masse volumique du sol sec en kg.m³ <i>P_r</i> : profondeur de l'horizon racinaire en m </p>

Végétaux racinaire	<p>Dépôt</p> $A_{\text{vég.racinaireirrig}} = A_{\text{solirrig}} \times F_{\text{rac}}$ <p> $A_{\text{vég.racinaireirrig}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg⁻¹ A_{solirrig} : activité massique du sol irrigué Bq.kg⁻¹ F_{rac} : facteur de transfert racinaire en kg_{sol}.kg_{frais}⁻¹. </p> <p>Irrigation</p> $A_{\text{vég.racinaireépôt}} = A_{\text{soldépôt}} \times F_{\text{rac}}$ <p> $A_{\text{vég.racinaireépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg⁻¹ $A_{\text{soldépôt}}$: activité surfacique déposée sur le sol Bq.m⁻² F_{rac} : facteur de transfert racinaire en kg_{sol}.kg_{frais}⁻¹. </p>	
Végétaux foliaire	<p>Dépôt</p> $A_{\text{vég.foliairedépôt}} = (D_s \times R_{cs} + D_h \times R_{ch}) \times F \times \frac{1 - \exp[-(I_{bm} + I) \times t_{\text{vég}}]}{(I_{bm} + I) \times r}$ <p> $A_{\text{vég.foliairedépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ D_s : débit de dépôt sec en Bq.s⁻¹.m² D_h : débit de dépôt humide en Bq.s⁻¹.m² R_s : rapport de captation sec du végétal (sans unité) R_h : rapport de captation humide du végétal (sans unité) F : facteur de translocation (sans unité) λ_{bm} : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹ λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ $t_{\text{vég}}$: temps de croissance du végétal en s r : rendement de culture en kg_{frais}.m² </p> <p>Irrigation</p> $A_{\text{vég.foliaireirrig}} = A_{\text{eauirrig}} \times V_{\text{irrig}} \times R_h \times F \times \frac{1 - \exp[-(I_{bm} + I) \times t_{\text{vég}}]}{(I_{bm} + I) \times r}$ <p> $A_{\text{vég.foliaireirrig}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ A_{eauirrig} : activité volumique dans l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m³ V_{irrig} : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² R_h : rapport de captation humide du végétal (sans unité) F : facteur de translocation (sans unité) λ_{bm} : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹ λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ $t_{\text{vég}}$: temps de croissance du végétal en s r : rendement de culture en kg_{frais}.m² </p>	<p>Dépôt</p> $A_{\text{vég.foliairedépôt}} = D_t \times R_{ct} \times F \times \frac{I_{bm} + I}{\log(2) \times r}$ <p> $A_{\text{vég.foliairedépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ D_s : débit de dépôt sec en Bq.s⁻¹.m² D_h : débit de dépôt humide en Bq.s⁻¹.m² R_s : rapport de captation sec du végétal (sans unité) R_h : rapport de captation humide du végétal (sans unité) λ_{bm} : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹ λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ r : rendement de culture en kg_{frais}.m² </p> <p>Irrigation</p> $A_{\text{vég.foliaireirrig}} = A_{\text{eauirrig}} \times V_{\text{irrig}} \times R_h \times \frac{I_{bm} + I}{\log(2) \times r}$ <p> $A_{\text{vég.foliaireirrig}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ A_{eauirrig} : activité volumique dans l'eau brute pendant la période d'irrigation en Bq.m³ V_{irrig} : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² R_h : rapport de captation humide du végétal (sans unité) λ_{bm} : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ r : rendement de culture en kg_{frais}.m² </p>

Produits d'origine animale	$A_{p.animal} = \left[\left(\sum_{veg} (A_{veg.foliaire} + A_{veg.racinaire}) \times Q_{veg} \times [1 - E_x] \times \frac{D_{conso}}{12} \times \exp[-I \times t_{stock}] \right) + A_{sol} \times Q_{sol} + A_{eau} \times \frac{Q_{eau}}{1000} \right] \times F_{animal}$ <p> $A_{veg.foliaire}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ $A_{veg.racinaire}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg⁻¹ $Q_{veg-animal}$: consommation de végétal par l'animal kg_{frais}.j⁻¹ A_{sol} : activité massique du sol en Bq.kg⁻¹ Q_{sol} : consommation de sol par l'animal kg_{frais}.j⁻¹ $A_{eau brute}$: activité de l'eau brute en Bq.m³ Q_{eau} : consommation d'eau par l'animal L.j⁻¹ E_x : fraction exogène du végétal (sans unité) λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹ t_{stock} : temps de durée de stockage du végétal en s F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en Bq.kg_{frais}⁻¹ par Bq_{ingéré}.j⁻¹ </p>	$A_{p.animal} = \left[\left(\sum_{veg} (A_{veg.foliaire} + A_{veg.racinaire}) \times Q_{veg} \times A_{eau} \times \frac{Q_{eau}}{1000} \right) \right] \times F_{animal}$ <p> $A_{veg.foliaire}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹ $A_{veg.racinaire}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg⁻¹ $Q_{veg-animal}$: consommation de végétal par l'animal kg_{frais}.j⁻¹ $A_{eau brute}$: activité de l'eau brute en Bq.m³ Q_{eau} : consommation d'eau par l'animal L.j⁻¹ F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en Bq.kg_{frais}⁻¹ par Bq_{ingéré}.j⁻¹ </p>
Produits dérivés	<p><i>Produits laitiers</i></p> $A_{p.laitiers} = A_{lait} \times F_{lait-p.laitiers}$ <p> $A_{p.laitiers}$: activité des produits laitiers en Bq.kg⁻¹ A_{lait} : activité du lait en Bq.L⁻¹ $F_{lait-p.laitiers}$: facteur de transfert du lait aux produits laitiers en L.kg⁻¹ </p> <p><i>Pour le vin</i></p> $A_{vin} = A_{fruits} \times F_{fruits-vin}$ <p> A_{vin} : activité du vin en Bq.L⁻¹ A_{fruits} : activité des fruits en Bq.kg⁻¹ $F_{fruits-vin}$: facteur de transfert des fruits au vin en kg.L⁻¹ </p>	
Produits de la pêche	$A_{p.pêche} = A_{eaufiltrée} \times F_c$ <p> $A_{p.pêche}$: activité des produits de la pêche en Bq.kg⁻¹ $A_{eaufiltrée}$: activité volumique annuelle moyenne de l'eau filtrée en Bq.m³ F_c : facteurs de transfert aux produits de la rivière en m³.kg⁻¹ </p>	$A_{p.pêche} = A_{eau brute} \times F_c$ <p> $A_{p.pêche}$: activité des produits de la pêche en Bq.kg⁻¹ $A_{eau filtrée}$: activité volumique annuelle moyenne de l'eau brute en Bq.m³ F_c : facteurs de transfert aux produits de la rivière en m³.kg⁻¹ </p>

ANNEXE 8. COEFFICIENTS UTILISES POUR LE CALCUL D'IMPACT DE L'ETABLISSEMENT COGEMA

Radionucléides

Radionucléides	Constante de décroissance radioactive λ (s^{-1})	Constante de migration λ_m (s^{-1})	Constante biomécanique λ_{bm} (s^{-1})
Cl-36	7,30E-14	7,85E-08	8,91E-07
Zr-95+Nb-95	1,25E-07	9,01E-12	5,73E-07
Ru-103	2,04E-07	2,00E-11	5,73E-07
Ru-106+Rh-106	2,18E-08	2,00E-11	5,73E-07
Sb-125	7,93E-09	1,32E-10	5,73E-07
Cs-137+Ba-137m	7,33E-10	4,50E-12	3,34E-07
Ce-144+Pr-144	2,82E-08	2,45E-12	5,73E-07
U-232	3,05E-10	1,65E-09	5,73E-07
U-233	1,39E-13	1,65E-09	5,73E-07
U-234	8,99E-14	1,65E-09	5,73E-07
U-235	3,12E-17	1,65E-09	5,73E-07
U-236	9,39E-16	1,65E-09	5,73E-07
U-238	4,92E-18	1,65E-09	5,73E-07
Np-237	1,03E-14	7,93E-10	5,73E-07
Pu-239	9,13E-13	1,65E-11	5,73E-07
Pa-233	2,97E-07	2,19E-10	5,73E-07
Tc-99	1,03E-13	2,19E-10	5,73E-07
Th-228	1,15E-08	2,19E-10	5,73E-07
Th-234	3,33E-07	2,19E-10	5,73E-07
Th-231	7,54E-06	2,19E-10	5,73E-07

Végétaux

	Rapport captation sèche R_{cs}	Rapport captation humide R_{ch}	Temps de croissance t_{veg} (s)	Profondeur de l'horizon racinaire P_r (m)	Rendement cultural r ($kg.m^{-2}$)	Fraction exogène E_x	Durée de consommation du végétal D_{conso} (mois)	Durée de stockage t_{stock} (s)
Foin	9,00E-01	1,00E-01	3,63E+06	1,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	1,30E+07
Herbe	7,00E-01	1,00E-01	3,63E+06	1,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Maïs	9,00E-01	1,00E-01	5,62E+06	3,00E-01	5,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	1,60E+07
Céréales	9,00E-01	1,00E-01	5,62E+06	3,00E-01	5,00E-01	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. racines	7,00E-01	1,00E-01	1,30E+07	3,00E-01	3,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. fruits	5,00E-01	1,00E-01	1,56E+07	3,00E-01	2,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. feuille	5,00E-01	1,00E-01	3,46E+06	3,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00

Végétaux (suite)

Facteur de translocation F							
Radionucléides	Foin	Herbe	Maïs	Céréales	Lég. Racines	Lég. Fruits	Lég. feuilles
Zr-95+Nb-95	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Ru-103	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Ru-106+Rh-106	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Sb-125	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,50E-01	1,00E-01	1,00E-01	1,00E+00
Cs-137+Ba-137m	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,50E-01	1,00E-01	1,00E-01	1,00E+00
Ce-144+Pr-144	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-232	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-233	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-234	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-235	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-236	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
U-238	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Np-237	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Pu-239	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	0,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Pa-233	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Th-228	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Th-234	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	1,00E+00
Th-231	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	2,00E-02	1,00E+00

Facteur de transfert racinaire sol/plante F_{rac} ($kg_{sol}.kg_{frais}^{-1}$)							
Radionucléides	Foin	Herbe	Maïs	Céréales	Lég. Racines	Lég. Fruits	Lég. feuilles
Zr-95+Nb-95	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	5,00E-03	1,00E-04
Ru-103	1,00E-02	1,00E-02	4,30E-03	4,30E-03	1,00E-02	6,70E-02	2,40E-02
Ru-106+Rh-106	1,00E-02	1,00E-02	4,30E-03	4,30E-03	1,00E-02	6,70E-02	2,40E-02
Sb-125	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	5,00E-05	4,80E-06	1,00E-05
Cs-137+Ba-137m	2,60E-02	2,60E-02	2,20E-02	2,20E-02	1,60E-02	6,90E-03	1,60E-02
Ce-144+Pr-144	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	2,00E-02	1,00E-03
U-232	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
U-233	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
U-234	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
U-235	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
U-236	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
U-238	2,30E-03	2,30E-03	1,10E-03	1,10E-03	2,00E-03	9,00E-02	6,60E-04
Np-237	2,30E-03	2,30E-03	2,30E-03	2,30E-03	1,50E-03	4,80E-03	3,00E-03
Pu-239	1,00E-04	1,00E-04	2,20E-05	2,20E-05	4,50E-05	1,20E-05	5,80E-06
Br-82	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02
Pa-233	4,00E-02	4,00E-02	4,00E-02	4,00E-02	4,00E-02	2,50E-03	4,00E-02
Tc-99	3,70E+00	3,70E+00	8,30E-01	8,30E-01	9,60E-02	1,00E+00	3,00E+01
Th-228	1,10E-03	1,10E-03	1,90E-05	1,90E-05	2,50E-05	3,00E-05	1,40E-04
Th-234	1,10E-03	1,10E-03	1,90E-05	1,90E-05	2,50E-05	3,00E-05	1,40E-04
Th-231	1,10E-03	1,10E-03	1,90E-05	1,90E-05	2,50E-05	3,00E-05	1,40E-04

Produits d'origine animale

	Facteur de transfert aux produits d'origine animale F_{animal} (j.kgfrais)							
	Vache	Bœuf	Veau	Mouton	Porc	Volaille	Lait de vache	Œufs
C-14	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Zr-95+Nb-95	1,00E-05	0,00E+00	6,67E-05	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-05	1,00E-03
Ru-103	1,00E-03	0,00E+00	6,67E-03	1,00E-02	6,80E-03	7,00E-03	1,00E-06	6,00E-03
Ru-106+Rh-106	1,00E-03	0,00E+00	6,67E-03	1,00E-02	6,80E-03	7,00E-03	1,00E-06	6,00E-03
Sb-125	1,00E-03	0,00E+00	6,67E-03	1,00E-02	9,20E-04	9,20E-04	1,00E-04	9,20E-04
Cs-137+Ba-137m	3,00E-02	5,00E-01	3,33E+00	5,00E-01	4,00E-01	4,50E+00	5,00E-03	5,00E-01
Ce-144+Pr-144	1,00E-03	0,00E+00	6,67E-03	1,00E-02	2,50E-03	1,00E-02	2,00E-05	5,00E-03
U-232	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
U-233	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
U-234	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
U-235	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
U-236	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
U-238	2,00E-04	0,00E+00	1,33E-03	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	6,00E-04	1,00E+00
Np-237	1,00E-04	0,00E+00	6,67E-04	4,00E-04	1,00E-02	4,00E-03	1,00E-06	2,00E-03
Pu-239	1,00E-04	0,00E+00	6,67E-04	4,00E-04	3,40E-06	2,00E-04	1,00E-06	8,00E-03
Pa-233	1,00E-03	1,00E-03	6,67E-03	1,00E-02	1,00E-02	4,00E-03	5,00E-06	2,00E-03
Tc-99	1,00E-02	1,00E-02	6,67E-02	1,00E-01	9,90E-04	3,00E-02	1,00E-02	1,90E+00
Th-228	1,00E-04	1,00E-04	6,67E-04	1,00E-03	1,00E-02	4,00E-03	5,00E-06	2,00E-03
Th-234	1,00E-04	1,00E-04	6,67E-04	1,00E-03	1,00E-02	4,00E-03	5,00E-06	2,00E-03
Th-231	1,00E-04	1,00E-04	6,67E-04	1,00E-03	1,00E-02	4,00E-03	5,00E-06	2,00E-03

Coefficient de dose efficace

Coefficient de dose efficace par exposition externe		
radionucléide	exposition externe au dépôt (Sv.s ⁻¹ par Bq.m ⁻²)	exposition externe au panache (Sv.s ⁻¹ par Bq.m ⁻³)
Zr-95+Nb-95	7,36E-16	3,67E-14
Ru-103	4,63E-16	2,25E-14
Ru-106+Rh-106	1,06E-16	5,20E-15
Sb-125	4,25E-16	2,02E-14
Cs-137+Ba-137m	2,77E-16	1,36E-14
Ce-144+Pr-144	2,91E-17	1,40E-15
U-232	1,01E-18	1,42E-17
U-233	7,16E-19	1,63E-17
U-234	7,48E-19	7,63E-18
U-235	1,48E-16	7,20E-15
U-236	6,50E-19	5,01E-18
U-238	5,51E-19	3,41E-18
Np-237	2,87E-17	1,03E-15
Pu-239	3,67E-19	4,24E-18
Pu-240	8,03E-19	4,75E-18
Pa-233	1,95E-16	9,35E-15
Tc-99	7,81E-20	1,62E-18
Th-228	2,35E-18	9,20E-17
Th-234	8,32E-18	3,38E-16
Th-231	1,85E-17	5,22E-16

Coefficient de dose efficace (suite)

radionucléide	Coefficient de dose efficace par ingestion (Sv.Bq ⁻¹)					
	Nourrisson	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
Zr-95+Nb-95	5,48E-09	2,40E-09	2,40E-09	1,50E-09	9,70E-10	7,65E-10
Ru-103	7,10E-09	4,60E-09	2,40E-09	1,50E-09	9,20E-10	7,30E-10
Ru-106+Rh-106	3,33E-08	1,25E-08	1,25E-08	7,50E-09	4,30E-09	3,50E-09
Sb-125	1,10E-08	6,10E-09	3,40E-09	2,10E-09	1,40E-09	1,10E-09
Cs-137+Ba-137m	8,25E-09	4,80E-09	4,80E-09	5,00E-09	6,50E-09	6,50E-09
Ce-144+Pr-144	2,65E-08	9,59E-09	9,59E-09	5,55E-09	3,28E-09	2,63E-09
U-232	2,50E-06	8,20E-07	5,80E-07	5,70E-07	6,40E-07	3,30E-07
U-233	3,80E-07	1,40E-07	9,20E-08	7,80E-08	7,80E-08	5,10E-08
U-234	3,70E-07	1,30E-07	8,80E-08	7,40E-08	7,40E-08	4,90E-08
U-235	3,50E-07	1,30E-07	8,50E-08	7,10E-08	7,00E-08	4,70E-08
U-236	3,50E-07	1,30E-07	8,40E-08	7,00E-08	7,00E-08	4,70E-08
U-238	3,40E-07	1,20E-07	8,00E-08	6,80E-08	6,70E-08	4,50E-08
Np-237	2,00E-06	2,10E-07	1,40E-07	1,10E-07	1,10E-07	1,10E-07
Pu-239	4,20E-06	4,20E-07	3,30E-07	2,70E-07	2,40E-07	2,50E-07
Pu-240	4,20E-06	4,20E-07	3,30E-07	2,70E-07	2,40E-07	2,50E-07
Pa-233	9,70E-09	6,20E-09	3,20E-09	1,90E-09	1,10E-09	8,70E-10
Tc-99	1,00E-08	4,80E-09	2,30E-09	1,30E-09	8,20E-10	6,40E-10
Th-228	3,70E-06	3,70E-07	2,20E-07	1,50E-07	9,40E-08	7,20E-08
Th-234	4,00E-08	2,50E-08	1,30E-08	7,40E-09	4,20E-09	3,40E-09
Th-231	3,90E-09	2,50E-09	1,20E-09	7,40E-10	4,20E-10	3,40E-10
radionucléide	Coefficient de dose efficace par inhalation (Sv.Bq ⁻¹)					
	Nourrisson	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
Zr-95+Nb-95	1,20E-08	1,20E-08	6,40E-09	4,50E-09	3,90E-09	3,15E-09
Ru-103	1,30E-08	1,00E-08	6,00E-09	4,20E-09	3,70E-09	3,00E-09
Ru-106+Rh-106	6,25E-08	6,25E-08	3,20E-08	2,05E-08	1,55E-08	1,40E-08
Sb-125	4,20E-08	3,80E-08	2,40E-08	1,60E-08	1,40E-08	1,20E-08
Cs-137+Ba-137m	3,55E-09	3,55E-09	1,80E-09	1,85E-09	2,20E-09	2,30E-09
Ce-144+Pr-144	8,76E-08	8,76E-08	4,40E-08	2,75E-08	2,05E-08	1,80E-08
U-232	1,00E-04	9,70E-05	6,60E-05	4,30E-05	3,80E-05	3,70E-05
U-233	3,40E-05	3,00E-05	1,90E-05	1,20E-05	1,10E-05	9,60E-06
U-234	3,30E-05	2,90E-05	1,90E-05	1,20E-05	1,00E-05	9,40E-06
U-235	3,00E-05	2,60E-05	1,70E-05	1,10E-05	9,20E-06	8,50E-06
U-236	3,10E-05	2,70E-05	1,80E-05	1,10E-05	9,50E-06	8,70E-06
U-238	2,90E-05	2,50E-05	1,60E-05	1,00E-05	8,70E-06	8,00E-06
Np-237	9,80E-05	9,30E-05	6,00E-05	5,00E-05	4,70E-05	5,00E-05
Pu-239	2,10E-04	2,00E-04	1,50E-04	1,20E-04	1,10E-04	1,20E-04
Pu-240	2,10E-04	2,00E-04	1,50E-04	1,20E-04	1,10E-04	1,20E-04
Pa-233	1,70E-08	1,30E-08	7,50E-09	5,50E-09	4,90E-09	3,90E-09
Tc-99	4,10E-08	3,70E-08	2,40E-08	1,70E-08	1,50E-08	1,30E-08
Th-228	1,80E-04	1,50E-04	8,30E-05	5,20E-05	3,60E-05	2,90E-05
Th-234	4,10E-08	3,10E-08	1,70E-08	1,10E-08	9,10E-09	7,70E-09
Th-231	2,40E-09	1,70E-09	7,60E-10	5,20E-10	4,10E-10	3,30E-10

ANNEXE 9. DONNEES METEOROLOGIQUES 2004

Dans le modèle de Doury (COTRAM4) le type de stabilité atmosphérique est réparti en deux classes : diffusion normale (gradient thermique inférieur ou égal à $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ -atmosphère instable) et diffusion faible (gradient thermique supérieur ou égal à $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ -atmosphère stable). Les précipitations ne peuvent être prises en compte que pour la classe de stabilité « atmosphère neutre ». Compte-tenu des informations fournies par la station météorologique du Tricastin, les calculs de COMODORE ont été lancés à partir des roses des vents établies sur les trois critères suivants :

Classe de stabilité instable sans précipitation

CRITERES DE SELECTION

. Classes de stabilité: *Instable*
 . Classes de précipitations: *Non*

NOMBRES D'OBSERVATIONS

. Total sur la période = 50051
 . Partiel pour le tableau = 29711

Période : du 01/01/2004 au 31/12/2004

FREQUENCE POUR 1000 DES VITESSES DE VENT EN FONCTION DE LA DIRECTION - NIVEAU 10 m -

Degrés	360	020	040	060	080	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	Direction inconnue	Toutes directions
m/s																				
14	2,0	2,6																		4,6
13	2,1	2,7																		4,8
12	3,9	5,8																		9,7
11	7,6	12,0																		19,6
10	9,9	20,5																		30,4
9	14,6	28,2	0,1					0,1												43,0
8	19,3	32,6	0,4					0,3	0,4		0,1								0,1	53,2
7	21,6	32,4	0,8					0,5	1,6	0,3	0,6	0,1							0,1	58,0
6	20,1	28,2	1,2					0,7	2,5	0,9	1,4	0,5								56,3
5	19,5	22,4	1,2					0,4	2,5	2,3	4,1	2,0	0,4	0,1	0,3	0,2	0,5	1,4		57,3
4	20,7	16,0	2,3	0,1				0,2	2,7	4,4	8,2	4,5	0,7	0,3	0,4	0,4	0,6	2,6		64,1
3	17,0	10,3	2,5	0,2			0,2	1,0	3,4	6,1	9,8	6,4	2,0	0,8	0,5	0,5	0,9	4,2		66,0
2	10,4	7,1	2,3	0,7	0,5	0,2	0,3	1,2	3,0	6,1	9,1	6,2	3,3	1,7	1,2	1,5	2,1	5,0		61,9
1	6,2	6,4	3,4	2,1	1,3	0,9	1,2	1,4	2,3	3,4	5,3	4,1	3,5	2,6	2,2	2,6	3,2	3,9		56,0
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		9,0
Toutes vitesses	175,4	227,7	14,7	3,6	2,3	1,8	2,2	6,3	18,9	24,0	39,1	24,3	10,4	6,0	5,2	5,8	8,0	18,2	0,0	593,9
Vitesses moyennes	6,3	7,1	3,3	1,3	1,1	0,8	1,2	3,3	3,8	2,9	3,1	2,8	2,0	1,7	1,9	1,8	2,1	2,6	0,0	5,5

Classe de stabilité instable avec précipitations

CRITERES DE SELECTION

. Classes de stabilité: *Instable*
 . Classes de précipitations: *Oui*

NOMBRES D'OBSERVATIONS

. Total sur la période = 50051
 . Partiel pour le tableau = 661

Période : du 01/01/2004 au 31/12/2004

FREQUENCE POUR 1000 DES VITESSES DE VENT EN FONCTION DE LA DIRECTION - NIVEAU 10 m -

Degrés	360	020	040	060	080	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	Direction inconnue	Toutes directions
m/s																				
14																				0,0
13																				0,0
12																				0,0
11																				0,0
10																				0,0
9	0,1	0,1																		0,2
8	0,1	0,2																		0,3
7	0,2	0,4						0,1												0,7
6	0,2	0,2						0,1	0,4											0,9
5	0,4	0,3						0,1	0,5				0,1					0,1		1,5
4	0,9	0,6	0,1					0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1						2,4
3	0,8	0,5	0,1				0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1				2,5
2	0,5	0,5	0,2					0,1	0,3	0,3	0,2	0,1				0,1	0,1	0,1		2,5
1	0,3	0,3		0,1	0,1				0,1	0,1	0,1	0,1				0,1		0,3		1,6
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
Toutes vitesses	3,5	3,1	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	1,4	0,7	0,8	0,5	0,5	0,2	0,0	0,3	0,1	0,5	0,0	12,6
Vitesses moyennes	3,9	4,3	2,8	1,0	1,0	0,0	3,0	6,0	4,7	2,4	2,5	2,4	3,0	3,5	0,0	2,0	2,0	2,0	0,0	3,6

Classe de stabilité stable toutes conditions de précipitations confondues

. Classes de stabilité: Stable
 . Classes de précipitations: Confondues

. Total sur la période = 50051
 . Partiel pour le tableau = 19678

Période : du 01/01/2004 au 31/12/2004

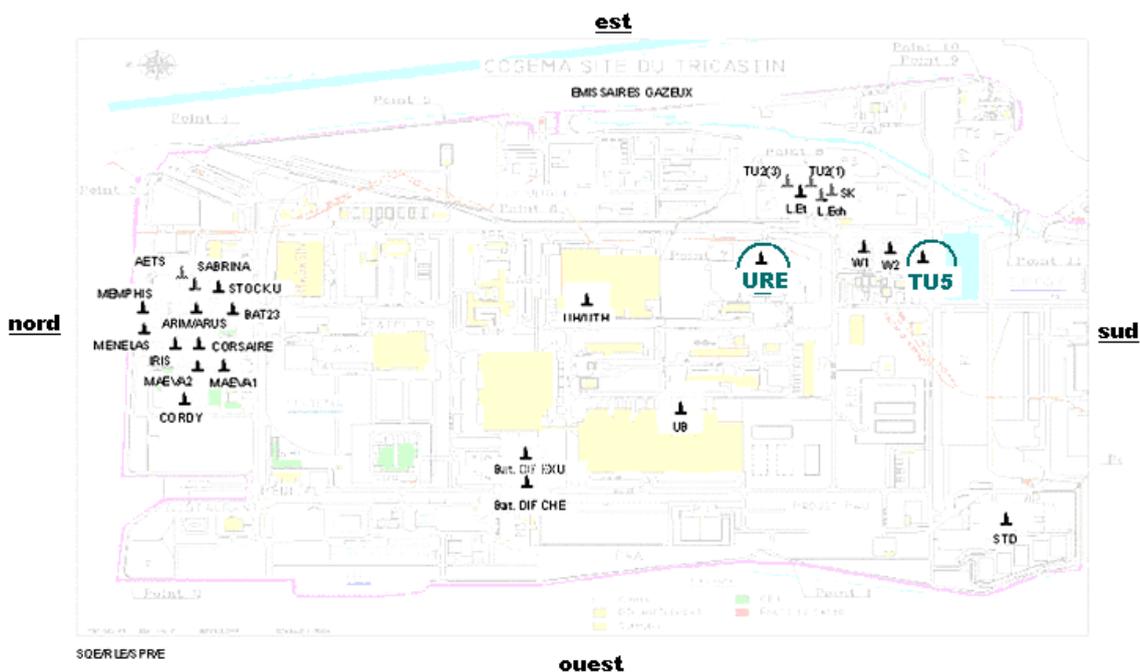
FREQUENCE POUR 1000 DES VITESSES DE VENT EN FONCTION DE LA DIRECTION - NIVEAU 10 m -

Degrés	360	020	040	060	080	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	Direction inconnue	Toutes directions	
m/s																					
14	0,1																			0,1	
13																				0,0	
12																				0,0	
11	0,1																			0,1	
10	0,2	0,2																		0,4	
9	0,5	0,6																		1,1	
8	1,8	1,3																0,1		3,4	
7	3,6	1,9							0,1									0,1	0,2	5,9	
6	5,7	3,5							0,1	0,1								0,1	0,2	9,7	
5	9,0	5,5	0,1						0,3	0,2	0,1	0,1						0,1	0,2	1,0	16,6
4	17,6	8,1	0,4	0,1				0,1	0,2	0,6	0,3	0,3	0,3		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	2,5	31,0
3	22,0	10,1	1,4	0,3	0,1	0,1		0,3	1,0	1,5	1,5	1,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,9	6,9		48,4	
2	22,2	13,5	4,3	1,4	0,6	0,2	0,6	0,7	1,8	4,1	5,1	3,1	1,0	1,0	1,3	2,2	2,7	8,0		73,8	
1	17,0	18,5	12,7	11,1	6,2	2,9	3,8	2,8	3,7	5,4	7,2	5,7	4,3	4,2	6,2	7,5	8,1	10,1		137,4	
0,5	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6		65,2	
Toutes vitesses	103,4	66,8	22,5	16,5	10,5	6,8	8,1	8,3	11,0	15,0	17,8	13,9	9,2	9,0	11,4	14,0	16,0	32,5	0,0	393,1	
Vitesses moyennes	3,2	2,8	1,3	1,0	0,9	4,6	0,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,0	1,0	1,0	1,1	1,4	2,0	0,0	2,1	

Remarque :

Sous COTRAM4, c'est l'icône « atmosphère neutre » qui correspond à la diffusion normale c'est-à-dire aux conditions instables telles qu'entendues dans les bilans météo de la station du Tricastin.

ANNEXE 10. LOCALISATION DES EMISSAIRES GAZEUX COGEMA



ANNEXE 11. DOSE EFFICACE ANNUELLE, DETAIL PAR INSTALLATION

Clos du Bonnot

		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
		<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Installation	Voie d'impact						
INB Gaz	Ingestion	2,33E-07	2,48E-07	1,60E-07	1,60E-07	1,72E-07	1,50E-07
	Inhalation	2,62E-06	4,62E-06	5,15E-06	6,09E-06	7,58E-06	7,41E-06
	Exposition interne	2,85E-06	4,87E-06	5,31E-06	6,25E-06	7,75E-06	7,58E-06
	Panache	7,74E-12	7,74E-12	7,74E-12	7,74E-12	7,74E-12	7,74E-12
	Dépôt	1,91E-09	3,75E-09	3,75E-09	3,75E-09	3,75E-09	3,75E-09
	Exposition externe	1,92E-09	3,76E-09	3,76E-09	3,76E-09	3,76E-09	3,76E-09
	Total gaz INB	2,85E-06	4,87E-06	5,31E-06	6,25E-06	7,76E-06	7,58E-06
INB Liquide		9,43E-06	2,54E-04	1,33E-04	9,28E-05	5,49E-05	5,22E-05
Total INB		1,23E-05	2,59E-04	1,38E-04	9,91E-05	6,27E-05	6,04E-05
INBS Gaz	Ingestion	4,38E-07	7,78E-07	5,26E-07	6,38E-07	7,29E-07	5,92E-07
	Inhalation	3,05E-05	5,36E-05	5,98E-05	7,06E-05	8,79E-05	8,60E-05
	Exposition interne	3,09E-05	5,44E-05	6,03E-05	7,12E-05	8,86E-05	8,68E-05
	Panache	5,98E-11	5,98E-11	5,98E-11	5,98E-11	5,98E-11	5,98E-11
	Dépôt	1,47E-08	2,90E-08	2,90E-08	2,90E-08	2,90E-08	2,90E-08
	Exposition externe	1,48E-08	2,91E-08	2,91E-08	2,91E-08	2,91E-08	2,91E-08
	Total gaz INBS	3,10E-05	5,44E-05	6,04E-05	7,13E-05	8,87E-05	8,68E-05
INBS	liquide	7,50E-04	2,12E-03	1,11E-03	7,71E-04	4,62E-04	4,25E-04
Total INBS		7,81E-04	2,17E-03	1,17E-03	8,42E-04	5,51E-04	5,19E-04
total général impact gaz		3,38E-05	5,93E-05	6,57E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,44E-05
total général liquide		7,59E-04	2,37E-03	1,24E-03	8,64E-04	5,17E-04	4,85E-04
total général		7,93E-04	2,43E-03	1,31E-03	9,41E-04	6,13E-04	5,79E-04

ANNEXE 12. RESULTATS AVEC EAU DE NAPPE

Rejets gazeux

		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
Clos du Bonnot		<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion		6,71E-07	1,03E-06	6,86E-07	7,98E-07	9,01E-07	7,42E-07
inhalation		3,31E-05	5,82E-05	6,50E-05	7,67E-05	9,55E-05	9,34E-05
exposition interne		3,38E-05	5,92E-05	6,56E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,42E-05
panache		6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11
dépôt		1,66E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
exposition externe		1,67E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
total général gaz		3,38E-05	5,93E-05	6,57E-05	7,75E-05	9,64E-05	9,42E-05
		Part					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion		2,0%	1,7%	1,0%	1,0%	0,9%	0,8%
inhalation		98,0%	98,2%	98,9%	98,9%	99,0%	99,2%
exposition interne		100,0%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
panache		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
dépôt		0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
exposition externe		0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général gaz		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Rejets liquides

		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
Clos du Bonnot		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,00E+00	3,74E-07	4,15E-06	3,70E-06	3,92E-06	3,53E-06
	p.animal	7,59E-04	1,64E-04	8,98E-05	7,14E-05	6,12E-05	4,30E-05
	poisson	0,00E+00	2,19E-03	1,14E-03	7,81E-04	4,45E-04	4,33E-04
	eau	0,00E+00	5,59E-02	3,59E-02	3,20E-02	2,98E-02	2,15E-02
total général liquide		7,59E-04	5,83E-02	3,71E-02	3,29E-02	3,03E-02	2,20E-02
		Part de chaque aliment					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	p.animal	1,3%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
	poisson	0,0%	3,8%	3,1%	2,4%	1,5%	2,0%
	eau	0,0%	96,0%	96,7%	97,4%	98,3%	97,8%
total général liquide		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

ANNEXE 13. RESULTATS 2004 MODELE DARPE

Résultats par installation

		dose efficace annuelle en mSv.an ⁻¹		
		DARPE	COMODORE	écart
		Adulte	Adulte	
Clos du Bonnot				
Installation	Voie d'impact			
INB Gaz	Ingestion	9,17E-07	1,50E-07	-7,67E-07
	Inhalation	1,94E-06	7,41E-06	5,47E-06
	Exposition interne	2,86E-06	7,58E-06	4,72E-06
	Panache	1,18E-11	7,74E-12	-4,06E-12
	Dépôt	4,29E-07	3,75E-09	-4,25E-07
	Exposition externe	4,29E-07	3,76E-09	-4,25E-07
	Total gaz INB	3,29E-06	7,58E-06	4,29E-06
INB Liquide		8,30E-07	5,22E-05	5,14E-05
Total INB		4,12E-06	6,04E-05	5,63E-05
INBS Gaz	Ingestion	3,71E-06	5,92E-07	-3,12E-06
	Inhalation	7,77E-06	8,60E-05	7,82E-05
	Exposition interne	1,15E-05	8,68E-05	7,53E-05
	Panache	3,30E-11	5,98E-11	2,68E-11
	Dépôt	1,22E-06	2,90E-08	-1,19E-06
	Exposition externe	1,22E-06	2,91E-08	-1,19E-06
	Total gaz INBS	1,27E-05	8,68E-05	7,41E-05
INBS	liquide	6,61E-04	4,25E-04	-2,36E-04
Total INBS		6,74E-04	5,19E-04	-1,55E-04

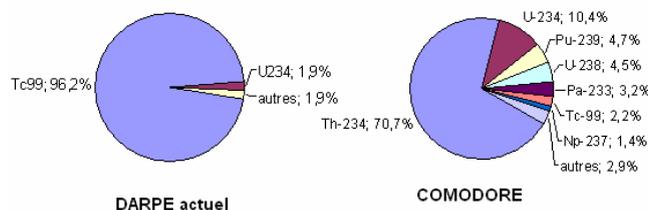
Rejets gazeux

		dose efficace en mSv.an ⁻¹		part	
		DARPE	COMODORE	DARPE	COMODORE
		Adulte	Adulte	Adulte	Adulte
Clos du Bonnot					
ingestion		4,63E-06	7,42E-07	28,9%	0,8%
inhalation		9,71E-06	9,34E-05	60,7%	99,0%
exposition interne		1,43E-05	9,43E-05	89,7%	100,0%
panache		4,48E-11	6,75E-11	0,0%	0,0%
dépôt		1,65E-06	3,28E-08	10,3%	0,0%
exposition externe		1,65E-06	3,28E-08	10,3%	0,0%
total général gaz		1,60E-05	9,44E-05	100,0%	100,0%

Rejets liquides

ingestion	végétaux	5,71E-04	3,53E-06	86,4%	0,7%
	p.animal	8,46E-05	4,30E-05	12,8%	8,9%
	poisson	6,18E-07	4,33E-04	0,1%	89,3%
	eau	5,06E-06	5,23E-06	0,8%	1,1%
total général liquide		6,62E-04	4,85E-04	100%	100%

part des radionucléides dans la dose efficace reçue par l'adulte



**ANNEXE 14. PREMIERS RESULTATS DE L'ENQUETE ALIMENTAIRE BEGEAT
SUR LES GROUPES DE REFERENCE DU TRICASTIN**

Pour l'adulte, les rations alimentaires proviennent de l'étude BEGEAT (rations autoconsommées). Les données fournies sont celles d'un individu sans distinction d'âge. Elles ont été utilisées en l'état pour la classe d'âge adulte. Pour les autres classes d'âge, la base de données CIBLEX qui fournit des rations alimentaires journalières pour différentes classes d'âge a été utilisée. Les valeurs INSEE ont ainsi été estimées, pour les classes d'âge [2-7ans], [7-12ans] et [12-17ans], en appliquant pour chaque type d'aliment, les mêmes rapports que ceux calculés entre chacune de ces classes pour les valeurs CIBLEX. Les rations alimentaires de la classe d'âge [1-2ans] ont été prises égales à celles de la classe [2-7ans]. Enfin, pour le nourrisson, une consommation quotidienne de 1L de lait a été prise en compte. Ce lait a été assimilé à du lait de vache.

	Rations alimentaires (kg.an ⁻¹ ou L.an ⁻¹)					
	< 1 an	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
Céréales	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lég. racines	0,0	45,4	45,4	59,8	67,0	59,8
Lég. fruits	0,0	70,2	70,2	79,0	85,6	109,7
Lég. Feuilles	0,0	28,2	28,2	30,6	39,4	58,8
Viande de bœuf	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Viande de mouton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Viande de porc	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Viande de volaille	0,0	7,5	7,5	13,6	15,4	16,6
Viande de veau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lait	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Œuf	0,0	2,8	2,8	4,0	5,3	4,6
Produits laitiers	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Vin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,1
Eau de boisson	0,0	300,2	300,2	345,0	345,0	345,0
Poisson de rivières	0,0	1,8	1,8	2,1	2,1	2,5

**ANNEXE 15. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES ETUDE SANS
PRODUITS DERIVES ET OEUFS**

Rejets gazeux

		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
Clos du Bonnot		<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion		0,00E+00	4,15E-07	1,19E-06	1,29E-06	1,52E-06	1,35E-06
inhalation		3,31E-05	5,82E-05	6,50E-05	7,67E-05	9,55E-05	9,34E-05
exposition interne		3,31E-05	5,86E-05	6,61E-05	7,80E-05	9,70E-05	9,48E-05
panache		6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11
dépôt		1,66E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
exposition externe		1,67E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
total général gaz		3,31E-05	5,87E-05	6,62E-05	7,80E-05	9,70E-05	9,48E-05
		Part					
		<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion		0,0%	0,7%	1,8%	1,7%	1,6%	1,4%
inhalation		99,9%	99,2%	98,1%	98,3%	98,4%	98,5%
exposition interne		99,9%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
panache		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
dépôt		0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
exposition externe		0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général gaz		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Rejets liquides

		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
Clos du Bonnot		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,00E+00	3,86E-07	1,08E-05	9,54E-06	1,02E-05	9,25E-06
	p.animal	0,00E+00	3,73E-05	2,50E-05	3,81E-05	4,29E-05	3,08E-05
	poisson	0,00E+00	7,89E-04	4,10E-04	2,73E-04	1,56E-04	1,49E-04
	eau	0,00E+00	1,10E-05	6,94E-06	6,26E-06	5,86E-06	4,10E-06
total général liquide		0,00E+00	8,38E-04	4,53E-04	3,27E-04	2,15E-04	1,93E-04
		Part de chaque aliment					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	-	0,0%	2,4%	2,9%	4,7%	4,8%
	p.animal	-	4,5%	5,5%	11,6%	20,0%	15,9%
	poisson	-	94,2%	90,6%	83,5%	72,6%	77,2%
	eau	-	1,3%	1,5%	1,9%	2,7%	2,1%
total général liquide		-	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

**ANNEXE 16. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES INSEE 91 AVEC
PRODUITS DERIVES, ŒUFS, SOL**

Rejets gazeux

	dose efficace annuelle en mSv.an ¹					
	COMODORE					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Clos du Bonnot						
ingestion	0,00E+00	1,30E-06	8,73E-07	1,03E-06	3,00E-06	9,21E-07
inhalation	3,31E-05	5,82E-05	6,50E-05	7,67E-05	9,55E-05	9,34E-05
exposition interne	3,31E-05	5,95E-05	6,58E-05	7,77E-05	9,85E-05	9,43E-05
panache	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11
dépôt	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
exposition externe	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
total général gaz	3,38E-05	5,96E-05	6,59E-05	7,77E-05	9,85E-05	9,44E-05

Clos du Bonnot

	part de chaque voie					
	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	0,0%	2,2%	1,3%	1,3%	3,0%	1,0%
inhalation	99,9%	97,8%	98,6%	98,6%	96,9%	99,0%
exposition interne	99,9%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
panache	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
dépôt	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
exposition externe	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général gaz	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Rejets liquides

		dose efficace annuelle en mSv.an ¹					
		COMODORE					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
Clos du Bonnot							
ingestion	végétaux	0,00E+00	3,74E-07	4,15E-06	3,70E-06	3,92E-06	3,53E-06
	p.animal	7,59E-04	1,93E-04	1,08E-04	9,15E-05	8,66E-05	5,74E-05
	p.dérivés	0,00E+00	1,85E-05	9,74E-06	5,80E-06	4,85E-06	4,00E-06
	poisson	0,00E+00	2,18E-03	1,14E-03	7,81E-04	4,44E-04	4,25E-04
	eau	0,00E+00	1,40E-05	8,85E-06	7,98E-06	7,48E-06	5,23E-06
	sol	0,00E+00	2,93E-11	1,99E-11	8,26E-12	4,09E-12	3,01E-12
total général liquide		7,59E-04	2,41E-03	1,27E-03	8,90E-04	5,47E-04	4,85E-04

Clos du Bonnot

		Part de chaque aliment					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17ans	Adulte
ingestion	végétaux	0,0%	0,0%	0,3%	0,4%	0,7%	0,7%
	p.animal	100,0%	8,0%	8,5%	10,3%	15,8%	11,5%
	p.dérivés	0,0%	0,8%	0,8%	0,7%	0,9%	0,8%
	poisson	0,0%	90,6%	89,7%	87,8%	81,2%	85,8%
	eau	0,0%	0,6%	0,7%	0,9%	1,4%	1,1%
	sol	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général liquide		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

**ANNEXE 17. RESULTATS RATIONS ALIMENTAIRES BEGEAT AVEC
PRODUITS DERIVES, ŒUFS, SOL**

<i>Rejets gazeux</i>		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
		<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Clos du Bonnot							
ingestion		0,00E+00	1,97E-06	1,31E-06	1,44E-06	1,72E-06	1,49E-06
inhalation		3,31E-05	5,82E-05	6,50E-05	7,67E-05	9,55E-05	9,34E-05
exposition interne		3,31E-05	6,02E-05	6,63E-05	7,81E-05	9,72E-05	9,49E-05
panache		6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11	6,75E-11
dépôt		1,66E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
exposition externe		1,67E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08	3,28E-08
total général gaz		3,31E-05	6,02E-05	6,63E-05	7,82E-05	9,72E-05	9,49E-05
		Part					
Clos du Bonnot		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion		0,0%	3,3%	2,0%	1,8%	1,8%	1,6%
inhalation		99,9%	96,7%	98,0%	98,1%	98,2%	98,4%
exposition interne		99,9%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
panache		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
dépôt		0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
exposition externe		0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général gaz		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

<i>Rejets liquides</i>		mSv.an ⁻¹					
		COMODORE					
		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
Clos du Bonnot							
ingestion	végétaux	0,00E+00	3,86E-07	1,08E-05	9,54E-06	1,02E-05	8,85E-06
	p.animal	0,00E+00	5,85E-05	3,83E-05	5,36E-05	6,21E-05	4,25E-05
	p.dérivés	0,00E+00	3,68E-06	1,94E-06	1,80E-06	1,85E-06	1,17E-06
	poisson	0,00E+00	7,89E-04	4,10E-04	2,73E-04	1,56E-04	1,49E-04
	eau	0,00E+00	1,10E-05	6,94E-06	6,26E-06	5,86E-06	4,10E-06
	sol	0,00E+00	2,94E-11	1,99E-11	8,26E-12	4,09E-12	3,01E-12
total général liquide		0,00E+00	8,63E-04	4,67E-04	3,44E-04	2,35E-04	2,06E-04
		Part de chaque aliment					
Clos du Bonnot		<1an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
ingestion	végétaux	-	0,0%	2,3%	2,8%	4,3%	4,3%
	p.animal	-	6,8%	8,2%	15,6%	26,4%	20,7%
	p.dérivés	-	0,4%	0,4%	0,5%	0,8%	0,6%
	poisson	-	91,5%	87,8%	79,4%	66,2%	72,5%
	eau	-	1,3%	1,5%	1,8%	2,5%	2,0%
	sol	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
total général liquide		-	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

**ANNEXE 18. INFLUENCE DU REGROUPEMENT DES EMISSAIRES SUR LA
MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLUANTS CHIMIQUES DE
COTRAM4**

CTA

Emplacement	CTA en mg.m ⁻³								
	COTRAM4 scénario 1			COTRAM4 scénario 2			COTRAM4 scénario 3		
	NOX	HF	U _{gazeux}	NOX	HF	U _{gazeux}	NOX	HF	U _{gazeux}
Clos du Bonnot	1,5.E2	2,1E0	5,8E-4	1,2E2	1,7E0	5,8E-4	1,1.E2	1,5E0	7,0E-4
Prés Guérinés	9,3E1	1,4E0	4,0E-4	7,7E1	1,2E0	3,7E-4	7,3E1	1,0E0	4,3E-4
Faveyrolles	1,2E1	1,8E-1	5,2E-5	1,1E1	3,0E-1	5,2E-5	1,2E1	3,1E-1	4,2E-5
La Croisière	2,7E1	3,9E-1	1,1E-4	2,4E1	3,5E-1	1,1E-4	2,4E1	3,4E-1	1,2E-4
Cité 3	1,7E1	2,5E-1	7,1E-5	1,5E1	2,2E-1	7,1E-5	1,6E1	2,2E-1	6,4E-5
Plein Soleil	9,1E0	1,3E-1	3,8E-5	8,0E0	1,2E-1	3,8E-5	7,9E0	1,1E-1	3,8E-5
Les Aurores	9,1E0	1,3E-1	3,7E-5	7,8E0	1,2E-1	3,7E-5			
Cité 4	2,0E1	2,9E-1	7,9E-5	1,7E1	2,5E-1	7,9E-5	1,7E1	2,4E-1	9,2E-5

Rapport de CTA

Emplacement	Rapport de CTA								
	COTRAM4 scénario 1/2			COTRAM4 scénario 2/3			COTRAM4 scénario 1/3		
	NOX	HF	U _{gazeux}	NOX	HF	U _{gazeux}	NOX	HF	U _{gazeux}
Clos du Bonnot	1,3	1,2	1,0	1,1	1,1	0,8	1,1	1,4	0,8
Prés Guérinés	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	0,9	1,1	1,4	0,9
Faveyrolles	1,1	0,6	1,0	0,9	1,0	1,2	0,9	0,6	1,2
La Croisière	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9
Cité 3	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	0,9	1,1	1,1
Plein Soleil	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,2	1,0
Les Aurores	1,2	0,9	1,0						
Cité 4	1,2	0,9	1,0	1,1	1,0	0,9	1,0	1,2	0,9

ANNEXE 19. ESSAIS D'INTERCOMPARAISON COTRAM/ADMS3

CTA

Lieu	CTA en mg.m ⁻³											
	ADMS3			COTRAM4 scénario 1			COTRAM4 scénario 2			COTRAM4 scénario 3		
	NOX	HF	Ugazeux	NOX	HF	Ugazeux	NOX	HF	Ugazeux	NOX	HF	Ugazeux
Clos du Bonnot	3,3E0	3,1E-2	3,1E-5	1,5.E2	2,1E0	5,8E-4	1,2.E2	1,7E0	5,8E-4	1,1.E2	1,5E0	7,0-4
Prés Guérinés	2,3E0	4,3E-2	2,0E-5	9,3E1	1,4E0	4,0E-4	7,7E1	1,2E0	3,7E-4	7,3E1	1,0E0	4,3E-4
Faveyrolles	1,6E0	4,0E-2	8,2E-6	1,2E1	1,8E-1	5,2E-5	1,1E1	3,0E-1	5,2E-5	1,2E1	3,1E-1	4,2E-5
La Croisière	1,5E0	2,4E-2	1,0E-5	2,7E1	3,9E-1	1,1E-4	2,4E1	3,5E-1	1,1E-4	2,4E1	3,4E-1	1,2E-4
Cité 3	1,8E0	4,9E-2	1,6E-5	1,7E1	2,5E-1	7,1E-5	1,5E1	2,2E-1	7,1E-5	1,6E1	2,2E-1	6,4E-5
Plein Soleil	5,3E-1	1,7E-2	6,8E-6	9,1E0	1,3E-1	3,8E-5	8,0E0	1,2E-1	3,8E-5	7,9E0	1,1E-1	3,8E-5
Les Aurores	3,7E-1	1,2E-2	4,6E-6	9,1E0	1,3E-1	3,7E-5	7,8E0	1,2E-1	3,7E-5			
Cité 4	5,9E-1	1,7E-2	5,0E-6	2,0E1	2,9E-1	7,9E-5	1,7E1	2,5E-1	7,9E-5	1,7E1	2,4E-1	9,2E-5

Rapport de CTA

Lieu	COTRAM4/ADMS3 scénario 1			COTRAM4/ADMS3 scénario 2			COTRAM4/ADMS3 scénario 3		
	NOX	HF	Ugazeux	NOX	HF	Ugazeux	NOX	HF	Ugazeux
Clos du Bonnot	43,7	64,5	18,9	37,1	54,8	18,7	33,7	47,9	22,6
Prés Guérinés	40,5	31,9	19,9	33,5	27,9	18,5	31,7	23,1	21,7
Faveyrolles	7,8	4,5	6,4	6,9	7,5	6,3	7,7	7,7	5,16
La Croisière	17,8	16,2	11,3	16,0	14,6	11,0	16,1	14,1	12,1
Cité 3	9,4	5,0	4,5	8,3	4,5	4,4	8,7	4,5	4,0
Plein Soleil	17,2	7,7	5,6	15,1	5,9	5,6	14,9	6,6	5,5
Les Aurores	24,6	10,5	8,1	21,1	10,0	8,0			
Cité 4	33,6	17,3	15,9	28,8	14,7	15,8	28,5	13,9	18,5

**ANNEXE 20. EQUATIONS ET COEFFICIENTS RETENUS POUR
L'EVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS CHIMIQUES**

<p>Concentration</p> <p>Eau</p>	$C_{\text{eau brute}} = \frac{Q_{\text{moyen}}}{D_{\text{moyen}}}$ <p> <i>C_{eau brute}</i> : concentration annuelle de l'eau brute en µg.m³ <i>Q_{moyen}</i> : débit d'activité rejetée en rivière moyenné sur une année en µg.s⁻¹ <i>D_{moyen}</i> : débit moyenné de la rivière sur une année en m³.s⁻¹ </p> $C_{\text{eau filtrée}} = \frac{C_{\text{eau brute}}}{(1 + K_d \times C_{\text{MES}})}$ <p> <i>C_{eau filtrée}</i> : concentration annuelle moyenne de l'eau filtrée en µg.m³ <i>C_{eau brute}</i> : concentration annuelle dans l'eau brute en µg.m³ <i>K_d</i> : coefficient de partage des radioéléments entre l'eau et les MES en m³.kg⁻¹ <i>C_{MES}</i> : concentration en MES de la rivière en kg.m³ </p>
<p>Concentration</p> <p>Sol</p>	<p>Dépôt</p> $C_{\text{sol dépôt}} = (D_s + D_h) \times \frac{1 - \exp[-I_m \times t_f]}{I_m \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>C_{sol dépôt}</i> : concentration du sol due aux dépôts en µg.kg⁻¹ <i>D_s</i> : débit de dépôt sec en µg.s⁻¹.m² <i>D_h</i> : débit de dépôt humide en µg.s⁻¹.m² <i>λ_m</i> : constante de migration de l'élément dans le sol en s⁻¹ <i>t_f</i> : temps de fonctionnement de l'installation en s <i>ρ₀</i> : masse volumique du sol sec en kg.m³ <i>P_r</i> : profondeur de l'horizon racinaire en m </p> <p>Irrigation</p> $C_{\text{sol irrig}} = C_{\text{eau brute}} \times V_{\text{irrig}} \times \frac{1 - \exp[-I_m \times t_f]}{I_m \times r_0 \times P_r}$ <p> <i>C_{sol irrig}</i> : concentration du sol irrigué µg.kg⁻¹ <i>C_{eau brute}</i> : concentration annuelle de l'eau brute en µg.m³ <i>V_{irrig}</i> : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² <i>λ_m</i> : constante de migration dans le sol de l'élément en s⁻¹ <i>t_f</i> : temps de fonctionnement de l'installation en s <i>ρ₀</i> : masse volumique du sol sec en kg.m³ <i>P_r</i> : profondeur de l'horizon racinaire en m </p>
<p>Concentration</p> <p>Végétaux racinaire</p>	<p>Dépôt</p> $C_{\text{vég. racinaire irrig}} = C_{\text{sol irrig}} \times F_{\text{rac}}$ <p> <i>C_{vég. racinaire irrig}</i> : concentration des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en µg.kg⁻¹ <i>C_{sol irrig}</i> : concentration du sol irrigué µg.kg⁻¹ <i>F_{rac}</i> : facteur de transfert racinaire en kg_{sol}.kg_{fraîs}⁻¹. </p> <p>Irrigation</p> $C_{\text{vég. racinaire dépôt}} = C_{\text{sol dépôt}} \times F_{\text{rac}}$ <p> <i>C_{vég. racinaire dépôt}</i> : concentration des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en µg.kg⁻¹ <i>C_{sol dépôt}</i> : concentration du sol due aux dépôts µg.m² <i>F_{rac}</i> : facteur de transfert racinaire en kg_{sol}.kg_{fraîs}⁻¹. </p>
<p>Concentration</p> <p>Végétaux foliaire</p>	<p>Dépôt</p> $C_{\text{vég. foliaire dépôt}} = (D_s \times R_{cs} + D_h \times R_{ch}) \times F \times \frac{1 - \exp[-I_{bm} \times t_{\text{vég}}]}{I_{bm} \times r}$ <p> <i>C_{vég. foliaire dépôt}</i> : concentration des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en µg.kg⁻¹ <i>D_s</i> : débit de dépôt sec en µg.s⁻¹.m² <i>D_h</i> : débit de dépôt humide en µg.s⁻¹.m² <i>R_{cs}</i> : rapport de captation sec du végétal (sans unité) <i>R_{ch}</i> : rapport de captation humide du végétal (sans unité) <i>F</i> : facteur de translocation (sans unité) <i>λ_{bm}</i> : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹ <i>t_{vég}</i> : temps de croissance du végétal en s <i>r</i> : rendement de culture en kg_{fraîs}.m² </p> <p>Irrigation</p> $C_{\text{vég. foliaire irrig}} = C_{\text{eau irrig}} \times V_{\text{irrig}} \times R_h \times F \times \frac{1 - \exp[-I_{bm} \times t_{\text{vég}}]}{I_{bm} \times r}$ <p> <i>C_{vég. foliaire irrig}</i> : concentration des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en µg.kg⁻¹ <i>C_{eau irrig}</i> : activité volumique dans l'eau brute pendant la période d'irrigation en µg.m³ <i>V_{irrig}</i> : débit d'irrigation moyen annuel par unité de surface en m³.s⁻¹.m² <i>R_h</i> : rapport de captation humide du végétal (sans unité) <i>F</i> : facteur de translocation (sans unité) <i>λ_{bm}</i> : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹ <i>t_{vég}</i> : temps de croissance du végétal en s <i>r</i> : rendement de culture en kg_{fraîs}.m² </p>

Concentration Produits d'origine animale	$A_{p.animal} = [(\sum_{veg} (A_{veg.foliaire} + A_{veg.racinaire}) \times Q_{veg} \times [1 - E_x] \times \frac{D_{conso}}{12}) + A_{sol} \times Q_{sol} + A_{eau} \times \frac{Q_{eau}}{1000}] \times F_{animal}$ <p> $C_{veg.foliaire}$: concentration des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ $C_{veg.racinaire}$: concentration des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ $Q_{veg-animal}$: consommation de végétal par l'animal kg.frais.j^{-1} C_{sol} : concentration du sol (dépôt + irrigation) en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ Q_{sol} : consommation de sol par l'animal kg.frais.j^{-1} $C_{eau brute}$: concentration de l'eau brute en $\mu\text{g.m}^{-3}$ Q_{eau} : consommation d'eau par l'animal kg.frais.j^{-1} E_x : fraction exogène du végétal (sans unité) F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en $\mu\text{g.kg.frais}^{-1}$ par $\mu\text{g.ingéré.j}^{-1}$ </p>
Concentration Produits dérivés	<p>Produits laitiers</p> $A_{p.laitiers} = A_{lait} \times F_{lait-p.laitiers}$ <p> $C_{p.laitiers}$: concentration des produits laitiers en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ C_{lait} : concentration du lait en $\mu\text{g.L}^{-1}$ $F_{lait-p.laitiers}$: facteur de transfert du lait aux produits laitiers en L.kg^{-1} </p> <p>Pour le vin</p> $A_{vin} = A_{fruits} \times F_{fruits-vin}$ <p> C_{vin} : concentration du vin en $\mu\text{g.L}^{-1}$ C_{fruits} : concentration des fruits en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ $F_{fruits-vin}$: facteur de transfert des fruits au vin en kg.L^{-1} </p>
Dose Journalière d'Exposition	<p>Voie inhalation :</p> $CI = (\sum_{i,j} C_i \times t_i) \times F$ <p> CI : concentration moyenne inhalée en $\mu\text{g.m}^{-3}$ C : concentration de polluant dans l'air inhalé pendant la fraction de temps t_i en $\mu\text{g.m}^{-3}$ t_i : fraction de temps d'exposition à la concentration C_i pendant une journée (sans unité) F : fréquence d'exposition (sans unité) </p> <p>Voie ingestion</p> $DJE = (\sum_i C_i \times Q'_i \times (1 - E_x) \times F \times [\frac{D_{conso}}{12} + (1 - \frac{D_{conso}}{12})]) + C_{poisson} \times Q'_{poisson} \times (1 - E_x) + C_{filtrée} \times \frac{Q'_{eau}}{1000} + C_{sol} \times Q_{sol} \times \frac{F}{P}$ <p> $DJE_{i,j}$: dose journalière d'exposition liée à une exposition au milieu i par la voie d'exposition j en $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ $C_{i, nom}$: concentration des produits (végétaux, produits d'origine animal, produits dérivés, poissons ou sol) en $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ou $\mu\text{g.L}^{-1}$ $Q'_{i, nom}$: quantité de produits ingérés (végétaux, produits d'origine animal, produits dérivés, poissons ou sol) en kg.an^{-1} ou L.an^{-1} E_x : fraction exogène du végétal (sans unité) F : taux d'autoconsommation D_{conso} : durée de consommation en mois F : fréquence d'exposition (sans unité) P : poids corporel de la cible en kg </p>
Risque	$IR = \frac{CI}{CJT}$ <p> CI : Concentration Inhalée en $\mu\text{g}^{-1}.\text{m}^{-3}$ DJT : Dose Journalière Tolérable (ou VTR) en $\mu\text{g.m}^{-3}$ </p> $IR = \frac{DJE}{DJT}$ <p> DJE : Dose Journalière d'Exposition en $\mu\text{g.j}^{-1}.\text{kg}_{poids\ corporel}^{-1}$ DJT : Dose Journalière Tolérable (ou VTR) en $\mu\text{g.j}^{-1}.\text{kg}_{poids\ corporel}^{-1}$ </p>

ANNEXE 21. COEFFICIENTS RETENUS POUR L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS CHIMIQUES

Eléments

Eléments	Constante de migration $I_m (s^{-1})$	Constante biomécanique $I_{bm} (s^{-1})$
Uranium	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$5,73 \cdot 10^{-7}$
Fluor	$5,73 \cdot 10^{-7}$	$5,73 \cdot 10^{-7}$
Mercure	$5,73 \cdot 10^{-7}$	$5,73 \cdot 10^{-7}$

Références :

U : IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997

F, Hg : - pour I_{bm} : US-EPA, Office of solid Waste, Human Health Risk Assessment Protocol for hazardous waste combustion facilities, Peer review draft, EPA/530/0-98/001A, 1998

- Pour I_m : la valeur a été prise par défaut comme étant égale à la constante de migration de l'uranium

Végétaux

Facteur de translocation F							
Eléments	Foin	Herbe	Maïs	Céréales	Lég. racines	Lég. fruits	Lég. feuilles
Uranium	1	1	1	1	1	1	1
Fluor	1	1	1	1	1	1	1
Mercure	1	1	1	1	1	1	1

Références :

U, F, Hg : Valeur par défaut la plus pénalisante

Facteur de transfert racinaire sol/plante ($kg_{sol} \cdot kg_{végétal\ frais}^{-1}$)							
Eléments	Foin	Herbe	Maïs	Céréales	Lég. racines	Lég. fruits	Lég. feuilles
Uranium	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$9,00 \cdot 10^{-4}$	$6,60 \cdot 10^{-4}$
Fluor	$2,00 \cdot 10^{-2}$						
Mercure	1,20	1,20	$3,00 \cdot 10^{-1}$				

Références :

U : IPSN, FOCON 96 version 1.0, Note technique SEGR/SAER/97 22 indice 2

F, Hg : IPSN, BEAUGELIN-SELLIER K., Adaptation du modèle de transfert GT3-GRNC dans un écosystème agricole aux polluants inorganiques non radioactifs, Paramètres de transfert, Rapport DPRE SERLAB/01-39, 2001

	Rapport captation sèche R_{cs}	Rapport captation humide R_{ch}	Temps de croissance $t_{veg} (s)$	Profondeur de l'horizon racinaire $P_r (m)$	Rendement cultural $r (kg \cdot m^{-2})$	Fraction exogène	Durée de consommation végétal $D_{conso} (mois)$	Durée de stockage $t_{stock} (s)$
Foin	9,00E-01	1,00E-01	3,63E+06	1,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	1,30E+07
Herbe	7,00E-01	1,00E-01	3,63E+06	1,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Maïs	9,00E-01	1,00E-01	5,62E+06	3,00E-01	5,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	1,60E+07
Céréales	9,00E-01	1,00E-01	5,62E+06	3,00E-01	5,00E-01	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. Racines	7,00E-01	1,00E-01	1,30E+07	3,00E-01	3,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. fruits	5,00E-01	1,00E-01	1,56E+07	3,00E-01	2,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00
Lég. Feuille	5,00E-01	1,00E-01	3,46E+06	3,00E-01	1,50E+00	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00

Références :

Les mêmes que pour le volet radiologique : Cf. en Annexe 4 en p. V.

Produits d'origine animale

	Facteur de transfert au produit d'origine animale F_{animal}								
	Vache	Bœuf	Veau	Mouton	Porc	Volaille	Poisson	Lait de vache	Œufs
Uranium	$2,00.10^{-4}$	$2,00.10^{-4}$	$2,00.10^{-3}$	$2,00.10^{-3}$	$4,00.10^{-2}$	1,00	$1,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-4}$	$6,00.10^{-4}$
Fluor	$2,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-2}$	$2,00.10^{-2}$	$1,00.10^{-2}$	$7,00.10^{-3}$	$2,00.10^{-2}$
Mercure	$1,60.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$2,17.10^{-4}$	$1,00.10^{-3}$	$9,90.10^{-4}$

Références :

U : IRSN, ROMMENS C., Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note technique SEGR/SAER/97-25 Indice2, 1997

F : IPSN, BEAUGELIN-SELLIER K., Adaptation du modèle de transfert GT3-GRNC dans un écosystème agricole aux polluants inorganiques non radioactifs, Paramètres de transfert, Rapport DPRE SERLAB/01-39, 2001

Produits de rivière

	Facteur de transfert aux parties comestibles des poissons	
	Poissons	
Uranium	$2,00.10^{-4}$	
Fluor	$2,00.10^{-2}$	
Mercure	$1,60.10^{-3}$	

Références :

U : Handbook of parameters values for the prediction of radionuclide transfers in temperate environments, Technical Reports Series n°364 IAEA Vienna, 1994

F : RIVM, SLOOFF W. et al. , Basisdocument Fluoride, réf. 758474010, 1988

Hg : RIVM, SLOOFF W. et al. , Integrated Criteria Document Mercury, 601014008, 1995

Homme

Budget temps	<1 an	1-2ans	2-7ans	7-12ans	12-17 ans	Adulte
intérieur	80,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
extérieur	20,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%

	< 1an	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
débit respiratoire ($m^3.an^{-1}$)	1080	1900	3200	5600	6500	8100

Références :

CIPR66

	< 1an	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	Adulte
Poids corporel (kg)	5,0	10,0	17,2	30,6	50,0	62,6

Références :

ADEME, Base de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué, ADEME/IRSN, Version 0, 2002

	Effets à seuil		Effets sans seuil	
	Inhalation VTR en $mg.m^{-3}$	Ingestion VTR en $mg.kg^{-1}.j^{-1}$	Inhalation VTR en $(mg.m^{-3})^{-1}$	Ingestion VTR en $(mg.kg^{-1}.j^{-1})^{-1}$
Uranium	0,3 (ATSDR)	0,6 (OMS)	Pas d'effet sans seuil	Pas d'effet sans seuil
HF/F	1 (OMS)	60 (US-EPA)	Pas d'effet sans seuil	Pas d'effet sans seuil
Mercure	Expo non concernée	0,1 (US-EPA)	Expo non concernée	Pas d'effet sans seuil
NO _x	40 (OMS)	-	Pas d'effet sans seuil	-