

Réservé aux participants
25 novembre 2005

Français
Original: Anglais

**Comité des utilisations pacifiques
de l'espace extra-atmosphérique**
Sous-Comité scientifique et technique
Quarante-troisième session
Vienne, 20 février-3 mars 2006
Point 10 de l'ordre du jour provisoire*
Utilisation de sources d'énergie nucléaires dans l'espace

**Atelier technique conjoint Organisation des Nations
Unies/Agence internationale de l'énergie atomique sur les
objectifs, la portée et les caractéristiques générales d'une
éventuelle norme de sûreté technique pour les sources
d'énergie nucléaires dans l'espace
(Vienne, 20-22 février 2006)**

**Situation et besoins en matière de sûreté nucléaire dans
l'espace: le point de vue d'un constructeur**

Document de travail soumis par la France

Note du Secrétariat

1. Conformément au paragraphe 16 de la résolution 60/99 de l'Assemblée générale, en date du 8 décembre 2005, le Sous-Comité scientifique et technique du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique organisera conjointement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique, un atelier technique sur les objectifs, la portée et les caractéristiques générales d'une éventuelle norme de sûreté technique pour les sources d'énergie nucléaires dans l'espace qui se tiendra à Vienne du 20 au 22 février 2006.

* A/AC.105/C.1/L.283.



2. Le document de travail figurant en annexe au présent document a été établi pour l'atelier technique conjoint conformément au calendrier indicatif des travaux de l'atelier, tel qu'en a convenu le groupe de travail sur l'utilisation des sources d'énergie nucléaires dans l'espace au cours de sa réunion intersessions, tenue à Vienne du 13 au 15 juin 2005 (A/AC.105/L.260).

Annexe

Situation et besoins en matière de sûreté nucléaire dans l'espace: le point de vue d'un constructeur

Document de travail soumis par la France

I. Situation et contexte

1. Il est probable que dans l'avenir proche de nouvelles initiatives utiliseront différents systèmes d'énergie et de propulsion nucléaires. Dans le cas d'un large recours à l'énergie nucléaire pour des applications civiles dans l'espace extra-atmosphérique, il est important de noter que de nombreux pays seraient concernés par les risques radiologiques potentiels. Les précédents montrent en effet, que malheureusement beaucoup de pays subissent les conséquences des accidents impliquant un objet spatial équipé de systèmes nucléaires. On peut citer l'incident du satellite SNAP-9A (dispersion de un kilogramme (kg) de plutonium (Pu) 238 – 17 kilo curies (kCi)), celui du réacteur de Cosmos 954 en 1978 (dans le nord du Canada, pollution d'une superficie de 50 000 km², plus de 4 000 débris – contenu radioactif total de 85 kCi, dont 50 Ci ont été récupérés) et celui du réacteur de Cosmos 1402 en 1983 (dans l'océan Indien). En outre, le risque potentiel existe toujours, comme dans le cas de la récente mission Cassini/Huygens, dont le succès a été facilité par l'utilisation de trois générateurs thermoélectriques radio-isotopiques contenant 28,5 kg de Pu-238 – 0,5 MCi.

2. De plus, il faut souligner qu'avec le nombre total de systèmes d'énergie nucléaire lancés jusqu'à présent, la probabilité d'un accident impliquant un tel système est de l'ordre de 10⁻⁴ par an et par système. Bien que cette valeur ne s'applique pas à un grand nombre de systèmes, on peut la comparer aux 10⁻⁶ admis couramment comme valeur maximum de la fréquence des dommages au cœur par réacteur et par an d'une centrale nucléaire terrestre. Cela souligne combien il est nécessaire et justifié de mettre en œuvre un programme complet et approfondi de sûreté nucléaire pour l'espace extra-atmosphérique.

3. Dans ces conditions, il est nécessaire de concevoir tous les systèmes nucléaires spatiaux en ayant à l'esprit les considérations de sûreté. En fait, les aspects tenant à la sûreté (analyses et essais) ont toujours représenté une partie importante des projets et programmes passés (par exemple, SP100, Topaz et Nerva). Toutefois, ces analyses ont été menées sur la base d'objectifs de sûreté établis par chacun des programmes nucléaires spatiaux, en dehors de tout cadre international. Si la plupart des décisions concernant les applications nucléaires terrestres sont prises au niveau national, les intérêts internationaux devraient être expressément représentés dans le cas des applications nucléaires spatiales.

4. Le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a proposé une approche générale préliminaire dans une première résolution adoptée par l'Assemblée générale en 1992. Même si l'on peut en faire ressortir certains points importants, tels que l'interdiction d'utiliser l'isotope 239 du plutonium dans un réacteur spatial, il est admis que cette première résolution n'abordait pas tous les aspects en cause (comme la propulsion nucléaire) et qu'elle n'a pas vraiment force

obligatoire. En outre, aucun critère quantitatif de sûreté pour l'utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace n'a été défini au niveau international, mais le Comité a fait à la place des recommandations sur la façon de formuler les objectifs de sûreté pour traiter cette importante question.

5. Les programmes généraux de sûreté élaborés pour les projets passés semblent former une politique et une approche de sûreté et constituer une sorte de culture de sûreté nucléaire spatiale générale. Comme dans le cas des centrales terrestres, la philosophie fondamentale est de ramener les risques au niveau le plus bas qu'il est raisonnablement possible d'atteindre^{a, b}. Sur la base du principe de la défense en profondeur (notion de lignes de défense, de barrières multiples, etc.), les objectifs de sûreté sont définis de façon à garantir la santé publique et la protection de l'environnement. Ils doivent contribuer à supprimer complètement le risque (fréquence x conséquences), si cela est réalisable, par des moyens techniques et économiques.

II. Les applications nucléaires dans l'espace et l'environnement naturel

6. Tout d'abord, il faut noter que tous les objectifs de sûreté relatifs aux centrales nucléaires ont été définis sur la base du niveau de fond radioactif naturel et artificiel (médical) auquel est soumis l'organisme humain. Il faut souligner aussi que l'environnement spatial reste très hostile en termes de radiations (ceinture de Van Allen, rayons cosmiques galactiques, événements solaires, etc.). Cela signifie que, loin de la Terre, les objectifs de sûreté devraient être adaptés à l'absence d'êtres humains et à un fond de rayonnement naturel différent. Cela soulève également la question de savoir quelles doses-seuil ou quel niveau de rejet minimum devraient être retenus dans l'estimation des risques d'accident, mais aussi quelles doses limites devraient s'appliquer dans des conditions normales de fonctionnement. Cela concerne:

a) Le rejet radioactif des systèmes de propulsion nucléothermique pour lesquels il faut déterminer, à partir des objectifs de sûreté, des niveaux acceptables de dégradation du combustible et les valeurs de la température d'exploitation, en tenant compte de l'impact direct sur la performance des systèmes;

b) Le niveau de radioactivité dans le circuit primaire d'un système de propulsion nucléoélectrique (rétention des produits de fission dans le combustible, température d'exploitation, etc.);

c) Les doses acceptables pour les équipages des objets spatiaux;

d) Les applications planétaires pour lesquelles il faut définir un périmètre (ou des limites de site) au-delà duquel la contribution du réacteur devient négligeable par rapport au fond de rayonnement naturel.

7. Il faut toutefois garder à l'esprit que, en plus de la situation loin de la Terre, d'autres questions de sûreté importantes concernent la rentrée (délibérée ou accidentelle) de systèmes nucléaires spatiaux dans l'atmosphère terrestre. Toutes ces questions de sûreté sont liées au type de système nucléaire impliqué et sont communes à toutes les situations particulières qui pourraient survenir lors de

chacune des phases d'une mission, du pré-lancement jusqu'à l'élimination du système d'énergie nucléaire. Ces questions sont abordées ci-dessous.

III. Caractéristiques de sûreté spécifiques des systèmes d'énergie nucléaire dans des conditions normales de fonctionnement dans l'espace extra-atmosphérique

8. Pour les conditions normales de fonctionnement d'un réacteur spatial, les exigences en matière de sûreté peuvent être résumées comme suit:

- a) Le réacteur devrait être maintenu exempt de produits radioactifs jusqu'à ce qu'il ait atteint une orbite opérationnelle sûre;
- b) Les orbites opérationnelles devraient être déterminées de façon que les produits radioactifs décroissent jusqu'à des niveaux négligeables avant une éventuelle rentrée dans l'atmosphère;
- c) Le réacteur devrait être maintenu dans l'espace après utilisation.

A. Réacteur propre et orbite de mise en route

9. Même si une conception stricte du réacteur empêche une mise en route et un fonctionnement non autorisés, le premier point mentionné ci-dessus sous-entend, d'une part, le lancement d'un objet spatial avec un réacteur propre et, d'autre part, ne permet sa mise en route qu'une fois atteinte une orbite sûre. D'abord, les orbites de mise en route sûres sont encore à définir et feront partie des objectifs de sûreté. Ensuite, compte tenu de la recommandation précédente du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, seuls les réacteurs fonctionnant à l'uranium neuf seront autorisés. Pour cette raison, la plupart des réacteurs de fission utilisés dans les applications spatiales ont été conçus pour fonctionner à l'uranium 235 enrichi, en particulier à l'uranium fortement enrichi (93 %) en raison des impératifs de compacité et de masse minimum.

10. Du fait que des réacteurs spatiaux fonctionnent avec une importante quantité d'uranium fortement enrichi, il faut résoudre les questions de garanties pendant leur transport au sol, leur lancement et après. De tels systèmes doivent rester sous le contrôle de gouvernements stables fortement attachés à la non-prolifération.

B. Orbites opérationnelles

11. De plus, une fois que le cœur en uranium froid et non critique est en orbite, il faut prendre des précautions concernant les orbites opérationnelles lorsqu'un retour en orbite terrestre est programmé (mission aller retour, accélération gravitationnelle de la Terre, etc.) ou, simplement, que les systèmes de propulsion nucléoélectrique restent en orbite terrestre pendant une longue période au cours de leur accélération. Ces orbites opérationnelles doivent être différentes de l'orbite de mise en route en raison de la forte radioactivité du cœur et elles doivent être définies, dans les exigences en matière de sûreté, en fonction de la durée de vie en orbite et du contenu radioactif du réacteur (durée de la décroissance).

C. Élimination finale

12. Enfin, il faut également déterminer des orbites spécifiques pour l'élimination finale d'un réacteur spatial en tenant compte des risques accrus dus aux météorites/débris en raison d'une durée de séjour plus longue. La question des solutions alternatives, comme les orbites d'échappement du système solaire et l'envoi des sources d'énergie nucléaires vers le Soleil, sera examinée et pourrait être proposée comme recommandation de sûreté résultant du compromis entre les risques réduits et la faisabilité technique d'une réserve d'énergie complémentaire nécessaire (pour prolonger la durée de vie du cœur du réacteur).

D. Radiations induites par les systèmes d'énergie nucléaire

13. Un écran partiel est généralement incorporé à la source d'énergie nucléaire au lieu d'un écran biologique (comme dans les applications nucléaires terrestres). Les radiations induites par le réacteur peuvent ainsi être ramenées à un niveau négligeable pour l'environnement naturel, mais il est néanmoins important de noter que des réglementations relatives aux limites de dose sont nécessaires pour les missions habitées. Ces limites de dose auront une influence considérable sur la performance des systèmes: sur le rapport masse/poussée pour les systèmes de propulsion nucléothermique ou sur le rapport masse/puissance pour les systèmes de propulsion nucléoélectrique.

IV. Caractéristiques de sûreté spécifiques des systèmes d'énergie nucléaire en cas d'accident dans l'espace extra-atmosphérique

14. Il a déjà été dit que les questions de sûreté dépendaient de la phase de la mission et étaient fortement liées au type de système nucléaire impliqué. À part pour la phase de lancement, qui devrait être considérée séparément, les différentes phases de la mission peuvent être résumées comme suit:

a) L'orbite terrestre, qui correspond soit à la phase de mise en route soit à la phase de fonctionnement (comme dans les missions aller retour ou les passages simples ou multiples près de la Terre). Pour la phase de mise en route, il est important de noter que dans un système de propulsion nucléothermique (forte poussée), la courte durée d'injection réduit le risque d'accident avec des cœurs radioactifs. Les systèmes de propulsion nucléoélectrique à faible poussée exigent quant à eux de longues périodes de transfert près de la Terre avec un cœur radioactif;

b) Les situations interplanétaires, où des accidents inacceptables en orbite peuvent devenir tolérables. Cela signifie, par exemple que l'on pourrait envisager des marges réduites pour les voyages dans l'espace lointain correspondant à des critères de sûreté différents de ceux en vigueur près de la Terre. Les objectifs de sûreté pourraient alors varier au cours de la durée de vie du réacteur, ce qui est une approche totalement différente de celle concernant une centrale nucléaire standard;

c) Les applications planétaires, pour lesquelles les objectifs de sûreté seront encore différents de ceux d'une centrale terrestre en raison du nombre de personnes qui pourraient potentiellement être concernées en cas d'accident et en raison de l'absence de biosphère. Toutefois, tout comme pour les centrales nucléaires, des mesures standard devraient être prises en compte pour l'accident, courant de perte de fluide caloporteur, les questions liées à la gestion des déchets, etc. En outre, la présence de générateurs thermoélectriques radio-isotopiques sur la Lune montre que l'on ne peut exclure d'envisager une planète comme lieu de stockage ultime de déchets radioactifs terrestres émetteurs alpha, ce qui nécessitera une réglementation particulière.

15. Enfin, les exigences concernant la fiabilité des missions peuvent dans certains cas l'emporter sur les objectifs de sûreté. En effet, la redondance de certains composants et la nécessité de conserver les sources d'énergie nucléaires en état de fonctionner pour assurer le succès de la mission contribueront également à garantir la sûreté.

A. Accidents en orbite terrestre

16. Pour se prémunir contre les dangers d'une rentrée accidentelle dans l'atmosphère, il faut empêcher toute rentrée à conséquences radiologiques après la mise en route initiale. Cela peut être réalisé si les orbites opérationnelles stables et adéquates, ainsi que les trajectoires de vols réduisant la probabilité de telles situations. On peut contribuer à réduire les risques en maintenant un système manœuvrable même en cas d'accident. Il faut là encore noter qu'un tel mode de fonctionnement dégradé pourrait être un important objectif en termes de fiabilité des missions. Maintenir un système de propulsion nucléoélectrique ou nucléothermique "manœuvrable" signifie assurer une poussée minimum en cas de d'endommagement du cœur (élément combustible bouché, dispositif de contrôle de la réactivité hors service, etc.). Cela signifie aussi qu'il faut disposer de composants de secours (turbopompe, source de rayonnement fractionné, etc.) en cas de mauvais fonctionnement d'un système de conversion.

17. À la différence des centrales terrestres, aucun confinement n'est possible dans un réacteur spatial. Cela signifie, premièrement, que l'intégrité du réacteur doit être maintenue le mieux possible au cours d'un accident et, deuxièmement, que le réacteur doit être conçu pour rester sûr même en cas d'accident. Par exemple, il faut pouvoir maîtriser la réactivité dans toutes les situations et évacuer la chaleur résiduelle du cœur en cas de perte de caloporteur. La maîtrise de la réactivité nécessite:

a) Un coefficient de vide négatif afin d'éviter surcriticalité en cas de perte de fluide caloporteur;

b) Un coefficient global de puissance négatif pour limiter la réaction de fission dans toutes les circonstances impliquant des changements de température (de sorte que le réacteur ne puisse devenir surcritique);

c) Un élargissement Doppler suffisant pour limiter l'élévation de la température du combustible et éviter la fusion du cœur en cas d'accident hypothétique (accident d'insertion de réactivité). Il faut noter que certains réacteurs

spatiaux sont de petits réacteurs rapides et qu'un spectre de neutrons rapides entraîne souvent des coefficients Doppler très faibles, mais que, d'autre côté, l'utilisation d'uranium comme combustible offre une marge importante en ce qui concerne la criticité instantanée ($\beta \sim 650$ pour cent mille (pcm))^c;

d) Une estimation de l'impact sur la réaction de fission du rayonnement spatial naturel (par exemple perturbation due au flux de protons solaires lors d'un événement à particules solaires).

18. En ce qui concerne la maîtrise des accidents de perte de fluide caloporteur et l'évacuation de la chaleur résiduelle, les systèmes de propulsion nucléothermique et nucléoélectrique diffèrent par niveau de puissance volumique du cœur:

a) Les systèmes de propulsion nucléothermique à forte puissance volumique ont souvent plus de réservoirs de fluide caloporteur sous pression et/ou de dispositifs de sûreté actifs que les centrales terrestres. À la différence des systèmes de propulsion nucléoélectrique, l'évacuation de la chaleur résiduelle exige également des précautions particulières en raison de la poussée résiduelle qui en résulte;

b) Pour les systèmes de propulsion nucléothermique à faible puissance volumique, l'évacuation passive de chaleur reste possible, auquel cas seuls des phénomènes de transfert thermique par conduction et rayonnement peuvent se produire comme dans les modèles de réacteurs à haute température qui ont déjà été exploités par le passé.

B. Autres scénarios d'accidents potentiels

19. Les exigences et les critères de sûreté appropriés devraient être formulés de manière que le risque météoritique soit spécifiquement pris en compte lors de la conception et du fonctionnement des systèmes de propulsion nucléaire spatiale. En effet, les météorites pourraient être responsables d'accidents de perte de fluide caloporteur ou d'un dommage partiel au cycle de conversion (la turbopompe, ou surtout la source de rayonnement dans le cas de la propulsion nucléoélectrique, etc.). Ces scénarios doivent être classés sur une échelle d'événements où leurs conséquences et leur probabilité sont reliées à la masse et à la taille de la météorite. Il faut souligner que les applications planétaires sont également concernées^d.

V. Questions clés concernant la sûreté au cours du lancement de systèmes d'énergie nucléaire

20. Tout d'abord, il ne faut pas oublier que les systèmes à radio-isotope (RTG) et les systèmes à réacteur (propulsion nucléothermique et propulsion nucléoélectrique) n'ont pas le même contenu radioactif initial. Un réacteur à uranium contiendra normalement quelques curies, alors que du dioxyde de plutonium 238 pur utilisé comme combustible émettra plusieurs centaines de kilocuries pour une mission utilisant des générateurs thermoélectriques à radio-isotopiques. Le tableau ci-dessous donne des exemples de contenu radioactif standard pour un objet spatial ordinaire équipé de générateurs radio-isotopiques et de réacteurs et quelques exemples d'accidents, avec les deux types de source d'énergie nucléaire (en curies):

<i>Mission embarquant un générateur radio-isotopique (Cassini)</i>	<i>Mission embarquant un réacteur</i>	<i>Accident avec un générateur radio-isotopique SNAP-9</i>	<i>Accident de COSMOS 954</i>	<i>Tchernobyl</i>
~500 kCi	Quelques curies	17 kCi	85 kCi (potentiels) 50 Ci (récupérés)	> 30MCi

21. Toutefois, l'absence de radioactivité initiale dans un système à réacteur est contrebalancée par le risque de criticité. En effet, si l'intégrité du générateur radio-isotopique peut être envisagée dans le cas d'une rentrée dans l'atmosphère terrestre, des exigences et des critères de sûreté spécifiques doivent être formulés pour garantir que le réacteur reste bien hors service si des accidents se produisent lors du lancement (pour empêcher toute criticité intempestive). On peut mentionner deux approches:

a) Comme c'est désormais le cas sur les lanceurs, une commande de destruction du système d'énergie nucléaire peut être mise en place pour éviter des trajectoires de vols anormales et empêcher tout risque de criticité du cœur. Une telle possibilité de destruction/dispersion pourrait s'appliquer à un réacteur fonctionnant à l'uranium qui, d'un côté, aurait un très faible niveau de radioactivité et, de l'autre, ne pourrait devenir critique si les systèmes de destruction pouvaient assurer la dispersion des éléments combustibles du cœur. Des dispositifs de secours et des dispositifs passifs pourraient assurer la séparation des éléments combustibles et éviter les configurations critiques. Toutefois, étant donné que les réacteurs spatiaux contiennent essentiellement de l'uranium fortement enrichi, cette option pourrait être inacceptable du point de vue de la prolifération^e;

b) La maîtrise de la réactivité du cœur doit être assurée dans tous les cas de noyage ou de changement de géométrie du cœur. De nombreuses solutions potentielles existent, par exemple des systèmes de piège neutronique, le chargement de combustible en orbite et l'empoisonnement du cœur, mais ils influent considérablement sur la performance globale des systèmes.

VI. Autres caractéristiques de sûreté spécifiques des systèmes d'énergie nucléaire dans l'espace

22. Certaines caractéristiques spécifiques de sûreté inhérentes à l'utilisation de systèmes nucléaires dans l'espace doivent également être soulignées:

a) Certaines activités de transport et activités technologiques peuvent être exécutées en présence d'un réacteur déjà chargé en combustible;

b) Le réacteur devra fonctionner dans deux milieux (la Terre et l'espace) sans limite de site. Cela rend la définition des critères de sûreté plus complexe. En particulier, les limites des rejets de produits radioactifs au cours des essais au sol des prototypes d'un système de propulsion nucléothermique correspondent à une limite du niveau de poussée d'une unité moteur;

c) Le facteur de l'apesanteur lors des vols interplanétaires rend difficile l'évacuation de la chaleur résiduelle par convection naturelle (sûreté passive) et par

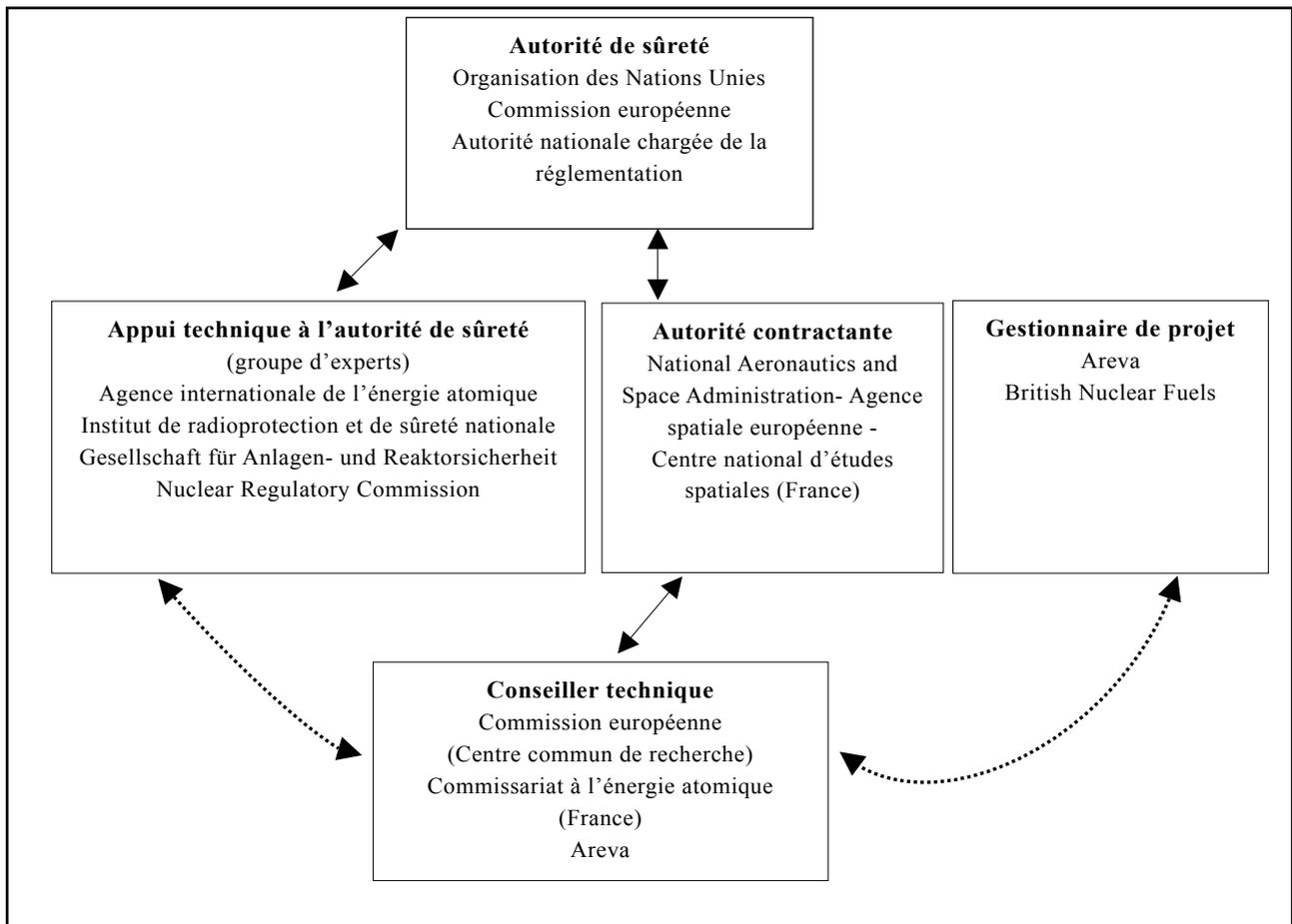
conséquent pourrait constituer une limite de la puissance volumique du cœur des systèmes de propulsion nucléoélectrique;

d) Le temps mis par les signaux de contrôle pour parvenir à destination lorsque la distance à la Terre est considérable peut rendre plus difficile la gestion des accidents de réactivité. Si cette question fait partie des questions de sûreté recensées, il faudrait fixer des critères de performance pour le contrôle télémétrique du système en ce qui concerne la conduite du réacteur.

VII. Cadre juridique de la définition des objectifs de sûreté

23. Les objectifs de sûreté doivent aider à décider si un système spatial d'énergie nucléaire est ou non suffisamment sûr. Des recommandations et lignes directrices peuvent donc aider une autorité de sûreté à prendre une décision, aussi est-il important de savoir qui, en cas d'utilisation d'un tel système, prend les décisions (exploitant, organisme de réglementation, concepteur, le public ou un ministre) et qui est juridiquement responsable (l'autorité contractante par exemple).

24. Alors que, pour les applications nucléaires terrestres, la plupart des décisions sont prises au niveau national dans le cas des applications spatiales, les intérêts internationaux devraient être expressément représentés car les pays concernés devraient être davantage préoccupés par les effets transfrontières d'accidents éventuels liés à des systèmes d'énergie nucléaire dans l'espace. Le graphique ci-dessous donne un exemple, à partir des applications terrestres, montrant qui pourraient être les acteurs d'un examen de sûreté et d'un processus d'approbation pour les applications spatiales:



Notes

- ^a *Regulatory Practices and Safety Standards for Nuclear Power Plants: proceedings of an International Symposium on Regulatory Practices and Safety Standards for Nuclear Power Plants*, Agence internationale de l'énergie atomique, collection Comptes rendus (Vienne, AIEA, 1989).
- ^b M. S. El-Genk, éd., *A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion: 1984-1993* (New York, American Institute of Physics Press, 1994).
- ^c S. Bernard et col., "Conceptual design of the MAPS NTP cargo shuttle based on a PBR", document élaboré pour le treizième colloque "Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, Nouveau Mexique, 1996.
- ^d Agence spatiale européenne, *Lunar Nuclear Power System (LunPS) Studies* (1998).
- ^e E. Rigaut et X. Raepsaet, "First studies on the Optimized Propulsion Unit System OPUS within the current Nuclear Space Program in CEA", document soumis à la *Space Nuclear Conference*, San Diego, Californie, 5-9 juin 2005.