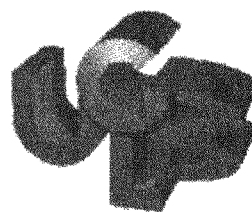


**enssib**

Ecole Nationale Supérieure
des Sciences de l'Information
et des Bibliothèques

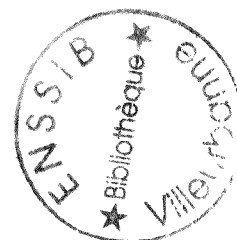


Université
Claude Bernard
Lyon I

DESS Informatique Documentaire
Rapport de recherche bibliographique

Utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace

DEROCHE Catherine



Sous la direction de

Monsieur DEMEYER

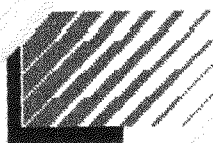
Professeur à l'Institut de Physique Nucléaire
de l'Université Claude Bernard - LYON I

BIBLIOTHEQUE DE L'ENSSIB



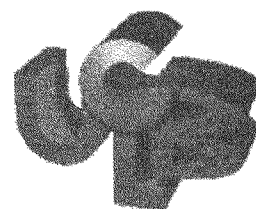
8028771

Année 1997-1998



enssib

Ecole Nationale Supérieure
des Sciences de l'Information
et des Bibliothèques



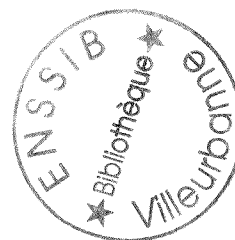
Université
Claude Bernard
Lyon I

DESS Informatique Documentaire

Rapport de recherche bibliographique

Utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace

DEROCHE Catherine



Sous la direction de
Monsieur DEMEYER

Professeur à l'Institut de Physique Nucléaire
de l'Université Claude Bernard - Lyon I

Année 1997-1998

1998
11
8

Utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace

Catherine DEROCHE

Résumé

Ce rapport de recherche bibliographique traite de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace.

Une première partie concerne la méthodologie de recherche des références bibliographiques. La seconde partie est une synthèse sur le mode de fonctionnement d'un réacteur nucléaire spatial, ses principales caractéristiques ainsi que les différents modes de conversion de la chaleur nucléaire en électricité. Les références sont données dans la dernière partie.

Mots clés

Bibliographie, énergie nucléaire, réacteur nucléaire, espace

Abstract

This bibliographical research deals with the use of nuclear power in space.

The first part is about methodology in finding references for research. The second part is a synthesis about the way a space nuclear reactor functions and its main features and various ways of nuclear heat conversion into electricity. References are given in the last part.

Keywords

Bibliography, nuclear power, nuclear reactor, space

TABLES DES MATIERES

I.INTRODUCTION	4
II.METHODOLOGIE	5
A.ETUDE PRÉLIMINAIRE DU SUJET	5
1.Présentation du sujet	5
2.Choix des descripteurs	5
B.RECHERCHE MANUELLE	6
1.Contact de personnes ressource	6
a) Contact de Mme Jarroux, documentaliste à l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon	6
b) Contact d'un documentaliste du CEA	6
2.Recherche sur l'OPAC de la bibliothèque universitaire de Lyon1	6
C.RECHERCHE AUTOMATISÉE	7
1.Choix et présentation des différentes bases de données	7
a) Choix	7
b) Présentation	7
2.Recherche sur cédéroms	9
a) Sur le cédérom PASCAL	9
b) Sur le cédérom de l'INIS	9
c) Sur le cédérom DOC THESE	9
3.Recherche sur le serveur de DIALOG	10
a) Première interrogation en ligne	10
b) Deuxième interrogation en ligne	10
c) Troisième interrogation en ligne	11
D.RECHERCHE SUR L'INTERNET	11
1.Recherche à partir d'URL	11
a) La nasa : http://www.nasa.gov	11
b) Le cnes : http://www.cnes.fr	12
c) Le cea : http://www.cea.fr	12
d) Doc'INSA : http://www.insa-lyon1.fr	13
2.Recherche à l'aide des moteurs de recherche	13
3.Recherche de preprints	14
E.BILAN DES RÉFÉRENCES OBTENUES	14
F.RECHERCHE DES DOCUMENTS PRIMAIRES	17
G.CONCLUSION	17
1.Bilan	17
2.Evaluation du coût et du temps de la recherche	17
III.SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	19
A.INTRODUCTION.....	19
B.LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS L'ESPACE	19
C.DIFFÉRENTS MODES DE FONCTIONNEMENT DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES	20
1. Combustible solide - métal liquide caloporteur - conversion thermodynamique	21
2. Combustible solide - caloporteur gazeux - conversion thermodynamique	21
3. Combustible solide - caloporteur liquide - conversion statique	22
4. Combustible gazeux - caloporteur liquide - conversion statique	23
D.COMPARAISON DES MASSES SPÉCIFIQUES EN FONCTION DU TYPE DE RÉACTEUR	24
E.CONCLUSION	24
IV.REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	25
V.ANNEXES	33

I. INTRODUCTION

Cette recherche bibliographique s'inscrit dans le cadre du DESS Informatique Documentaire de l'ENSSIB (Ecole Nationale Supérieure des Sciences de l'Information et des Bibliothèques). Elle a été dirigée par Monsieur Demeyer, professeur, à l'Institut de Physique Nucléaire de l'Université de Lyon 1.

Monsieur Demeyer, qui enseigne en maîtrise de physique et dont le cours porte sur les réacteurs terrestres, avait besoin d'informations concernant les réacteurs spatiaux pour développer une partie du cours.

Nous pouvons nous demander en quoi l'énergie nucléaire est une réponse aux problèmes énergétiques dans l'espace et quelle en est son utilisation. En fait, l'énergie nucléaire produit de la chaleur qui est transformée en électricité. L'objectif de ce rapport est d'étudier plus particulièrement les différents mécanismes de cette transformation qui diffèrent des solutions trouvées sur terre par les conditions extrêmes qu'impose l'espace.

II. METHODOLOGIE

A. Etude préliminaire du sujet

1. Présentation du sujet

L'étude des documents fournis par Monsieur Demeyer [2,6,41] m'a permis de mettre à jour mes connaissances en physique nucléaire et m'a fait découvrir en quoi l'espace changeait les conditions qui existent sur terre. Dans l'espace, l'énergie nucléaire est produite par deux types de réacteurs : les réacteurs nucléaires et les réacteurs radioisotopiques. Pour l'instant, ces réacteurs sont à l'étude et divers types de fonctionnement sont proposés.

2. Choix des descripteurs

Dans un premier temps, le sujet a été séparé en deux concepts :

- celui de l'énergie nucléaire
- celui de l'espace.

Sur le thème de l'énergie nucléaire, nous avons retenu les descripteurs suivants :

Energie ou energy

Générateur ou generator

Réacteur ou reactor

Nucléaire ou nuclear

Radioisotopique ou radioisotopic

Et sur le thème de l'espace, ceux-ci :

Espace ou space

Satellite

Sonde ou probe

Fusée ou rocket

Après les premières interrogations , je me suis rendue compte que le sujet formulé ainsi était vaste et imprécis et que les termes *satellite*, *sonde* et *fusée* étaient superflus. C'est le mot *espace*, plus général, qui est utilisé. De même, le terme *générateur* n'est pas utilisé dans ce contexte, c'est le terme réacteur qui prime.

Après discussion avec Monsieur Demeyer, nous avons plus ciblé le sujet : il avait surtout besoin d'informations sur les réacteurs nucléaires et non sur les réacteurs radioisotopiques. De plus, il voulait des informations sur les combustibles utilisés et sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires.

Monsieur Demeyer souhaitait aussi dans un premier temps avoir des documents en français et selon les résultats des documents en anglais.

J'ai donc redéfini de nouveaux mots clés :

Réacteur ou reactor
Nucléaire ou nuclear
Espace ou space
Combustible ou fuel

B. Recherche manuelle

1. Contact de personnes ressource

a) Contact de Mme Jarroux, documentaliste à l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL)

Mme Jarroux m'a permis d'obtenir ce sujet de recherche bibliographique et m'a très gentiment donné accès à la bibliothèque de l'IPNL ainsi qu'aux cédéroms de l'INIS.

b) Contact d'un documentaliste du CEA

Grâce à ma collègue Axelle Monsou qui a effectué un stage au CEA de Cadarache, j'ai obtenu l'adresse e-mail d'un documentaliste de ce centre de documentation, Monsieur Emeric.

Je lui ai expliqué le sujet de ma recherche et lui ai demandé s'il avait des documents sur ce thème en sa possession. Il m'a fait parvenir quelques articles du CEA ainsi que des références provenant de la base de données de l'INIS obtenues grâce aux mots clés : nuclear - space - reactor.

2. Recherche sur l'OPAC de la bibliothèque universitaire de Lyon1

J'ai interrogé l'OPAC de la bibliothèque universitaire en faisant une recherche par descripteurs qui s'est avérée inefficace : aucun document ne correspondait à ma demande. L'équation de recherche est la suivante :

réacteur* nucléaire* et espace

Il existe cependant beaucoup d'ouvrages sur le nucléaire mais ceux-ci ne considèrent pas les applications spatiales. Cette recherche a été peu fructueuse : la BU n'étant pas du tout spécialisée dans le domaine du nucléaire, ce n'était pas le meilleur endroit pour trouver de l'information spécialisée.

C. Recherche automatisée

1. Choix et présentation des différentes bases de données

a) Choix

Pour trouver les bases de données les plus adaptées à mon sujet, j'ai, dans un premier temps, consulté le répertoire des banques de données 1996 édité par l'ADBS et le catalogue de DIALOG.

J'ai séparé les différentes bases en trois catégories :

✓ celles spécialisées en physique nucléaire

Il s'est avéré que l'une des bases les plus importantes en nucléaire était **INIS** (*International Nuclear Information System*) produite par l'IAEA (*International Atomic Energy Agency*). L'accès à cette base par le serveur DIALOG est interdit mais la version cédérom est disponible et accessible au centre de documentation de l'IPNL.

J'ai aussi, sélectionné la base **NSA** (*Nuclear Science Abstract*) (n° 109) dans le domaine du nucléaire. Malgré son arrêt en 1976, certains documents pouvaient être intéressants ; mon commanditaire n'ayant pas de limite sur la date.

La base **SPIN**(n° 62) a aussi été sélectionnée.

✓ celle spécialisée sur l'espace : Il s'agit de **Aerospace database** (n° 108)

✓ celles portant sur la physique en générale : **INSPEC**, **NTIS**, **Sci Search**, **PASCAL**(n° 4,6,434,144)

Dans un second temps, j'ai effectué une recherche des bases adéquates en interrogeant le serveur Dialog par la fonction Dialindex en précisant les domaines : *science nucléaire* (NUCSI), *défense et aérospatiale* (DEFTECH) et *énergie* (ENERGY). J'ai obtenu comme réponse la plupart des bases que j'avais déjà définies. La base n°8 Ei Comp était aussi citée mais comme elle est plus orientée sur l'aspect commercial, je l'ai supprimée.

b) Présentation

N°	2	6	144	434	108	62	109	
Base de données	INSPEC	NTIS	PASCAL	Sci Search	Aerospace database	SPIN	NSA	INIS
PRODUCTEUR	Institution of Electrical Engineers	National Technical Information Service	INIST - CNRS	Institute for Scientific Information	American Institute of Aeronautics and Astronautics et la NASA	American Institute of Physics	U.S. Atomic Energy Commission	Agence Internationale de l'Energie Atomique
DOMAINES	Physique	Physique, chimie, médecine, administration	Sciences et technique : physique, chimie, sciences et technologies, science de la terre, science de l'information, science humaine	Tous les domaines de sciences pures et appliquées	Aérospatiale, aéronautique ainsi que les applications en géophysique, physique, chimie, électronique	Physique, astronomie, astrophysique, géophysique	Sciences nucléaires, technologie des réacteurs, environnement et sciences de la terre, chimie, instrumentation	Domaine en rapport avec les applications civiles des sciences nucléaires
SOURCES	4000 journaux et périodiques, comptes rendus de conférences, livres, rapports	Inclut les résultats de recherche, de développement sponsorisés par le gouvernement américain	Articles de journaux (93%), thèses, actes de congrès, rapports techniques, monographies, brevets	4500 journaux des domaines scientifiques et techniques	Livres, rapports, comptes rendus de conférence de 40 pays, brevets, thèses	Journaux des domaines scientifiques et comptes rendus de conférence	Rapports techniques, livres, comptes rendus de conférence, articles de journaux, thèses	Articles, livres, comptes rendus de conférences, rapports de communication
VOLUME	1,8 millions en 1990	1,8 millions en 1993	11,5 millions en avril 1997	15,1 millions en 1997	2,2 millions en 1997	700 000 en 1991	950 000	1,8 millions
MISE A JOUR	Bimensuelle	bimensuelle	mensuelle	hebdomadaire	mensuelle	Mensuelle		Tous les 6 mois
PERIODE COUVERTE	Depuis 1969	Depuis 1964	Depuis 1973	Depuis 1974	Depuis 1962	Depuis 1975	1948 / 1976	Depuis 1975

2. Recherche sur cédéroms

a) Sur le cédérom PASCAL

J'ai effectué l'interrogation sur ce cédérom pour me familiariser avec ce nouvel outil dans le but d'être plus opérationnelle avec l'interrogation en ligne. En effet, nous n'avons pas ici le stress de la durée de l'interrogation et donc du coût.

En recherchant sur la période 1993-1997, avec l'équation suivante :

(li = reactor* ou réacteur* ou generator* ou générateur*)

et (li = nuclear* ou nucléaire*)

et (li = espace* ou space* ou satellite*)

je n'ai trouvé que cinq références pertinentes. La base PASCAL n'est donc pas la plus adaptée à ce sujet.

b) Sur le cédérom de l'INIS

Grâce à Dominique Jarroux, j'ai pu interroger ce cédérom spécialisé dans le domaine du nucléaire.

L'interrogation a été faite en anglais et en utilisant le thesaurus papier et l'index en ligne.

L'équation de recherche est la suivante :

(space power reactor*) and (nuclear fuel*)

Les réponses obtenues étaient des articles très spécialisés. Nous avons donc précisé que le type de document soit des revues ce qui nous a permis d'avoir de l'information moins ciblée. Les références ainsi obtenues correspondaient bien au type de documents désirés. L'interrogation a été faite sur la période 1984-1997 et sans précision de langue (en précisant le français comme langue, nous avons obtenu 0 document). Nous avons obtenu 15 références.

c) Sur le cédérom DOC THESE

J'ai interrogé ce cédérom en réseau à l'ENSSIB en précisant comme mots clés : réacteur* - nucléaire* - espace. Je n'ai malheureusement obtenu aucune réponse. Aucune thèse française ne porte sur les réacteurs nucléaires spatiaux.

3. Recherche sur le serveur de DIALOG

a) Première interrogation en ligne

La consultation des fiches techniques de Dialog permet d'étudier le vocabulaire d'interrogation propre à chaque base. L'option One Search permet d'interroger plusieurs bases simultanément à la condition que celles-ci aient le même vocabulaire. Cela permet aussi d'éliminer les doublons et d'être plus rapide.

L'ordre d'interrogation de ces bases est important car, en cas de doublons, la notice est extraite de la base ayant été citée en premier.

Le sujet de ma recherche ayant été défini très peu de temps avant la première séance de l'interrogation en ligne, j'ai commencé ma recherche avec la première liste de mots clés. J'ai d'abord sélectionné les bases en utilisant la commande One Search et en développant tous les concepts.

b 108,109,62,2,6,144,434

J'ai choisi d'interroger les bases INSPEC et PASCAL en ligne (alors que j'aurais pu consulter leurs cédéroms gratuitement à l'ENSSIB ou à l'INSA) car les cédéroms ne couvrent pas toute la période qui m'intéresse et ne permettent pas d'enlever les doublons.

L'équation de recherche est la suivante :

```
S1 = reactor? ? or generator? ? or energ?  
S2 = nuclear or radioisotopic  
S3 = space or satellite? ? or probe? ? or rocket? ?  
S4 = S1 and S2 and S3
```

Toutes les interrogations ont été suivies de la commande Remove Duplicate.

Le nombre de réponses obtenues étaient environ 6 000 ! J'ai donc modifié ma stratégie d'interrogation.

b) Deuxième interrogation en ligne

La deuxième interrogation a eu lieu après la discussion avec Monsieur Demeyer où le sujet était précisé. J'ai utilisé la seconde liste de mots clés en précisant la langue recherchée et en éliminant une cause du bruit, le concept espace-temps.

Avant l'interrogation, j'ai vérifié que toutes les bases acceptaient un langage plus élaboré. La nouvelle équation de recherche s'écrit :

S1 = space (1n) nuclear (1n) reactor? ?
 S2 = nuclear (1n) fuel? ?
 S3 = LA=french not space(w)time
 S4 = S1 and S2 and S3

L'ajout de l'élément "combustible nucléaire" permet de faire une restriction sur les articles qui portent sur le système énergétique des réacteurs nucléaires.

Le nombre de réponses a rapidement chuté. La recherche effectuée sur toutes ces bases a donné 35 réponses mais la plupart des articles étaient des années 70.

La limitation sur la langue fait que les documents obtenus restent très généraux et sont obsolètes.

c) Troisième interrogation en ligne

Les documents écrits en français n'étant pas très pertinents, j'ai réinterrogé en supprimant le critère de la langue. L'introduction du terme "conversion" a permis de limiter les réponses mais a pu supprimer certaines références pertinentes.

S1 = space (1n) nuclear (1n) reactor? ? and
 conversion? ?
 S2 = nuclear(w)fuel? ?
 S3 = not space(w)time
 S4 = S1 and S2 and S3

Le nombre de réponses obtenus est de 39.

Le nombre de réponses par types de bases est donné dans un tableau récapitulatif dans la partie E.

D. Recherche sur l'Internet

1. Recherche à partir d'URL

Le thème de cette recherche bibliographique faisant référence au nucléaire et à l'espace, je suis allée "visiter" les pages de plusieurs organismes dont j'avais noté les adresses.

a) La nasa : <http://www.nasa.gov>

J'ai parcouru ce site qui, quoique très intéressant, possédait très peu de renseignements sur les moyens employés lors d'envois de fusées ou de satellites dans l'espace.

Par contre, je suis arrivée sur le serveur de la bibliothèque de la Nasa qui contient un nombre impressionnant de références. Son adresse est : <http://techreports.larc.nasa.gov/cgi-bin/NTRS> et sa description est donnée en annexe.

J'ai sélectionné plusieurs bases :

- Goddard Technical Report Server qui couvre les domaines des vols spatiaux, de la recherche dans l'espace et des sciences.
- Nasa Jet Propulsion Laboratory dont le domaine d'étude est la science de l'espace. De plus, plusieurs articles que j'avais déjà obtenus provenaient de ce laboratoire.
- Nasa Lewis Center spécialisé dans l'aérospatial et dans la science de la propulsion.
- NACA report qui contient des documents en texte intégral sur les sciences.

J'ai utilisé comme mots clés : space and nuclear and reactors and conversion.

J'ai obtenu 250 réponses. Cependant, les références ne sont pas toujours complètes : on a le titre, l'auteur, la date, un résumé et/ou la source. De plus, les temps de réponses pour obtenir les références une à une sont très longs et le nombre de références téléchargées est limité à 10 par jour. C'est un inconvénient par rapport à Dialog.

J'ai reformulé ma question en ajoutant différents mots :

- fuels : le nombre de réponses est passé à 211
- electronuclear : j'ai obtenu deux références qui correspondaient à des documents écrits par des français et qui étaient des doublons [47,48].

Il était difficile de préciser plus car le sujet est assez général. J'ai quand même ajouté le mot concepts qui a certainement éliminé des articles pertinents parmi les 250. J'ai obtenu 40 réponses dont la moitié étaient des doublons.

Cette base de données est sans doute la plus adaptée à ce sujet de recherche bibliographique. J'y ai retrouvé la plupart des références de Dialog. Le problème est qu'il faut commander les articles directement à la Nasa quand la référence n'est pas complète.

b) Le cnes : <http://www.cnes.fr>

J'ai interrogé la base de données du CNES qui ne m'a donnée aucune référence intéressante. J'ai, quand même laissé un message sur leur serveur. A ma surprise, le CNES m'a recontacté et m'a envoyé plusieurs documents concernant la propulsion des lanceurs : ces documents étaient intéressants mais ne concernaient pas directement les réacteurs nucléaires.

c) Le cea : <http://www.cea.fr>

Le site du CEA permet d'accéder à différents catalogues : chaque CEA possède son propre centre de documentation et ses propres références.

L'interrogation de ces catalogues peut se faire en langage naturel. L'équation de recherche est la suivante :

(réacteur ou réacteurs) et nucléaire et espace

J'ai , ainsi , obtenu 91 références. Il est cependant difficile d'évaluer la pertinence de ces documents puisque l'on a accès uniquement au titre et à l'auteur, aucun résumé n'est disponible et il est impossible d'obtenir les références complètes

si on ne commande pas les articles. J'ai ,quand même, sélectionné cinq documents dont le titre correspondait précisément à mon sujet.

d) **Doc'INSA** : <http://www.insa-lyon1.fr>

L'INSA étant connu comme un des plus grands centres de documentation scientifique, je suis allée visiter leur site. Cela m'a permis de consulter le catalogue de Doc'INSA et de trouver quelques références pertinentes mais aussi d'accéder aux signets de Sapristi portant sur le nucléaire. Cette méthode a été très efficace, j'ai, en effet, trouvé des sites universitaires spécialisés en nucléaire

Si l'intuition nous guide sur ces pages, on ne sait évidemment pas sur quoi on va arriver. Ces recherches restent donc très aléatoires, et c'est par chance que l'on trouve ce que l'on cherche. Cependant, cela permet d'illustrer l'hétérogénéité des sites existants sur Internet et de trouver le nom de personnes à contacter ce qui est aussi très appréciable.

2. Recherche à l'aide des moteurs de recherche

J'ai utilisé plusieurs moteurs de recherche : Altavista, Magellan , Yahoo, et Infoseek en interrogeant avec les mots clés : space and nuclear and reactors.

Je me suis vite rendue compte que ce n'était pas le moyen le plus rigoureux pour effectuer de telle recherche puisque très rapidement on tombe dans le piège de l'hypertexte qui nous éloigne peu à peu du problème initial. Il faut rester très concentré pour ne pas se perdre dans l'immensité d'Internet.

Quand on interroge un moteur, on croit que l'on va trouver beaucoup de renseignements vu le nombre de réponses. Mais, ce n'est malheureusement rarement le cas : certes, il y a beaucoup d'information mais celle-ci reste trop générale et parfois hors de propos. Ce n'est donc pas le meilleur moyen pour trouver de l'information scientifique très spécialisée. Cependant, il existe de nombreux catalogues de banques de données (leurs adresses sont données en annexes).

De plus, les différents moteurs de recherche ne donnent pas les mêmes résultats : Yahoo et Infoseek ne m'ont pratiquement rien apportés ; par contre Altavista et Magellan ont donné quelques sites pertinents : j'ai, en effet, trouvé un rapport déclassé de l'université de Californie correspondant à mon sujet [10], quelques pages d'université et un article écrit par une équipe de recherche russe (les URL sont données en annexe).

J'ai accéder par altavista en interrogeant avec catalogue and nuclear au site de **uncovered** (catalogue de bases de données) et j'ai pu interroger gratuitement une banque spécialisée dans le nucléaire qui m'a donnée 11 références dont la plupart étaient des doublons. Mon équation de recherche étaient : space and nuclear and reactors and conversion. Ici, les références sont

complètes et un résumé de l'article est disponible ce qui est très appréciable. Sur les 11 références, 6 étaient pertinentes ; les autres concernaient le problème de la sécurité nucléaire dans l'espace.

3. Recherche de preprints

Le site de l'INSA m'a fourni plusieurs points de départ pour cette recherche. J'ai interrogé plusieurs sites de préprints qui donnent accès à des banques de donnée. La base de données de préprint du CERN, Alice, est très volumineuse et fait référence en la matière. J'y ai trouvé de nombreuses notices concernant le nucléaire mais peu correspondaient à mon sujet. Les autres adresses intéressantes sont données en annexes.

E. Bilan des références obtenues

Nom de la base	Nombre de notices	Nombre de notices pertinentes	doublons	bruit (%)	Nombre de notices retenues
INSPEC	14	8	0	42	8
NTIS	7	4	0	43	2
Pascal	6	4	1	33	3
Sci Search	0	0	0	0	0
NSA	13	7	0	22	5
Aerospace	46	41	0	11	32
INIS	16	15	0	6	9
Internet	60?	50	30?	?	20
Total	117	94	31?	20?	78

(1) Quelques remarques

✓ Sur Internet , je n'ai gardé que les notices pertinentes vues le nombre de références. Il est difficile d'évaluer le nombre de références provenant d'Internet car souvent les références ne sont pas complètes et difficilement exploitables.

✓ Le bruit provient essentiellement d'articles anciens (années 1970) mais aussi d'articles traitant des matériaux constituant les réacteurs, de la sécurité nucléaire dans l'espace et des brevets.

✓ Toutes les références pertinentes n'ont pas été retenues. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer :

- la langue ; plusieurs documents étaient écrits en japonais, suédois ou allemand.
- les documents concernaient le même thème sans être des doublons et mon commanditaire a estimé avoir assez d'articles sur ce sujet.
- l'article portait sur un sujet "limite".

✓ Il est à noter que 70% des articles proviennent de rapports ou de comptes-rendus de conférence.

✓ L'analyse des documents primaires obtenus montre que l'intérêt des scientifiques sur le nucléaire et l'espace peut se diviser en deux périodes :

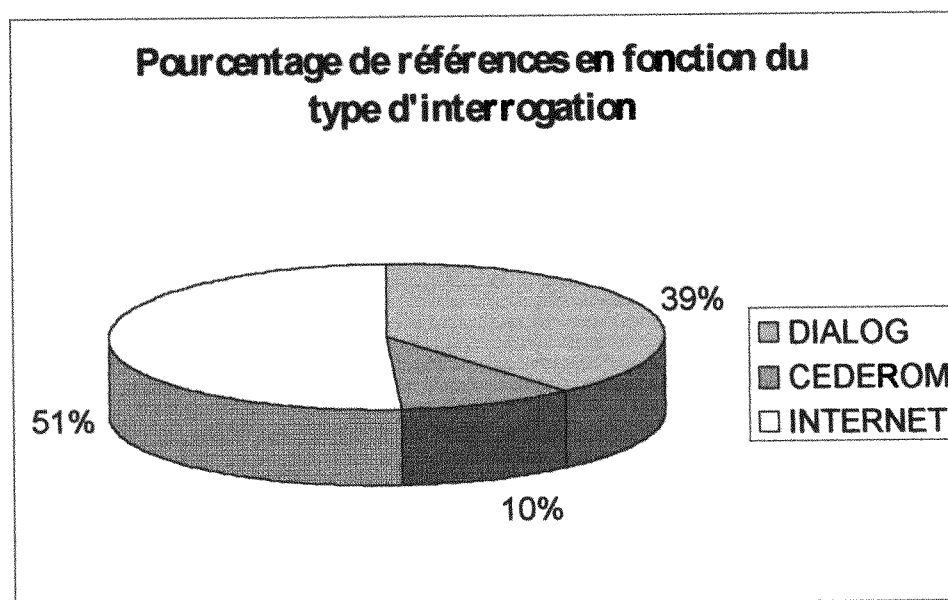
- de 1965 à 1975 : les documents sont très nombreux puisque c'est le début de ces recherches et de l'aventure de l'homme dans l'espace. On trouve aussi des documents écrit en français ce qui n'est plus le cas après.

- de 1985 à 1997 : les documents portent essentiellement sur les divers types de réacteur.

Entre ces deux périodes les documents sont plus rares.

✓ En consultant les bibliographies des documents primaires, j'ai retrouvé une partie des références citées. Une bonne méthode est donc de partir de la bibliographie d'un document synthétique. Cela peut permettre de gagner du temps...

(2) analyse des références obtenues en fonction du type d'interrogation

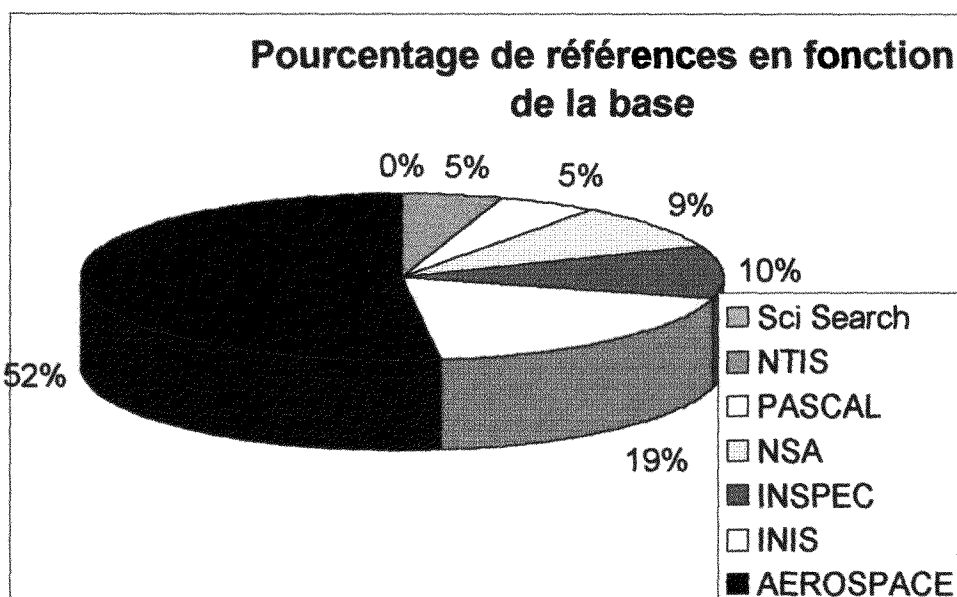
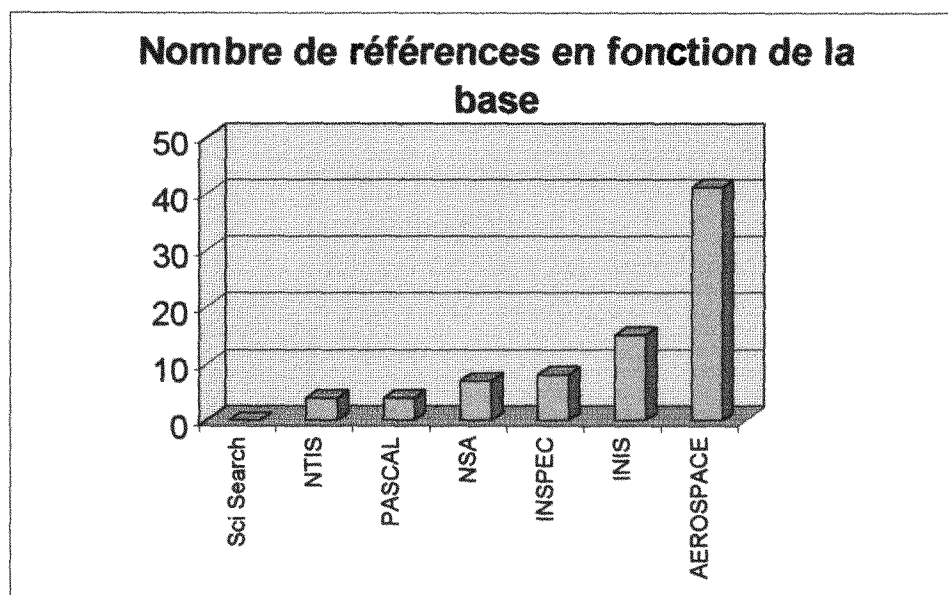


Une majorité de références a été obtenue grâce à Internet. En effet, j'ai retrouvé 75% des références de Dialog sur le serveur de la Nasa. J'aurai donc dû commencer par interroger ce serveur !

L'Internet permet d'interroger de nombreuses bases de données et de trouver des références mais celles-ci ne sont pas toujours directement exploitables : le nom de la revue et la pagination ne sont pas toujours précisés ainsi que le résumé de l'article. Il est difficile de commander un article en connaissant uniquement le titre !

Le nombre d'articles directement accessibles en ligne est très limité. Je n'ai trouvé qu'un rapport déclassé et un article (annexe 2).

(3) Comparaison des bases de DIALOG ou de cédérom:



On peut remarquer que l'interrogation de Sci Search s'est avérée inutile.

La majorité des références a été trouvée sur la base Aerospace ce qui prouve que les bases orientées sur "l'espace" étaient les plus adaptées au sujet (cela concorde avec le bon résultat de la base de la Nasa). Les bases spécialistes du nucléaire ont donné seulement 28% des références alors qu'au départ, j'avais pensé que c'étaient les plus intéressantes. Il faut cependant remarquer que l'interrogation sur le cédérom de l'INIS n'a pas été faite avec la même équation de recherche que sur Dialog puisqu'un autre type de documents était recherché. Cela explique en partie aussi la différence des résultats.

F. Recherche des documents primaires

La recherche de la localisation des documents primaires a été effectuée sur le cédérom Myriade qui est en réseau à l'ENSSIB.

La bibliothèque universitaire de Grenoble possédait une partie des documents recherchés ainsi que Doc'Insa. L'autre partie était disponible uniquement à l'INIST.

G. Conclusion

1. Bilan

Ce sujet m'a fait découvrir un aspect de la physique que je ne connaissais pas auparavant et qui est vraiment très intéressant. La "conquête de l'espace" est un sujet qui est actuel (exploration de Mars grâce à Pathfinder en septembre 1997) et qui fait rêver. J'ai, grâce à ce sujet, découvert la "face cachée" de ce rêve : la technologie de pointe des réacteurs qui permet de passer du rêve à la réalité.

Cette recherche bibliographique m'a fait comprendre les difficultés liées à l'obtention d'informations parmi les différents moyens mis à notre disposition. Internet est un outil documentaire très puissant et redoutable puisque l'on se perd facilement dans ses méandres. Dialog demande d'être très rigoureux ce qui est difficile car le temps (et donc le coût) est compté...

La documentation occupe une place très importante dans le monde scientifique et constitue le point de départ pour de nouvelles recherches même si son importance est souvent trop peu reconnue.

2. Evaluation du coût et du temps de la recherche

Les temps d'interrogation des différents cédéroms sont donnés dans le tableau suivant :

	Pascal	INIS	Doc'Thèse	Myriade
Temps de connexion	1h	1h	30mn	30mn

La consultation des cédéroms m'a pris trois heures.

Par contre, la recherche sur Internet a été plus longue, environ 15 heures.

La recherche manuelle s'évalue à une demi journée.

Le temps passé pour la préparation et l'interrogation de DIALOG est de 5h.

Au total, le travail de recherche seul est de 27h

Seule la recherche sur DIALOG est payante. Le tableau présente les temps et les coûts de la deuxième et de la troisième connexion. En effet, lors de la première

connexion , je n'ai pas pu obtenir le détail puisque la ligne a été coupée. Le temps passé était de 0.905 h.

Coût au tarif normal

(calculé à partir des tarifs donnés sur le site Internet de DIALOG :
<http://www.dialog.com>)

Base de données	INSPEC	NTIS	PASCAL	Sci Search	Aerospace database	SPIN	NSA
Temps de connexion en heure	0.035	0.030	0.015	0.017	0.205	0.007	0.20
Prix/h (\$)	60	45	45	45	45	45	45
Coût de la connexion (\$)	2.1	1.35	0.675	0.765	9.225	0.315	9
Nombre de références téléchargées	14	7	1	0	46	1	13
Prix par unité (\$)	1.85	1.75	1.4	2.1	1.35	1.25	1.5
Coût des références (\$)	25.9	12.25	1.4	0	21.6	1.25	19.5
Coût total (\$)	28	13.6	2.075	0.765	30.825	1.565	28.5

Soit un coût total de 105.33 \$, ou 632 F

III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

A. Introduction

L'énergie nucléaire, nouvelle source d'énergie, est produite par la fission du noyau d'uranium[6]. Lors de cette fission, le noyau émet plusieurs neutrons qui vont alimenter une réaction en chaîne. Cette réaction est utilisée dans les réacteurs des centrales nucléaires : la chaleur produite est utilisée pour produire et chauffer de la vapeur d'eau, actionnant avec elle une turbine dont l'axe fait tourner un alternateur produisant ainsi de l'électricité.

Les engins spatiaux (satellite, sonde, ...) ont besoin d'énergie électrique pour fonctionner[5]. Nous pouvons donc nous demander comment cette énergie pourrait être produite dans l'espace.

En quoi l'énergie nucléaire est-elle une réponse à l'alimentation en énergie des missions spatiales ?

Dans une première partie, nous verrons les solutions qui existent actuellement pour produire de l'électricité dans l'espace puis, nous étudierons le fonctionnement des différents types de générateurs nucléaires.

B. La production d'électricité dans l'espace

Les différents types de générateurs électriques se caractérisent par leur durée de vie et par leur puissance. Le schéma ci-dessous illustrent la répartition des ces générateurs selon ces deux caractéristiques.[41]

✓ Les générateurs chimiques :

- Les turbogénérateurs : ils utilisent un combustible liquide comme l'ergol par exemple. Ils fournissent une puissance électrique élevée mais leur autonomie ne dépassent pas quelques heures. Ils sont utilisés pour des manœuvres de courte durée.

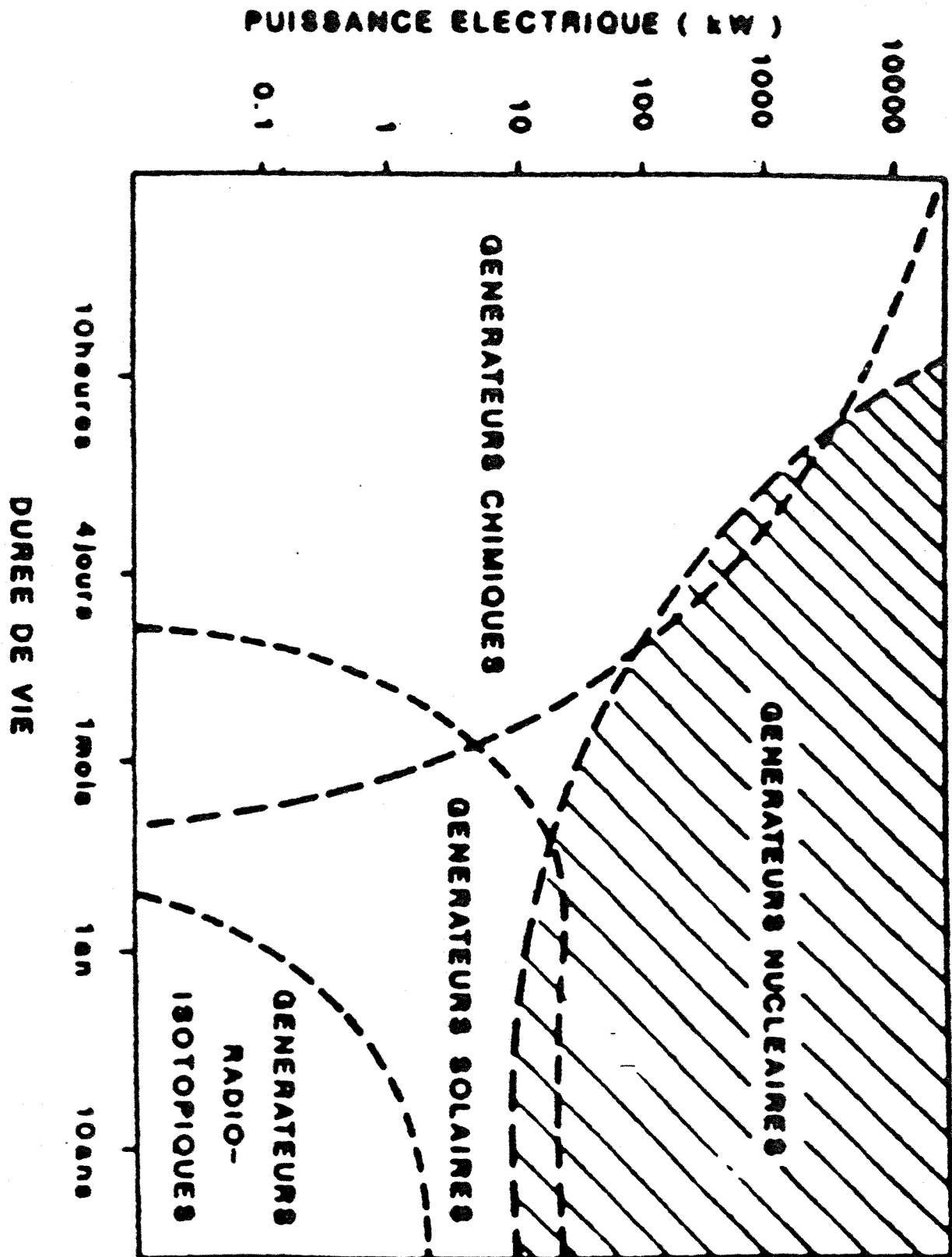
- Les piles à combustibles : elles utilisent de l'hydrogène et de l'oxygène sous forme liquide cryogénique. Leur autonomie est limitée à quelques semaines et fournissent au maximum une puissance de 6.5 kWe. Elles sont utilisées dans les navettes spatiales pour fournir en continu la puissance de bord.

✓ Les générateurs solaires :

- Les générateurs photovoltaïques : ils sont utilisés par la plupart des satellites actuels. Ils sont constitués de cellules photovoltaïques au silicium montées sur des panneaux déployés lorsque le satellite se trouve en orbite. Leur puissance est de 20 à 30 kWe mais ils sont lourds, encombrants et très fragiles.

Utilisation de l'énergie nucléaire dans l'espace

- Domaine d'utilisation des différents types
de générateurs électriques spatiaux selon leurs puissances
et leurs durées d'autonomie.



•Les générateurs solaires à miroirs tournants: ils peuvent fournir des puissances élevées (20 à 100 kWe). Leur fonctionnement est basé sur un dispositif qui concentre l'énergie solaire grâce à des miroirs. Cette énergie chauffe un fluide qui se détend dans une turbine et entraîne un alternateur. Ces générateurs restent à développer.

✓Les générateurs utilisant un combustible nucléaire :

•Les générateurs radioisotopiques : ils utilisent une source radioactive (du plutonium 238 [78]) dont la chaleur est transformée en électricité grâce à des couples thermoélectriques. Leur puissance est au maximum de 250 We, leur autonomie est de 10 à 20 ans. Leurs inconvénients sont tout d'abord leur coût mais aussi le risque radiologique créé par la mise en œuvre du plutonium 238 en quantité importante dès qu'est visée une puissance électrique supérieure à quelques kWe.

•Les générateurs électronucléaires [13,19]: ils permettent d'obtenir une puissance et une autonomie élevées. Ce sont ces réacteurs que nous allons étudier plus particulièrement puisqu'ils semblent adaptés à des missions de longues durées comme une exploration de Mars.

C. Différents modes de fonctionnement des réacteurs nucléaires

Un générateur nucléaire est constitué des mêmes éléments qui existent dans une centrale nucléaire [30,11]:

- ✓un réacteur nucléaire, constituant la source chaude du système
- ✓un système de conversion d'énergie, transformant une partie de la chaleur nucléaire en électricité
- ✓une source froide, dissipant dans l'environnement la chaleur non transformée en électricité.

Le réacteur est refroidi par circulation d'un fluide caloporteur transportant la chaleur libérée dans le cœur jusqu'au système de conversion d'énergie.

Le système de propulsion électronucléaire consiste à utiliser un moteur électrique alimenté par un réacteur nucléaire [11]. Les types de conversion électronucléaire ou de propulsion seront classés selon trois critères :

- l'état du combustible : solide ou gazeux [80]
- l'état du caloporteur: métal liquide ou gazeux
- le type de conversion : statique ou thermodynamique

Une caractéristique importante est la masse spécifique par kWe. Un tableau comparatif de ces masses sera donné dans la dernière partie.

L'article [11] développe différents types de réacteurs. Nous allons en étudier seulement un ou deux exemples pour chaque catégorie.

1. Combustible solide - métal liquide caloporteur - conversion thermodynamique

Le SP - 100 scale up [43] appartient à cette catégorie de réacteur. Il fait parti du programme américain portant sur les réacteurs spatiaux. Sa puissance est de l'ordre de 2.4 MWth, il est donc adapté pour une mission sur Mars. Ce système est prévu pour fonctionner au minimum sept ans à la puissance maximale et les trois années suivantes à une puissance partielle. Cette durée de vie peut être prolongée encore par l'ajout de combustible ou par l'augmentation de la taille du réacteur.

La masse spécifique par kWe de ce réacteur est évaluée à 7kg/kWe à 10 MWe. La température à la sortie du réacteur est de 1375 K. Le liquide de refroidissement utilisé est le lithium.

La conversion est ici produite par des turbomachines à cycle de Rankine (typique dans les centrales nucléaires) en circuit fermé dans lesquelles le caloporteur se recondense en fin de cycle. Elles comprennent :

- une turbine entraînant un alternateur ,
- un condenseur à la sortie de la turbine
- et une pompe de recirculation du fluide condensé.

2. Combustible solide - caloporteur gazeux - conversion thermodynamique

C'est le concept du "Pellet Bed" [45,11]. A cause des billes de combustibles, entassées entre la paroi externe et la paroi interne, le cœur n'a pas de structure interne. Le combustible est sous la forme de billes contenant des centaines de particules protégées par une couche de ZrC. Ces particules sont des grains de UC-NbC.

La grande surface de transfert de chaleur conduit à une température élevée à la sortie du réacteur. Le refroidissement se fait par de l'hydrogène qui amène la température à 1800K. La masse spécifique est estimée à 6 kg/kWe à 10MWe.

La conversion de l'énergie est faite par le cycle fermé de Brayton à hélium (comprenant deux adiabatiques et deux isobares sans changement d'état) : l'hélium refroidit directement le réacteur. Dans les turbomachines à cycle de Brayton [50], le fluide de travail reste à l'état gazeux : une turbine à gaz entraîne un alternateur et un compresseur pour la recirculation du gaz dans la boucle.

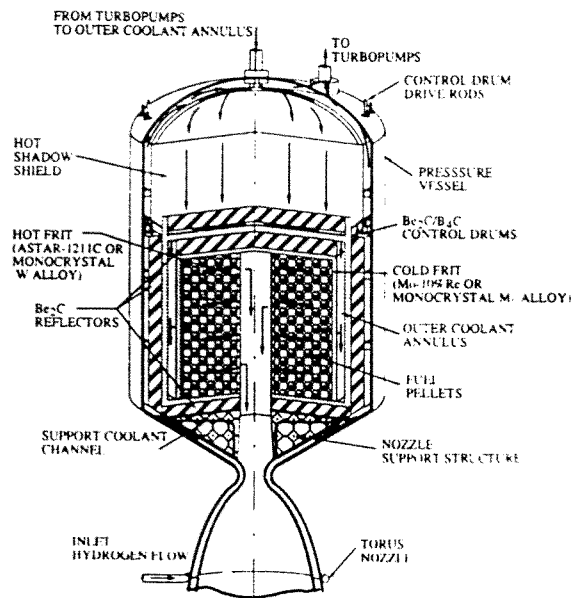


Fig. 1. Vue longitudinale du "pellet bed" du réacteur [45]

3. Combustible solide - caloporteur liquide - conversion statique

C'est la conversion thermoionique interne au cœur [11,56,60]. Le système est refroidi grâce au métal liquide NaK (22% de sodium et 78% de potassium). Une pompe électromagnétique permet la circulation du caloporteur à travers le réacteur et les radiateurs. Le combustible utilisé est le UO_2 sous forme de bille. La masse spécifique de ce système est évaluée à 4 kg/kWe à 6.5 MWe.

TORCHLITE est un réacteur nucléaire qui utilise le mode de conversion thermoionique.

La conversion thermoionique [55] est le phénomène de transformation directe de la chaleur en électricité. Elle suscite l'intérêt des scientifiques qui recherchent une source d'énergie compacte, fiable et puissante pour des applications particulièrement exigeantes dans l'espace ou au fond des océans. La conversion thermoionique provient de la circulation sous vide des électrons émis entre deux parois chauffées à des températures différentes et reliées par l'extérieur.

Les avantages de ce dispositif sont multiples :

- ce système est entièrement statique ce qui permet d'éviter les "méfais" gyroscopiques;
- la chaleur non convertie peut être récupérée par un système installé en amont;
- le système de conversion peut être intégré au réacteur pour une meilleure compacité.

L'application de ce type de réacteur nucléaire est TOPAZ II, acronyme russe pour thermoélectronique expérimental, conversion en zone active[68,64,54].

Sa conception commence en 1960 pour s'achever en 1989. TOPAZ II est initialement prévu pour opérer pendant un an avec une puissance de 6kWe.

Il utilise un système de conversion thermoionique unicellulaire ou pluricellulaire[62]. Il est compact : 3.9m de haut pour un diamètre de 4m. Le réacteur est constitué d'un bloc modérateur (Be) contenant le combustible (27 kg d'UO₂ à 96%) et d'un réflecteur (ZrH). La puissance thermique convertie est maintenue constante à 6kWe. Trente sept barreaux thermoioniques convertissent directement la chaleur nucléaire en électricité [81]. L'émetteur et le collecteur sont coaxiaux et les électrodes sont reliées entre elles.

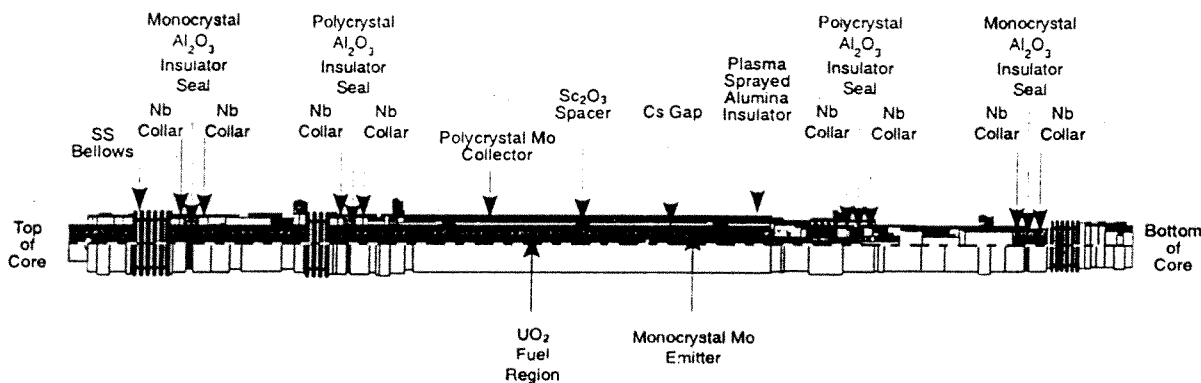


Fig. 2. Schéma descriptif du convertisseur thermoionique de TOPAZ II

4. Combustible gazeux - caloporteur liquide - conversion statique

C'est le concept du réacteur au cœur gazeux [11].

Le combustible existe à l'état gazeux dans le cœur du réacteur où il est immédiatement mélangé avec le liquide caloporteur. Le combustible utilisé est le UF₄ sous forme vapeur avec un fluorure alcalin comme liquide caloporteur. La température à la sortie du réacteur est de 4000 K. Deux mécanismes existent :

- la conversion se fait par un système magnétohydrodynamique : la circulation d'un fluide à une vitesse v sous un champ magnétique provoque une différence de potentiel transversale et donc un courant [71],
- la chaleur dégagée par les radiations chauffe de l'hydrogène qui est ensuite expulsé par une tuyère convertissant ainsi directement l'énergie thermique en "poussée"[73].

La masse spécifique de ce système est évaluée de 3 à 8 kg/kWe pour un mode d'explosion compris entre 10 et 70 MWe.

L'avantage de ce système est que contrairement aux réacteurs utilisant un combustible solide, ceux-ci n'ont pas de limite en température car le combustible peut exister à des températures très élevées (10 000 à 100 000 K) [73].

Le coût d'envol d'éléments dans l'espace étant prohibitif, il est nécessaire d'explorer tous les moyens permettant de diminuer la taille et le poids des réacteurs spatiaux. Le réacteur à cœur gazeux est un réacteur compact et léger. Il est actuellement étudié par plusieurs équipes.

D. Comparaison des masses spécifiques en fonction du type de réacteur

Type du réacteur nucléaire	Masse spécifique en kg/kWe	Température à la sortie du réacteur en K
SP - 100 scale up	7	1375
Pellet bed	6	1800
Topaz II	4	1700
Cœur gazeux	3 à 8	10 000 à 100 000

E. Conclusion

Un réacteur nucléaire doit donc être compact (il doit tenir sous la coiffe du lanceur), fiable (problème de sécurité), léger (problème de coût).

Le problème de la conversion de la chaleur nucléaire en électricité n'est pas encore résolu. De nombreux systèmes sont expérimentés mais il est difficile de prévoir quel système sera utilisé dans les années à venir. Pour développer notre connaissance de "l'espace" et donc effectuer des missions de longue durée, il faudra trouver des solutions pour obtenir des sources d'énergie électrique spatiales puissantes et de grande autonomie [4,2].

IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Format des références

Les références bibliographiques sont présentées en appliquant la norme française Z44-005.

Classement des références

Les références sont classées par thème et selon l'ordre de citation du thème dans la synthèse.

Une partie intitulée "combustibles nucléaires" regroupe les articles portant sur les combustibles des réacteurs à conversion thermodynamique ou statique.

A l'intérieur de chaque thème, les références sont classées par ordre alphabétique du nom du premier auteur.

Généralités

- [1] **BOUZAT, A.** L'énergie atomique. *Paris : Presses universitaires de France, 1957, collection Que sais-je?, 127 p.*
- [2] **DESCHAMPS, L.** Energie électrique et espace. *L'onde électrique, 1992, n°115, p. 22*
- [3] **FREEMAN, D.** Les sondes spatiales du 21^{ème} siècles. *Pour la science, 1998, dossier hors série n°18, p. 125-130*
- [4] **POULIQUEN, M.** La propulsion des véhicules spatiaux. *Pour la science, 1998, dossier hors série n°18, p. 118-124*
- [5] **REPAIROUX, A.** Nuclear reactors in space. *La Recherche, 1983, vol.14, n°146, p. 977-979*
- [6] **TUBIANA, M., DAUTRAY, R.** La radioactivité et ses applications. *Paris : Presses universitaires de France, 1996, collection Que sais-je?, 126 p. ISBN 2 13 047908 1*

Production d'électricité dans l'espace

- [7] **AFTERGOOD, S., HAFEMEISTER, D., PRILUTSKY, O.** Nuclear Power in Space. *Scientific american, 1991, vol.264, n°6, p. 42*
- [8] **ANGELO, J.A., BUDEN, D.** The nuclear power satellite (NPS) - Key to a sustainable global energy economy and solar system civilization. In : *Proceedings of the 2nd International Symposium, Gif-sur-Yvette, France, 27-30 Aug. 1991*. New York : American Institute of Physics , 1991, n°217, p. 117-124
- [9] **BAIRIOT, H., CHARLES, R., DE MYTTENAERE, P. et al.** Conception et étude d'un réacteur nucléaire de faible puissance destiné à la propulsion spatiale. In : *Congres international aeronautique, 9th, Paris, France, Jun. 2-4, 1969*. Paris : Association française des ingénieurs et techniciens de l'aeronautique et de l'espace, 1969, 33 p.
- [10] **BALCOMB, J.D., BOOTH, L.A., COTTER, T.P. et al.** Nuclear pulsed space propulsion systems [On-line]. *Los Alamos : Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1970, 28 p.* Rapport technique disponible sur internet : <URL : <http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00384887.pdf>>
- [11] **BARNETT, J.W.** Nuclear electric propulsion technologies. In : *8 th Symposium on Space Nuclear Power, Albuquerque, USA, 6-10 Jan. 1991*. New York : American Institute of Physics , 1991, n°217, pt.2, p. 511-523

- [12]**BENNETT, G.L., HEMLER, R.J.** Status report on the U.S. space nuclear program. In : *International Astronautical Congress, 46th, Oslo, Norway, 2-6 Oct 1995*. Oxford : Pergamon Press, 1995, 12 p.
- [13]**BLANC, P., CONTZEN, J.** Propulsion d'engins spatiaux au moyen d'un réacteur nucléaire de faible puissance. In : *International Astronautical Congress, 20th, Mar del Plata, Argentina, 5-10 October, 1969*. Oxford : Pergamon Press, 1972, p. 297-308
- [14]**BRANDHORST, H.W., SOVIE, R.J.** *Nuclear technology and the space exploration missions*. Cleveland (USA) : NASA Lewis Research Center, 1990. 11 p. Rapport d'étude n° NASA-TM-103156
- [15]**BUDEN, D.** Summary of space nuclear reactor power systems. In : *10th Symposium on Space Nuclear Power, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1993, 65 p.
- [16]**BUDEN, D., ZUPPERO, A., REDD, L.** *Mission needs and system commonality for space nuclear power and propulsion*. Idaho Falls (USA) : EG and G Energy Measurements, 1993. 7 p. Rapport d'étude n° DE93-016557
- [17]**CAUSSE, J.P.** L'électricité et les télécommunications dans les véhicules circulant dans l'espace. *Revue générale de l'électricité*, 1967, vol.76, p. 486-493
- [18]**CLARK, J.S.** Nuclear propulsion technology development - A joint NASA/Department of Energy project. In : *Mars: Past, present, and future, Williamsburg, USA, 16-19 July 1991*. Washington (USA) : AIAA, 1991, p. 225-237
- [19]**DELAPLACE, J., BLIN, J.** *Etude préliminaire d'un réacteur nucléaire spatial*. Paris (France) : International Astronautical Congress, 1982. 6 p. Rapport d'étude n°IAF PAPER 82-406
- [20]**EL-GENK, M.S.** Space Technology and Applications International Forum. In : *13th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 7-11 Jan. 1996*. New York : American Institute of Physics, 1996, n°361, pt. 3, 657 p.
- [21]**EL-GENK, M.S.** Space nuclear power systems. In : *Second Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 14-16 Jan. 1985*. New York : Orbit Book Co., 1987, vol. 3, 192 p.
- [22]**ITAGAKI, M., BREBBIA, C.** Space-dependent core/reflector boundary conditions generated by the boundary element method for pressurized water reactors. *Nuclear science and engineering*, 1991, vol.107, n°3, p. 246
- [23]**JACKSON, W., HULL, D.** *Aerospace power systems and power conditioning*. Washington : intersociety energy conversion engineering conference, 1989. 661 p. Rapport d'étude n° LA-UR-89-1452
- [24]**KOENIG, D.R., RANKEN, W.A., SALMI, E.W.** Heat pipe reactors for space power applications. In : *Conference on the Future of Aerospace Power Systems, St. Louis, USA, 1-3 Mar. 1977*. 9 p.

- [25]**KUSPA, J.P., WAHLQUIST, E.J., BITZ, D.** *Important technology considerations for space nuclear power systems*. Washington (USA) : Department of Energy, 1988. 28 p. Rapport d'étude n° DE89-004005
- [26]**NELSON, P., SCHERT, W., TILL, R.** *Aerospace power systems*. Reno : Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990. 603 p. Rapport d'étude n°LA-UR-90-2651
- [27]**POHER, C.** *Remorqueur interorbital électronucléaire pour la fin des années 90*. Paris (France) : International Astronautical Congress, 1982. 8 p. Rapport d'étude n° 82-405
- [28]**POLANSKY, G.** Comparison of selected nuclear thermal propulsion concepts. In : *Conference on Advanced SEI Technologies, Cleveland, USA, 4-6 Sept. 1991*. Washington (USA) : AIAA, 1991, 15 p.
- [29]**SCHULZE, N.R.** *Fusion energy for space missions in the 21st Century*. Washington : NASA, 1991. 477 p. Rapport d'étude n° NASA-TM-4298
- [30]**SCHWARZE, G.E.** *Overview of space power electronic's technology*. Albuquerque : 7th Symposium on Space Nuclear Power, 1990. 8 p. Rapport d'étude n°ELDO-PUBL-21
- [31]**SLATER, S.M., KLEIN, A.** Limits to power system growth (design of space nuclear reactors). In : *10th Symposium on Space Nuclear Power, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1993, pt.2, p. 11-20
- [32]**TILLIETTE, Z.P., DELAPLACE, J., PROUST, E.** Brayton cycle conversion and additional French investigations on space nuclear power systems. In : *Space nuclear power systems ; Proceedings of the 8th Symposium, Albuquerque, USA, 6-10 Jan. 1991*. New York : American Institute of Physics, 1991, n°217, pt. 1, p. 26-31
- [33]**TRUSCELLO, V.C.** Power reactors in space. *Modern power systems*, 1990, vol.10, n°9, p. 25
- [34]**WEBB, B.J.** *Advanced thermal management systems for lunar and Mars mission needs*. Seattle : Umpqua Research Co., 1992. 7 p. Rapport d'étude n° SAE PAPER 921363
- [35]**WETCH, J.R.** *Megawatt Class Nuclear Space Power Systems (MCNSPS) conceptual design and evaluation report*. San Jose : Space Power Inc., 1988. 143 p. Rapport d'étude n° NASA-CR-179614-VOL-2
- [36]**WINTER, J.M.** *The NASA CSTI High Capacity Power Program*. Cleveland : National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center, 1992. 18 p. Rapport d'étude n° NASA-TM-105240

Conversion dynamique

- [37] **ANDERSON, P.** Power distribution study for 10-100 kW baseload space power systems. In : *IECEC-90; Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion, Reno, USA, 12-17 Aug. 1990*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1990, p. 428-433
- [38] **BRYZGALOV, V.I., GLOUCHKOV, A.E., GLOUCHKOV, E.S. et al.** Verification of the MCU code on small-size space reactor. In : *PHYSOR96 : international conference on the physics of reactor 1996, Mito, Japan, 16-20 sept. 1996*. Tokyo : Atomic Energy Society of Japan, 1996, vol.2, p. C/138-C/147
- [39] **DEAN, V.F., EL-GENK, M.S.** *Heat Pipe Space Nuclear Reactor Design Assessment*. Albuquerque : Dept. of Chemical and Nuclear Engineering, 1985. 52 p. Rapport d'étude n° NE-101 (85) AFWL-144-1
- [40] **DEARIEN, J.A., WHITBECK, J.F.** Multi-megawatt Space Power Reactors. *Space power*, 1990, vol.9, n°4, p. 325
- [41] **DELAPLACE, J., POHER, C.** ERATO : un réacteur nucléaire pour l'espace. *Clefs CEA*, 1987, n°5, p. 17-27.
- [42] **DUDEHOFER, J.E., WINTER, J.M., ALGER, D.** *Progress update of NASA's free-piston. Stirling space power converter technology project*. Cleveland : National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center, 1992. 12 p. Rapport d'étude n° NASA-TM-105748
- [43] **JOSLOFF, A.T., MATTEO, D.N., BAILEY, H.S.** SP-100 space reactor power system readiness and mission flexibility. In : *10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Physics, 1993, n°271, pt.1, p. 229-236
- [44] **MOLLENDORFF, U., GOEL, B.** *Emerging nuclear energy systems 1989*. Karlsruhe : International conference on emerging nuclear energy systems; 1989. p. 337-352. Rapport d'étude n°ESA-SP-398
- [45] **MORLEY, N.J., EL-GENK, M.S.** Thermal-hydraulic analysis of the pellet bed reactor for nuclear thermal propulsion. *Nuclear engineering and design*, 1994, vol.149, n°3, p. 387-400
- [46] **POHER, C., CACHEUX, J., BLIAUX, M., TILLIETTE, J. et al.** Space electronuclear generators - Comparison between different kinds of energy conversion methods. In : *International Astronautical Federation, International Astronautical Congress, 35th, Lausanne, Switzerland, 7-13 Oct. 1984*. Oxford : Pergamon Press, 1984, 5 p.
- [47] **POHER, C., DELAPLACE, J.** Space electronuclear generators for new and ambitious long term applications - The French approach. In : *International Astronautical Congress, 36th, Stockholm, Sweden, 7-12 Oct. 1985*. Oxford : Pergamon Press, 1985, 11 p.

- [48]**SALAMAH, S.A., RODGERS, D.N., NARKIEWICZ, R.S. et al.** *HYTEC, high efficiency thermally regenerative power conversion for SEI missions*. San Jose : General Electric Co., 1991. 7 p. Rapport d'étude n° AIAA PAPER 91-3524
- [49]Soviet nuclear-powered satellite expected to reenter within 30 days. *Aviation week and space technology*, 1988, vol.129, n°12, p. 20
- [50]**TILLIETTE, Z.** Evolution in the approach of Brayton cycle-space nuclear reactors. In : *26th Intersociety Energy Conversion, Boston, USA, 4-9 Aug. 1991*. American Nuclear Society, 1991, p. 452-455
- [51]**WAHNSCHAFTE, S.D., LORDS, R.E., KNEFF, D.W. et al.** *A document review to characterize Atomic International SNAP fuels shipped to INEL 1966-1973*. Washington : Funding organization USDOE DC, 1995. 109 p. Rapport d'étude n° INEL950131
- [52]**YOSHIKAWA, H., TAKAHASHI, M., NAGAMATSU, T.** Virtual environment for integrated design support for conceptual design of a space reactor core. In : *PHYSOR96 : international conference on the physics of reactor 1996, Mito, Japan, 16-20 sept. 1996*. Tokyo : Atomic Energy Society of Japan, 1996, vol.1, 615 p .

Conversion statique

- [53]**AITHAL, S.M., ALDEMIR, T., VAFAI, K.** Assessment of the Impact of Neutronic/Thermal-Hydraulic coupling on the Design and Performance of Nuclear Reactors for Space Propulsion. *Nuclear technology*, 1994, vol.106, n°1, p. 15
- [54]**ASTRIN, C.D., et al.** *Startup Control of the TOPAZ-2 Space Nuclear Reactor*. M.S. Thesis : Naval Postgraduate School, Monterey, 1996. 161p.
- [55]**BLIAUX, J., LINET, F.** La conversion thermoionique. *Clefs CEA*, 1997, n°36, p. 11-23
- [56]**BOUQUIN, B., RIO, I., SAFIEH, J.** Ulysse, réacteur mentor. *Clefs CEA*, 1997, n°36, p. 43-48
- [57]**DETERMAN, W.R., VAN HAGAN, T.H.** Space power reactor in core thermionic multicell evolutionary. In : *10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Physics, 1993, n°271, pt.3, p. 1235-1239
- [58]**EL-GENK, M.S., XUE, H., PARAMONOV, D.V.** Transient analysis and startup simulation of a thermionic space nuclear reactor system. *Nuclear technology*, 1994, vol.105, p. 70
- [59]**KAGAN, D.N.** Multi-component Liquid Metal Coolants with Regulated properties for Space Nuclear Reactors in a Large Station. *Space power*, 1993, vol.12, n°3, p. 111
- [60]**LEE, H.H.** System modeling and reactor design studies of the advanced thermionic initiative space nuclear reactor. *Nuclear technology*, 1996, vol.115(1), p. 1-21

[61]LEE, H.H., DICKINSON, J.W. Comparison of tungsten and molybdenum based emitters for advanced thermionic space nuclear reactors. In : *11th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 9-13 Jan. 1994*. New York : American Institute of Physics, 1994, n°301, pt.2, p. 701-706

[62]LEE, H.H., LEWIS, B.R., KLEIN, A. System modeling for the advanced thermionic initiative single cell thermionic space nuclear reactor. In : *10th Symposium on Space Nuclear Power, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1993, pt.2, p. 951-956

[63]NASSERSHARIF, B., GAETA, M.J., BERGE, F. Extension of the CENTAR system simulation code to thermionic space nuclear reactors. In : *26th Intersociety Energy Conversion, Boston, USA, 4-9 Aug. 1991*. American Nuclear Society, 1991, p. 166-170

[64]PARAMONOV, D.V. Test results of Y2-21u thermionic space power system. *Nuclear technology*, 1997, vol.117(1), p. 1-14

[65]POWELL, G.E., REDD, F.J. Verification of a thermionic heat pipe in microgravity for space nuclear reactor power system. In : *Annual AIAA/Utah State University Conference on Small Satellites, 5th, Logan, USA, 26-29 Aug. 1991*. Washington (USA) : AIAA, 1991, 11 p.

[66]SAHIN, S., KENNEL, E.B. Hybrid Thermionic Space Reactors for Power and Propulsion. *Nuclear technology*, 1994, vol.107, n°2, p.155

[67]Soviet reveal testing in space of thermionic nuclear reactor. *Aviation week and space technology*, 1989, vol.130, n°3, p. 30

[68]VOSS, S.S. TOPAZ II design evolution. In : *11th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 9-13 Jan. 1994*. New York : American Institute of Physics, 1994, n°301, pt.2, p. 791-802

[69]WETCH, J.R., RASOR, N.S., BRITT, E.J. et al. Thermionic space reactors-overview. In : *Proceedings of the 18th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Orlando, USA, 21-26 Aug. 1983*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1983, vol.1, p. 170-178

[70]YOSHIKAWA, H., TAKAHASHI, M., ISHIZAKA, H. *Optimal design of reactor core for space power reactor with direct heat-to-electricity conversion*. Tokyo : Research center for nuclear science and technology, 1996. 373 p. Rapport d'étude n° UTRCN-G-24

Combustible gazeux

[71]DUGAN, E.T., WATANABE, Y., KURAS, S.A. et al. Nuclear design of a vapor core reactor for space nuclear propulsion. In : *10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 10-14 Jan. 1993*. New York : American Institute of Physics, 1993, n°271, pt.2, p. 655-662

[72]JAHSHAN, S.N. The Reactor Physics Design of Gas-Cooled Cermet Reactors and Their Potential Application to Space Power Systems. *Nuclear technology*, 1992, vol.98, n°3, p. 257

[73]KAMMASH, T., GALBRAITH, D.L. A compact reactor for space nuclear propulsion. *Transactions of the American Nuclear Society*, 1993, vol. 68, pt.A, p. 345-346

Combustibles nucléaires

[74]AL-KUELIEWI, A.S., KLEIN, A.C. Modeling transient thermal hydraulic behavior fuel element for nuclear space reactors. In : *29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Monterey, USA, 7-11 Aug. 1994*. Washington (USA) : AIAA, 1994, vol.1, p. 499-504

[75]BANJAC, V., HEGER, A. Mass Optimization Studies of Gamma Shield Materials for Space Nuclear Reactors. *Nuclear technology*, 1994, vol.108, n°1, p. 126

[76]BHATTACHARYYA, S.K., OLSEN, C., COOPER, R. et al. *Space exploration initiative fuels, materials and related nuclear propulsion technologies panel*. Cleveland : National Aeronautics and Space Administration, 1993. 314 p. Rapport d'étude n° CASI HC A14/MF A03

[77]COOPER, R.H., MOORE, J.P. Materials in space nuclear power systems. In : *Winter meeting of the American Nuclear Society (ANS), San Francisco, (United States), 10-15 Nov 1991*. American Nuclear Society, 1991, 3 p.

[78]DELAPLACE, J., SICARD, B. Les applications spatiales du plutonium 238. *Clefs CEA*, 1994, n°28, p. 2-14

[79]LYON, W.F., BAKER, R.B., LEGGETT, R.D. et al. *Advancing liquid metal reactor technology with nitride fuels*. Washington : Westinghouse Hanford Co, 1991. 13 p. Rapport d'étude n° WHC-SA-1067

[80]MATTHEWS, R.B., CHIDESTER, K.M. Fuels for space nuclear power and propulsion. *Transactions of the American Nuclear Society*, 1993, vol. 68, pt.B, p. 26-27

[81]NIKOLAEV, Y.N., EREMIN, S.A., KOLESOV, V.S. Space-R nuclear power system thermoionic fuel element mock-up SC-320 demonstration test. In : *13th symposium on space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, USA, 7-11 Jan. 1996*. New York : American Institute of Physics, 1996, n°361, pt. 3, p. 1149-1155

[82]RANKEN, W.A., CRONENBERG, A.W. Irradiation effects on fuels for space reactors. In : *Symposium on space nuclear power systems, Albuquerque, (USA), 10-13 Jan 1984*. New York : American Institute of Physics, 1984, 38 p.

[83]WAHNSCHAFTE, S.D., LORDS, R.E., KNEFF, D.W. et al. *A document review to characterize Atomic International SNAP fuels shipped to INEL*. Washington (USA) : Funding Organization : USDOE, 1995. 109 p. Rapport d'étude n° INEL-95/0131

V. ANNEXES

1-Adresses des catalogues concernant des bases de données spécialisées en physique nucléaire ou dans le domaine aérospatial et disponibles sur INTERNET

<http://www.nndc.bnl.gov/>

C'est la page du National Nuclear Data Center. Elle comporte des liens hypertextes vers des catalogues ou des articles.

<http://www.c3.lanl.gov/inmm>

Ce site possède les archives du laboratoire national de Los Alamos.

http://www.in2p3.fr/sc_in2p3/IN2P3docum.html

C'est le catalogue de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules.

<http://alice.cern.ch>

C'est le catalogue du CERN. Il est spécialisé dans le domaine de la physique nucléaire et de la physique des particules. Il contient un quantité importante de préprints.

<http://dist.cea.fr>

Catalogue des bibliothèques, bases de données, etc.... Plus de 100 000 références et 700 000 rapports sur lesquels on peut faire des recherches par thème , par auteur, par titres.

<http://techreports.larc.nasa.gov/cgi-bin/NTRS>

C'est le catalogue de la Nasa. Il contient 2 200 000 documents et 376 010 598 mots indexés. Il couvre la période de 1962 à nos jours.

Un moteur de recherche permet l'interrogation par des mots clés .On a aussi la possibilité de sélectionner des bases qui nous sont présentées.

<http://uncweb.carl.org:80/cgi-bin/unCover>

Le site uncovered regroupe un nombre important de bases de données dont certaines sont accessibles sans abonnement. La plupart des références sont complètes contrairement à certaines bases. Il contient 7 000 000 articles Un moteur de recherche permet l'interrogation par des mots clés, par l'auteur, ou par le titre du périodique. Uncovered est surtout spécialisée en chimie mais il possède quelques bases de physique intéressantes.

2-Adresses d'article et rapport disponibles sur Internet concernant le sujet

<http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00384887.pdf>

BALCOMB, J.D., BOOTH, L.A., COTTER, T.P. et al. Nuclear pulsed space propulsion systems [On-line]. *Los Alamos : Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1970, 28 p.*

Rapport déclassé du laboratoire scientifique de Los Alamos.

<http://www.rssi.ru/IPPE/General/spacer.html>

C'est un article synthétique dont le nom de l'auteur n'est pas précisé qui correspond à mon sujet de recherche bibliographique. Il s'intitule High-temperature Nuclear Reactors for Space Application. Il est produit par une équipe de recherche russe.