

SIMULER LES TRANSFERTS DE RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT : QUELS CODES DE CALCUL ET POURQUOI FAIRE ?

Marie SIMON-CORNU, Christophe MOURLON

IRSN
Cadarache

Cette présentation invitée a pour objectif de dresser un état de l'art des outils et des techniques de calcul mises en œuvre dans les codes de radioprotection simulant le transport et les transferts de radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement (atmosphère, géosphère, milieu agricole, milieu forestier, milieu urbain, rivières, nappes, mer...) et à leurs interfaces, i.e. en radioécologie. Ces codes de calcul ont de manière générale pour application d'évaluer un impact dosimétrique (aux populations humaines et/ou aux écosystèmes). Les scénarios sont divers et découlent de rejets par voie liquide ou atmosphérique, issus d'installations nucléaires (centrales de production d'électricité, installations du cycle du combustible, sites de stockage de déchets...), en fonctionnement normal ou en situations incidentelles, accidentelles et post-accidentelles.

Les voies d'exposition modélisées couvrent l'immersion dans le panache atmosphérique (voie externe et voie interne par inhalation voire passage cutané dans le cas du tritium atmosphérique) ; l'exposition aux sols et sédiments (par voie externe et par l'inhalation des particules remises en suspension) ; l'ingestion volontaire (eau potable ; denrées issues de l'agriculture, de la chasse, de la pêche et de la cueillette) ; et l'ingestion accidentelle (sol ou eau de baignade...). Cela conduit à déterminer pour les populations humaines des doses efficaces (Sv) ou des débits de dose (Sv/jour), et des doses absorbées (Gy) ou débits de dose absorbée (Gy/jour) pour les organismes non humains.

Selon le scénario et les besoins de l'évaluateur, une grande diversité de codes existent pour traiter tout ou partie de chacune des situations, avec une plus ou moins grande complexité. Le panorama proposé dans cette communication balaye les principales caractéristiques de ces codes (équations et domaine d'application, données, paramètres, fonctionnalités en termes d'incertitude, variabilité, sensibilité...) sans vocation à être exhaustif et en se concentrant sur les codes qui incluent un scénario d'exposition et aboutissent donc à un calcul de dose. Ainsi, on développera peu dans ce panorama les codes de transport de radionucléides au sein d'un compartiment (e.g. dans la géosphère, ou dans l'atmosphère, ou dans les nappes phréatiques) qui peuvent être utilisés en amont dans une chaîne de calcul dosimétrique.

Aujourd'hui, trois grandes familles de codes co-existent et sont toujours employées, voire développées.

La première famille réunit les codes fondés sur une modélisation dite « à l'équilibre », dans laquelle le transfert des radionucléides est exprimé par des équations statiques. Ce sont les approches privilégiées pour les situations « chroniques » (i.e. 'plateau' de contamination) associées en général au fonctionnement normal des installations. L'AIEA porte de tels développements, notamment sur la base d'un document technique en cours de révision (SRS 19). La modélisation qui y est proposée a été implémentée dans un outil libre, le code CROM (prochaine version prochainement téléchargeable gratuitement), dédié à l'impact aux populations humaines. Le code ERICA-tool (téléchargeable gratuitement sur : www.ericatool.com) est similaire mais dédié à l'impact dosimétrique aux écosystèmes.

La deuxième famille est constituée des codes dédiés aux situations accidentelles simples (i.e. 'pic' de contamination), pour lesquelles des équations analytiques ont été obtenues par l'intégration analytique d'équations différentielles. C'est ce qui est implémenté dans des codes tels que RODOS développé au travers de projets européens (www.rodos.fzk.de), ou ASTRAL développé par l'IRSN (usage actuellement limité aux co-financeurs IRSN-EDF).

Enfin, on regroupe dans une troisième famille les logiciels qui permettent de traiter de façon flexible une plus large variété de situations (par exemple avec une succession de 'pics' et de 'plateaux' de contamination). Ceci est rendu possible par un solveur pour la résolution numérique d'équations différentielles. Au-delà de simples codes, cette famille inclut des suites logicielles (ensemble de codes interconnectés), et des boîtes à outils qui permettent à un utilisateur (avancé) de développer des modèles appropriés à chaque besoin. L'exemple de la plate-forme SYMBIOSE, développée par l'IRSN (usage actuellement limité aux co-financeurs IRSN-EDF), sera approfondi. Seront cités également la plate-forme FRAMES (GENII) dont le développement a été financé par un consortium d'agences des Etats Unis, et deux logiciels commerciaux souvent utilisés pour développer des modèles en radioécologie et calculs de doses associées GOLDSIM et ECOLEGO.

Quelle que soit la famille logicielle parmi les 3 citées ci-avant, les doses calculées dépendent des données de scénario (e.g. qualification/quantification du flux de radionucléides entrant dans le système modélisé, qualification/quantification des conditions météorologiques, budgets temps, régimes alimentaires...) et des paramètres (coefficients décrivant la décroissance/filiation radioactive, paramètres radioécologiques quantifiant les processus de transport/transfert dans et entre les compartiments modélisés, coefficients de dose...). Ces paramètres, et en particulier les paramètres radioécologiques, sont entachés d'une forte incertitude. Des données ont été acquises au travers de travaux expérimentaux et de mesures *in situ* dont l'essor s'est situé dans la dizaine d'années ayant suivi l'accident de Tchernobyl. Néanmoins, leur exploitation repose parfois sur des hypothèses discutables d'équilibre et surtout leur nombre reste faible. Pour la plupart des éléments chimiques, hors quelques 'stars' (e.g. césium, strontium, iode), le nombre de données disponibles pour un paramètre donné est très faible (ce qui nuit à l'estimation), voire nul (ce qui impose des extrapolations discutables). On assiste actuellement, en particulier depuis l'accident de Fukushima, à un nouvel élan dans le domaine de la recherche en radioécologie, tel que tracé dans l'agenda stratégique européen, avec une ambition forte de mieux caractériser les variabilités et réduire les incertitudes paramétriques.

En termes de fonctionnalités, la majorité de ces codes permettent aujourd'hui de prendre en compte l'incertitude paramétrique au travers de calculs probabilistes de type Monte Carlo (itérations répétées après tirage au sort des entrées – données ou paramètres – dans des lois de distributions) et/ou de réaliser des analyses de sensibilité (par exemple calcul des coefficients de corrélation entre une sortie incertaine et chacune des entrées incertaines après un calcul Monte Carlo). C'est le cas d'ERICA-tool, de SYMBIOSE (dès à présent pour l'incertitude, dans la prochaine version pour la sensibilité), de la prochaine version de CROM, de FRAMES (GENII), de GOLDSIM, d'ECOLEGO...

Les échelles spatiales et temporelles à prendre en compte dans les calculs dépendent fortement des situations modélisées et sont traitées différemment d'un code à l'autre. La spatialisation des calculs est particulièrement approfondie dans certains codes qui embarquent des fonctionnalités de SIG (système d'information géographique).

La présentation sera illustrée par quelques applications, en particulier se rapportant à la situation post-accidentelle à proximité de Fukushima.