Dossier d’Alternance présenté par : **Fabien Boulland**

Spécialité : **Sciences et Technologies Nucléaires 1ème année**

Promotion : **2013-2016**

Antenne Alternance Saint-Denis de l’EICnam

**TITRE**

Réalisé au sein de l’entreprise :

ALTRAN EILIS

|  |  |
| --- | --- |
| Tuteur enseignant : | [GALICHET Emmanuelle](javascript:ouvreFenetre('./visu_info_intervenant.php?uid=abb_6_1_1_51d2f4432b4a9&intervenant_id=201113651','height=480')) |
| Membre enseignant : | GALICHET Emmanuelle |
| Tuteur entreprise : | JACQUET Philippe (ALTRAN) |
| Membre entreprise : | SECHAUD Matthieu (AREVA NP LTA) |

eicnam

Remerciements

Ce mémoire a été réalisé au sein de l’entreprise ALTRAN Technologies dans le département Energy Industry and Life Science (EILiS).

….

Abréviations

|  |  |
| --- | --- |
| **Abréviation** | **Nom complet** |
| **…** | **…** |

Table des matieres

[1. Introduction generale 8](#_Toc393985317)

[1.1. Contexte actuel 8](#_Toc393985318)

[1.2. Les reacteurs de 4eme generations 8](#_Toc393985319)

[1.3. Definition et caracteristiques du smr 9](#_Toc393985320)

[2. Présentation de l’entreprise  8](#_Toc393985317)

[2.1. Présentation 8](#_Toc393985318)

[2.2. Ma place dans l’entreprise 8](#_Toc393985319)

[2.3. Contexte de l’étude présentée 9](#_Toc393985320)

[3. developpement d’un modele d’epuisement 10](#_Toc393985322)

[3.1. Presentation de l’étude et du preconcept etudie 12](#_Toc393985323)

[3.2. Equation de bateman 12](#_Toc393985324)

[3.2.1. Epuisement sans flux 29](#_Toc393985341)

[3.2.2. Epuisement avec flux 29](#_Toc393985341)

[4. DEVELOPPEMENT DU MODELE SIMPLIFIE 13](#_Toc393985326)

[4.1. Résolution analytique à l’aide de methode numerique 13](#_Toc393985327)

[4.2. Simplification du modele 14](#_Toc393985329)

4.3. Validation du modèle 14

[4.3.1. Code DRAGON 29](#_Toc393985341)

[4.3.2. Code VESTA 29](#_Toc393985341)

[4.4. Conclusion du modèle simplifié 15](#_Toc393985331)

[5. exploitation de resultats 31](#_Toc393985344)

[5.1. Création de tâches 15](#_Toc393985331)

[5.2. Analyse physique 15](#_Toc393985331)

[5.3. Conclusion 15](#_Toc393985331)

[6. conclusion generale 31](#_Toc393985344)

[6.1. Perspective de l’étude 15](#_Toc393985331)

[6.2. Bilan 15](#_Toc393985331)

Liste des tableaux

[Tableau 1. Caractéristiques des principaux accidents d’éjection de grappes 11](#_Toc393879604)

[Tableau 2. Caractéristiques des principaux transitoires d'extraction de grappes 11](file:///D:\users\ahijaz.EUROPE\Desktop\memoire_Akim230714_v1.docx#_Toc393879605)

[Tableau 3. Séquence des événements du transitoire EDG-MT 12](#_Toc393879606)

[Tableau 4. Séquence des évènements EDG-MT cas PPZR-A 17](#_Toc393879607)

[Tableau 5. Séquence des évènements du transitoire avec cumul MDTE cas RDS-B 19](#_Toc393879608)

[Tableau 6. Séquence des évènements du transitoire d'EDG-MT cas SRDS-C0 20](#_Toc393879609)

[Tableau 7. Différences entre les transitoires de référence et les sensibilités 24](#_Toc393879610)

[Tableau 8. Tableaux des résultats de MA obtenus et leurs instants 24](#_Toc393879611)

[Tableau 9. Cas PPZRA: zonage en température et en cb du cœur à l’instant pénalisant pour le calcul de MA 25](#_Toc393879612)

[Tableau 10. Pénalités et incertitudes nécessaires au calcul de MA (référence [2]) 26](#_Toc393879613)

[Tableau 11. Résultats des Keff SMART nécessaire pour le calcul MA 26](#_Toc393879614)

[Tableau 12. Pénalités et incertitudes à considérer dans le calcul de MA 27](#_Toc393879615)

[Tableau 13. Catégories de transitoire et leurs caractéristiques 33](#_Toc393879616)

[Tableau 14. Calcul du CDM: tableau des résultats transitoire PPZRA 46](#_Toc393879617)

[Tableau 15. Tableau des résultats d'efficacité du bore obtenus dans le cas SRDS-B2 47](#_Toc393879618)

[Tableau 16. Hypothèses hydrauliques et neutroniques de chaque état 48](#_Toc393879619)

[Tableau 17. Valeurs de la température de l'eau en entrée du coeur de l'état final par zone 49](#_Toc393879620)

[Tableau 18. Résultats des calculs de MAR 51](#_Toc393879621)

Liste des FIGURES

[Figure 1. Diagramme de Farmer 34](#_Toc393718528)

[Figure 2. Comparaison de l’évolution de la CB et de la température de la branche chaude 1 et 2 en fonction du temps entre le cas de référence et la sensibilité PPZR-A 35](#_Toc393718529)

[Figure 3. Evolution de la pression du RCP en fonction du temps et les seuils d’activation du RBS et de l’IS 35](#_Toc393718530)

[Figure 4. Evolution du niveau pressuriseur en fonction du temps 36](#_Toc393718531)

[Figure 5. Débit ARE au cours du temps 36](#_Toc393718532)

[Figure 6. Evolution de la puissance échangée au GV au cours du temps 37](#_Toc393718533)

[Figure 7. Evolution de la température du RCP dans le transitoire de référence RDS-B 38](#_Toc393718534)

[Figure 8. Cas SRDS-B-2: Evolution tu transitoire en fonction du temps 38](#_Toc393718535)

[Figure 9. Puissance évacuée au GV au cours du transitoire 39](#_Toc393718536)

[Figure 10. Evolution du débit de l'IS et du RBS dans chacune des boucles en fonction du temps 39](#_Toc393718537)

[Figure 11. Evolution de la CB à l'entrée du coeur au cours du transitoire 40](#_Toc393718538)

[Figure 12. Evolution de la température et de la CB au cours du transitoire SRDS-C-0 41](#_Toc393718539)

[Figure 13. Evolution de la pression dans le pressuriseur au cours du transitoire 41](#_Toc393718540)

[Figure 14. Evolution de la pression dans le GV1 au cours du transitoire 42](#_Toc393718541)

[Figure 15. Evolution de la puissance au GV au cours du transitoire 42](#_Toc393718542)

[Figure 16. Comparaison entre la température de la branche chaude du RCP et la température dans le GV au cours du transitoire 43](#_Toc393718543)

[Figure 17. Chaîne de calcul SMART-COPILOTE 43](#_Toc393718544)

[Figure 18. Cas PPZRA: évolution de la MA en fonction du temps 44](#_Toc393718545)

[Figure 19. Cas SRDSC0: évolution de la MA en fonction du temps 44](#_Toc393718546)

[Figure 20. Cas SRDB2: évolution de la MA en fonction du temps 45](#_Toc393718547)

[Figure 21. Calcul du CDM: Relation entre la réactivité et la température 45](#_Toc393718548)

[Figure 22. Calcul du CDM: évolution du Keff en fonction de la densité modérateur 46](#_Toc393718549)

[Figure 23. Calcul du CDM: évolution de la densité du modérateur en fonction du temps 46](#_Toc393718550)

[Figure 24. Calculs de MAR TGI – Enchaînement des calculs 51](#_Toc393718551)

[Figure 25. Evolution de la MAR en fonction du NP 52](#_Toc393718552)

Introduction

…

# INTRODUCTION GENERALE

## Contexte actuel

A partir des années 70, l’augmentation durable du prix du pétrole, les objectifs de sécurité énergétique et les perspectives de plus en plus contraignantes de réduction des émissions de CO2 ont suscité une renaissance des nouveaux projets de constructions de centrales nucléaires.

Cependant, ils ont paradoxalement été suivis d’une interruption des investissements nucléaires aux États-Unis et en Europe dû aux accidents de Three Miles Island (1979) et de Tchernobyl (1986).

Après la prise de conscience du réchauffement climatique, le concept de développement durable émerge et l’énergie nucléaire suscite un regain d’intérêt. Cela s’explique par le fait que l’énergie nucléaire émet très peu de quantité de gaz à effet de serres contrairement aux énergies fossiles.

L’énergie nucléaire affiche une progression et une évolution dynamique tant sur le plan technique que industriel. Les réacteurs de 3ème génération sont en cours de construction, notamment le réacteur conçu par Areva, l’EPR à Flamanville (France), Okiluoto (Finlande), Taishan (Chine) et un en projet à Hinkley Point (Angleterre).

Le nucléaire produit, dans le monde et en France, respectivement 17% et 75% de l’électricité.

Les scientifiques du monde entier travaillent déjà au développement des réacteurs de 4ème génération qui seront probablement en exploitation durant la deuxième moitié du 21e siècle.

## Les réacteurs 4eme génération

En vue du développement des réacteurs de 4ème génération, le GIF (Generation IV International Forum) a été créé par 9 pays en 2000. Aujourd’hui, il en compte 12 : l’Afrique du Sud, l’Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, la France, la Grande-Bretagne, le Japon, la Russie et la Suisse ainsi que la Communauté Européenne de l’Energie Atomique (EURATOM).

Le but est de développer d’ici 2040 de nouveaux réacteurs et cycles de combustibles permettant de réduire la consommation des ressources, la quantité de déchets radioactifs et les possibilités de détournement pour la confection d’armes nucléaires.

Le GIF a retenu six types de réacteurs nucléaires comme étant les technologies les plus prometteuses pour les prochaines décennies:

* Molten Salt Reactor : Réacteur rapide à sels fondus
* Gas‐Cooled Fast Reactor : Réacteur rapide à caloporteur gaz
* Lead-Cooled Fast Reactor : Réacteur rapide à caloporteur plomb
* Sodium‐Cooled Fast Reactor : Réacteur rapide à caloporteur sodium
* Supercritical Water Cooled Reactor : Réacteur à eau supercritique
* Very High Temperature Reactor : Réacteur à très haute température

Le préconcept retenu pour cette étude par ALTRAN est un réacteur de type neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G).

## Définition et caractéristique du SMR

Selon l’AIEA, les réacteurs de petites et moyennes puissances (SMR, Small Modular Reactor) ont une puissance comprise entre 300 et 700 MW. Il y a aujourd’hui intérêt croissant pour développer ce type de réacteur. En effet, on compte actuellement 131 SMR en exploitation dans 26 pays, soit une capacité de 59 GWe et 14 SMR en construction dans six pays tel que l’Argentine, la Chine, l’Inde, le Pakistan, la Russie et la Slovaquie.

Outre l’aspect de puissance et de taille qui caractérise les SMR, ils ont d’autres propriétés intéressantes qui découlent de ces deux caractéristiques. Le délai de construction est réduit à 3 ans. Le début du retour d’investissement est donc plus rapide. De plus, ils offrent une meilleure gestion des risques financiers, c’est donc une option intéressante pour les pays en voie de développement.

La co-génération est possible grâce à leur modularité, les SMR peuvent être utilisé dans d’autres applications industrielles telles que le chauffage urbain, le dessalement de l’eau et la production d’hydrogène.

La conception du réacteur est simplifiée. Le générateur de vapeur est intégré dans la cuve. Le SMR possède une sûreté passive, cela signifie que le réacteur ne nécessite pas d’intervention humaine. La réduction de la maintenance et la capacité à fournir de la chaleur et de l’électricité pendant des années sans recharger le combustible a pour effet d’augmenter grandement son temps de fonctionnement.

Le SMR est également adapté aux régions reculées possédant un réseau haute tension peu développées. En effet il est possible de transporter un SMR sur un navire pour alimenter et chauffer une ville puis retirer le SMR quand son temps de fonctionnement est achevé. Pour finir, il est utilisé dans la propulsion navale telle que les sous-marins et les navires. Par exemple le brise-glace russe en cours de construction possèdera deux réacteurs de 38 MWe et sera destiné à une utilisation de la côte nord de la Sibérie.

# PRESENTATION DE L’ENTREPRISE

## Présentation

ALTRAN est une entreprise de conseil en ingénierie fondée en 1982 par Alexis Kniazeff et Hubert Martigny. ALTRAN s’est rapidement imposé comme leader européen de son secteur sur l’ensemble des métiers de l’ingénierie : automobile, ferroviaire, aéronautique, télécommunication et énergie.

Considéré comme un partenaire stratégique de grandes industries, ALTRAN accompagne ses clients tout au long de leur processus d’innovation. Elle mène différentes études allant de la recherche fondamentale appliquée jusqu’aux procédés d’innovation. Avec une dimension internationale, ALTRAN est présent dans plus de 20 pays à travers le monde.

Afin de mieux saisir l’étendue de ses missions et moyens, voici quelques chiffres clés :

* Chiffres d’affaire 2013 : 1 633 M€.
* Plus de 21000 collaborateurs en 2014.
* 500 clients majeurs dans le monde entier.
* 80 filiales présentes dans plus de 20 pays en Europe, Amérique latine, aux États-Unis et en Asie.

Figure 1 : Organigramme d’ALTRAN

ALTRAN est composée de deux grandes entités :

* ALTRAN TI : Technology et Industrie qui comprend :
* ALTRAN AIT: Automobile, Infrastructure and Transportation.
* ALTRAN EILiS: Energy, Industry and Life Science.
* ALTRAN ASD: Aerospace and Defence.
* ALTRAN FG/TEM est constitué de:
* ALTRAN FG: Finance and Government.
* ALTRAN TEM: Telecom and Media.

## Ma place dans l’entreprise

L’étude qui fait l’objet de ce rapport a été effectuée dans la division Energy, Industry and Life Science (EILiS). Ce centre réalise des études pour AREVA et s’intéresse principalement aux problèmes énergétiques et prend en charge, en particulier, les études liées au développement de l’EPR :

* Modélisation de transitoires accidentels ou de fonctionnement normal.
* Calculs scientifiques consistant à développer et utiliser des méthodes, procédures, jeux de données afin de réaliser des simulations, d’extraire les résultats pour ainsi les valoriser dans un document d’ingénierie.
* Etudes de sensibilités et d’analyse de données permettant d’apporter des réponses quant à l’importance de chaque paramètre dans un scénario de transitoire donné.
* Vérification d’études indépendantes afin de contrôler et de s’assurer qu’une étude réponde aux exigences énoncées.

Je suis donc apprenti ingénieur chez ALTRAN dans la division EILiS au sein du plateau situé à AREVA La Defense.

## Contexte de l’étude présentée

Le secteur de l’énergie nucléaire se compose d’industriels leader dans la conception des centrales destinées au marché mondial et de challengers se concentrant sur des activités intellectuelles techniquement pointues à forte valeur ajoutée. La conception d’un réacteur innovant est une opération complexe, pour laquelle il n’existe pas de méthodologie traditionnelle. Dans le cadre de ses activités de R&D dédiées au secteur des réacteurs nucléaires, ALTRAN s’intéresse à l’application de différentes méthodes très innovantes à la problématique de préconception des SMR.

C’est dans ce contexte qu’ALTRAN a lancé le projet Physor. L’objectif de ce projet est de définir un nouveau préconcept innovant de SMR répondant à un cahier de charge ambitieux en termes de sûreté, compétitivité économique et gestion des déchets à vie longue.

# dEVELOPPEMENT D’UN MODELE D’EPUISEMENT

## Présentation de l’étude et du préconcept étudié

L’objectif de ce travail est d’étudier le comportement et la population des noyaux lourds du combustible par épuisement naturel et par épuisement en réacteur. Cela a pour but de connaître la composition du combustible au cours du temps et de savoir comment il évolue jusqu’à son chargement dans un cœur de SMR mais également à la fin de la phase d’irradiation. Les noyaux étudiés sont des isotopes du plutonium.

Le combustible envisagé est le vecteur Pu issu du réacteur à neutrons rapides SuperPhénix.

On appelle vecteur Pu le vecteur représentatif des différents isotopes du Plutonium en cœur allant de Pu238 à Pu242 incluant également l’Am241. L’Am241 est compris dans le combustible car il issu du Pu241 par décroissance naturelle 𝛽- ce qui le rend donc indissociable au vecteur Pu.

Le cœur de SuperPhénix utilisait comme combustible un mélange composé de 85% d’uranium﻿ (majoritairement l’U238 qui est fertile) et de 15% de plutonium﻿﻿. Il y avait environ 5 tonnes de plutonium﻿﻿ 239 dans le cœur de SuperPhénix. La composition exacte du combustible est la suivante :

|  |  |
| --- | --- |
| Noyaux | %wt |
| Pu238 | 0,38 |
| Pu239 | 69,08 |
| Pu240 | 23,04 |
| Pu241 | 4,82 |
| Pu242 | 1,64 |
| Am241 | 1,04 |
| U238 | 99,48 |
| U235 | 0,52 |

Tableau 1 : Composition du vecteur Pu

La surgénération est une particularité du réacteur SuperPhénix très intéressante et recherché dans les réacteurs à neutrons rapides. La surgénération est un processus qui permet de produire plus de matières fissiles que d’en consommer en utilisant l’uranium 238 qui est fertile. En effet, soumis à un flux neutronique rapide, l’uranium va capturer un neutron pour se transformer en plutonium 239 qui est fissile, en émettant deux particules beta. De plus, une enveloppe d’uranium﻿ 238 est placée autour du cœur. C’est cette enveloppe d’uranium﻿ 238 qui permet la surgénération. Cependant, dans cette étude, l’enveloppe n’est pas prise en compte dans les calculs.

Ainsi, grâce à la surgénération, le réacteur peut potentiellement fonctionner et produire de l’énergie pendant une trentaine d’années sans rechargement de combustible.

Le réacteur SuperPhénix possède une puissance thermique nominale de 3000 MW et une disponibilité de 75%. La puissance thermique effective du réacteur est :

Voici ci-dessous une cellule de combustible SuperPhénix :

0,3685 cm

0,42926 cm

0,56 cm

Pastille

Gaine

Sodium

Figure 2 : Combustible SuperPhénix

La densité en U/Pu/ est 11,05 g/

## Equation de Bateman

Pour étudier la population de noyaux lourds dans le combustible, il est judicieux d’utiliser l’équation de Bateman. L’équation de Bateman est un calcul d’épuisement qui consiste à décrire l’évolution de la concentration de noyaux en fonction de la constante de décroissance radioactive et du temps. L’équation de Bateman est la suivante :

Dans un premier temps, l’équation de Bateman sera utilisée pour le modèle d’épuisement sans flux puis le flux neutronique sera introduit, ainsi que les sections efficaces, pour avoir un modèle d’épuisement dans un cœur de réacteur nucléaire.

Pour le modèle d’épuisement sans flux, une étude préalable sera faite sur les chaînes de décroissance naturelle pour prévoir les désintégrations des isotopes du vecteur plutonium ainsi que de l’uranium 238 et 235. En effet, il est important de connaître la composition du combustible à un instant donné afin de mieux appréhender la réactivité du cœur.

Cependant, les chaînes de désintégrations sont simplifiées. Seuls les premiers noyaux fils issus des réactions de désintégrations seront pris en compte car on considère que les prochains noyaux fils n’auront pas d’impact sur la réactivité.

Figure 3 : Chaîne de désintégrations des noyaux lourds

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

### Epuisement sans flux neutronique

L’évolution des noyaux du vecteur Pu dans un modèle d’épuisement naturel ne prend pas en compte les sections efficaces et le flux neutronique ce qui simplifie l’équation de Bateman :

L’équation de Bateman simplifiée pour chaque isotope est la suivante:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Tableau 2 : Equation de Bateman sans flux neutronique

L’équation de Bateman sans flux dépend de la concentration des noyaux et de la constante de décroissance radioactive.

La décroissance radioactive est le processus par lequel un noyau instable perd son énergie en émettant un rayonnement ionisant. Elle est directement liée à la période de demi-vie qui est défini comme le temps nécessaire pour que la moitié d’un échantillon de noyaux radioactifs se désintègre naturellement. La décroissance radioactive est un phénomène statistique, elle est décrite par l’équation :

Une recherche a été nécessaire pour caractériser les périodes de demi-vie des noyaux lourds pour ensuite déterminer la décroissance radioactive.

|  |  |
| --- | --- |
| Noyaux |  |
| Pu238 | 87,7 |
| Pu239 | 24110 |
| Pu240 | 6561 |
| Pu241 | 14,325 |
| Pu242 | 3,75E+005 |
| Am241 | 432,6 |
| U238 | 4,47E+09 |
| U235 | 7,04E+08 |

Tableau 3 : Période de demi-vie des noyaux lourds

### Epuisement avec flux neutronique

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Tableau 4 : Equation de Bateman avec flux neutronique

# DEVELOPPEMENT DU MODELE SIMPLIFIE

## Résolution analytique à l’aide de méthode numérique

La résolution de l’équation de Bateman se fait par une méthode d’analyse appelée méthode de Runge Kutta. La méthode RK1 est la suivante : on utilise un pas d’itération pour calculer le pas suivant, ensuite on utilise le résultat précédant avec le pas de temps suivant pour calculer le nouveau résultat et ainsi de suite.

L’équation utilisée est la suivante :

Où h est le pas d’itération

Dans le cas d’épuisement sans flux cas, f(t,Yn) = -λN et h = Δt

Cela donne N (n+1) = Nn + Δt \* (-λN) => Nn – Δt \* (λN) => N (n+1)= (1- Δt\*λ)\* Nn

## Simplification du modèle

On pose :

La solution est de la forme :

On cherche la solution particulière :

On dérive :

En injectant dans notre équation initiale, on obtient :

A t=0, on a :

## Validation du modèle

#### Code DRAGON

#### Code VESTA

## Conclusion du modèle simplifié

# EXPLOITATION DES RESULTATS

## Création de tâches

analyse, interprétation des tâches

## Analyse physique

## Conclusion de l’exploitation

conclure avec esprit critique, ça marche bien ou pas, pourquoi

# CONCLUSION GENERALE

## Perspective de l’étude

étendre de l’étude à d’autre vecteur, d’autre réacteur

## Bilan

bilan de la première année, observations, ressenti, impressions

References

1. ...

Résumé

….

Mots clés :

- NEUTRONIQUE

…

