



Assemblée générale

Distr. limitée
8 décembre 2010
Français
Original: anglais

Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique

Sous-Comité scientifique et technique

Quarante-huitième session

Vienne, 7-18 février 2011

Point 10 de l'ordre du jour provisoire*

Utilisation des sources d'énergie nucléaire dans l'espace

Atelier sur l'utilisation de sources d'énergie nucléaire dans l'espace: l'approche des États-Unis en matière d'évaluation des risques et son rôle dans la mise en œuvre d'un programme efficace de sûreté pour les applications de sources d'énergie nucléaire dans l'espace

Document présenté par les États-Unis d'Amérique**

Résumé

Les États-Unis d'Amérique soumettent les applications prévues de sources d'énergie nucléaire dans l'espace à un processus d'analyse de la sûreté et d'évaluation des risques conforme aux recommandations pertinentes du Cadre de sûreté pour les applications de sources d'énergie nucléaire dans l'espace, publié conjointement par le Sous-Comité scientifique et technique et l'Agence internationale de l'énergie atomique en 2009. L'analyse de la sûreté des sources d'énergie nucléaire effectuée par les États-Unis porte en premier lieu sur le lanceur, l'engin spatial, la conception de la mission et les règles de lancement. Ces informations permettent de caractériser un ensemble de scénarios d'accidents postulés afin de créer l'environnement d'un accident survenant lors du lancement et de déterminer les probabilités qu'un tel accident se produise. Les essais de sûreté des composants de sources d'énergie nucléaire et la modélisation de la mécanique des milieux continus servent à comprendre comment la source d'énergie nucléaire et le combustible nucléaire réagiront selon divers scénarios d'accident. Afin de

* A/AC.105/C.1/L.306.

** Le présent document se fonde sur le document de séance A/AC.105/C.1/2011/CRP.5.



caractériser le risque de la mission, les environnements et la probabilité des accidents, les résultats des essais de sûreté et la simulation informatique sont regroupés dans une analyse de la sûreté. Celle-ci est ensuite examinée par un groupe d'experts nationaux indépendants de la mission. Les observations et résultats de cet examen sont intégrés dans une deuxième mouture de l'analyse de la sûreté, soumise à son tour à un examen indépendant. L'analyse de la sûreté nucléaire et le processus d'examen permettent d'améliorer en permanence l'évaluation des risques de la mission et d'identifier d'éventuelles améliorations de la sûreté au niveau de la conception de la mission et des futures sources d'énergie nucléaire.

I. Introduction

1. Le Département de l'énergie des États-Unis fournit des systèmes d'énergie nucléaire spatiaux à l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) aux fins des missions spatiales civiles ayant des besoins particuliers en matière d'alimentation électrique et de chauffage des engins spatiaux. Ces sources d'énergie peuvent être classées en deux catégories générales: générateurs à radio-isotopes pour l'alimentation électrique (RPS) ou unités de chauffage à radio-isotopes (RHU) pour le chauffage de composants. Les générateurs à radio-isotopes sont compacts et légers, durent longtemps et sont très fiables. Ils permettent d'effectuer des missions spatiales quand l'énergie solaire ne peut être utilisée. Au moment de l'établissement du présent document, le programme spatial des États-Unis compte deux types de générateurs à radio-isotopes: le générateur thermoélectrique à radio-isotopes (RTG) et le générateur Stirling à radio-isotopes avancé (ASRG). Les générateurs utilisés pour toutes les précédentes missions des États-Unis étaient des générateurs thermoélectriques à radio-isotopes. Le générateur Stirling à radio-isotope avancé est toujours en cours de mise au point.

2. Les planètes et lunes et leurs surfaces sont souvent distantes du Soleil et dans l'ombre ou constituent des environnements difficiles. L'utilisation de générateurs à radio-isotopes est actuellement le seul moyen disponible pour y réaliser des explorations. Cependant, les radio-isotopes représentent un danger. Depuis l'époque où un SNAP-3 figurait sur le bureau du président Eisenhower en janvier 1959, la sûreté a toujours été au cœur du programme nucléaire spatial des États-Unis¹. Au cours des explorations réalisées ces 50 dernières années, les États-Unis ont exploité cette énergie, évalué les dangers potentiels, maîtrisé les risques et enrichi leur connaissance du système solaire en toute sûreté, d'une manière conforme au Cadre de sûreté pour les applications de sources d'énergie nucléaire dans l'espace (A/AC.105/934). Le présent document décrit comment le Département de l'énergie mène une analyse de la sûreté pour le lancement de sources d'énergie nucléaire.

II. Sûreté nucléaire

3. Les générateurs à radio-isotopes et les unités de chauffage à radio-isotopes utilisent du combustible au dioxyde de plutonium (PuO_2), la chaleur provenant essentiellement de la désintégration alpha du plutonium 238 (^{238}Pu). La radioactivité du PuO_2 peut être source de danger lors du lancement ou de l'exploitation de l'engin spatial qui emploie ces systèmes si un accident survient au cours d'une mission. C'est pourquoi le Département de l'énergie et la NASA considèrent la sûreté faisant partie intégrante de la conception, la fabrication et l'application des sources d'énergie nucléaire dans l'espace, conformément à la section 5.2 du Cadre de sûreté. Les caractéristiques de conception reflètent les considérations liées à la sûreté: un radio-isotope (^{238}Pu) facile à protéger; une forme de combustible à base de radio-isotope (un oxyde résistant, chimiquement stable, insoluble et qui fond à haute température); et des barrières chimiquement stables (gainage en iridium ductile et composites carbone-carbone réfractaires) pour

¹ États-Unis, Département de l'énergie, *Atomic Power in Space: A History* (Washington, 1987), p. 17.

réduire le plus possible les risques pour le public. La figure 1² montre les nombreuses couches de protection qui entourent le combustible. Dans les générateurs à radio-isotopes utilisés aux États-Unis, on appelle “fuelled clad” une pastille de combustible au PuO₂ encapsulée dans de l’iridium. Deux de ces pastilles sont placées en ligne dans une enveloppe anti-impact en graphite faite d’un composite carbone-carbone appelé “fine weave pierced fabric” (FWPF). Cette enveloppe protège les pastilles en cas d’impact. Elle est recouverte d’un matériau en carbone réfractaire qui protège le combustible de la chaleur lors de la rentrée dans l’atmosphère et face à d’autres contraintes thermiques. Deux enveloppes anti-impact en graphite à isolation thermique sont placées dans un module de source de chaleur universelle (GPHS) en FWPF. Ce module GPHS sert de bouclier thermique qui empêche tout rejet de combustible lors de la rentrée dans l’atmosphère et protège le combustible en cas d’impact. Plusieurs modules GPHS peuvent être empilés dans un générateur à radio-isotopes. Toutes ces caractéristiques intrinsèques de sûreté sont complétées par des essais de sûreté visant à évaluer la réponse des systèmes selon divers scénarios d’accident.

4. La sûreté des sources d’énergie nucléaire dans l’espace ne peut être traitée indépendamment des caractéristiques de sûreté intégrées du lanceur, de l’étage supérieur, de l’engin spatial, du dispositif d’interruption du vol et du profil de la mission. La NASA a un vaste programme pour garantir la fiabilité des lanceurs et des engins spatiaux. Des éléments supplémentaires importants de cette approche intégrée de la sûreté sont l’organisation de la sauvegarde au sol et les activités connexes de planification des situations d’urgence avant et pendant le lancement.

5. Le Département de l’énergie effectue des évaluations probabilistes des risques pour déterminer les diverses réponses de ce matériel en cas d’accident et caractériser tout rejet potentiel de combustible depuis le générateur à radio-isotopes. La modélisation du transport et de la dispersion atmosphériques de rejets postulés de combustible est utilisée pour évaluer le risque d’exposition humaine au combustible ainsi que les conséquences et risques ultérieurs pour tout un ensemble de scénarios d’accident.

III. Essais de sûreté des systèmes nucléaires

6. Conformément à la section 5.2 c) du Cadre de sûreté, l’évaluation, par les États-Unis, des risques liés à un lancement de sources nucléaires s’appuie sur plus de 30 ans d’essais de sûreté allant d’essais de composants à ceux de convertisseurs grandeur nature. Les essais de sûreté se sont concentrés sur la réaction d’une pastille à diverses agressions. Généralement, cette réaction s’exprime en termes de déformation globale de la pastille, de dimension de criques (le cas échéant) et de distribution granulométrique du dioxyde de plutonium. Les essais de sûreté incluent les essais suivants:

a) *Essais de surpression par explosion.* Les premiers essais, qui employaient des tubes à choc, étaient également appelés essais de surpression par explosion. Ils avaient pour but d’évaluer les effets d’une onde de choc heurtant un

² Voir fig. 1 dans le document A/AC.105/C.1/2011/CRP.5, disponible à l’adresse: <http://www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html>.

module à source de chaleur universelle ou un générateur à radio-isotopes suite à une explosion. L'une des surfaces latérales du module d'essai était orientée perpendiculairement au sens de propagation de l'onde de choc. Des blocs de graphite étaient placés de chaque côté pour simuler une pile de trois modules. Les pastilles situées dans le module d'essai étaient remplies de dioxyde d'uranium simulant le combustible;

b) *Essais de projection de fragments.* Des essais de projection de fragments ont été effectués pour déterminer les effets de petits fragments et projectiles précipités sur le module de source de chaleur universelle suite à l'explosion d'un lanceur. Des essais ont tout d'abord été réalisés avec des plaques de FWPF afin de déterminer la réduction de vitesse assurée par le module seul. Ils ont été suivis d'essais au cours desquels on a visé des demi-modules à l'aide de balles d'aluminium. Dans ce cadre, en outre, on a examiné l'impact de balles de titane contre des pastilles nues;

c) *Épreuves de choc.* Lors de la conception du module de source de chaleur universelle, on a réalisé des essais de largage depuis un hélicoptère pour déterminer la vitesse terminale du module et étudier comment il tourbillonnerait vers le sol;

d) *Essais de résistance à un feu de propergol solide.* Deux composants de module de source de chaleur universelle ont été longuement exposés à un feu produit par un grand cube de propergol solide. Ces composants, une pastille nue et un amortisseur d'impact composé d'une coque en graphite et de deux pastilles, ont été placés de chaque côté du bloc propulseur et directement exposés au feu. Dans les deux composants, on a utilisé, pour simuler le combustible, du dioxyde d'uranium;

e) *Essais de résistance au choc des pastilles nues.* Des essais de résistance au choc des pastilles nues ont été effectués pour déterminer le comportement de ces pastilles et du combustible en cas de chocs contre différents matériaux. Les conditions d'essai ont été choisies pour refléter celles qui pourraient résulter d'un accident survenant sur le pas de tir ou en début d'ascension. Ces essais ont été effectués avec des pastilles contenant soit du dioxyde d'uranium, soit du dioxyde de plutonium;

f) *Essais de résistance au choc des sources de chaleur.* Ces essais avaient pour but de simuler la rentrée atmosphérique et l'impact terrestre subséquent d'un module de source de chaleur universelle suite à l'abandon d'une mise sur orbite. Les modules utilisés pour ces essais avaient été usinés pour retirer une fine couche de graphite de toutes les surfaces externes. La quantité retirée correspondait au double de l'épaisseur de matière qui serait ablatée lors d'une rentrée accidentelle. Toutes les pastilles contenues dans les modules étaient remplies, en guise de combustible, de dioxyde de plutonium. Les modules ont été soumis au profil thermique escompté lors d'une rentrée, puis au choc escompté aux vitesses de rentrée. On a varié, pour ces essais, l'angle d'impact. Les modules ont été projetés contre de l'acier;

g) *Essais de résistance au choc causé par des fragments volumineux.* Ces essais consistent à simuler l'impact d'un fragment volumineux provenant de l'enveloppe d'un lanceur contre une section de générateur thermoélectrique à radio-isotopes. Plusieurs essais ont été effectués à l'aide d'un chariot à fusée pour simuler l'impact d'un fragment volumineux. On a installé, dans le générateur simulé, une fausse source de chaleur qu'on a chauffée, au moment de l'impact, aux températures de pré-lancement. Le générateur simulé consistait en un empilement de

huit modules de sources de chaleur, deux contenant, pour simuler les pastilles, du dioxyde d'uranium et six étant formés de graphite grossier contenant des barreaux de molybdène solide représentant les pastilles;

h) *Essais de résistance au choc causé par des plaques.* Ces essais ont consisté à simuler l'impact à plat d'un fin fragment en forme de plaque contre une pastille remplie, en guise de combustible, de dioxyde d'uranium. La plaque était en aluminium pour astronefs. Les pastilles utilisées dans les trois premiers essais étaient des restes de l'un des tubes à choc. Avant les essais, les pastilles ont été chauffées pour les porter à leur température de prélancement;

i) *Essais de résistance au choc causé par le bord de plaques.* Ces essais avaient pour but de simuler l'impact de fragments volumineux en forme de plaque projetés contre des modules de sources de chaleur pleinement chargés et des pastilles nues. Toutes les pastilles contenaient, en guise de combustible, du dioxyde d'uranium. Les plaques étaient projetées au moyen d'un chariot à fusée de sorte que leur bord heurte la cible;

j) *Essais de résistance des générateurs thermoélectriques à radio-isotopes aux chocs longitudinaux.* Ces essais avaient pour but d'obtenir des données concernant la déformation des pastilles en fonction de l'empilement des modules de sources de chaleur dans les générateurs et la variation des déformations dans chaque position. Ils avaient également pour but d'obtenir des données sur les rejets de fractions de combustible en cas de rupture de la pastille. On a utilisé, pour ces essais, un générateur simulé dans lequel étaient empilés neuf modules chargés de pastilles de dioxyde d'uranium, l'ensemble étant chauffé aux températures de prélancement. Le générateur simulé a été projeté contre une cible en béton à l'aide d'un chariot à fusée;

k) *Essais de ductilité de l'iridium.* Les gaines utilisées pour encapsuler le dioxyde de plutonium sont en iridium. Pour mieux comprendre les propriétés de ce matériau, on a effectué des essais de tension à diverses températures pour caractériser le comportement de l'iridium en fonction des températures et des contraintes;

l) *Essais de caractérisation de l'environnement en cas de feu de propergol solide.* Plusieurs essais ont été effectués pour étudier et caractériser l'environnement situé au-dessous et à proximité de divers types de propergol solide brûlant dans des conditions atmosphériques et pour mesurer la réaction de divers isotopes ou substitués à ces environnements.

IV. Analyses de la sûreté nucléaire

7. Aux États-Unis, les systèmes d'énergie nucléaire spatiaux sont soumis, lors de leur élaboration et de leur application, à plusieurs types d'examen de la sûreté et de l'environnement, tels ceux décrits à la section 5.3 du Cadre de sûreté. Ces examens sont axés sur le Rapport de sûreté et sur les documents connexes établis dans le cadre des processus d'approbation des lancements. Les documents importants, à cet égard, sont notamment les suivants:

a) *Recueil de données relatives au lanceur.* La NASA établit un recueil de données relatives au lanceur spécifique à la mission pour aider le Département de

l'énergie à produire des rapports d'analyse et de sûreté aux fins de l'approbation des lancements. Le recueil comprend un descriptif précis de la mission, du lanceur, de l'engin spatial, du site de lancement, du calendrier de la mission et de la trajectoire. En outre, il recense les divers accidents potentiels et les environnements correspondants (surpression par explosion, bolide, fragment, impact et rentrée), ainsi que leur probabilité;

b) *Rapport de sûreté.* Chaque mission impliquant l'utilisation d'un système d'énergie nucléaire spatial est dûment analysée par le Département de l'énergie pour évaluer la sûreté nucléaire et les risques de la mission. Les analyses de sûreté sont consignées dans des rapports de sûreté à trois niveaux dans le cadre du processus d'approbation des lancements. Les rapports comprennent une analyse préliminaire de la sûreté, un projet de rapport et un rapport final;

c) *Rapport d'évaluation de la sûreté.* Dans le cadre du processus d'approbation des lancements, un groupe externe dit Groupe interorganisations d'examen de la sûreté nucléaire examine le recueil de données de la NASA ainsi que le rapport de sûreté du Département de l'énergie et réalise une évaluation indépendante de la sûreté de la mission. Il présente ensuite l'examen et l'évaluation indépendante dans un rapport d'évaluation de la sûreté. Au cours de ce processus, la NASA et le Département de l'énergie fournissent les informations supplémentaires dont le Groupe peut avoir besoin pour résoudre d'éventuels problèmes techniques. Les versions préliminaires du rapport d'évaluation de la sûreté et les observations du Groupe peuvent être intégrées aux versions ultérieures du rapport de sûreté afin de renforcer l'analyse de sûreté.

V. Aperçu des calculs réalisés pour l'analyse de sûreté

8. L'analyse de sûreté utilise une suite de codes informatiques pour modéliser les différents stades et phénomènes d'un accident: séquence, rejet de radio-isotopes ("terme source"), transport des radio-isotopes et conséquences³. La NASA établit le recueil de données de manière à inclure le lanceur, la probabilité des accidents et leur environnement. Ces informations servent d'entrées pour les calculs. Des codes phénoménologiques déterminent la réaction du matériel des générateurs à radio-isotopes en cas d'explosion, d'impact, d'incendie et de rentrée dans l'atmosphère. Ces codes produisent un ensemble de tables de recherche, qui sont utilisées pour déterminer le terme source d'un scénario d'accident donné. Normalement, les dispositifs de sûreté des générateurs empêchent tout rejet de matières. En cas de rejet, cependant, le terme source est transféré vers une suite conséquentielle de codes pour déterminer la distance sur laquelle des matières rejetées pourraient être transportées et les conséquences que cela pourrait avoir sur la santé ou sur l'environnement. Comme produit final, l'évaluation donne une indication de la distribution des probabilités d'accident et de rejet, des conséquences possibles, des valeurs moyennes et du risque encouru.

³ Pour le flux calculatoire utilisé dans l'analyse de sûreté aux fins de l'approbation des lancements, voir la figure 2 du document A/AC.105/C.1/2011/CRP.5, que l'on peut consulter sur le site www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html.

A. Explosion et impact

9. Les scénarios d'accident susceptibles de se produire sont trop nombreux pour pouvoir tous faire l'objet d'essais. Aussi l'analyse de sûreté utilise-t-elle, pour enrichir la base de données existante, la modélisation numérique. Les événements potentiellement dangereux qui doivent être modélisés sont l'explosion de destruction ordonnée lors du lancement, l'impact au sol du matériel du générateur à radio-isotopes et l'impact de débris ou de fragments de propergol solide contre le matériel du générateur. Des codes de mécanique des milieux continus sont utilisés pour modéliser explicitement les environnements d'accident définis dans le recueil. Les programmes comprennent des modèles constitutifs non linéaires et analysent de manière précise les importantes déformations qui peuvent entraîner des non-linéarités géométriques. Ces simulations numériques de dommages mécaniques dus à des explosions et à des impacts donnent une estimation des dommages causés à la source d'énergie (et à ses composants), en particulier à la pastille située dans cette source. Des estimations de l'exposition, de la rupture et de la déformation de la pastille sont obtenues par simulation numérique. L'évaluation est réalisée pastille par pastille pour chaque accident, les résultats alimentant un modèle de mécanisme de libération intégré au code d'analyse du terme source. Ce modèle détermine la quantité et la distribution granulométrique du dioxyde de plutonium de tout rejet de matières à partir des informations d'endommagement des pastilles fournies par les simulations numériques.

10. Ces simulations numériques examinent des conditions de charge mécanique telles que les explosions, les impacts au sol, les impacts de fragments d'engins spatiaux et, pour certaines missions, les débris d'un engin spatial intact. Dans la plupart des cas, les dommages mécaniques sont dus à une suite d'événements complexe. Les simulations numériques découplent cette suite complexe et alimentent les informations du code d'analyse du terme source relatives à chaque événement, que l'on peut ensuite utiliser pour représenter la progression d'événements. Le code d'analyse du terme source intègre des informations relatives à l'exposition, à la déformation et à la rupture de la pastille dans des matrices d'impact au sol, d'impact de fragments, d'impact de débris d'engins spatiaux et d'explosion. Ces résultats peuvent ensuite être combinés pour estimer le rejet qui résultera d'une charge mécanique.

B. Feux et analyse thermique

11. Les accidents susceptibles de se produire lors du lancement peuvent donner lieu à des feux de propergol liquide ou solide. Les États-Unis ont introduit plusieurs couches de protection dans leur matériel pour prévenir tout rejet de combustible du générateur à radio-isotopes en cas d'accident survenant sur l'aire de lancement. Par exemple, les feux de propergol liquide ne sont pas sensés faire fondre la gaine d'iridium qui enveloppe le combustible du générateur à radio-isotopes. Plusieurs codes sont utilisés pour modéliser les feux de propergol liquide et solide, les impacts thermomécaniques et les effets de la vaporisation sur le matériel et le combustible du générateur.

12. Les informations entrées dans le code caractérisent le feu de propergol solide au sol, le nuage flottant et la distribution, en compartiments de diverses granulométries, de toute masse de dioxyde de plutonium résultant d'un impact coïncident ou quasi-coïncident. À partir de là, la séquence de code prédit la composition et la distribution granulométrique des aérosols contenant du dioxyde de plutonium dans le nuage flottant. En effet, le code transforme le terme source (masse par compartiment de granulométrie) des particules de dioxyde de plutonium produites par l'agression mécanique en un autre qui intègre les effets de la vaporisation, de la condensation et de l'agglomération de particules.

C. Analyse de la rentrée atmosphérique

13. Les engins spatiaux dotés de générateurs à radio-isotopes peuvent avoir à effectuer des rentrées atmosphériques inopinées. Le module de source de chaleur est conçu pour résister aux conditions de rentrée et l'on utilise une suite de codes pour évaluer et confirmer sa conception. Plusieurs codes sont utilisés ensemble pour fournir une solution intégrée aux problèmes physiques séquentiels de mouvement, de chauffage, de réponse thermique, de chimie et de propagation parfaite qui peuvent se poser lors de la rentrée atmosphérique. Pour évaluer les paramètres de rentrée, il faut effectuer des milliers de calculs concernant la dynamique de vol, l'échauffement aérodynamique des surfaces, et l'ablation et la réponse thermique du module lors de la rentrée. Cette analyse est réalisée pour chaque mission, chacune ayant des caractéristiques orbitales propres. Les résultats obtenus en ce qui concerne les valeurs thermiques, les valeurs physiques et la vitesse sont ensuite transmis à l'analyse du terme source.

D. Analyse du terme source

14. Le terme source désigne la quantité et la forme du combustible du générateur à radio-isotopes qui peut, éventuellement, être rejeté. Le matériel étant conçu pour contenir le combustible, le terme source peut avoir une valeur nulle. Pour l'analyse de la sûreté du lancement, le terme source est généré à l'aide d'un code de Monte-Carlo qui produit des millions de résultats possibles pour chaque analyse de mission. Il tente de caractériser toutes les menaces que présente l'environnement de lancement.

15. Dans chaque simulation, on commence par déterminer le lieu de l'accident en échantillonnant de manière aléatoire une fonction de distribution de probabilités du lanceur. Le code du terme source passe ensuite par toutes les agressions qui se produiraient dans cet accident, notamment l'explosion initiale, les impacts aériens de fragments, l'impact au sol du générateur, l'impact du propergol solide ou d'autres fragments volumineux contre le générateur, la pluie de débris et les feux de propergol liquide et solide. On échantillonne, dans ce cadre, diverses distributions, ce qui produit des millions de solutions uniques.

16. Le résultat final de l'analyse du terme source est une distribution des rejets potentiels de dioxyde de plutonium échantillonnable aux fins de l'analyse des conséquences. Les informations relatives aux rejets ultimes comprennent la masse, la distribution granulométrique, le lieu des rejets et les paramètres d'environnement

des feux. Les résultats définissent également la probabilité d'un rejet dans un accident donné, qui, combiné à la probabilité d'accident, produit la probabilité totale du scénario.

E. Analyse des conséquences

17. La suite de conséquences est un ensemble de codes qui calcule le transport atmosphérique du combustible rejeté par le générateur et ses conséquences en termes d'effets sur la santé, de doses et de contamination du sol. Les effets sur la santé sont caractérisés par le nombre de décès par cancer latent sur les 50 années à suivre. Le modèle de dose linéaire sans seuil est utilisé avec, en option, une valeur (seuil) *de minimis*. La suite de codes est appliquée de manière stochastique à de nombreux scénarios, appelés "observations". Le terme source, les conditions météorologiques et le moment du lancement sont choisis de manière aléatoire pour chaque observation. On utilise l'échantillonnage par importance pour s'assurer que les combinaisons de variables qui donnent lieu à des événements peu probables, mais lourds de conséquences sont prises en compte dans l'analyse.

18. Le transport atmosphérique est déterminé en utilisant un modèle Lagrangien (à trajectoire) à bouffée gaussienne capable d'intégrer des termes sources granulométriques multiples. Le transport et la diffusion des matières dans une bouffée nuageuse dépendent de conditions météorologiques qui peuvent varier dans l'espace et dans le temps. Ces conditions incluent les composantes de vent aux points de grille, la classe de stabilité, la hauteur de la couche de mélange et la rugosité de la surface située en-dessous. Chaque nuage source, défini par des caractéristiques telles que la taille de ses particules et ses dimensions et coordonnées initiales, est suivi à intervalles de temps dans un champ de vent quadri-dimensionnel (trois dimensions spatiales et temps).

19. Lorsque la bouffée interagit avec le sol, on calcule les concentrations atmosphériques et terrestres aux points de grille définis. Une fois calculés le transport et la concentration, on évalue les doses potentielles et leurs effets sur la santé des personnes exposées. Un module distinct calcule les doses potentielles à l'aide des facteurs de conversion des différentes voies d'exposition. Puisque les termes sources peuvent impliquer plusieurs tailles de particules et que la résolution peut changer d'une application à l'autre, ce module intégré ne restreint pas les valeurs des facteurs de conversion de dose à une liste fixe de tailles de particules. Le calcul des doses et des effets sur la santé englobe également d'autres données relatives aux zones potentiellement contaminées, comme la densité démographique, l'utilisation des sols, et la production et la consommation d'aliments.

20. Les résultats de la suite de conséquences sont combinés dans des tableaux de conséquences moyennes, de conséquences par percentile et de risque (conséquence moyenne multipliée par la probabilité de rejet). On crée également des graphiques complémentaires de fonctions de distribution cumulative. Ces graphiques montrent la probabilité d'un niveau de conséquence particulier ou supérieur. Ces résultats aident, sur le plan technique, le décideur à évaluer le risque lié à l'utilisation d'un générateur à radio-isotopes dans l'espace.

VI. Conclusion

21. Les générateurs à radio-isotopes ont permis d'explorer les profondeurs du système solaire du Soleil à Pluton, d'orbiter autour d'exoplanètes et d'observer leurs lunes, chacune plus étrange que l'autre, et d'atteindre ou de dépasser les confins du système solaire. Bien que ces applications utilisent souvent d'importantes quantités de radio-isotopes, les États-Unis ont mis au point un important programme de sûreté étayé par une procédure rigoureuse qui a pour but d'évaluer les risques inhérents aux missions et de faire en sorte que celles-ci soient menées en toute sûreté. Conformément au Cadre de sûreté, la mise en œuvre de cette évaluation par les États-Unis remplit une fonction essentielle dans la conception et la mise au point des générateurs à radio-isotopes, ainsi que dans celles de leurs applications. Elle aide à justifier les demandes d'utilisation de générateurs de ce type et forme le fondement technique de la procédure de sûreté nucléaire qui conditionne l'autorisation de lancement.
