

ARTICLE

## Accident de criticité – CODAC<sup>★</sup>, CIRCEE<sup>★★</sup> et l'évaluation des doses

A. Thomassin<sup>1\*\*\*</sup>, E. Arial<sup>1</sup>, M. Laget<sup>2</sup> et V. Masse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IRSN, Service d'Études et d'expertise en Radioprotection, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France.

<sup>2</sup> CEA, Service d'Études et de Recherches en Mathématiques Appliquées, Boîte Courrier n° 57, Bât. 470, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

Reçu le 4 février 2015 – Accepté le 2 juillet 2015

**Résumé** – L'IRSN et le CEA ont développé respectivement les applications CODAC et CIRCEE pour l'évaluation des doses reçues par des travailleurs ou des personnes du public en cas d'accident de criticité. L'application CODAC est brièvement décrite et ses résultats sont comparés à ceux obtenus avec l'application CIRCEE pour des configurations des deux installations nucléaires ATALANTE et MELOX du site de Marcoule (Gard). Les deux applications donnent des résultats du même ordre de grandeur – ratio CIRCEE/CODAC inférieur à 2 – pour des protections de 40 ou 50 cm d'épaisseur de béton ordinaire, de 100 cm de magnétite, ou encore des protections mixtes de 20 cm de plomb avec 30 cm de béton ordinaire ou de 100 cm de béton à la colémanite avec 30 ou 50 cm de béton ordinaire. En revanche, le ratio CIRCEE/CODAC peut être supérieur à 2 pour une protection de 100 cm d'épaisseur de béton à la colémanite, voire supérieur à 10 dans le cas de protections mixtes de 100 cm d'épaisseur de magnétite avec 30 ou 50 cm de béton ordinaire. L'exercice de comparaison entre ces deux applications devra donc être poursuivi en approfondissant la méthodologie utilisée (composition des matériaux, découpage énergétique, etc.) et en élargissant la liste des configurations.

**Abstract** – **Criticality accident – CODAC and dose assessment.** The IRSN and CEA have respectively developed their applications CODAC and CIRCEE to assess doses in the case of a criticality accident. CODAC is briefly described and its results are compared with those of CIRCEE for some configurations of two nuclear facilities of the Marcoule site (France): ATALANTE and MELOX. The results of both applications are in quite good agreement – the CIRCEE to CODAC ratio is less than 2 – for shieldings of 40 or 50 cm width of ordinary concrete, 100 cm of magnetite concrete, or also mixed shieldings of 20 cm lead with 30 cm ordinary concrete, or 100 cm width of colemanite concrete with 30 or 50 cm of ordinary concrete. However, the CIRCEE to CODAC ratio can be more than 2 for a shielding of 100 cm of colemanite concrete, and even more than 10 in the case of mixed shieldings of 100 cm of magnetite concrete with 30 or 50 cm of ordinary concrete. The exercise of comparison of these applications should be further carried out by deepening the methodology (material composition, energy discretization, etc.) with a broader panel of configurations.

**Keywords:** dose assessment / criticality accident

### 1 Introduction

Le propos de cette communication est de présenter une comparaison des évaluations de dose reçues par des travailleurs ou des personnes du public en cas d'accident de criticité réalisées par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) avec celles réalisées par des exploitants d'installations nucléaires concernées par ce risque et ayant ré-

cemment fait l'objet d'une expertise par l'IRSN à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Après avoir rappelé le contexte de ces évaluations et fait une rapide présentation de l'application CODAC de l'IRSN, des évaluations de dose en cas d'accident de criticité avec CODAC sont comparées à celles réalisées avec l'application CIRCEE pour les deux installations nucléaires ATALANTE<sup>1</sup> et MELOX. Une analyse des résultats est menée permettant d'une part d'apprécier l'adéquation des deux applications, et d'autre part de préciser des investigations futures à réaliser en étudiant notamment l'influence des paramètres et des hypothèses sur les résultats.

\* Acronyme pour Conséquences Dosimétriques d'un Accident de Criticité.

\*\* Acronyme pour code de Calcul des Iso-doses en cas de Risque de Criticité en Environnement Évolutif.

\*\*\* [alain.thomassin@irsn.fr](mailto:alain.thomassin@irsn.fr)

<sup>1</sup> Acronyme pour ATelier Alpha et Laboratoires pour ANalyses, Transuraniens et Études de retraitement.

## 2 Contexte

Les accidents de criticité peuvent conduire à des expositions très élevées (en termes de dose absorbée) des opérateurs situés à proximité du lieu de l'excursion critique. Ainsi que l'a montré l'accident de Tokai-Mura au Japon en 1999 (Takada et Hoschi, 2000), des débits de dose significatifs peuvent également être observés à de grandes distances du lieu de l'accident (plusieurs  $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$  à plusieurs centaines de mètres). Ceci nécessite de s'intéresser en cas d'accident de criticité non seulement à l'exposition des travailleurs de l'installation concernée, mais aussi à celle des autres travailleurs du site ainsi qu'à celle de la population se trouvant à proximité.

Aussi, et ainsi que l'a requis l'autorité de sûreté nucléaire (DSIN, 2000), les exploitants d'installations nucléaires utilisant des matières fissiles présentent désormais dans leurs dossiers de sûreté une cartographie des doses susceptibles d'être reçues lors d'hypothétiques accidents de criticité, au sein de l'installation et dans son environnement. En tant qu'appui technique de l'ASN, l'IRSN s'est doté en 2011 de l'application CODAC, permettant d'évaluer rapidement l'ordre de grandeur des doses reçues lors d'un accident de criticité dans une large gamme de configurations. Depuis sa création, CODAC a été utilisé à plusieurs reprises par l'IRSN lors de l'instruction de dossiers de sûreté concernant différentes installations nucléaires de base.

## 3 Applications

### 3.1 CODAC

CODAC (IRSN, à paraître) est une application simple consistant en une bibliothèque de configurations d'accidents de criticité et une interface de requête.

Les configurations (source, air intercalaire, protection, distance) calculées sont sphériques et correspondent à la bibliothèque suivante :

- les sources :
  - de poudre sèche d'oxyde de plutonium ( $\text{PuO}_2$ ) de densités 3,5, 5,5 et 11. Le volume retenu pour chaque source est celui établi en considérant la masse critique en milieu non réfléchi et non modéré ; soit les rayons et volumes respectifs suivants : 27,3 cm et 85,2 L, 17,4 cm et 22,1 L, 8,7 cm et 2,8 L ;
  - solides de plutonium métallique (Pu) de densités 15,8 et 19,8. Le volume retenu pour chaque source est celui établi en considérant la masse critique en milieu non réfléchi et non modéré ; soit les rayons et volumes respectifs suivants : 6,2 cm et 1 L, 5 cm et 0,5 L ;
  - de solution aqueuse de nitrate de plutonium ( $\text{Pu}(\text{NO}_3)_3$ ) à la concentration de  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de plutonium de volumes  $274 \text{ L}^2$ ,  $1 \text{ m}^3$  et  $25 \text{ m}^3$  ; soit les rayons respectifs suivants : 40 cm, 62 cm et 181 cm ;
  - de solution aqueuse de nitrate de plutonium ( $\text{Pu}(\text{NO}_3)_3$ ) à la concentration de  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de plutonium de volumes 16 L,  $1 \text{ m}^3$  et  $25 \text{ m}^3$  ; soit les rayons respectifs suivants : 16 cm, 62 cm et 181 cm ;

<sup>2</sup> Correspondant à la masse critique minimale en milieu non réfléchi.

- l'air intercalaire : la source peut être géométriquement séparée de la face « chaude » de la protection par un espace d'air, nommé air intercalaire, d'épaisseur 10 cm, 1 m, 2 m, 5 m ou 10 m.
- les protections monocouches en :
  - béton ordinaire (densité 2,35), de 10 cm à 1 m par pas de 10 cm et de 1 m à 3 m par pas de 20 cm ;
  - béton lourd à la colémanite (densité 1,88) ou à la magnétite (densité 3,3) ou à la barytine (densité 3,3), de 10 cm à 1 m par pas de 10 cm et de 1 m à 2 m par pas de 20 cm ;
  - acier inoxydable (densité 7,8), de 1 cm à 5 cm par pas de 1 cm et de 5 cm à 35 m par pas de 5 cm ;
  - verre au plomb (densité 4,23), de 10 cm à 1 m par pas de 10 cm, 1,2 m et 1,4 m ;
  - plomb (densité 11,34), de 5 cm à 25 cm par pas de 5 cm.

Il est possible de considérer des protections bicouches constituées de l'association de certaines des protections monocouches avec du béton ordinaire ; dans ce cas, les deux couches n'ont pas d'espace intercalaire qui les sépare.

- les distances suivantes :
  - depuis le centre de la source : 5 cm, 10 cm et tous les 10 cm jusque 1 m, tous les 50 cm jusque 3 m, tous les 1 m jusque 10 m, tous les 2 m jusque 20 m, 25 m, 30 m, puis tous les 10 m jusque 100 m et enfin tous les 50 m jusque 1 km ;
  - depuis la face froide de la protection : 5 cm, 10 cm et tous les 10 cm jusque 1 m, tous les 50 cm jusque 3 m, tous les 1 m jusque 10 m.

Le terme source est normalisé à  $5 \times 10^{18}$  fissions de  $^{239}\text{Pu}$  (2,874 neutrons en moyenne par fission) ; cet isotope du plutonium conduit aux doses les plus élevées parmi les radionucléides fissiles. Les rayonnements prompts de fission sont pris en considération pour les calculs ainsi que les gammas issus de la capture des neutrons au cours de leur parcours. Les débits de fluence (par groupe d'énergie) de chaque configuration sont archivés dans la bibliothèque. Les coefficients de conversion de flux en équivalent de dose ambiant  $\text{H}^*(10)$  de la publication 74 de la Commission internationale de protection radiologique (ICRP, 1996) sont utilisés pour l'évaluation des doses ; cette fonction « réponse », adaptée aux faibles doses, pourrait toutefois conduire à sous-estimer les doses réelles au-delà de 100 mSv. Les configurations ont été calculées à l'aide du code de calcul aux ordonnées discrètes à 1 dimension SAS1 (Knight *et al.*, 2000) du formulaire SCALE. Par ailleurs, CODAC a fait l'objet d'une qualification avec le code de calcul Monte Carlo MCNP5 (LA, 2005).

En termes d'usage, l'utilisateur définit au niveau de l'interface la configuration la plus proche de celle qu'il étudie. Il peut choisir des distances de calcul différentes de celles des configurations existant au sein de la bibliothèque, CODAC interpolant sur cette variable. Enfin, la normalisation de la source ainsi que la fonction « réponse » sont modifiables.

### 3.2 CIRCEE

Les calculs présentés ci-après pour les deux installations nucléaires de base ATALANTE et MELOX ont été réalisés

avec l'application CIRCEE (Masse, 2010 ; Laget, 2014) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). CIRCEE permet le calcul de dose sur une installation complète, dans sa réalité à trois dimensions *via* l'import de modèles CAO, et utilise pour cela une bibliothèque de facteurs d'atténuation de dose pré-calculés avec le code SN1D du CEA (Dejonghe et Luneville, 1983). Les facteurs d'atténuation sont calculés pour des protections en béton ordinaire, béton boré, béton à la magnétite, acier et plomb et pour des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 2 m ; des compositions bicouches sont possibles. CIRCEE considère une source ponctuelle ou des sphères d'eau d'un volume pouvant aller jusqu'à 1000 L et à l'intérieur desquelles sont placées les sources de fission. Les rayonnements prompts de fission ainsi que les gammas secondaires issus de la capture des neutrons au cours de leur parcours sont pris en considération pour les calculs. CIRCEE calcule les doses dans l'air ou les équivalents de dose ambiants  $H^*(10)$  à l'aide des fonctions « réponse » de la publication 74 de la CIPR, en tout point du bâtiment et dans ses alentours pour toute source placée en un point de celui-ci. Ses résultats sont présentés sous forme de cartes isodoses représentant des intervalles de dose. CIRCEE a fait l'objet d'une qualification avec le code TRIPOLI-4 du CEA (TRIPOLI-4 Project Team, 2012).

## 4 Exemples de comparaisons

### 4.1 ATALANTE

L'installation nucléaire de base n° 148 ATALANTE est exploitée par le CEA sur le site de Marcoule dans le département du Gard. Cette installation de recherche en radiochimie regroupe des laboratoires travaillant sur l'amélioration des procédés de traitement du combustible usé (hydrométallurgie et pyrométallurgie, séparation des radionucléides à vie longue des produits de fission à l'aide de molécules extractantes, transmutation, etc.) avec des équipements d'analyse et de procédés mis en œuvre dans un environnement de boîtes à gants et de chaînes blindées. À ce titre, ATALANTE met en œuvre des quantités significatives de matières radioactives et/ou fissiles et est donc confrontée au risque de criticité de ces dernières.

Lors des suites du dernier réexamen de sûreté de 2007, l'exploitant d'ATALANTE a présenté (Masse, 2011) à l'ASN des cartes isodoses au sein de son installation et de ses environs, réalisées à l'aide de CIRCEE pour des sièges d'accidents de criticité supposés dans différents locaux :

- les laboratoires étudiant la chimie des actinides, ainsi que les chaînes blindées dédiées au traitement des déchets et aux dissolutions du bâtiment de chimie de haute activité ;
- le magasin des matières et la chaîne blindée d'essais en intégration du bâtiment du laboratoire d'études en géométrie sûre ;
- les laboratoires de chimie du solide du bâtiment des services généraux actifs ;
- la chaîne blindée du bâtiment de développement du retraitement et analyse.

Ces calculs ont été soumis à l'IRSN pour instruction et CODAC a été utilisé afin d'apprécier les résultats présentés.

**Tableau 1.** ATALANTE – Laboratoire de chimie des actinides –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses au nord du bâtiment.

ATALANTE – Actinide chemical analysis laboratory –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses in the northern area.

Distance <sup>(a)</sup> (m)	CIRCEE (mSv)	CODAC (mSv)
20	>300	>300
30	[100–300[	193
40	[100–300[	112
60	[50–100[	53
80	[20–50[	31
100	[20–50[	20
120	[20–50[	14
140	[20–50[	11
160	[10–20[	8
180	[10–20[	6

<sup>(a)</sup> Comptée à partir du lieu siège de l'accident de criticité.

**Tableau 2.** ATALANTE – Chaîne de traitement des déchets –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses à l'ouest du bâtiment.

ATALANTE – Shielded cell for waste treatment –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses in the western area.

Distance <sup>(a)</sup> (m)	CIRCEE (mSv)	CODAC (mSv)
30	>300	>300
40	>300	209
60	[100–300[	97
80	[100–300[	55
100	[50–100[	35
120	[20–50[	24
140	[20–50[	17
160	[20–50[	13
180	[20–50[	10

<sup>(a)</sup> Comptée à partir du lieu siège de l'accident de criticité.

L'exploitant d'ATALANTE a modélisé la géométrie réelle en trois dimensions du bâtiment avec l'épaisseur exacte des murs, tandis que l'IRSN a relevé l'épaisseur des protections au niveau des plans transmis au cours de l'instruction. L'exploitant a modélisé la source par une sphère d'eau de 6 L de volume à l'intérieur de laquelle sont placées les sources de fission, (source de la bibliothèque de CIRCEE la plus proche de la réalité), alors que l'IRSN a modélisé la source par une sphère contenant du nitrate de plutonium de concentration  $200 \text{ g.L}^{-1}$  et de 16 L de volume (source de la bibliothèque de CODAC la plus proche de la réalité).

#### 4.1.1 Le laboratoire de chimie des actinides

Le tableau 1 présente les résultats de CIRCEE et CODAC au nord du bâtiment de chimie de haute activité. La protection retenue par l'IRSN est du béton ordinaire de 50 cm d'épaisseur, avec un air intercalaire de 5 m d'épaisseur.

#### 4.1.2 La chaîne blindée de traitement des déchets

Le tableau 2 présente les résultats de CIRCEE et CODAC à l'ouest du bâtiment de chimie de haute activité. La protection

**Tableau 3.** ATALANTE – Chaîne blindée du retraitement –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses autour de la chaîne.  
 ATALANTE – Shielded cell for reprocessing development –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses around the cell.

		Béton à la colémanite		Béton à la magnétite	
		Autour de la chaîne blindée	Salle la plus proche	Autour de la chaîne blindée	Salle la plus proche
Sud	CIRCEE (mSv)	>300	<10	>300	[20–50[
	CODAC (mSv)	>300	2	>300	2
Ouest	CIRCEE (mSv)	[100–300[	<10	[100–300[	[50–100[
	CODAC (mSv)	37	2	116	2

retenue par l'IRSN est du plomb de 20 cm d'épaisseur (paroi de la chaîne blindée) suivie par du béton ordinaire de 30 cm d'épaisseur (murs des salles adjacentes et du bâtiment), avec un air intercalaire de 1 m d'épaisseur.

#### 4.1.3 La chaîne blindée de développement du retraitement

Le tableau 3 présente les résultats de CIRCEE et CODAC pour la zone située au sud et à l'ouest du bâtiment de développement du retraitement et analyse. La paroi de la chaîne blindée consiste en un feuilletage d'acier et d'hématite. L'hématite n'est pas un matériau de protection inclus dans les bibliothèques de CIRCEE ni de CODAC. Le CEA et l'IRSN ont comparé des protections en béton à la colémanite et en béton à la magnétite en tant que substitut de ce matériau. Le béton à la magnétite est une protection radiologique gamma au même titre que le béton à l'hématite, et ces matériaux possèdent tous deux une teneur élevée en fer.

La protection modélisée est une épaisseur de béton soit à la colémanite soit à la magnétite, de 100 cm d'épaisseur (paroi de la chaîne blindée) complétée par du béton ordinaire de 30 cm ou 50 cm d'épaisseur (parois des murs) selon la direction considérée. L'air intercalaire est de 1 m d'épaisseur vers le sud et de 5 m vers l'ouest. Les calculs ont été réalisés autour de la chaîne blindée (à 5 cm de ses faces « froides ») et dans la salle adjacente la plus proche dans chaque direction de celle abritant la cellule blindée.

## 4.2 MELOX

L'installation nucléaire de base n° 151 MELOX est exploitée par la société AREVA NC sur le site de Marcoule. Cette installation fabrique des assemblages de combustibles MOX destinés à alimenter des réacteurs à eau légère, en recyclant le plutonium issu du retraitement des combustibles usés à l'usine d'AREVA de La Hague. Un mélange primaire de poudres d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium est associé, lors d'un mélange secondaire, avec de l'uranium appauvri permettant d'atteindre la teneur en plutonium souhaitée. La poudre obtenue est alors compactée en pastilles, lesquelles sont converties en céramiques par cuisson dans un four (frittage). Après rectification, les pastilles sont insérées dans un tube en alliage de zirconium (crayon combustible). Les crayons sont alors assemblés dans une structure métallique pour former un assemblage combustible. Le confinement du

**Tableau 4.** MELOX – Presse de mélange final –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses au nord du bâtiment.

MELOX – Final mix squeezer –  $5 \times 10^{18}$  fissions – Doses in the northern area.

Distance <sup>(a)</sup> (m)	CIRCEE (mSv)	CODAC (mSv)
40	>300	303
50	[100–300[	202
100	[50–100[	56
130	[20–50[	34
150	[20–50[	26
200	[10–20[	14

<sup>(a)</sup> Comptée à partir du lieu siège de l'accident de criticité.

procédé est principalement assuré par des boîtes à gants. Toutefois, le caractère fissile des matières premières conduit l'exploitant à mettre en œuvre les dispositions nécessaires pour éviter toute excursion critique au cours de ce procédé.

Lors du dernier réexamen de sûreté de 2011, l'exploitant de MELOX a présenté à l'ASN (MELOX, 2007) des calculs de dose réalisés avec CIRCEE dans les environs de certains locaux, identifiés comme sièges potentiels d'un accident de criticité : l'atelier de dosage, les ateliers 1 et 2 des poudres, l'atelier de pastillage, l'atelier de la presse de mélange final, l'atelier de rectification.

Ces calculs ont été soumis à l'IRSN pour instruction et CODAC a été utilisé pour évaluer les résultats présentés.

L'exploitant de MELOX a modélisé la géométrie réelle en trois dimensions du bâtiment avec l'épaisseur exacte des murs, tandis que l'IRSN a relevé l'épaisseur des protections au niveau des plans transmis au cours de l'instruction. L'exploitant a modélisé la source par une sphère d'eau de 13,8 L de volume à l'intérieur de laquelle sont placées les sources de fission, alors que l'IRSN a modélisé la source par une sphère contenant une solution de nitrate de plutonium de concentration  $200 \text{ g.L}^{-1}$  et de 16 L de volume.

Le tableau 4 présente les résultats de CIRCEE et CODAC pour la zone située au nord du bâtiment abritant la presse de mélange final. La protection retenue par l'IRSN est celle du béton ordinaire de 40 cm d'épaisseur et d'un air intercalaire de 10 m d'épaisseur.

## 5 Résultats et discussion

Dans les documents transmis à l'ASN par les exploitants pour l'instruction par l'IRSN (MELOX, 2007 ; Masse, 2011),

les isodoses sont représentées graphiquement en zones de couleur (correspondant à des intervalles de dose) projetées sur les plans de l'installation. Cette présentation très synthétique ne permet pas une comparaison précise avec des valeurs numériques calculées avec CODAC. L'exercice de comparaison est donc nécessairement approximatif.

Alors que des différences significatives sont à noter au niveau des résultats, il apparaît toutefois que CIRCEE et CODAC donnent des valeurs d'équivalent de dose du même ordre de grandeur pour les configurations envisagées.

Dans le cas d'une protection monocouche de béton ordinaire, qu'elle soit de 40 cm d'épaisseur (presse de mélange final de MELOX) ou de 50 cm (laboratoire de chimie des actinides d'ATALANTE), les équivalents de dose sont corrélés; cependant CODAC semble donner des résultats plus faibles, notamment au-delà d'une distance de 100 m dans le cas de la protection de béton ordinaire de 50 cm d'épaisseur.

Dans le cas d'une protection monocouche de béton à la colémanite ou à la magnétite de 100 cm d'épaisseur (chaîne blindée de développement du retraitement d'ATALANTE), les résultats semblent bien corrélés dans le cas de la magnétite, alors que dans le cas de la colémanite, CODAC donne des valeurs plus faibles que celles de CIRCEE.

Dans le cas d'une protection bicouche de béton à la colémanite ou à la magnétite de 100 cm d'épaisseur associée à du béton ordinaire de 30 cm ou 50 cm d'épaisseur (chaîne blindée de développement du retraitement d'ATALANTE), les résultats semblent bien corrélés en présence de colémanite, alors que ce n'est pas le cas en présence de magnétite; CODAC donne des valeurs plus faibles que CIRCEE d'au moins un facteur 25 si le second mur a une épaisseur de 30 cm de béton et d'au moins un facteur 10 si le second mur a une épaisseur de 50 cm de béton. Il est intéressant de relever que l'écart des valeurs de dose entre CODAC et CIRCEE semble se réduire si l'épaisseur du second mur augmente.

Dans le cas d'une protection bicouche de plomb de 20 cm d'épaisseur associée à du béton ordinaire de 30 cm d'épaisseur (chaîne blindée de traitement des déchets d'ATALANTE), les résultats semblent corrélés (de moins d'un facteur 2), même si les valeurs données par CODAC sont plus faibles que celles de CIRCEE, et ce d'autant plus que la distance de calcul augmente.

Il ressort de ces comparaisons, que CODAC donne des résultats comparables à ceux de CIRCEE, ce qui est cohérent avec le fait que ces deux applications ont été développées de manière analogue, c'est-à-dire à l'aide d'une bibliothèque de pré-calculs réalisés avec un code aux ordonnées discrètes (SN1D pour CIRCEE et SAS1 pour CODAC). Des différences sont toutefois observées, parfois très significatives. Ainsi, de nombreuses pistes devront être examinées pour expliquer toutes les différences déjà rencontrées en fonction des configurations étudiées et celles qui pourraient vraisemblablement apparaître pour des configurations à venir. Citons, par exemple, quelques points influents sur lesquels porter attention :

- la composition et la densité des matériaux considérés dans chaque application. Des différences peuvent en effet conduire à des variations très significatives dans les résultats pour des protections d'épaisseur conséquente, compte

tenu du caractère exponentiel de l'atténuation des rayonnements neutres dans la matière ;

- le traitement des sections efficaces, en particulier celle du fer dont une représentation insuffisamment fine peut conduire à mésestimer le ralentissement des neutrons et consécutivement la production des gammas de capture pouvant conduire à sous-estimer l'équivalent de dose réel ;
- l'atténuation dans l'air et les effets de rétrodiffusion au niveau des points de calcul éloignés (plusieurs centaines de mètres) ;
- la prise en compte de la géométrie (réelle pour CIRCEE, sphérique pour CODAC).

## 6 Conclusion

Les configurations de comparaison présentées ici montrent que l'application CODAC de l'IRSN utilisée pour l'estimation des doses susceptibles d'être reçues par des personnes se trouvant dans l'environnement d'un accident de criticité donne des résultats du même ordre de grandeur que ceux de l'application CIRCEE du CEA. Cette relative adéquation est satisfaisante. Toutefois, compte tenu du grand nombre de configurations pouvant être traitées avec ces deux applications, des intercomparaisons devront être poursuivies avant de conclure définitivement.

Outre la nécessité d'examiner d'autres configurations, la maîtrise des différences de résultats entre CODAC et CIRCEE nécessitera une comparaison approfondie des hypothèses de calcul (composition des matériaux, bibliothèques de données nucléaires, *etc.*) et des traitements numériques par les codes SN1D et SAS1 (sections efficaces, quadratures, *etc.*).

## Références

- Dejonghe G., Luneville L. (1983) SN1D : Code de protection nucléaire à une dimension, Rapport interne CEA, 1983.
- DSIN (2000) Lettre DSIN-FAR/SD1/N° 11204/00 du 3 décembre 2000.
- ICRP Publication 74 (1996) Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP, *Ann. ICRP* 26 (3-4).
- Knight J.R. *et al.* (2000) SAS1: A one-dimensional shielding analysis module, Rapport NUREG/CR-0200, Rév. 6, Vol. 1, Section S1 ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6. Oak Ridge National Laboratory.
- LA (2005) MCNP – A general Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5, Vol. II: User's Guide, LA-CP-03-0245, avril 2003 (révision octobre 2005).
- Laget M. (2014) CIRCEE : principe, validation et applications, Journées codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie de la SFRP, Paris, 2014.
- Laget M. (à paraître) Calcul des conséquences dosimétriques d'un accident de criticité : Manuel de l'outil, IRSN, Rapport PRP-HOM/SER.
- Masse V. (2010) CIRCEE un programme de Calculs d'Isodoses appliqué au Risque de Criticité en Environnement Evolutif, Journées codes de calcul en radioprotection, radiophysique et dosimétrie de la SFRP, Sochaux, 2010.

- Masse V. (2011) Évaluation des iso-doses en cas d'accident de criticité INB 148 ATALANTE Marcoule, Rapport DM2S/SERMA/CP2C/RT/08-4513/B.
- MELOX (2007) Rapport de sûreté de MELOX 620 RS 054 B, Vol. B, Chap. 7, Sûreté de l'environnement.
- Takada J., Hoschi M. (2000) External doses to 350 m zone residents around the Tokai-Mura criticality accident site, *J. Environ. Radioact.* **50**, 43-48.
- TRIPOLI-4<sup>®</sup> Project Team (2012) TRIPOLI-4<sup>®</sup> User Guide, CEA-R-6316, CEA Saclay, 2012.

**Cite this article as:** A. Thomassin, E. Arial, M. Laget, V. Masse. Accident de criticité – CODAC, CIRCEE et l'évaluation des doses. Radioprotection 50(4), 295-300 (2015).