



Rapport de stage 2A

Analyse de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR

(09 mai-26 août 2017 au LPSC)

Je tiens à remercier toute l'équipe MSFR, pour son accueil chaleureux et son dévouement tout au long de mon stage afin qu'il puisse se dérouler au mieux.

Tout d'abord, je souhaite remercier ma tutrice de stage, Delphine Gérardin, pour m'avoir accueilli dans son bureau, et d'avoir supporté le débit incessant de questions concernant mes études. Mais aussi de m'avoir aidé tout au long du stage, grâce à sa pédagogie, à comprendre tous les phénomènes qui m'étaient inconnus, par des explications très claires, jusqu'à me montrer ses talents de dessinatrice !

Merci aussi à Elsa Merle-Lucotte de m'avoir permis de connaître l'existence d'un tel stage, et de m'avoir donné l'opportunité de pouvoir candidater pour celui-ci. Ce stage n'aurait pas eu le même éclat sans sa présence, sa gentillesse et ses Saint-Genis pour accompagner nos pauses café. Enfin, elle m'a permis de participer au meeting SAMOFAR, ce qui m'a beaucoup apporté d'un point de vue connaissance sur le projet MSFR, mais aussi pour mon projet professionnel. Je lui en suis très reconnaissant.

Je remercie également Daniel Heuer d'avoir pris le temps de m'aider lors de mes études, et d'avoir apporté toutes ses connaissances, et pas des moindres, pour faire en sorte que je puisse comprendre au mieux certains phénomènes. Son humour va beaucoup me manquer !

Enfin merci à Michel Alibert pour son accompagnement et ses conseils afin de mener au mieux mes travaux. Ce fut un plaisir de voir que la recherche est une réelle passion pour certain, et que même au-delà de la retraite des personnes continuent de faire avancer les sciences, tout en étant bénévoles.

Le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble (LPSC) est une unité mixte de recherche qui est affiliée à trois instituts du CNRS : l'IN2P3, l'INSU et l'INSI, ainsi qu'à l'université Grenoble Alpes et à Grenoble INP.

Il est installé sur le polygone scientifique de Grenoble, et était anciennement appelé institut des sciences nucléaires, ses thématiques de recherche fondamentale sont organisées en quatre principaux axes :

- des particules aux noyaux : physique des particules, physique nucléaire, physique théorique des particules...
- astroparticules, cosmologie et neutrinos : physique des rayons cosmiques, cosmologie observationnelle, détection directe de matière noire, physique des neutrinos...
- accélérateurs, sources d'ions et plasma-matériaux : accélérateurs et source d'ions, plasma et matériaux...
- énergie et santé : physique des réacteurs, physique des applications médicales...

C'est parmi l'équipe MSFR que j'ai effectué mon stage. Cette équipe étudie les réacteurs à combustible liquide, et a conçu, le Molten Salt Fast Reactor (MSFR) qui a été au cœur de mon stage. Les activités de l'équipe MSFR s'appuient sur le développement d'outils de simulation, de modélisation des réacteurs et sur des études de sûreté.

L'équipe MSFR participe au projet SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor) [2], projet européen d'une durée de 4 ans (2015-2019) du programme Horizon2020, ayant pour but de prouver les concepts de sûreté innovants du MSFR, par des techniques expérimentale et numérique avancées, de fournir une avancée dans la sûreté nucléaire, et une gestion optimale des déchets. Des réunions sont organisées tous les 6 mois afin de rendre compte des avancées du projet, de mettre en commun les résultats de chaque participants et de décider des développements techniques à venir / à réaliser. Le dernier a eu lieu en juillet (du 2 au 7) 2017 à Lecco en Italie, j'ai pu y participer.

Table des matières

Introduction.....	6
I) Design du MSFR.....	7
1.1 Design général du MSFR.....	7
1.2 La couverture fertile.....	8
1.3 Le circuit intermédiaire.....	10
II) Analyse de sûreté.....	11
2.1 Le FFMEA.....	11
III) Application du FFMEA.....	13
3.1 Application à la couverture fertile.....	13
3.1.1 Exemple d'une partie du FFMEA.....	13
3.1.2 Résultat du FFMEA de la couverture fertile : liste des PIEs.....	15
3.2 Application au circuit intermédiaire - Résultat du FFMEA du circuit intermédiaire : liste des PIEs.....	15
IV) Etudes.....	17
4.1 Outil utilisé pour les calculs de criticité : le code Serpent 2.....	17
4.2 Obtention d'un coeur critique.....	18
4.3 Etudes liées à l'exemple de la section 3.1.1.....	19
5.3 Autres études et résultats issus du FFMEA de la couverture fertile.....	23
5.4 Etude sur la nécessité d'un système de bullage.....	26
V) Conclusions et perspectives.....	29
Bibliographie.....	30
Annexe 1 : FBS de la couverture fertile.....	31
Annexe 2 : PBS de la couverture fertile.....	33
Annexe 3 : Postulated Initiating Events (PIEs) for the fertile blanket tank.....	34
Annexe 4 : Design options for the fertile blanket tank.....	45
Annexe 5 : FBS pour le circuit intermédiaire.....	54
Annexe 6 : PBS pour le circuit intermédiaire.....	55
Annexe 7 : Postulated Initiating Events (PIEs) for the intermediat circuit.....	56
Annexe 8 : Le circuit intermédiaire et ses options de design.....	66
Annexe 9 : Convergence des calculs neutroniques.....	70
Annexe 10 : Diagramme de Gantt.....	77

Figure 1 : Visualisation du MSFR	7
Figure 2 : Schéma du MSFR est des différents circuits qui le composent	8
Figure 3 : Visualisation du circuit combustible	8
Figure 4 : Couverture fertile et ses composants	9
Figure 5 : Géométrie de la simulation pour le MSFR (vue de face)	18
Figure 6 : Géométrie de la simulation pour le MSFR (vue de dessus)	18
Figure 7 : Variation de la réactivité lors d'une insertion de réactivité $\Delta\rho \in \{0, 33, 100, 333, 1000\}$ pcm en 1 seconde	20
Figure 8 : Variation de la température lors d'une insertion de réactivité $\Delta\rho \in \{0, 33, 100, 333, 1000\}$ pcm en 1 seconde	21
Figure 9 : Variation de la réactivité en fonction de la température (cas composition initiale du fertile)	23
Figure 10 : Variation de la réactivité en fonction de la température (cas composition stationnaire du fertile)	23
Figure 11 : Géométrie de la simulation de l'étude 5	24

Tableau 1 : Composition du sel fertile dans son état initial et son état stationnaire	10
Tableau 2 : Exemple d'une partie du FFMEA	13
Tableau 3 : Liste des PIEs pour la couverture fertile	15
Tableau 4 : Liste des PIEs pour le circuit intermédiaire	16
Tableau 5 : Valeur de k_{eff} et de ρ (cas fertile avec et sans Uranium)	18
Tableau 6 : Valeur de k_{eff} et de ρ et $\Delta\rho$ (cas fertile avec et sans Uranium) pour l'étude 1	19
Tableau 7 : Valeur de k_{eff} et de ρ et $\Delta\rho$ (cas fertile avec et sans Uranium) pour l'étude 2	20
Tableau 8 : Valeur de k_{eff} et de ρ et $\Delta\rho$ (cas fertile avec et sans Uranium) pour l'étude 3	22
Tableau 9 : Quantité de mole des produits de fissions gazeux	25
Tableau 10 : Quantité de mole des produits de fissions métalliques	25
Tableau 11 : Volume des produits de fission gazeux	26
Tableau 12 : Volume des produits de fission métalliques	27

Glossaire

EDS: Emergency Draining System

FBS: Functional Breakdown Structure

FFMEA: Functional Failure Mode and Effect Analysis

GIF: Generation IV International Forum

ISAM: Integrated Safety Assessment Methodology

PBS: Plant Breakdown Structure

PIE: Postulated Initiating Event

MLD: Master Logic Diagram

MSFR: Molten Salt Fast Reactor

SAMOFAR: Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor

Aujourd'hui l'un des enjeux mondiaux majeurs est de produire de manière durable, efficace et en quantité importante, de l'électricité par des moyens plus sûrs, moins coûteux, tout en étant respectueux de l'environnement. En effet, la population mondiale augmente, engendrant une augmentation conséquente de la demande d'énergie. Il y a deux facteurs à l'augmentation mondiale de la demande énergétique :

- l'accroissement de la population dans certains pays,
- l'accroissement du besoin énergétique par habitant.

(cf. certains pays comme l'Inde, la Chine et le Brésil, qui visent un niveau de vie égale à ceux des pays de L'OCDE)

Il est donc nécessaire de trouver un moyen de produire de l'électricité de manière conséquente, tout en étant cohérent avec la tendance actuelle de durabilité. Les énergies renouvelables ne peuvent être qu'un moyen complémentaire à une autre méthode. Elles doivent être associées à des sources permettant une production électrique de base et capables de compenser leur intermittence. L'une de ces méthodes est le nucléaire. Pour assouvir la demande globale d'énergie mondiale, il faudrait des milliers de réacteurs de type REP. Mettre au point des réacteurs utilisant au mieux les ressources naturelles, par exemple en étant régénérateurs, est alors un enjeu important. De plus, la sûreté nucléaire devient un point de plus en plus sujet à confrontation. Ainsi des innovations dans la sûreté doivent être proposées pour ces réacteurs à venir.

Si on veut donc fabriquer plusieurs milliers de réacteurs nucléaires, il sera aussi nécessaire d'utiliser un nucléaire socialement acceptable. Pour cela, il ne doit pas présenter de risques ni pour l'environnement ni pour l'humain. Mais pas seulement, il faudra aussi que la population comprenne le fonctionnement de celui-ci, et en quoi il présente une amélioration par rapport aux réacteurs existants, pour éviter les associations et les comparaisons non pertinentes.

C'est ce que les réacteurs de génération IV visent à réaliser. Parmi les six concepts retenus dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF) [1], le MSFR (Molten Salt Fast Reactor) ou en français réacteur à sel fondu à spectre rapide, semble pouvoir regrouper tous les critères nécessaires à ce nucléaire socialement acceptable.

Il faut donc étudier et expliquer comment le MSFR essaye de mettre en application ce nucléaire plus sûr, et par quels moyens sa sûreté est améliorée et démontrer tout cela. L'objectif de mon stage a été d'effectuer une analyse de sûreté sur le MSFR, et plus particulièrement sur la couverture fertile et le circuit intermédiaire. Ceci en appliquant une méthode d'analyse de risque nommée FFMEA (Functional Failure Mode and Effect Analysis) [3],[4],[5] complétée par des études de sûreté et de design.

Le chapitre 1 présente en détail le concept du MSFR. Le chapitre 2 explique l'objectif de l'analyse de sûreté et les outils utilisés. Le chapitre 3 présente l'application du FFMEA à la couverture fertile et le chapitre 4 décrit les études complémentaires à l'analyse de sûreté.

Cette partie a pour but de présenter le MSFR et ses particularités, avec tout d'abord une présentation du réacteur dans sa globalité, puis une description plus centrée sur la couverture fertile et le circuit intermédiaire.

1.1 Design général du MSFR

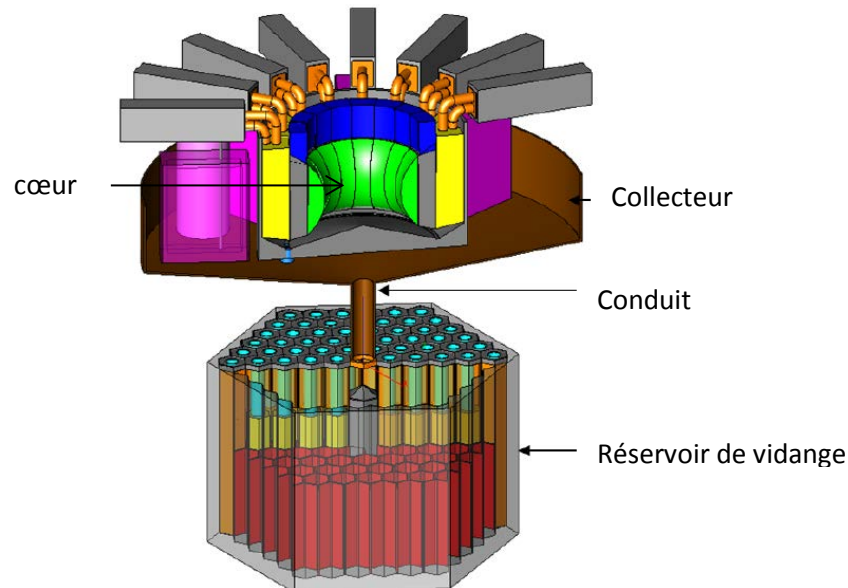


Figure 1 : Visualisation du MSFR

Le MSFR [3] est un réacteur original par différents points. Ce n'est pas un réacteur traditionnel à combustible solide mais un réacteur à combustible liquide. Ceci est possible grâce à un sel combustible de type Fluorure, qui présente une température de fusion de 585 °C. Il est monté à une température moyenne de 725 °C, ce qui lui confère un état liquide. Le combustible liquide sert aussi de caloporteur, donc il sera mis en circulation afin d'extraire la chaleur nécessaire à la production d'énergie. Ensuite c'est un réacteur en kits, son circuit combustible est composé de plusieurs secteurs identiques. De plus, le réacteur est étudié pour fonctionner avec le cycle Thorium, et en plus de cela il est régénérateur grâce à la présence d'une couverture fertile. Les coefficients de contre-réactions sont négatifs, et permettent la stabilité du réacteur, ce qui est favorable pour sa sûreté. A cela s'ajoutent des prélèvements/insertions de sels réguliers pour le nettoyer, ce qui permet d'avoir une très faible réserve de réactivité en cœur.

La composition du sel combustible est $\text{LiF}-(\text{NL})\text{F}_{(3;4)}$ où NL= Noyaux lourd (Th et U), avec des proportions molaires de 77.5%-22.5%.

Le fluide caloporteur est donc le sel combustible, et l'extraction de la chaleur se fait à travers des échangeurs de chaleur reliés à un autre circuit, le circuit intermédiaire, contenant du sel intermédiaire. Ce dernier est lui-même relié à un autre échangeur de chaleur connecté à un troisième circuit, le circuit de conversion qui permet de convertir la chaleur en électricité (voir figure 2).

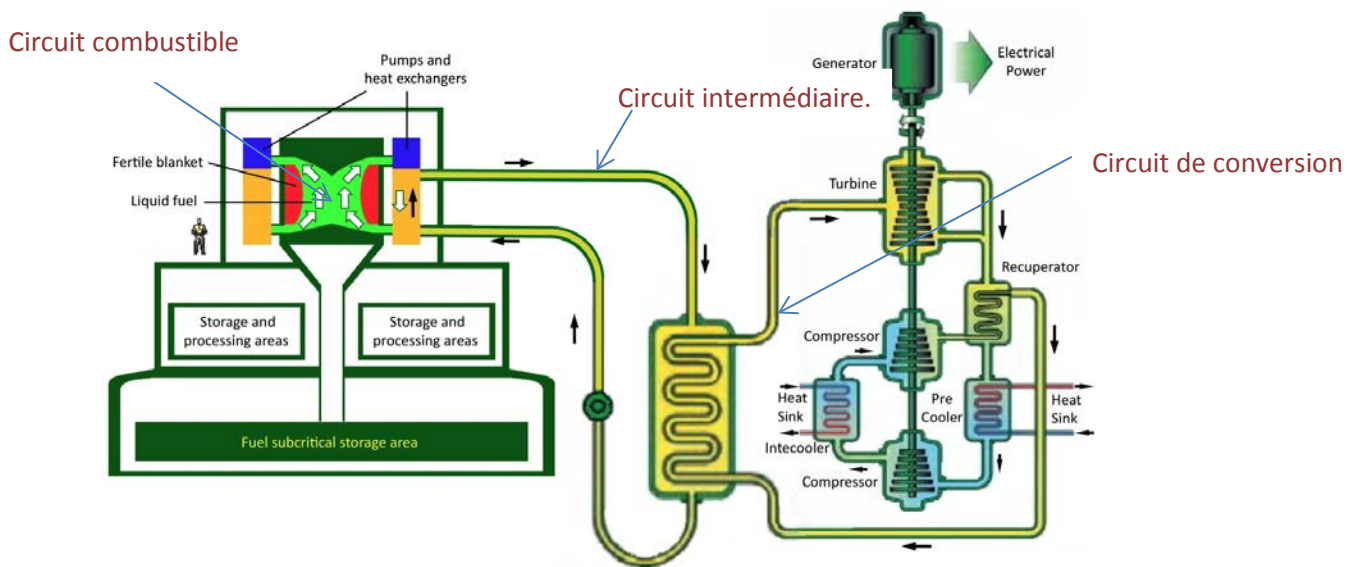


Figure 2 : schéma du MSFR est des différents circuits qui le composent [6]

Enfin, un des atouts majeurs de ce réacteur pour sa sûreté, c'est la présence d'un système de vidange d'urgence avec un réservoir, qui permet de vidanger le combustible par écoulement gravitaire en cas d'accident/incident. Ainsi le sel combustible vidangé devient sous critique, la réaction en chaîne s'arrête et la puissance résiduelle peut être évacuée de manière passive. La connexion entre le circuit combustible et le réservoir de vidange est assuré par des vannes et des bouchons froids, qui en cas de panne d'électricité, s'ouvrent ou fondent (respectivement) et permettront la vidange automatique du cœur (voir figure 1). La vidange peut être faite de manière active ou passive.

Pour mes études, je me suis concentré plus particulièrement sur deux parties du réacteur, qui sont la couverture fertile et le circuit intermédiaire.

1.2 La couverture fertile

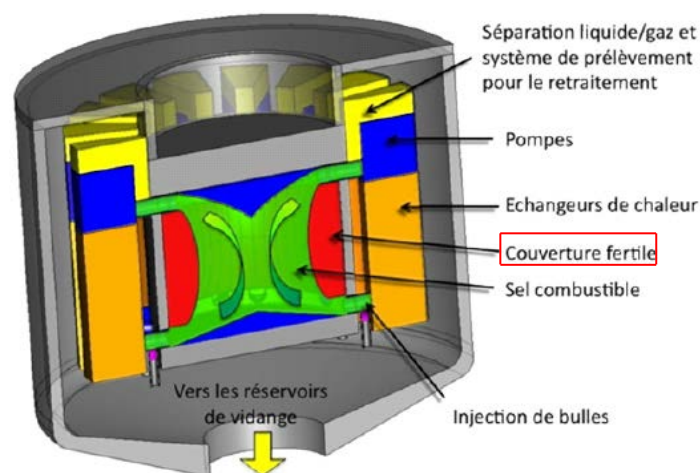


Figure 3 : Visualisation du circuit combustible du MSFR

La couverture fertile située autour du cœur (comme montré sur la figure 3) est elle aussi composée des mêmes secteurs, constituée d'un réservoir nécessitant un refroidissement sur ses parois à cause de la température élevée du combustible. Ce réservoir est rempli par du sel fertile permettant au cœur d'être régénérateur. Celui-ci est mis en circulation par une pompe afin d'être envoyé dans un échangeur pour évacuer grâce au circuit intermédiaire la chaleur produite dans celle-ci (voir figure 4). Cette description est une configuration de référence. Néanmoins d'autres options peuvent être envisagées.

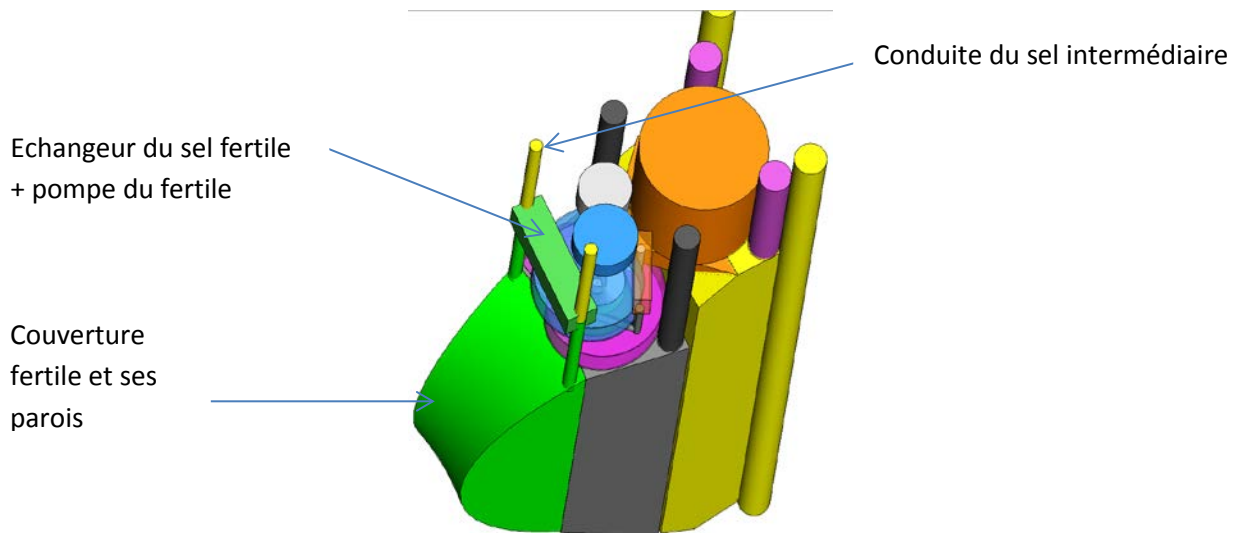
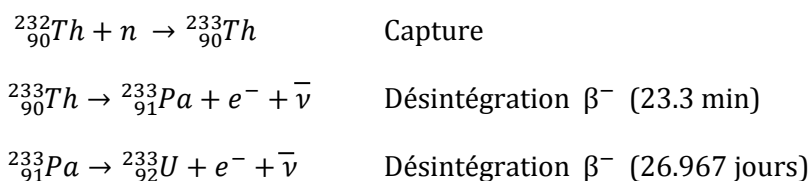


Figure 4 : Couverture fertile et ses composants

La composition initiale de ce sel est : ${}^7\text{LiF}^1\text{-ThF}_4$, avec les proportions molaires suivantes : (77.5% - 22.5%).

Au cours du fonctionnement du réacteur, de l'Uranium fissile ${}^{233}_{92}\text{U}$ est produit dans le sel fertile par capture neutronique sur le Thorium, via les réactions suivantes :



Cette production d' ${}^{233}_{92}\text{U}$ fissile est utilisée pour améliorer le taux de régénération du réacteur. En effet l' ${}^{233}_{92}\text{U}$ est majoritairement produit dans le sel combustible. La couverture fertile ne sert qu'à compléter cette production pour atteindre la régénération (voire la surgénération). C'est dans ce but que la couverture a été intégrée au design du MSFR afin que le nombre global de disparitions d' ${}^{233}_{92}\text{U}$ soit le même que le nombre global de productions d' ${}^{233}_{92}\text{U}$ dans le réacteur.

¹ le Li sera enrichi en Li^7

Le tableau 1 donne la composition du sel fertile dans son état initial et dans son état stationnaire:

	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{233}_{92}\text{U}$	NL	Li	^7_3Li	^6_3Li	$^{19}_9\text{F}$
Composition initiale (en %)	22.50	0.00	22.50	77.50	77.49	3.875 E-3	167.5
Composition stationnaire (en %)	22.50	0.075	22.58	77.42	77.42	1.23 E-4	167.2

Tableau 1 : Composition du sel fertile dans son état initial et son état stationnaire.

C'est à partir de la composition du sel fertile que j'ai pu, par dichotomie, ajuster les proportions d'isotopes du sel combustible dans les simulations neutroniques afin qu'on soit dans un régime critique ($k_{eff}=1$) à la température visée.

1.3 Le circuit intermédiaire

Le circuit intermédiaire est rempli de sel intermédiaire. Comme vu sur la figure 2, le circuit intermédiaire sert à transférer la chaleur du sel combustible au sel intermédiaire puis du sel intermédiaire au fluide de conversion, par l'intermédiaire de deux échangeurs de chaleur. Le fluide est mis en mouvement grâce à des pompes et passe à travers plusieurs conduites. Le débit peut être ajusté afin d'évacuer plus ou moins de chaleur du cœur.

La composition du sel intermédiaire n'est pas encore définie, mais quatre propositions sont considérées : FLiBe, FLiNaK, LiF-ZrF₄ ou le fluoroborate (8NaF-92NaBF₄). Le choix se fera sur un compromis entre la conductivité thermique, la production de radio éléments et la température de fusion. Néanmoins la détermination du meilleur candidat ne fait pas partie du cahier des charges de ce stage.

Ce qui vient d'être présenté dans la section 1 concerne le design actuel du MSFR. Néanmoins il n'est pas fixé et se veut évolutif en fonction des études de sûreté. Dans cet objectif, des outils d'analyses de sûreté innovants sont utilisés, et vont vous être présentés et plus particulièrement la méthode FFMEA (section 2.1).

Le but de cette partie est de présenter les objectifs de l'analyse de sûreté et comment elle est mise en œuvre pour le MSFR. En particulier un outil sera présenté en détail : le FFMEA, puisqu'il sera à l'origine des études de mon stage.

L'analyse de sûreté a pour but de définir et vérifier les dispositifs pour protéger la population et l'environnement de rejets d'éléments radioactifs et donc de faire en sorte que le réacteur soit capable de résister et d'affronter tous types d'accidents. Elle se base sur les trois fonctions de sûreté suivantes :

- Contrôle de la réactivité (être critique ou sous critique)
- Evacuation de la puissance (de fission et/ou résiduelle)
- Confinement des éléments radioactifs

La méthode d'analyse de sûreté doit être indépendante de la technologie du réacteur, et donc doit pouvoir être applicable directement au cas des réacteurs à sels fondus par exemple. Dans le cadre du GIF, des méthodologies d'analyse de sûreté exigeantes ont été développées et ont abouti notamment à la méthode ISAM (Integrated Safety Assessment Methodology). C'est une méthodologie globale d'analyse de risque menant à une identification complète des accidents des réacteurs de quatrième génération et permettant d'intégrer la sûreté au cours du design pour des réacteurs innovants tels que le MSFR.

Dans le cadre du projet SAMOFAR, deux outils de sûreté sont intégrés à la méthode ISAM : le FFMEA et le MLD (Master Logic Diagram). Ces deux outils visent à la détermination des événements initiateurs d'accidents (PIE-Postulated Initiating Events), mais par des modes d'analyses différentes. Ils sont tous deux menés parallèlement afin de pouvoir vérifier qu'on arrive à des événements communs et surtout qu'il n'y ait pas d'oubli afin d'obtenir la liste des PIEs la plus exhaustive possible.

On s'intéressera dans ce rapport principalement à la méthode FFMEA puisque ce sera celle mise en œuvre lors de l'analyse de sûreté de la couverture fertile et du circuit intermédiaire lors du stage.

2.1 Le FFMEA

Le MLD fait partie des méthodes dites "top down" qui ont pour but de déterminer les événements initiateurs en considérant une situation accidentelle. On regarde alors toutes les possibilités menant à cette situation. Le FFMEA au contraire, est une méthode dite "bottom up", en considérant une fonction et sa perte. En examinant chaque composant et leur défaillance, menant à la perte de la fonction, on regarde toutes les conséquences sur la sûreté du réacteur. C'est en cela que réside l'originalité de cette méthode, par son approche fonctionnelle, puisqu'on s'intéresse essentiellement aux fonctions et à leur perte. Cela est utile lorsque le design n'est pas

encore fixé, car on sait parfois quelles fonctions doivent être remplies par les systèmes sans pour autant savoir quels composants assurent ces fonctions.

A la suite de cette analyse, les PIEs sont déterminés : par définition, seuls les accidents ayant les conséquences les plus graves, pour une même fonction, sont retenus. Ainsi, les conséquences des PIEs englobent celles de tous les autres accidents. Des actions préventives et des mesures d'atténuations sont alors définies dans le but de réduire la probabilité de la perte de la fonction et d'en diminuer les conséquences.

Cependant, en aucun cas le FFMEA ne doit être considéré comme une accumulation de risques inévitables. Cette méthode est qualitative, c'est pourquoi elle doit être accompagnée d'études déterministes permettant de quantifier la gravité des accidents, ainsi que des études probabilistes déterminant leur probabilité d'occurrence.

Concernant l'évolution conjointe de la conception du MSFR, des études neutroniques par exemple peuvent être menées suite à des questions soulevées lors du FFMEA. Le design du MSFR devra prendre en compte les résultats issus de ces études, et des options de design seront alors proposées.

Cette partie met en application la méthode FFMEA pour la couverture fertile et le circuit intermédiaire, et donne la liste des différents PIEs identifiés durant le stage grâce à cette méthode.

3.1 Application à la couverture fertile

Le FFMEA considère donc la perte de fonctions en considérant une liste de fonctions appelée FBS (Functional Breakdown Structure) et pour ces fonctions une liste de composants appelée PBS (Plant Breakdown Structure) est utilisée. Leur liste pour la couverture fertile est respectivement disponible en Annexe 1 et 2.

Le FFMEA peut s'organiser sous Excel (voir Tableau 2). Ici on regarde toutes les fonctions associées à la couverture fertile et les conséquences de leurs pertes. Cependant le FFMEA comprend un grand nombre de fonctions et de sous fonctions pour un même système du MSFR étudié qui ne peuvent pas être toutes décrites dans ce rapport. Aussi des exemples seront décrits par la suite afin d'illustrer le travail réalisé.

3.1.1 Exemple d'une partie du FFMEA

Un exemple de FFMEA est présenté tableau 2 et considère l'étude de risque associée à la perte de confinement du sel fertile.

Fonctions (FBS)	Composants (PBS)	Mode opératoire	défaillance	Cause	conséquences	Actions préventives	Mesures d'atténuations	Note
P2.1.2.1 garder et préserver l'intégrité et l'étanchéité de la couverture fertile	Paroi de la couverture séparant le sel combustible du sel fertile	Nop-P (opération normale en production de puissance)	Perte d'étanchéité	Rupture de la paroi de la couverture fertile	[*1*]	Maintenance préventive	Fermer les vannes d'isolation du circuit fertile et du circuit du fluide de refroidissement de la paroi de la couverture fertile.	[*2*]

Tableau 2 : Exemple d'une partie du FFMEA réalisé

[*1*] Le sel fertile et le sel intermédiaire entrent dans le circuit combustible à cause des pressions dans la couverture fertile et dans le circuit de refroidissement de la paroi, qui sont supérieures à celle du circuit combustible. Le volume du sel dans le cœur augmente ainsi que les niveaux libres. Les vannes d'isolation du circuit fertile (s'il y en a) ainsi que celles du circuit intermédiaire doivent être fermées pour limiter les pertes de sel et leur mélange. Si les vannes ne sont pas fermées assez rapidement, les pressions atteignent l'équilibre et le sel combustible entre dans la couverture fertile et dans le circuit intermédiaire.

Concernant la couverture fertile : La structure du secteur n'est plus assez refroidie. Des composants peuvent être endommagés en raison de la température élevée du sel combustible et de l'activation neutronique.

Concernant circuit combustible : La composition du sel dans le cœur devient sous critique à cause de la baisse de densité de matière fissile. La réaction en chaîne s'arrête et le combustible va être transféré vers le réservoir de stockage et refroidi par son système de refroidissement.

[*2*] Est-ce que la pression de la couverture fertile est supérieure, égale ou inférieure à celle du circuit combustible ?

Est-ce que la température de la couverture fertile est supérieure, égale ou inférieure à celle du circuit combustible ?

Est-ce que la pression du circuit intermédiaire est supérieure, égale ou inférieure à celle du circuit combustible ?

Est-ce que la température du circuit intermédiaire est supérieure, égale ou inférieure à celle du circuit combustible ?

Concernant les options de design à la suite de cette partie du FFMEA, nous nous sommes posé la question sur le système de refroidissement de la paroi de la couverture fertile : de quelle façon la paroi de la couverture fertile est-elle refroidie ? En effet, même si on a considéré dans notre analyse que la paroi était refroidie par du sel intermédiaire, commun à celui de l'échangeur de chaleur du combustible, il est possible que d'autres options soient envisageables, ayant des répercussions moins importantes en cas d'accident. Néanmoins aucune étude n'a encore été menée jusqu'à présent.

3.1.2 Résultat du FFMEA de la couverture fertile : liste des PIEs

Comme vu dans la partie précédente, l'un des principaux résultats issus de cette analyse est la liste des PIEs présentée dans le tableau 3. Sur environ 200 accidents identifiés, on en retient 10 PIEs.

PIE 1	Perte d'intégrité et d'étanchéité de la couverture fertile : rupture de la paroi de la couverture fertile séparant le sel combustible du sel fertile avec rupture du circuit de refroidissement de la paroi
PIE 2	Perte d'intégrité et d'étanchéité de la couverture fertile : rupture de la protection neutronique
PIE 3	Perte de retraitement : rupture du système de bullage ² permettant l'extraction des produits de fission gazeux dans la couverture fertile
PIE 4	Perte d'intégrité et d'étanchéité de la couverture fertile : rupture de l'échangeur de chaleur de la couverture fertile avec le circuit intermédiaire
PIE 5	Perte de retraitement : rupture du système de prélèvement de la couverture fertile
PIE 6	Perte du débit de sel intermédiaire : rupture de la pompe du circuit intermédiaire
PIE 7	Sur-refroidissement du sel fertile : sur-fonctionnement de la pompe du circuit intermédiaire
PIE 8	Perte d'intégrité et d'étanchéité de la couverture fertile : rupture de l'échangeur de chaleur du circuit intermédiaire en contact avec le fluide de conversion
PIE 9	Sur refroidissement du sel intermédiaire : sur-fonctionnement de la pompe du circuit de conversion
PIE 10	Perte de la source froide

Tableau 3 : liste des PIEs pour la couverture fertile

Le document en Annexe 3 regroupe tous les PIEs les plus importants et leurs conséquences pour la couverture fertile.

A la suite du FFMEA des questions sur le design ont été soulevées. Ainsi des propositions de modification du design (voir Annexe 4), dont l'ajout ou la suppression de composants, mais également les phénomènes à étudier, seront réalisés afin d'améliorer la sûreté du MSFR.

A la suite de cette partie du FFMEA, des études ont été proposées et menées afin de pouvoir analyser la gravité des accidents.

3.2 Application au circuit intermédiaire - Résultat du FFMEA du circuit intermédiaire : liste des PIEs

Les listes des FBS et PBS pour le circuit intermédiaire sont disponibles respectivement dans les Annexes 5 & 6.

Suite à l'analyse FFMEA, comme pour la couverture fertile, une liste de PIEs pour le circuit intermédiaire a été réalisée et est présentée dans le tableau 4.

² Une étude sur la nécessité d'un système de bullage est présentée section 5.4

PIE 1	Perte d'intégrité et d'étanchéité du circuit intermédiaire : rupture de l'échangeur de chaleur entre le circuit combustible et le circuit intermédiaire
PIE 2	Perte d'intégrité et d'étanchéité du circuit intermédiaire : rupture de l'échangeur de chaleur entre le circuit intermédiaire et le circuit de conversion
PIE 3	Perte du débit de sel intermédiaire : rupture complète de la pompe du circuit intermédiaire
PIE 4	Sur-refroidissement du circuit intermédiaire : sur fonctionnement de la pompe du circuit de conversion
PIE 5	Perte d'intégrité et d'étanchéité du circuit intermédiaire : rupture d'une conduite du circuit intermédiaire
PIE 6	Perte du retraitement du sel intermédiaire : rupture du système de purification du circuit intermédiaire
PIE 7	Perte du contrôle de la température du sel intermédiaire : rupture du capteur de température du circuit intermédiaire.
PIE 8	Perte d'intégrité et d'étanchéité du circuit intermédiaire : rupture ou déformation du support du circuit intermédiaire

Tableau 4 : liste des PIEs pour le circuit intermédiaire

Le document en Annexe 7 regroupe tous les PIEs les plus importants et leurs conséquences pour le circuit intermédiaire.

Suite au FFMEA des options de design pour le circuit intermédiaire ont été proposées et sont disponibles en Annexe 8. Suite à mes études, il s'avère qu'une étude neutronique serait nécessaire pour compléter les résultats évalués jusqu'ici sur le circuit intermédiaire. Ainsi en perspective, des études sur la production d'éléments radioactifs dans le circuit intermédiaire seraient judicieuses afin d'évaluer les risques de contamination en cas de perte de confinement du sel intermédiaire. Mais aussi, si un code système est développé, on pourrait étudier la variation de débit du sel intermédiaire afin d'évaluer les répercussions sur l'extraction de chaleur du cœur.

Ce chapitre rend compte des études effectuées à la suite de la détermination des PIEs par le FFMEA. Premièrement, est décrit l'outil de calcul utilisé pour ces études, puis la méthode pour avoir un cœur critique. Enfin les différentes études et leur analyse sont présentées dans le cas de la couverture fertile.

4.1 Outil utilisé pour les calculs de criticité : le code Serpent 2

A la suite de l'analyse FFMEA, il est nécessaire d'étudier la gravité des accidents listés tableau 3. Des études de criticité ont été menées afin de pouvoir quantifier les variations de réactivité lors des accidents et donc de quantifier les conséquences de ces derniers. Pour cela le code Serpent 2 [7], [8], [9] est utilisé.

Il s'agit d'un code de calcul neutronique Monte-Carlo. Ce code n'est pas déterministe (résolution directe, approchée ou exacte, des équations de transport ou de diffusion), mais stochastique, qui fonctionne en utilisant des tirages de nombres aléatoires répétés. Il peut ainsi simuler les histoires des neutrons par cycles. On appelle histoire l'ensemble des événements (diffusion, capture, etc.) lié à un neutron au cours d'un cycle. Ceci est réalisé en utilisant ces nombres aléatoires qui sont affectés à des variables : un neutron arrive sur un atome, et en fonction de la section efficace, l'histoire du neutron va pouvoir se dérouler : si le neutron est diffusé, l'évènement est enregistré, et le neutron continue avec une direction et une énergie différente.. S'il fissionne, son histoire s'arrête et donne naissance à de nouvelles histoires, pour les 2.5 nouveaux neutrons créés en moyenne, au cycle suivant. Enfin s'il est capturé, l'histoire s'arrête. La simulation s'effectue donc par cycles, et la distribution des sources de neutrons, pour chaque cycle, est formée par la distribution de neutrons créés par fission lors du cycle précédent. C'est l'ensemble des histoires, qui font le résultat du calcul, et notamment permettent d'obtenir le facteur de multiplication k_{eff} qui nous intéresse.

On s'est assuré à la fois de la convergence du k_{eff} et de l'entropie de Shannon [10] (qui caractérise la distribution des sources de fission), pour vérifier que nos calculs étaient bien convergés. L'étude de convergence est disponible en Annexe 9.

Dans la suite toutes les valeurs de k_{eff} , sauf si précisé, ont été calculées avec la base de données JEFF 3.1.1 et avec 50 cycles inactifs et 500 cycles actifs, pour une statistique de 200000 neutrons, à l'aide de calculs à 16 processeurs (CPU) (durée de 9h environ pour chaque calcul ce qui correspond à environ 8.6 CPU heure représentant le temps nécessaire si on avait un seul CPU).

4.2 Obtention d'un coeur critique

Pour effectuer nos calculs il faut initialiser notre système avec un état critique. Ainsi à partir des proportions d'isotopes dans le fertile, on ajuste les proportions d'isotopes dans le combustible de manière à obtenir $k_{\text{eff}} = 1$. Ces études considèrent le fertile dans sa composition initiale (sans Uranium) mais aussi dans son état stationnaire³ (avec Uranium), et sont présentées conjointement.

Cas où la composition du fertile est : ${}^7\text{LiF} - \text{ThF}_4$ (sans Uranium) :

On considèrera égales la température du sel fertile et du sel combustible et égale à 725 °C. Egalemeht, les densités pour le fertile et le combustible, à cette température, seront identiques.

La densité est donnée par la formule (1) suivante :

$$d = 4.094 - 8.82 \cdot 10^{-4} (T(K) - 1008) \text{ en g/cm}^3 \quad (1) \quad [6]$$

A 725 °C, $d = 4.103 \text{ g/cm}^3$

On fixe alors les proportions des isotopes du fertile, puis par dichotomie on fixe les proportions des isotopes du combustible afin d'avoir un k_{eff} le plus proche de 1 :

Proportion des isotopes dans le fertile : ${}^7\text{LiF} = 75 \%$ et $\text{ThF}_4 = 22.5 \%$

- $n_F = 0.775 + 4 \times 0.225 = 1.675$
- $n_{Li} = 0.775$ $n_{Li6} = 3.875 \text{ E-5}$
 $n_{Li7} = 0.77496125$
- $n_{Th} = 0.225$

Proportion des isotopes dans le combustible :

Composition combustible : ${}^7\text{LiF} - \text{ThF}_4 - \text{UF}_{3/4}$ (ici on considère que la proportion de UF_4 sera toujours très largement supérieure à celle de UF_3 , que l'on néglige donc)

${}^7\text{LiF} = 75 \%$ et $\text{ThF}_4 - \text{UF}_4 = 22.5 \%$

- $n_F = 0.775 + 4 \times n_{Th} + 4 \times n_U = 1.675$
- $n_U = 0.02635$
- $n_{Li} = 0.775$ $n_{Li6} = 3.875 \text{ E-5}$
 $n_{Li7} = 0.77496125$
- $n_{Th} = 0.19865$

³ Etat stationnaire : représente l'état du combustible pour lequel sa composition n'évolue plus en fonction du temps. Pour cet état on considère les compositions après 200 ans de fonctionnement du réacteur.

Cas où la composition du fertile est : ${}^7\text{LiF} - \text{UThF}_4$ (avec Uranium) :

De la même manière on obtient :

Proportion des isotopes dans le fertile : ${}^7\text{LiF} = 77.5\%$ et $\text{UThF}_4 = 22.5\%$

- $n_F = 1.672$
- $n_{Li} = 0.77419926$ $n_{Li6} = 1.231005 \text{ E-}5$
 $n_{Li7} = 0.77419804$
- $n_{Th} = 0.22505086$
- $n_U = 7.49867 \text{ E-}4$

Proportion des isotopes dans le combustible : $\text{LiF} = 77.5\%$ et $\text{ThF}_4 - \text{UF}_4 = 22.5\%$

- $n_F = 1.675$
- $n_U = 0.02637$
- $n_{Li} = 0.775$ $n_{Li6} = 3.875 \text{ E-}5$
 $n_{Li7} = 0.77496125$
- $n_{Th} = 0.19863$

Les valeurs de k_{eff} issues de ces proportions sont données dans le tableau 4.

	k_{eff}	$\rho = \frac{K_{eff}-1}{K_{eff}}$
Sans Uranium	0.99986 +/- 0.00005	-1.4E-4 +/- 0.00005
Avec Uranium	1.00062 +/- 0.00007	6.19615 E-4 +/- 0.00007

Tableau 4 : valeur de k_{eff} et de ρ (cas fertile avec et sans Uranium)

4.3 Etudes liées à l'exemple de la section 3.1.1

Des études de criticité ont pu être menées dans le cas de la perte de confinement du sel fertile. Celles-là sont représentatives de l'exemple du FFMEA en 3.1.1. Les figures 5 et 6 montrent la géométrie des simulations pour le MSFR. La géométrie avait été créée grâce au logiciel Shark préalablement au stage sous forme d'un fichier STL, utilisé pour les calculs Serpent.

La thèse de M. BROVCHENKO [6], présentant des études préliminaires de sûreté du MSFR, contient de nombreux calculs similaires aux études présentées ci-après. Ainsi certaines comparaisons seront effectuées par la suite.

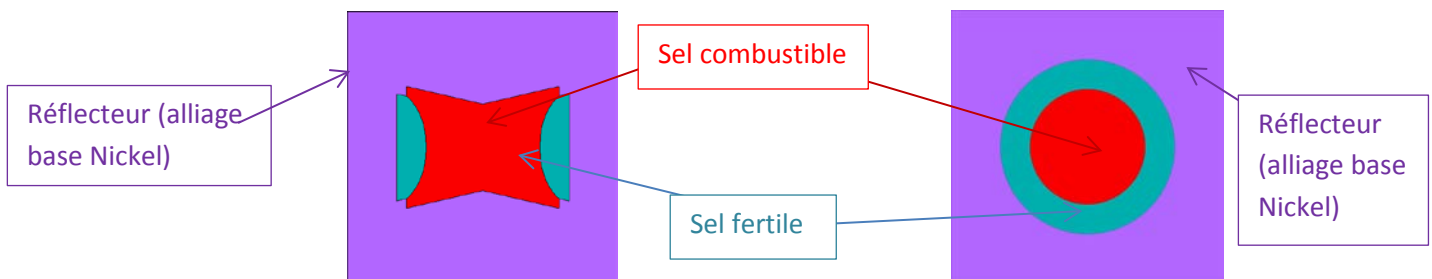


Figure 5 : Géométrie de la simulation pour le MSFR (coupe verticale)

Figure 6 : Géométrie de la simulation pour le MSFR (coupe horizontale)

Etude 1 : On considère la rupture de la paroi de la couverture fertile. On suppose alors un mélange fertile/combustible après équilibrage des pressions afin que la composition soit homogénéisée sur le volume total cœur + couverture.

Les volumes sont trouvés en utilisant l'option Checkvolumes dans Serpent :

$$\text{Volume cœur} = \underline{8879400 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Volume couverture fertile} = \underline{7348100 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Volume total} = \underline{16227500 \text{ cm}^3}$$

En homogénéisant, on obtient les proportions suivantes dans le volume total :

- $n_F = 1.675$
- $n_U = 0.01441825$
- $n_{LI} = 0.775$ $n_{LI6} = 3.875 \text{ E-}5$
 $n_{LI7} = 0.77496125$
- $n_{Th} = 0.21058175$

On obtient alors les résultats listés dans le tableau 5 :

	k_{eff}	ρ	$\Delta\rho = \rho_{\text{initial}} - \rho_{\text{étude}}$
Sans Uranium	0.72082 +/- 0.00004	-0.387308 +/- 0.0001	-38716 pcm
Avec Uranium	0.73129 +/- 0.00006	-0.36745 +/- 0.00013	-36806 pcm

Tableau 5: valeur de k_{eff} , ρ et $\Delta\rho$ dans le cas du fertile avec et sans Uranium pour l'étude 1

Analyse : Comparée à la réactivité initiale, on s'aperçoit que la réactivité diminue. D'après la thèse de M. BROVCHENKO [6] une insertion de réactivité négative de l'ordre de 1000 pcm peut ainsi conduire à une diminution de la température en dessous du point de fusion. En effet, s'il se produit une insertion de réactivité négative assez importante (de l'ordre de 1000 pcm), la réaction en chaîne s'arrêtera. Ainsi il n'y plus de fission et il ne reste que la puissance résiduelle à évacuer. Si l'extraction de puissance équivaut à la puissance résiduelle, la température ne varie pas et le réacteur est dans un état stable. Dans notre cas, si au contraire, on garde une extraction de puissance supérieure à la puissance résiduelle, le sel dans les échangeurs de chaleur va atteindre la température de fusion et va se solidifier à cet endroit. Si la solidification mène à une obstruction totale des échangeurs de chaleur alors le sel dans le cœur lui n'est donc plus refroidi et sa température va donc augmenter à nouveau.

Une vidange est nécessaire afin d'évacuer la chaleur résiduelle dans le réservoir de vidange d'urgence et notamment de réparer la fuite de la couverture fertile et de renouveler le combustible et le sel fertile.

On constate une insertion négative de réactivité plus grande pour le cas du sel fertile sans uranium qu'avec uranium. En effet, lors de l'homogénéisation avec le fertile sans uranium,

la densité de matière fissile sera moindre et donc mènera à une insertion de réactivité négative plus grande.

Etude 2 : On considère maintenant le cas où la couverture fertile est vidangée, mais une brèche est apparue après la vidange, tout ceci pendant que le cœur est en fonctionnement. Ainsi, la couverture fertile se remplit de sel combustible. Ceci est un cas extrême car la couverture est fragmentée en plusieurs secteurs, et donc le combustible, dans le cas d'une brèche localisée, ne rentrerait pas dans chaque secteur mais dans un seul.

Les proportions pour le combustible restent les mêmes que celles de départ, permettant d'obtenir un k_{eff} de 0.99986 ± 0.00005

On obtient alors les résultats du tableau 6 :

	k_{eff}	ρ	$\Delta\rho = \rho_{initial} - \rho_{étude}$
Sans Uranium	1.03717 ± 0.00005	0.03584 ± 0.00005	3598 pcm
Avec Uranium	1.03769 ± 0.00006	0.036321 ± 0.00006	3570 pcm

Tableau 6: valeur de k_{eff} , ρ et $\Delta\rho$ (cas fertile avec et sans Uranium) pour l'étude 2

Analyse: On constate une grande insertion de réactivité (3000 pcm). Néanmoins le cas étudié est un cas extrême car la probabilité pour que la couverture fertile soit remplie de sel combustible est très faible.

M. BROVCHENKO a réalisé la même étude mais avec une géométrie cylindrique : un premier cylindre composant le cœur contenait le combustible, et un deuxième cylindre entourant le cœur composait la couverture fertile. Elle obtenait : $\Delta\rho=1600$ pcm [6]

Le changement de géométrie dans la thèse de M. BROVCHENKO doit expliquer cette différence.

Dans le cas d'une insertion de réactivité positive, le transitoire est représenté sur les figures 7 et 8 (résultat de la thèse de A.Laureau [11] calculé avec un modèle de cinétique point par zone) pour des insertions de réactivités différentes de nos résultats.

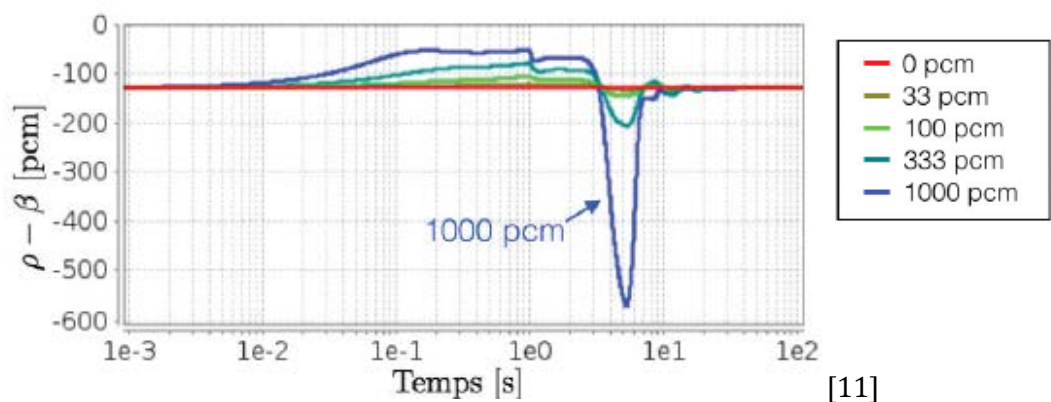


Figure 7 : variation de la réactivité lors d'une insertion de réactivité $\Delta\rho \in \{0, 33, 100, 333, 1000\}$ pcm en 1 seconde

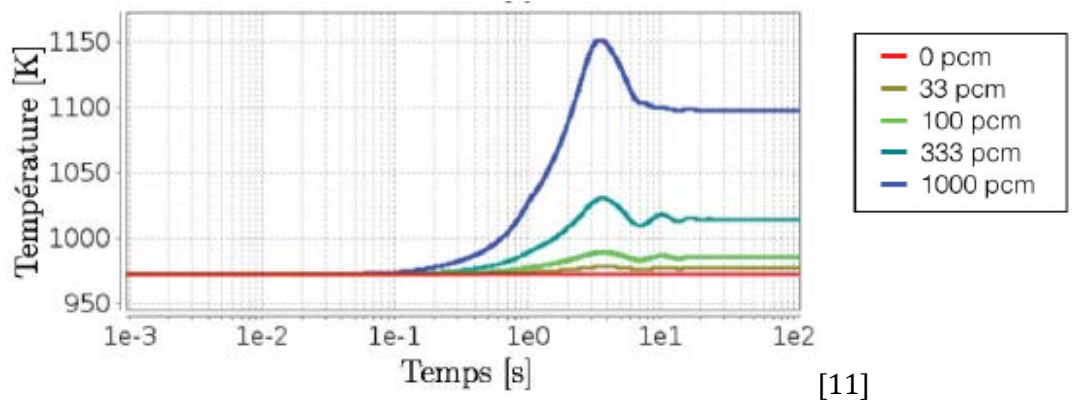


Figure 8 : variation de la température lors d'une insertion de réactivité $\Delta\rho \in \{0, 33, 100, 333, 1000\}$ pcm en 1 seconde

Ces deux figures nous permettent de connaître l'allure d'une insertion de réactivité positive. La réactivité augmente puis revient à sa valeur initiale, du fait des contre réactions (coefficient de contre réaction négatif). Néanmoins on peut voir que pour la température ce n'est pas le cas. Celle-ci augmente fortement et reste par la suite à un niveau élevé. Ainsi une insertion de réactivité positive pose des problèmes au niveau de la structure, puisque si cette insertion est trop importante la température en cœur sera très élevée et la structure risque d'être endommagée. Dans ce cas là, une vidange d'urgence du combustible doit être effectuée. Si l'insertion positive de réactivité amène à une élévation non critique de la température, alors une modification de la vitesse de circulation du sel intermédiaire et du fluide de conversion sera effectuée afin de pouvoir évacuer cette chaleur pour se ramener à la température initiale du cœur.

On peut évaluer la température finale attendue après une certaine insertion de réactivité :

$$T_{final} = T_0 + \frac{\rho}{dk/dT}$$

Une insertion de 3598 pcm correspond à une température finale de :

$$T_{final} = 998.15 \text{ K} + \frac{3598 \text{ pcm}}{8 \text{ pcm/K}} = 1448 \text{ K}$$

On atteint donc 1448 K pour le combustible. Or d'après le livrable [12], on considère la vidange du combustible lorsqu'il atteint une température de 1200 °C soit 1473 K. Cependant dans notre étude on calcule la température finale. Or la température du combustible lors de ce transitoire est supérieure à 1448 K, et risque d'atteindre la température limite de vidange. Ainsi une vidange sera sûrement nécessaire dans ce cas de figure.

On constate encore une insertion de réactivité plus grande pour le cas du sel fertile sans uranium que pour le cas contraire. En effet, la densité en matière fissile du sel combustible, dans le cas où le sel fertile ne contient pas d'uranium, sera plus grande. Ainsi lors de l'insertion du sel

combustible dans la couverture fertile, vide de sel fertile, le bilan en matière fissile sera plus grand que pour le cas du sel fertile avec uranium.

5.3 Autres études et résultats issus du FFMEA de la couverture fertile

D'autres analyses de criticité faisant suite au FFMEA ont été menées et sont présentées ci-dessous.

Etude 3: On considère une vidange du sel fertile alors que le cœur est toujours en fonctionnement. On considère alors la couverture fertile vide de sel fertile.

	k_{eff}	ρ	$\Delta\rho = \rho_{initial} - \rho_{étude}$
Sans Uranium	0.99392 +/- 0.00005	-6.1172 E-3 +/- 0.00005	- 597.72 pcm
Avec Uranium	0.99438 +/- 0.00008	-5.65176 E-3 +/- 0.00008	-627.13 pcm

Tableau7: valeur de k_{eff} , ρ et $\Delta\rho$ (cas fertile avec et sans Uranium) pour l'étude 3

Analyse: L'écart à la valeur par rapport à $k_{eff\ initial}$ est de 5.94 E-3. Sachant que l'erreur statistique est de 0.00005 le résultat peut être considéré comme représentatif.

Dans la thèse de M. BROVCHENKO [6] $\Delta\rho = -354$ pcm. Donc dans notre cas, l'insertion de réactivité négative étant plus grande, la sous-criticité sera plus importante.

On observe une légère diminution de la réactivité du cœur lors de l'absence de sel fertile dans la couverture fertile. Ceci peut être dû au fait que le sel fertile est ici constitué de noyaux lourds. Ainsi dans le cas où le sel fertile est présent dans la couverture, les noyaux lourds engendreront des captures de neutrons, et le sel fertile quant à lui jouera un rôle de réflecteur sur les neutrons permettant de renvoyer des neutrons vers le cœur.

Dans notre cas le sel fertile étant absent, la réflexion des neutrons par celui-ci vers le cœur est inexistante, ainsi que les captures de neutron dans la couverture. Ces neutrons vont donc continuer leur chemin et se réfléchir sur le réflecteur entre la couverture fertile et l'échangeur de chaleur, et revenir vers le cœur (mais ils mettront plus de temps). Ces deux phénomènes pouvant se compenser (à quantifier), cela peut mener à une très légère baisse de la réactivité.

L'insertion de réactivité étant faible (inférieure à 1000 pcm) on peut jouer sur l'extraction de chaleur afin de ramener le cœur à un état critique. Cela engendrera une baisse globale de la température du combustible, mais la solidification dans les échangeurs de chaleur sera évitée.

On constate que l'insertion de réactivité négative est plus importante dans le cas du fertile avec uranium que sans uranium. Ceci est dû au fait que lors de la perte du sel fertile, en plus de perdre la caractéristique réflectrice du sel, on perd la matière fissile présente dans le sel

fertile. Or dans le cas sans uranium on ne perd pas de matière fissile, et ainsi l'insertion de réactivité négative est moindre que pour le cas du sel fertile avec uranium.

Etude 4 : On considère une variation de la température du fertile pendant que le cœur est en fonctionnement. Pour étudier cela on a tracé la variation de réactivité par rapport à la réactivité initiale (à 725°C) en fonction de la température du sel fertile, dans les deux cas de composition du sel fertile. (Figures 9 et 10).

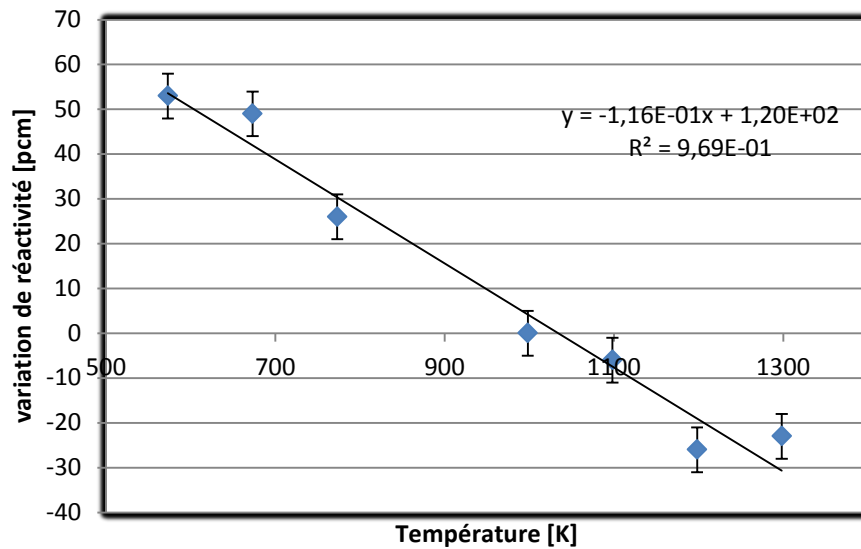


Figure 9 : Variation de la réactivité en fonction de la température du sel fertile (cas composition initiale du fertile)

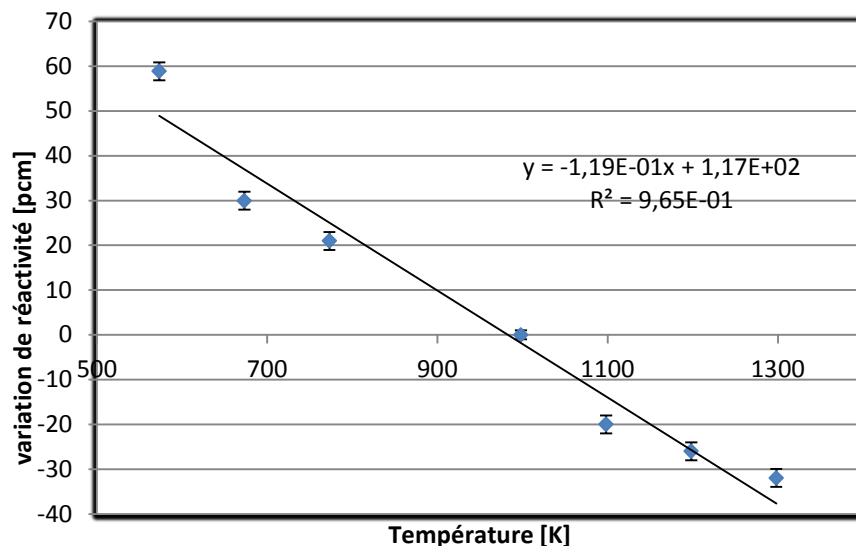


Figure 10 : Variation de la réactivité en fonction de la température du sel fertile (cas composition stationnaire du fertile)

Analyse : La figure 9 a été réalisé avec une statistique de 200 000 neutrons, alors que la figure 10 l'était avec 2 000 000 neutrons, car sinon la courbe de cette dernière n'était pas significative. On constate une évolution plus ou moins linéaire de la variation de réactivité dans les deux cas.

On constate que, lorsque la température du sel fertile augmente, la réactivité diminue, et lorsque la température diminue la réactivité augmente. Ceci est dû aux coefficients de contre réactions négatifs. Cependant l'effet de la contre réaction par la couverture fertile est moindre que pour le combustible. En effet, pour le combustible on a -8 pcm/K , or ici on voit que l'on a environ -0.2 pcm/K . L'effet de la variation de température du sel fertile est donc moindre sur la réactivité qu'une variation de température du sel combustible.

On constate de plus que les variations de réactivité sont plus importantes dans le cas du sel fertile à l'état stationnaire que dans son état initial. Cela est dû à la quantité d'Uranium, qui étant plus importantes, va plus influencer sur la réactivité.

Etude 5 : Dans cette étude on cherche à savoir si l'effet d'une insertion de sel fertile dans le combustible peut amener à une insertion de réactivité positive. En effet d'après la thèse de M. BROVCHENKO, dès lors qu'on a un mélange de sel combustible avec un autre sel (e.g. sel fertile), il y aurait une insertion négative de réactivité. Les tests effectués ici visent à vérifier cela, en supposant que si le sel en contact est suffisamment froid, il y aurait une possibilité d'insertion de réactivité positive. On considère alors une entrée de sel fertile dans le combustible. Mais ne sachant pas comment le sel fertile va se propager dans le cœur lors d'une perte de confinement du sel fertile, on considère un cas extrême, le plus contraignant possible : une sphère de sel fertile dans son état stationnaire, très froide, est insérée au centre du cœur (car c'est la zone la plus importante pour la neutronique), dans le sel combustible (voir figure 11).

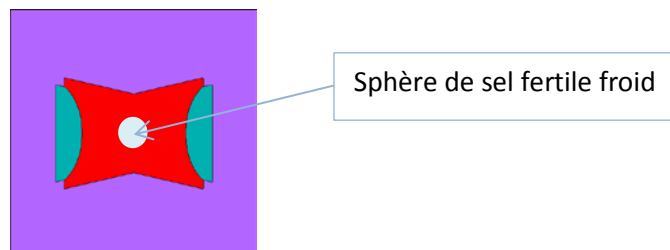


Figure 11 : géométrie de la simulation de l'étude 5

Paramètre :

- Sphère de 20 cm de rayon et à 400 °C :

On obtient $k_{\text{eff}} = 0.99085 \pm 0.00017$ et $\rho = -9.23449 \text{ E-3} \pm 0.0002$

$\Delta\rho = -985 \pm 20 \text{ pcm}$

- Sphère de 20 cm de rayon et à 200 °C :

On obtient $k_{\text{eff}} = 0.99069 \pm 0.00007$ et $\rho = -9.39749\text{E-}3 \pm 0.00007$

$\Delta\rho = -1001 \pm 10$ pcm

Dans les deux cas on constate une insertion négative de réactivité de l'ordre de 1000 pcm. On montre donc que même à basse température, s'il y a contact entre deux sels alors cela mènera à une insertion négative de réactivité, ce qui est positif pour la sûreté du MSFR. Les autres études ne sont donc pas nécessaires (autre forme, autre volume, etc.) car ayant considéré le cas le plus contraignant, les autres études mèneront aussi à une insertion négative de réactivité.

5.4 Etude sur la nécessité d'un système de bullage

On cherche ici à déterminer s'il est nécessaire d'extraire les produits de fissions gazeux et métalliques de la couverture fertile.

Suite à un calcul effectué au préalable à l'aide du code d'évolution ERE [13], on possède la quantité de matière (en moles) au bout de 200 ans de fonctionnement du réacteur, des produits de fission dans la couverture fertile (total des 16 secteurs) (voir Tableaux 8 & 9).

gaz				
	Hydrogène	Hélium	Krypton	Xénon
Z	1	2	36	54
nombre de moles	6.69E+01	1.54E+03	1.78E+02	5.76E+02

Tableau 8 : Quantité en moles de produits de fission gazeux au bout de 200 ans

métaux								
	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
Z	41	42	43	44	45	46	47	48
A	92,9	96,9	98	101.1	102.9	106.4	107.9	112.4
nombre de moles	1.40E-01	5.54E+02	1.22E+02	1.91E+02	4.99E+01	8.94E+01	1.52E+01	7.24E+01

Tableau 9 : Quantité en moles de produits de fission métalliques au bout de 200 ans

On cherche alors le volume produit de ces éléments, afin de déterminer s'il est nécessaire d'extraire les produits de fissions gazeux et métallique de la couverture fertile.

Pour les gaz : on obtient le volume avec $V = \frac{nRT}{p}$ loi de gaz parfaits

Avec n donné par le tableau 1

$$R = 8.314$$

$$T = 998.15$$

$$P = P_{atm} = 10^5 \text{ Pa}$$

On obtient alors les volumes suivants (tableau 10) :

	H	He	Kr	Xe
volume m^3 en 200 ans	5.55E+00	1.28E+02	1.48E+01	4.78E+01
volume m^3 en 10 ans	2.77E-01	6.41E+00	7.38E-01	2.39E+00
volume cm^3 en 10 ans	2.77E+05	6.41E+06	7.38E+05	2.39E+06
Total m^3 en 10 ans	9.81			
Total cm^3 en 10 ans	9.81 E+06			

Tableau 10 : volume des produits de fission gazeux

Volume par secteur : $V = 0.613 m^3$

Analyse : On constate donc un volume gazeux non négligeable au bout de 10 ans de fonctionnement. Un système de bullage peut donc être nécessaire. Néanmoins cette solution présente des risques : possibilité de fuite à cause des connexions, etc. Une alternative au système de bullage est possible : un vase d'expansion situé au dessus de chaque secteur permettrait de recueillir le volume de gaz produit par la couverture.

On peut dimensionner ces vases d'expansion : un tel vase contient un gaz neutre dès le départ à pression atmosphérique (car si vide, le fertile remontera dans le vase) : par exemple de l'Argon, avec un volume d'au moins $0.613 m^3$ pour chaque secteur. Cependant, le système n'est pas à température ambiante en fonctionnement, donc la pression de l'argon va augmenter. On doit donc considérer une pression moindre lors de sa fabrication avant qu'il ne soit mis en fonctionnement, pour atteindre la pression atmosphérique en fonctionnement : on passe de 300 K à 998 K soit un facteur 3, donc on part avec $1/3$ de la pression atmosphérique dans le vase d'expansion pour l'Argon.

Néanmoins, d'après les normes de sûreté, il ne faut pas atteindre plus de 3 bars dans les systèmes. Ainsi on fixe une limite à 2 bars, pour un volume de $0.613 m^3$. On atteindra cette quantité de produits de fission au bout de 10 ans : le secteur devra alors être changé.

En lien avec l'analyse de sûreté préalable, on constate que le système de bullage dans la couverture fertile n'est donc pas nécessaire et qu'ainsi on évite par le design le PIE3 du tableau 3.

Pour les métaux : On détermine le volume en reliant la quantité de mole à la masse avec

$$m = n \times M$$

On considère une densité $d = 10 \text{ g/cm}^3$ environ pour ces métaux. Le volume est alors donné par $V = m/d$ en cm^3 .

On obtient alors les résultats du tableau 11 :

	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
volume m^3 en 10 ans	6.52E-08	2.68E-04	5.96E-05	9.68E-05	2.57E-05	4.76E-05	8.21E-06	4.07E-05
volume cm^3 en 10 ans	6.52E-02	2.68E+02	5.96E+01	9.68E+01	2.57E+01	4.76E+01	8.21E+00	4.07E+01
Total m^3 en 10 ans	5.47 E-04							
Total cm^3 en 10 ans	5.47 E+02							

Tableau 11 : Volume des produits de fission métalliques au bout de 10 ans

Observation : on constate un volume très faible de produits de fission métallique. On peut donc les laisser dans le secteur pour toute sa durée de vie, sachant qu'il subsiste un risque de dépôts localisés (sur les échangeurs de chaleur par exemple qui pourraient amoindrir le coefficient d'échange ou obstruer les conduites/plaques).

Dans le cadre du projet européen SAMOFAR, l'étude de sûreté du MSFR est en cours de réalisation. Elle est effectuée en utilisant notamment deux méthodes innovantes d'analyse de risque : le MLD et le FFMEA. Cette dernière s'organise par une approche fonctionnelle, puisqu'on s'intéresse aux fonctions et à leur perte. C'est en cela que réside son originalité, qui est utile lorsque le design n'est pas encore fixé, comme pour le MSFR.

Ce stage a eu pour but d'appliquer la méthode FFMEA à deux éléments du MSFR : La couverture fertile et le circuit intermédiaire. Ainsi pour chacun d'eux, le FFMEA a été organisé dans un tableur, à l'aide de leur liste de fonctions et de composants. Cela a abouti à l'identification des événements initiateurs de ces deux systèmes.

Cette liste des événements initiateurs a permis ensuite d'identifier un grand nombre d'études neutroniques pour la couverture fertile afin de quantifier les conséquences de ces accidents. Les résultats ont pu montrer que dans la majorité des cas, ces accidents mènent à une insertion de réactivité négative, ce qui est favorable pour la sûreté du réacteur, mais cela peut quand même laisser des contraintes non négligeables menant à la vidange du cœur. Dans le cas où l'insertion de réactivité est positive, comme pour le cas où la couverture fertile est remplie uniquement de sel combustible, une vidange du cœur semble être nécessaire afin d'éviter un aggravement des conséquences.

En complément, une étude sur la quantité de produits de fission produite dans la couverture fertile a été réalisée, dans le but de savoir si un système de bullage serait nécessaire. On a pu montrer que le volume des produits de fission gazeux était important. Par choix, pour diminuer les risques de fuite, on a choisi de remplacer le système de bullage par un vase d'expansion, qui atteindra une pression de 2 bars après 10 ans de fonctionnement (la norme de sûreté étant de 3 bars). Ainsi le secteur devra être changé dans cette période afin d'éviter une surpression. Suite à ces résultats, des options de design ont pu être proposées afin d'éviter certains événements initiateurs, ou afin de diminuer leurs conséquences. Ces études ont été présentées via un poster lors de l'école d'été internationale du projet européen SAMOFAR début juillet en Italie.

Pour le circuit intermédiaire, des études supplémentaires sont nécessaires. Néanmoins, des options de design ont été proposées afin de pouvoir limiter les conséquences des événements initiateurs listés à la suite du FFMEA.

En perspective le choix du sel intermédiaire doit être fait afin de réaliser les études nécessaires pour quantifier les accidents (ex : mélange intermédiaire /combustible etc.). De plus, un code système pourrait être réalisé afin d'étudier les effets de la variation du débit du sel intermédiaire sur la quantité de chaleur extraite du cœur. Par ailleurs le FFMEA doit être appliqué à l'ensemble du MSFR (ex : le circuit de conversion). D'autre part, les études sur la probabilité d'occurrence de ces accidents doivent être effectuées, et il faudra ensuite définir des systèmes de protection par des méthodes plus structurées, afin d'éviter les accidents les plus graves.

- [1] GIF (Generation IV International Forum), “Annual report 2015”. Site : https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2016-09/gif_2015_annual_report_-_final_e-book_v2_sept2016.pdf.
- [2] SAMOFAR website, “project”, <http://samofar.eu/project/>.
- [3] A. C. Ugenti et al, “Preliminary functional safety assessment for molten salt fast reactors in the framework of the SAMOFAR project”. International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2017). 2017, Pittsburgh, USA.
- [4] A. Caprignano et al, “Safety Issues related to the Intermediate Heat Storage for the EU DEMO”. FUSION ENGINEERING AND DESIGN, vol. 109-111, part A, pp. 135-140, 2016, Torino, Italie.
- [5] T. Pinna et al, “Identification of accident sequences for the DEMO plant”. FUSION ENGINEERING AND DESIGN, article in press, 2017, Italie.
- [6] M. Brovchenko, “ Etudes préliminaire de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR”. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2013, Grenoble, France.
- [7] J. Leppänen. “Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code”. User’s Manual, 2015 June 18, Finland.
- [8] Wikipedia-serpent. “ imput syntaxe manual”. Site : http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Input_syntax_manual
- [9] J. Leppänen. “Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code”. Thèse de doctorat, University of Technology ,Espoo, 2007, Finland.
- [10] Forrest B. Brown. “On the Use of Shannon Entropy of the Fission Distribution for Assessing Convergence of Monte Carlo Criticality Calculations”. Technical report of ANS Topical Meeting on Reactor Physics Organized and hosted by the Canadian Nuclear Society, 2006 September 10-14, Vancouver, BC, Canada.
- [11] A. Laureau, “Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs ”. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015, Grenoble, France.
- [12] M. Allibert et al, “D1.1 Description of initial reference design and identification of safety aspects”. Livrable du projet européen SAMOFAR du programme Horizon 2020, janvier 2017.
- [13] X. Doligez, “Influence du retraitement physico-chimique du sel combustible sur le comportement du MSFR et sur le dimensionnement de son unité de retraitement ”. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010, Grenoble, France.

Annexe 1 : FBS de la couverture fertile

Le FFMEA s'appuie sur une liste de fonctions pour pouvoir identifier tous les PIEs possibles. Cette annexe présente la liste des fonctions associées à la couverture fertile utilisée lors de l'analyse FFMEA de celle-ci lors du stage.

To perform process functions

1. To produce fissile matter in the blanket sectors

1.1. To produce fissile matter in the blanket

1.1.1. To allow the neutron flux to reach the fertile salt

1.1.2. To control and manage the fertile salt inventory in the fertile salt circuit

1.1.2.1. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of the fertile salt blanket

1.1.2.2. To keep and preserve the integrity of the fertile salt circuit

1.1.2.3. To measure fertile salt temperature, pressure and mass-flow

1.1.2.4. To add fertile salt

1.1.2.5. To remove fertile salt

1.1.2.6. To manage pressure/volume of the fertile salt

1.1.2.6.1. To preserve free surfaces in the active zone

1.1.2.6.2. To manage the fission products presence in the active zone

1.1.3. To manage the fertile salt chemical composition (in the entire blanket)

1.1.3.1. To provide chemical purification (absorber elements)

1.1.3.1.1. To remove fission products

1.1.3.1.2. To limit chemical impurities

1.1.3.2. To ensure homogeneity of the fertile salt

1.1.3.2.1. To provide circulation of the fertile salt (ref.)

1.1.3.2.2. To provide enough turbulence eddies (?)

1.1.3.3. To measure and adjust the chemical composition of the fertile salt

1.1.3.3.1. To provide fertile salt flow in the fertile salt sampling device

1.1.3.3.2. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of the fertile salt sampling device

1.1.3.3.3. To measure the physical and chemical parameters of the fertile salt (e.g. electrochemical potential, corrosion rate, ...)

1.1.3.3.4. To adjust the fertile salt chemical composition (Li, Th, F)

1.1.3.3.5. To draw samples for reprocessing

1.1.3.3.6. To analyse fertile salt

1.1.3.3.7. To inject the fertile salt

1.1.3.3.8. To manage the pressure of the fertile salt sampling device

1.1.4. To cool-down the breeding blanket

1.1.4.1. To provide circulation of the fertile salt

1.1.4.1.1. To provide correct geometry and space for the fertile salt circulation

1.1.4.1.2. To provide fertile salt flow

1.1.4.1.3. To maintain the fertile salt at a liquid state

1.1.4.1.4. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of the blanket

1.1.4.2. To provide the intermediate salt circulation

1.1.4.2.1. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of intermediate salt circuits for the fertile salt

- 1.1.4.2.2. To provide intermediate salt flow
- 1.1.4.2.3. To provide enough space for the intermediate salt circulation
- 1.1.4.2.4. To maintain the intermediate salt at a liquid state
- 1.1.4.3. To provide pressure and intermediate salt inventory in the intermediate circuit for the fertile salt
 - 1.1.4.3.1. To keep and preserve integrity of the pressure control system of the intermediate circuit
 - 1.1.4.3.2. To provide intermediate salt inventory
 - 1.1.4.3.3. To provide intermediate salt pressure control
 - 1.1.4.3.4. To provide flow in the pressure control system for the intermediate circuit
- 1.1.4.4. To provide the purification of the intermediate circuit salt for the fertile salt
 - 1.1.4.4.1. To keep and preserve integrity of the purification system of the intermediate circuit
 - 1.1.4.4.2. To provide intermediate salt flow in the purification system of the intermediate salt
 - 1.1.4.4.3. To provide pressure control in the purification system of the intermediate circuit
 - 1.1.4.4.4. To provide the removal of the impurities from the intermediate salt
- 1.1.4.5. To measure intermediate salt physical and chemical parameters
- 1.1.4.6. To provide heat sink
- 1.1.5. To ensure the integrity of the structure
- 1.2. To extract fissile matter
 - 1.2.1. To provide fertile salt flow in the fertile salt sampling device
 - 1.2.2. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of the fertile salt sampling device
 - 1.2.3. To draw samples of fertile + fissile salt for reprocessing
 - 1.2.4. To separate fissile matter from fertile salt
 - 1.2.5. To re-inject the fertile salt in the blanket
 - 1.2.6. To manage the pressure of the fertile salt sampling device

Annexe 2 : PBS de la couverture fertile

Le FFMEA s'appuie sur une liste de fonctions pour pouvoir identifier tous les PIEs possibles. Ainsi pour obtenir la liste des PIEs, tous les composants associés à chaque fonction sont étudiés dans l'objectif de comprendre comment la fonction est perdue. Cette annexe présente la liste des composants (PBS) associées à la couverture fertile, utilisée lors de l'analyse FFMEA de celle-ci lors du stage.

1.1.1. Blanket salt circuit (x16)

- 1.1.1.1. Blanket tank / wall between fuel and fertile salt
- 1.1.1.2. Blanket cooling loop using the intermediate fluid
 - 1.1.1.2.1. Pumps
 - 1.1.1.2.2. Heat exchanger with the intermediate circuit
 - 1.1.1.2.3. Fission products removing system from the blanket salt (e.g. filters, not defined)
 - 1.1.1.2.4. Pipes
 - 1.1.1.2.5. Connexion between the blanket cooling system and the blanket sampling device
 - 1.1.1.2.6. Valves
- 1.1.1.3. Blanket sampling device (with a free surface)
- 1.1.1.4. Connexion from the blanket sampling device to the reprocessing unit through the reactor building (fertile salt) (It is possible to use the 1.1.2.1.2.7)
 - 1.1.1.4.1. Pipes
 - 1.1.1.4.2. Gates

Annexe 3 : Postulated Initiating Events (PIEs) for the fertile blanket tank

Methodology

Starting from the elementary IEs, the following questions can provide a guideline to identify the PIEs:

1. What is the plant status after the initiating event, without considering the further accident propagation?
2. What are the mitigating actions (lines of defence) to be provided to avoid the accident propagation to the environment?
3. What are the mitigating actions (lines of defence) to be provided to limit the accident consequences to the environment?

All the effects presenting the same answer to the above three questions can be grouped in a representative PIE.

Then, the grouping of IEs in PIEs is usually done according to criteria of similarity of the consequences associated to the single IE and of plant response in terms of preventive and mitigating actions. Generally, the most severe in terms of consequences of the basic elementary events is the event chosen as PIE.

List of PIE

Rupture of blanket tank wall between fuel and fertile salts with rupture of the cooling circuit for internal structures

CONSEQUENCES

The fertile and the intermediate salts enter in the fuel circuit because the pressure of the blanket circuit and the cooling circuit for the structure are higher than the pressure of the fuel circuit. The salt volume in the core cavity increases and the free surface levels increase. The isolating valves of the fertile circuit (if any) and of the intermediate circuit are closed in order to limit the loss of salts. If the valves are not closed soon enough, the pressure in the core cavity reaches the equilibrium with the pressure of the blanket and intermediate circuits. The mixture fuel/fertile/intermediate salt enters in the blanket circuit and the cooling circuit for the structure and may damage their components (because of high temperature and neutron activation).

The structures of the sector are not cooled anymore and can be damaged by the high temperature.

The composition of the salt in the core becomes subcritical because of the decrease of the fissile matter density. The chain reaction shuts down. The fuel salt is drained to the routine storage tank/EDS and it is cooled by the routine storage tank/EDS cooling system.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance & control of the radioactivity of cooling circuit

MITIGATING ACTIONS

Close isolation valve (if any) for the fertile and also for the cooling fluid.

NOTES

Is the pressure in the blanket lower, equal or higher than the fuel?

Is the temperature of the blanket lower, equal or higher than the fuel?

Is the pressure in the intermediate circuit lower, equal or higher than the fuel?

Is the temperature of the intermediate lower, equal or higher than the fuel?

Rupture of neutron protection

CONSEQUENCES

Broken parts of the neutron protection, if present, can enter in the fuel salt or in the fertile tank and damage the fuel/fertile circuit components (e.g. pumps). Broken pieces of the pump can further damage the surrounding structures and can cause the shutdown of the chain reaction because of the pollution of the fissile zone.

Depending on the rupture location, the fuel or the fertile salt enters the breach and might damage the other components of the sector. If the salt stays stagnant for a long time, its composition will be corrupted and can cause corrosion, that will further damage the neutron protection and the other components of the sector.

The heat exchanger is less protected from the neutron flux and its lifetime is reduced. Some other components of the fuel circuit are more irradiated than what is foreseen by the design and their lifetime is reduced.

The fuel salt is drained to the routine storage tank/EDS and it is cooled by the routine storage tank/EDS cooling system.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

Rupture of the fertile pump

CONSEQUENCES

The fertile salt flow, in the corresponding sector, decreases. If the pumps have flywheels, it gives to the system a greater rotational inertia. After some times, the circulation stops completely, and depending on the geometry, it is possible that the fuel and the fertile salt mix.

Natural circulation of the salt can start.

The fertile salt in the concerned recirculation sectors becomes colder, the lower temperature achievable corresponding to the thermal equilibrium with the intermediate salt. If there is no natural convection or if the natural convection is too weak, there is a risk of precipitation of some elements in the heat exchangers and the salt may solidify if the intermediate salt working temperature is lower than the fertile salt solidification temperature.

The heat extraction becomes less and less efficient.

The temperature of the fertile salt in the rest of the fertile circuit increases: the increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps . If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump, as item 27.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the concerned circuit cannot be controlled.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank means a small insertion of negative reactivity (very small insertion) decrease because of the decrease of the concentration of fissile matter.

The fertile salt has to be drained to the blanket storage tank.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

To design SIC SSC.

We can design the fertile circuit in order to have some natural convection (in order to have a small flow that still exists)

Also the temperature of the cooling circuit should be higher than the temperature of solidification of the fertile salt.

The system can be designed in order to avoid a mixture between the fertile and the fuel salts in case of leakage/rupture of the pump.

NOTES

Is the pressure in the blanket lower, equal or higher than the fuel?

Is the temperature of the blanket lower, equal or higher of the fuel?

Rupture of the fission products removal system from the blanket salt

CONSEQUENCES

There is a leakage of fissions products (coming from fission of U233). The fission removal system is unavailable therefore, the fission products will stay in the blanket tank and they will capture some neutrons, then the capture on Th232 will decrease. Therefore, the production of U233 in the blanket tank is lower (just a little bite).

Also the pressure in the blanket circuit will increase because of the increase of gaseous products.

The liquid fission product or metallic fission product can stick on the wall. Therefore there will be an accumulation of fission products in some areas, mainly on the heat exchanger (HX). Those accumulations can obstruct some pipes, or also can form some agglomerations larger or smaller that could cause some abrasions or potentially some other obstructions.

The increase of the corrosion is possible because of some kinds of fission products and other chemical elements.

In case of leakage, the fertile salt enters the fuel circuit because the pressure of the blanket circuit is higher than the pressure of the fuel circuit. The salt volume in the core cavity increases and the free surface levels increase. The isolating valve of the fertile circuit (if any) is closed in order to limit the loss of salts. If the valves are not closed soon enough, the pressure in the core cavity reaches the equilibrium with the pressure of the blanket. The mixture fuel/fertile salts enter in the blanket circuit and may damage their components (because of high temperature and neutron activation).

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

Detector

MITIGATING ACTIONS

The processing of the salt will be available thanks to the sampling system. We can design the system in order to avoid a mixture between the fertile and the fuel salts.

NOTES

The proportion of fission product is small, so the impact of this failure will not be significant.

Rupture of part of the heat exchanger with the intermediate circuit

CONSEQUENCES

There will be a mix of the fertile and the intermediate salt. Because the pressure of the intermediate salt is higher than the fertile, the intermediate salt will go in the blanket circuit. The pressure of both circuit reach equilibrium, and then the mixture flows into the intermediate circuit. A risk of damage of the intermediate circuit and the fertile circuit exists, because of some broken pieces. Also the temperature of the mixture could be too high for the circuit which can not resist.

The concentration of the fertile inside the tank decrease and also the breeding capacity decreases.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance;

MITIGATING ACTIONS

Possibility of isolations valves for the fertile and the intermediate.

NOTES

Check if there are some chemicals reactions between the fertile and the intermediate salt.

Rupture of the blanket sampling system

CONSEQUENCES

The possibility of sampling is not available, so the concentration of Th232 will decrease inside the blanket tank, and the concentration of the U233 will increase. This way the reactivity will increase (for a long time scale). If the reactivity is positive, the temperature will increase and can damage some components. Also the power distribution will be more distributed between the core and blanket tank, and some part will be under the flux and can be damage. Even if nothing was done during a long time, the reactivity will not increase indefinitely because the quantity of Th232 will produce a certain quantity of U233 and then just the fission product will stay.

Some broken pieces can damage some others components.

If any, the isolation valve can be closed because if not, some fuel salt (including some U233 or fission products) can go out of fission product the removal system, and contaminate some adjacent areas.

The fission product removal system has to be removed, because of maintenance, then chemical composition control is not available anymore

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

The processing of the salt will be available thanks to the fission products removal system (if any)

Also we can put redundant sampling devices in case of one is unavailable.

The quantification of the radioactivity of the fertile has to be studied.

Rupture of the intermediate pump

CONSEQUENCES

The intermediate salt does not circulate anymore. The intermediate salt becomes warmer on the fertile side, the higher temperature achievable corresponding to the thermal equilibrium between the fertile salt and the intermediate.

On the conversion circuit side, the intermediate becomes colder. If there is no natural convection or, if the natural convection is too weak, there is a risk of solidification of the intermediate fluid on the conversion circuit side. In this case, there is a possibility to activate the heat system on the intermediate circuit.

The heat extraction becomes less and less efficient.

The temperature of the fertile salt in the fertile circuit increases: the increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps . If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure of the fertile circuit, in the concerned sector, increase and cannot be controlled.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank can causes a very little insertion of negative reactivity.

The fertile and the intermediate salt have to be drained to the blanket storage tank and the intermediate storage tank

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

To design SIC SSC.

The intermediate circuit can be designed in order to have some natural convection (in order to have a small flow that stay exists).

Also the temperature of the intermediate circuit should be higher than the temperature of solidification of the fertile to prevent the fertile salt solidification.

NOTE

If the intermediate circuit that cooling down the fertile is connected to the intermediate circuit that cooling down the fuel and also connected to the intermediate circuit that cooling down the structure, the issues in one circuit will also concerned the other connected circuits.

Over-working of the pump of the intermediate circuit

CONSEQUENCES

The pump could pump too much and the flow rate of the intermediate salt is bigger (because of the higher velocity of the intermediate salt). Therefore the fertile salt is over cooled.

The extraction of heat is more important, then the average temperature of the fertile salt decreases.

Locally, in the HX channels the fertile salt temperature decreases too. It is plausible to reach solidification, and the circulation of the fertile will be stopped. After a long time, by conduction (bad conduction in the fertile salt) the salt will melt and then the circulation will begin again. The heat extraction increase, then the global fertile temperature decrease and could introduce a positive reactivity in the core.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

NOTE:

If the intermediate circuit that cooling down the fertile is connected to the intermediate circuit that cooling down the fuel and also connected to the intermediate circuit that cooling down the structure, the issues in one circuit will also concerned the other connected circuits.

Rupture of the heat exchanger between the intermediate circuit and the energy conversion system

CONSEQUENCES

It will have a mix of the intermediate salt and the conversion fluid. It will be impossible to converse the energy and no power can be extracted from the core. The conversion fluid will go inside the intermediate circuit because the pressure of the conversion fluid is higher than the pressure of the intermediate circuit. The intermediate circuit is not designed to support high pressure as the conversion circuit. Therefore there is a possibility of rupture of the intermediate circuit and leakage in the reactor vessel/building/core (depending on the location of the rupture). The intermediate will solidify because the temperature of the conversion fluid is colder than the temperature of the

intermediate. There will be a Possibility to close the valve (if any) in order to isolate the rest of the circuit. Loss of flow of the intermediate and the cooling of the fertile is loss too. The heat extraction becomes less and less efficient. An increase of the temperature of the fertile in the circuit is possible. The warming inside the fertile tank can damage the walls. The temperature of the fertile salt in the rest of the fertile circuit increases: the increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. A leakage in the core vessel is also possible.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the concerned sectors cannot be controlled.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank can causes a very little insertion of negative reactivity as the total amount of fissile matter in the fertile is lower.

The fertile and the intermediate have to be drained to the blanket storage tank and intermediate storage tank.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

Possibility of isolation valve in the intermediate circuit and the conversion circuit

NOTE

In the case of the maintenance of the conversion fluid, the way to do this maintenance have to be determinate (if there is a tank storage or not)

Also the study of the mixture of the intermediate salt with the conversion fluid should done because of the different of temperature and pressure.

Over-speed of the conversion circuit pump/compressor

CONSEQUENCES

The conversion circuit pump/compressor over-speeds. If it over-speeds, the extraction of heat is more important, the intermediate can solidify (case a) or the fertile can solidify on the HX side (case b) or none of them will solidify (case c).

Case a: the intermediate can solidify if the fusion temperature is reached, just in case of a big obstruction of solidify salt is present. Therefore the circulation of the intermediate will be stopped.

Case b: the intermediate stay at the liquid state but it will have a lower temperature. The fertile will solidify on the HX side and can not circulate any more.

Case c: both salts continue to flow, and will have a lower operation temperature. Then there is a little insertion of negative reactivity because of the decrease of temperature.

Case a: The cooling of the fertile salt became impossible. Likely solidification of the intermediate salt on the side of the conversion energy circuit, and overheating of the intermediate on the HX fertile side. Possibility to activate the heating system (thermal resistance) in case of solidification of the intermediate salt.

Overheating of the fertile in the blanket tank. The overheating can damage some component and we can loose the integrity. The pressure could increase (but very little).

The temperature of the fertile salt in the rest of the fertile circuit increases: the increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps or the heat exchangers plates/channels. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the HX. Also the global temperature of the intermediate will increase because the temperature of the fertile increase.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the concerned sector cannot be controlled.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank can cause a very little insertion of negative reactivity.

After a long time, by conduction (bad conduction in the intermediate salt) the intermediate salt will melt and then the circulation will begin again.

Nevertheless the fertile and the intermediate salt have to be drained to the blanket storage tank and intermediate storage tank.

Case b: The cooling of the fertile salt became impossible. Likely solidification of the fertile salt on the HX fertile side. The intermediate salt still circulates in the intermediate salt and his temperature still the same or decrease.

Over heating of the fertile in the blanket tank, expect on the HX fertile side where the fertile salt solidifies and is colder. The overheating can damage some component and we can loose the integrity. The pressure could increase (but very little).

The increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the concerned sector cannot be controlled.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank can cause a very little insertion of negative reactivity.

After a long time, by conduction (bad conduction in the intermediate salt) the intermediate salt will melt and then the circulation will begin again.

Nevertheless the fertile and the intermediate salt have to be drained to the blanket storage tank and intermediate storage tank.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

To design SIC SSC component.

If there are some flywheels, it will enable the liquid a more progressive slowdown

NOTE

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concern the other connected circuits.

Unavailability of the heat sink

CONSEQUENCES

The heat sink to cool down the conversion circuit is unavailable.

The conversion fluid temperature increases in the conversion circuit.

The heat extraction from the intermediate circuit(s) to the conversion circuit is less efficient. The intermediate salt heats up in the intermediate circuit(s). The intermediate volume increases because of the thermal dilation of the intermediate salt.

The heat extraction from the fuel to the intermediate salt becomes less and less efficient. The fuel salt heats up in the entire fuel circuit: the increase of the fuel temperature can damage the fuel circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the fuel pumps or the fuel heat exchangers plates/channels. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the HX.

The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure in the fuel circuit cannot be controlled.

The higher temperature of the fuel salt in the core cavity means an insertion of negative reactivity.

The heat extraction from the structures to the intermediate salt becomes less and less efficient.

The temperature of the fuel circuit structures increases and can lead to damages to the core structures that are not designed to sustain too high temperatures.

The structures overheating can cause a very small negative reactivity insertion in the core.

The heat extraction from the fertile to the intermediate salt becomes less and less efficient. Therefore, the cooling of the fertile salt is not be ensured. The fertile salt heats up in the entire blanket circuit: the increase of the fertile temperature can damage the fertile circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the fertile pumps or the fertile heat exchangers plates/channels. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the HX.

The fertile salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure in the fertile circuit cannot be controlled and the pressure could increase in the fertile circuit.

The higher temperature of the fertile salt in the blanket tank can causes a very small insertion of negative reactivity.

The total negative reactivity insertion shuts down the chain reaction. The temperature of the fuel salt reaches the predefined limit temperature to automatically trigger the EDS. The fuel salt is drained in the EDS tank and it is cooled down by the EDS cooling system.

The fertile salt is drained in the blanket draining tanks.

The intermediate salt may be drained in the intermediate draining tanks.

PREVENTING ACTIONS

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS

In case of lost of principal heat sink, every single intermediate circuit will have a rescue heat sink. It could be a circulation of cooling gas or liquid.

Annexe 4 : Design options for the fertile blanket tank

The objective of the present document is to list the design open points raised from the application of the FFMEA methodology to the MSFR and more especially for the blanket tank. The list is composed of questions raised from the application of the methodology on the blanket tank as well as suggestions to enhance the safety of the concept. Those open points have been classified according to their type: systems, components, procedures, physical and chemical variables and phenomena.

SYSTEMS

- *The design of the fertile heat exchanger and the fertile pipe should be defined.*

Several options are possible for the fertile heat exchanger design.

Case a: If there is pump and a heat exchanger that will enable to cool the fertile salt

Case b: if there is a unique intermediate circuit for both fertile and fuel salt, to cool the fertile salt, in order to simplify the design, but the consequences of a breach in the unique circuit are more severe.

Furthermore one single intermediate circuit cools down 4 recirculation sectors; therefore a total of 4 intermediate circuits for the fuel salt are foreseen: How many for the fertile salt?

Also the localization of the pump in case a, should be decided, in order to reduce the risk of the mix of the fertile with the fuel.

According to the case a, different choice of disposition of the fertile heat exchanger and the fertile pump are presented on the figure a, b, c .

According to the case b, the intermediate will cool the fertile blanket tank on the figure d.

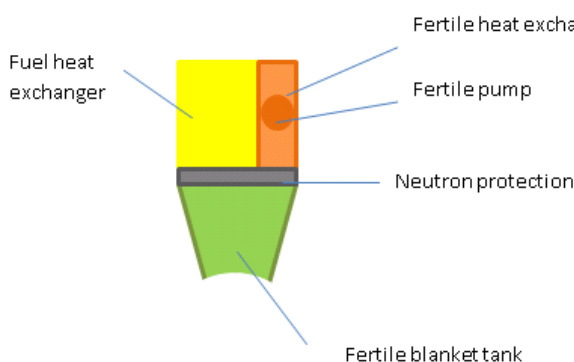


Figure a: Fertile heat exchanger next to the fuel heat exchanger

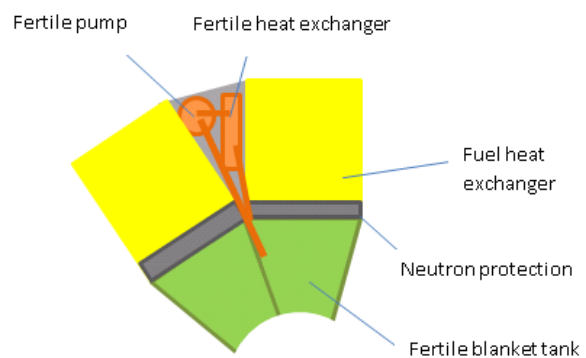


Figure b: Fertile heat exchanger between each sector

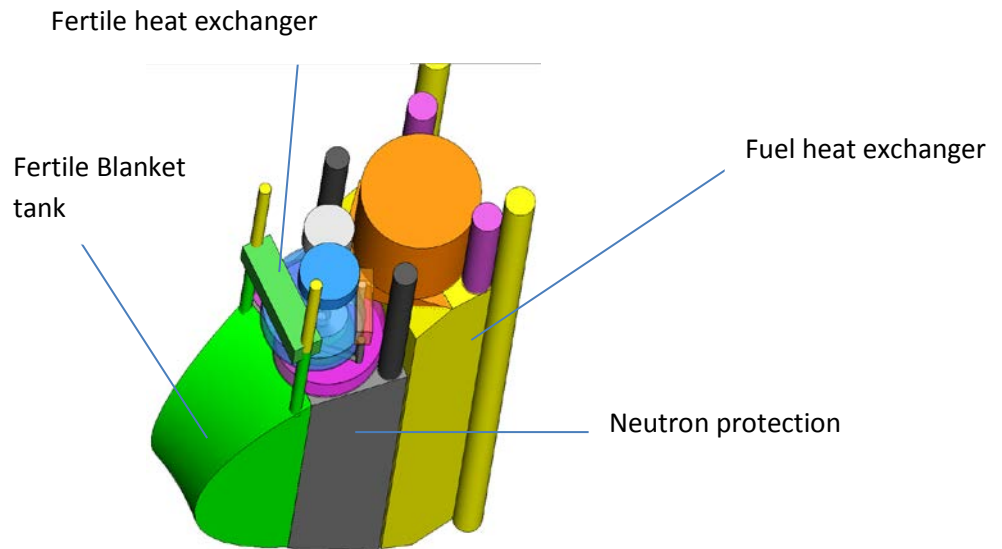


Figure c: Fertile heat exchange r
above the fertile blanket tank

In the case of the fertile pump and the fertile heat exchanger is next to the fuel heat exchanger, the geometrie of the fuel exchanger could not be optimal.

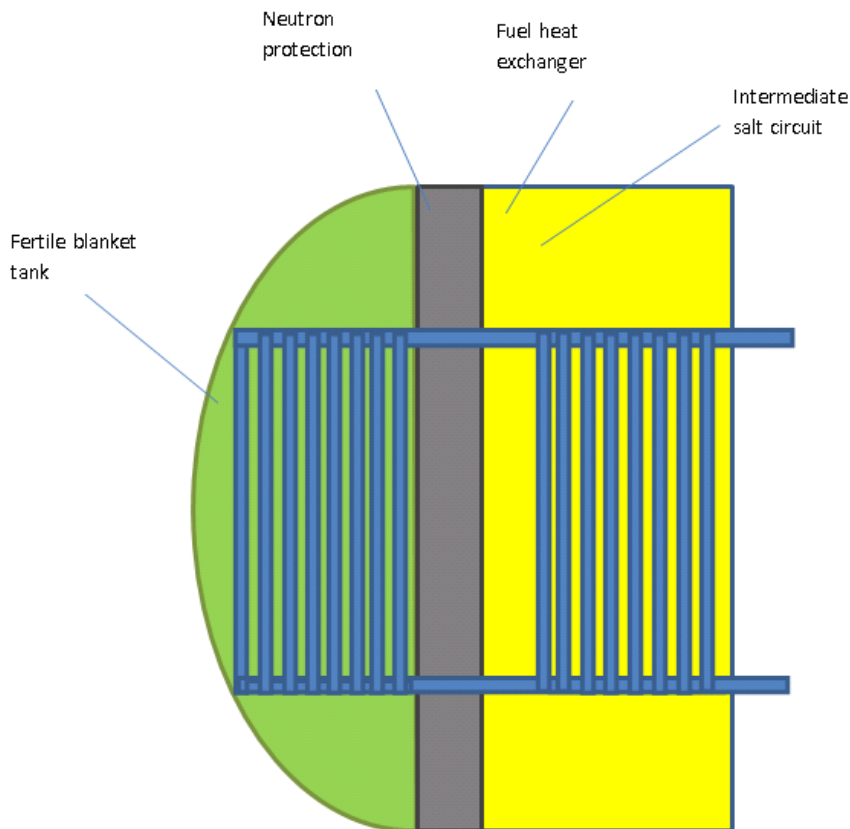


Figure d: intermediate will cool the fertile blanket tank.

- *Is it necessary to design a fission product removal system ?*

The fertile will produce (by capture on the Th232 and U233) some fissions products. Those one will be on solid or gaseous state. A bubbling system could be (or not) necessary to extract those fissions products. If the quantity of gaseous fissions products is very important, it will be necessary to extract those one by the bubbling system. If not, the system will not be necessary, and all gaseous fissions products will stay in the fertile tank during all the sector life. In this case, the pressure in the blanket tank will increase, and will be higher than the fuel. In case of leakage of the fertile with the fuel, it will be the fertile that will go in the core: this is better rather than the fuel will go in the fertile tank.

- *The Localization of the sampling device should be defined.*

Depending on the geometry, in case of leakage of the sampling system, there is a possibility to loss the fertile inside the core vessel or in the reactor vessel. The best case has to be study. Indeed the effect of this accident could be more dangerous in one of the situation above for example if there is no rescue storage tank under the leakage, or if some broken pieces can damage other components and can have more severe damage in one case. Also in both of this case, after the sampling, the sample will have to cross the others barriers and some other accident could appear, and can be more severe than before. That's why the localization of the sampling device has to be chosen, if it will be in the core vessel or in the reactor vessel.

- *The design of the intermediate circuit, the conversion circuit and the conversion heat exchanger should be defined.*

In case of leakage, the design of the intermediate circuit and the conversion circuit is very important. Depending on the geometry, the leakage will have worst consequences. If the conversion heat exchanger is in the reactor vessel, the integrity of the second barrier is maintained. But if the conversion heat exchanger is in the reactor building, the integrity of the second barrier is lost, and then depending on the radioactivity of the intermediate salt, the contamination risk is more or less important e.g.: leakage of a pipe or the heat exchanger. Nevertheless, if the conversion heat exchanger is in the reactor building the maintenance will be easier, and in case of accident, it will be solve faster. Also, knowing that the pressure of the conversion circuit is higher than the intermediate, it is better to put the heat exchanger far away from the core cavity, yes or no? A choice have to be taken, and according to the choice, security measures have to be taken as draining tank, valves etc.

- *The heating systems for the intermediate salt should be defined and designed.*

In case of fuel salt drain, the intermediate salt loses its heat source and can solidify: a heating system for the intermediate salt should be designed, in order to highlight sensible areas (i.e. the areas where the intermediate salt can easily solidify). This is important for draining the intermediate salt (e.g. for maintenance actions) and to properly transfer the heat when the fuel will be re-injected in the core to restart the reactor.

- *Installation of the intermediate salt formatting systems should be defined and designed.*

The intermediate, before to be introduced in the intermediate circuit, has to be melt and then if the intermediate have to be removed from the intermediate circuit the salt has to be solidified after the extraction. That's why a intermediate salt formatting systems should be designed.

- *The fertile salt must be maintained at liquid state*

In case of over cooling of the fertile e.g.: over speed of the pump, or rupture of the pump, The fertile could solidify on the fertile heat exchanger side, and then the heat extraction become less and less efficient, therefore the over heating of the fertile is possible. In order to prevent this case, a heating system should be design for the fertile circuit to prevent this solidification.

- *The number and the design of the Heat sink should be defined.*

So far, there is just one heat sink for the conversion circuit. But in case of loss of this heat sink the cooling of the conversion fluid will not be insured and then the cooling of the intermediate also will not be insured. Therefore, the possibility to put one rescue heat sink for both conversion circuit and intermediate circuit should be studied. But in the case of leakage of the conversion fluid, if the heat sink is just on the conversion fluid, the possibility to cool the intermediate will be not available. So the possibility of an individual rescue heat sink for each (conversion and intermediate circuit) should be studied too.

Nevertheless, the heat sink will be more useful on the intermediate circuit. Indeed, it is likely that the conversion circuit will not work for some lower thermic power. Then a cold source will be necessary on the intermediate circuit in order to extract the residual power. It will be judicious that this exchange will be done by an exchange salt/air.

- *Define if all deferent intermediate circuit are connected between them, or if they are independent.*

There are three different main intermediate circuits: the intermediate circuit of the fertile, the intermediate circuit of the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure. In case of accident, the design of those circuits will be important.

If they are all connected between them, this means that all the heating extraction will be available to be converted into electric energy. Nevertheless, in case of leakage of the intermediate circuit fuel, the fuel could be inside in all the intermediate circuit and the integrity could be lost and there will be a higher risk of contamination, and this one will be more disseminated.

If they are independent, each issue will stay in its circuit, and the integrity of each barrier will be more protected and in case of leakage, the contamination will be more contained. Nevertheless the heat of the intermediate circuit of the fertile and the heat of the intermediate circuit to cool down the structure will be not available to be converted into electric energy, and this is a loss of heat that should be quantified in order to do the best choice for the design of those intermediate circuits.

Also considering the existence of some reflectors, those one will need to be cooled. Both cases are possible: the intermediate salt will cool those reflectors by the common intermediate circuit, or it's an external system that will cool those reflectors.

COMPONENT AND MATERIAL

- *Radiological control of the intermediate salt.*

In case of leakage, some radioactive elements could go in the intermediate salt. And a mean to detect it rapidly, is a radiological control of the salt on a sample of the intermediate salt.

- *Isolation valve should be designed.*

In case of leakage, or rupture of some components, e.g. rupture of Heat exchanger, pipe, pump etc. a device should be designed in order to interrupt the leakage. Valves could be potentially a good mean to stop the leakage or also to interrupt the expansion of a fluid, in order to prevent a mixture between different fluids e.g. fuel with fertile.

- *Design redundant components in case of loss in the fertile circuit*

In case of rupture or malfunction of a component e.g. temperature sensor, pressure sensor, mass flow sensor etc. the concerned data will not be available, and can cause some accident more or less severe e.g. if the temperature sensor of the fertile doesn't work, and the temperature of the fertile

increases, in this case it will be not possible to detect it. Therefore the capacity to react accordingly will be not possible. To avoid this kind of issues, redundant devices could be designed.

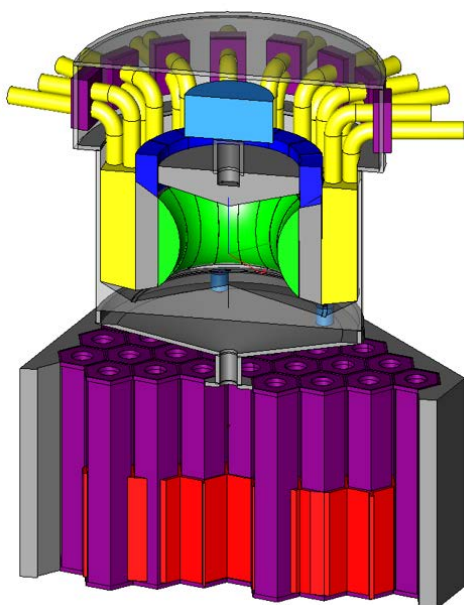
- *Design draining tank for the conversion circuit.*

So far, no draining tank for the conversion circuit is design. In case of accident or maintenance, should be designed a draining tank?

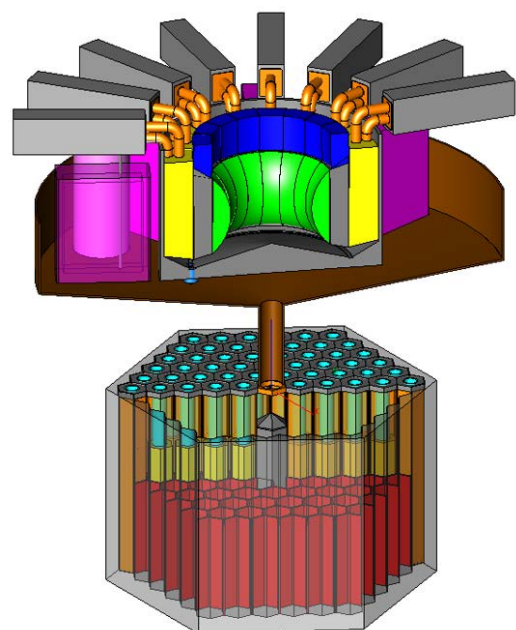
- *Design of the storage tank for the core vessel should be also for the reactor vessel.*

In case of accident e.g. runaway for the chain reaction, or leakage and mixture of the fuel salt with other fluids, the possibility of draining the fuel in a storage tank is available. But the question is how far the storage tank is designed? Indeed if it is just under the core just the fuel can be drained (case a), but the fertile salt will not be drain, and there is residual power that could potentially be dangerous, or also If there is a mix of the fertile with the fuel. Therefore it is necessary to drain the fertile salt, and an emergency storage tank is needed (case b). That's why the draining storage tank should go until the reactor vessel in case of draining of a deferent fluid than the fuel. Nevertheless, the necessity of this enlargement could be not necessary. In the case of the residual power in not dangerous, or even if it stays dangerous, the intermediate circuit will still be cooling, or if there are other solutions of rescue.

Nevertheless, if there is a massive leakage of the intermediate salt, which represent more than the storage tank volume, the intermediate can not be storage and the level of the intermediate will go in the core or in the collector.



Case a



case b

PARAMETER AND VARIABLE ISSUES

- *Define if the pressure of the fertile circuit is higher than the fuel circuit or if it is the other way around.*

In case of leakage of the fertile circuit with the core, depending on the pressure of the fertile, the fertile will go in the core, or the fuel will go in the fertile circuit. A study should be done, to know the less dangerous case, in order to define the pressure of the fertile circuit. Also, considering that the radioactivity of the fuel is higher than the fertile, it's better that the pressure of the fertile is higher than the fuel, in order to avoid the fission product expansion.

- *Define if the pressure of the fertile circuit is higher than the intermediate circuit or if it is the other way around.*

In case of leakage of the fertile circuit with the intermediate circuit, depending on the pressure of the fertile, the fertile will go in the intermediate circuit, or the intermediate salt will go in the fertile circuit. A study should be done, to know the less dangerous case e.g. study the best way for the draining, or the robustness of the structure if both cases, in order to define the pressure of the fertile circuit. Also, considering that the radioactivity of the fertile is higher than the intermediate. it's better that the pressure of the intermediate is higher than the fertile, in order to avoid the fission product expansion.

- *Define the working temperature and the composition of the intermediate salt, according to the fertile fusion temperature.*

The intermediate circuit cools the fertile circuit and there is a risk of leakage of the fertile with the intermediate. The composition of the intermediate will depend on its working temperature (if the intermediate's working temperature is fixed by the fertile' fusion temperature, the composition of the intermediate should be chosen in order to have its fusion temperature under its working temperature).The choice of the working temperature of the intermediate is important in case of mixture of the fertile and the intermediate salt. Indeed if the working temperature of the intermediate is lower than the fusion temperature of the fertile, in case of leakage the fertile will solidify and then the expansion of the salt can be stopped. As long as the circulation of the intermediate is kept, the heat extraction is not perfect. Therefore the fertile will not solidify. Nevertheless, when the circulation is stopped e.g. loss of pump, or also if there is an over-speed of the pump, the fertile will solidify and the heat extraction of the fertile will be not available, and some other issues will appear.

PHENOMENA

- *In many accidents/incidents, the role of the natural circulation of the fertile salt and intermediate salt is not clear and demonstrated.*

If the fertile pump exists, in case of loss of the fertile pump, the mass flow of the fertile salt is not maintained, and the heat extraction is not possible anymore. Depending on the design, the natural circulation of the fertile salt can be activated if there is a sufficient heights difference between the hot and the cold barycentre. Some design arrangement could be made if the option of natural convection in the fertile circuit is kept. The possibility to use natural convection in the fertile and intermediate circuits has to be determined and its efficiency should be studied.

- *Are there any dangerous chemical reactions between the fertile salt and the fuel salt or the intermediate salt?*

In case of leakage of the fertile, this one can be mixed with the fuel salt or the intermediate salt. Some chemical reactions could occur, and then some gases or corrosive product could appear, and could damage some components, and there is a higher risk of integrity loss. That's why the reaction of the fertile with the fuel salt should be studied and also the reaction of the fertile with the intermediate salt, as soon as the intermediate composition will be chosen (different options are still taken into account for the intermediate salt).

STUDY THAT SHOULD BE DONE

- *The impact of the fertile temperature decrease on the core reactivity.*

In case of over-speed of the fertile pump, the temperature of the fertile could decrease and can have some impacts on the core reactivity. This impact should be quantified.

- *The radioactivity of the intermediate salt.*

Depending on the geometry, in case of leakage of the intermediate salt in the reactor building, a contamination risk is possible. The radioactivity of the intermediate salt should be studied, in order to know the impact of the contamination, and also to design the geometry of the intermediate

circuit. Also there are different possibilities of the intermediate composition, and this study could help to select the best intermediate salt.

- *Quantity of gaseous fissions products of the fertile salt.*

The fertile salt produces some fission products which could be in solid state or in gaseous state. Those products have to be removed. This removal could be by a removal system if the quantity of fission product is important. For the gases products it will have a bubbling system (as the core bubbling system ref. SAMOFAR) if the quantity is important. If not, they will stay in the blanket tank during the lifetime of each sector.

- *The impact of the draining of the fertile on the reactivity.*

The blanket tank can be drained, in case of maintenance, while the core is working. This way the reactivity could be modified, and a study could quantify this variation.

- *The impact of a leakage during the draining of the fertile on the reactivity.*

The blanket tank can be draining, in case of maintenance, while the core is working. This way, the blanket is empty, and in case of leakage of the blanket, the fuel could be inside in the blanket tank. The reactivity could be modified, and a study could quantify this variation.

- *The evolution of the power in the blanket (power in operation or residual power).*

The fertile, contain some thorium 232. This one will capture some neutrons and will produce some gammas. Those one could lead to some others captures on other elements, and can produce power. A study could quantify this power in both of cases in operation or in interruption.

Annexe 5 : FBS pour le circuit intermédiaire

Le FFMEA s'appuie sur une liste de fonctions pour pouvoir soulever tous les PIEs possibles. Cette annexe vous présente la liste des fonctions associées au circuit intermédiaire utilisée lors de l'analyse FFMEA de celui-ci.

- 1.2.6.1. To provide the intermediate salt circulation
 - 1.2.6.1.1. To keep and preserve the integrity and leak-tightness of intermediate salt cooling circuits for the fissile fuel salt
 - 1.2.6.1.2. To maintain the intermediate salt at a liquid state
 - 1.2.6.1.3. To provide the correct geometry and space for the intermediate salt circulation
 - 1.2.6.1.4. To provide intermediate salt flow
- 1.2.6.2. To provide pressure and inventory of the intermediate salt
 - 1.2.6.2.1. To keep and preserve integrity of the pressure control system of the intermediate circuit
 - 1.2.6.2.2. To provide intermediate salt inventory
 - 1.2.6.2.3. To provide intermediate salt pressure control
 - 1.2.6.2.4. To provide flow in the pressure control system for the intermediate circuit for the fissile fuel salt
- 1.2.6.3. To provide the purification of the intermediate salt
 - 1.2.6.3.1. To keep and preserve integrity of the purification system of the intermediate circuit
 - 1.2.6.3.2. To provide intermediate salt flow in the purification system of the intermediate salt
 - 1.2.6.3.3. To provide pressure control in the purification system of the intermediate circuit
 - 1.2.6.3.4. To provide the removal of the impurities from the intermediate salt
- 1.2.6.4. To provide heat sink for intermediate circuits
- 1.2.6.5. To measure fuel salt physical and chemical parameters
- 1.2.6.6. To measure intermediate salt physical and chemical parameters
- 1.2.7. To provide intermediate salt structures integrity
 - 1.2.7.1. To provide support for the intermediate structures
 - 1.2.7.2. To measure physical and chemical parameters of the fuel salt (e.g. electrochemical potential, impurities inventories, ...)
 - 1.2.7.3. To measure physical and chemical parameters of the intermediate salt
 - 1.2.7.4. To manage pressure and temperature on the structures

Annexe 6 : PBS pour le circuit intermédiaire

Le FFMEA s'appuie sur une liste de fonctions pour pouvoir soulever tous les PIEs possibles (présenté annexe 2). Ainsi pour obtenir la liste des PIEs, tous les composants associés à chaque fonction sont étudiés dans l'objectif de comprendre comment la fonction est perdue. Cette annexe vous présente la liste des composants (PBS) associée au circuit intermédiaire, utilisée lors de l'analyse FFMEA de celui-ci.

2. Intermediate salt circuit (x4) – NOp P/SU/SD
 - 2.1. Pumps
 - 2.2. Heat exchanger between the intermediate circuit and the energy conversion system
 - 2.3. Pipes
 - 2.4. Gates (to isolate a part of the circuit)
 - 2.5. Draining tanks – NOp M/SU/SD - A
 - 2.6. Draining plugs and valves – NOp M/SU/SD - A
 - 2.7. Distributor for the sectors (Because 4 primary circuits feed 1 intermediate circuit)
 - 2.8. Collector for the sectors (Because 4 primary circuits feed 1 intermediate circuit)
 - 2.9. Heating system for the draining tank – NOp M/SU/SD - A
 - 2.10. Heating system for the pipes where the intermediate fluid flows – NOp –SU/SD - A
 - 2.11. Distributor for the part of salt that cools down the external part of core vessel
 - 2.12. Collector for the part of salt that cools down the external part of core vessel
 - 2.13. Distributor for the part of salt that cools down the fertile blanket
 - 2.14. Collector for the part of salt that cools down the fertile blanket
 - 2.15. Distributor for the part of salt that cools down the recirculation sectors structure
 - 2.16. Collector for the part of salt that cools down the recirculation sectors structure

Annexe 7 : Postulated Initiating Events (PIEs) for the intermediat circuit

Methodology

Starting from the elementary IEs, the following questions can provide a guideline to identify the PIEs:

4. What is the plant status after the initiating event, without considering the further accident propagation?
5. What are the mitigating actions (lines of defence) to be provided to avoid the accident propagation to the environment?
6. What are the mitigating actions (lines of defence) to be provided to limit the accident consequences to the environment?

All the effects presenting the same answer to the above three questions can be grouped in a representative PIE.

Then, the grouping of IEs in PIEs is usually done according to criteria of similarity of the consequences associated to the single IE and of plant response in terms of preventive and mitigating actions. Generally, the most severe in terms of consequences of the basic elementary events is the event chosen as PIE.

List of PIE

Rupture of the heat exchanger between fuel salt and intermediate circuit

CONSEQUENCES:

The intermediate salt enters in the fuel salt circuit, because the pressure of the intermediate circuit is higher than the pressure of the fuel circuit. The salts volume in the core cavity increases and the free surfaces levels increase. The isolating valve of the broken intermediate circuit is closed in order to limit the loss of intermediate salt. If the valve is not closed soon enough, the pressure in the core cavity reaches the equilibrium with the pressure of the intermediate salt circuit. The mixture fuel/intermediate salt enters the intermediate circuit and may damage the components of the intermediate circuit (because of high temperature and neutronic activation).

The composition of the salt in the core becomes subcritical because of the decrease of the fissile matter density. The chain reaction shuts down. The fuel salt is drained to the routine storage tank/EDS and it is cooled by the routine storage tank/EDS cooling system.

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

Valves should be foreseen to isolate the damaged part of the intermediate circuit

Rupture of the HX between the intermediate circuit and the conversion circuit

CONSEQUENCES:

The intermediate salt and the conversion fluid mix. It becomes impossible to convert the energy and no power can be extracted from the core. The conversion fluid flows inside the intermediate circuit because the pressure of the conversion circuit is higher than the pressure of the intermediate circuit. The intermediate circuit is not designed to support high pressures as the conversion circuit. Therefore, some intermediate circuit components can be damaged and there is a possibility of rupture of the intermediate circuit involving a leakage in the reactor vessel/building/core (depending on the location of the rupture) (as item rupture of a pipe). The intermediate solidifies because the temperature of the conversion fluid is lower than the fusion temperature of the intermediate. A valve is closed (if any) in order to isolate the rest of the circuit. The intermediate salt circulation stops and the cooling of the fertile is loss too (as item rupture/obstruction of the HX between fertile and conversion circuit) and also the cooling of the structures is loss (as item loss of the structure cooling system). The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel increases. The warming in the fuel circuit can damage some components that are not designed to manage too high temperatures, e.g. it can cause structural damages to the pumps.

The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the core cannot be controlled.

The higher temperature of the fuel leads to a negative insertion of reactivity

The fuel and the intermediate have to be drained to the EDS and intermediate storage tank.

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

Possibility of isolation valve in the intermediate circuit and the conversion circuit

If there is an expansion vessel for the intermediate salt, it will be able to amortize the pressure elevation in the intermediate circuit if there is a rupture of the HX between the intermediate and conversion circuit

NOTES:

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concern the other connected circuits and those consequences can lead to a more severe accident.

Complete rupture of the intermediate pump

CONSEQUENCES:

The intermediate salt does not circulate anymore. If the pumps possess flywheels, it gives to the system a greater rotational inertia. After some times, the circulation stops completely.

Some broken pieces can damage the intermediate circuit, and lead to a leakage.

Natural circulation of the intermediate salt can start.

The intermediate salt becomes warmer on the fuel side, the higher temperature achievable corresponding to the thermal equilibrium with the fuel salt and the intermediate.

On the conversion circuit side, the intermediate became colder. If there is no natural convection or if the natural convection is too weak natural, there is a risk of solidification of the intermediate fluid on the conversion circuit side. In this case, possibility to activate the heat system on the intermediate circuit.

The heat extraction becomes less and less efficient.

The temperature of the fuel salt in the rest of the core increases: the increase of the fuel temperature can damage some components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump.

The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the core cannot be controlled.

The higher temperature of the fuel will lead to a negative insertion of reactivity.

the fuel salt has to be drained to the EDS.

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS:

To design SIC SSC component.

If there is some flywheels, it will enable the liquid a more progressive slowdown.

NOTES:

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concern the other connected circuits and those consequences can lead to a more severe accident.

Over working of the conversion circuit pump

CONSEQUENCES:

The flow rate of the conversion fluid increases. Therefore, the intermediate salt cooling down the structure is overcooled.

The intermediate salt temperature decreases in all the circuit. To prevent intermediate salt solidification in the pipes, the thermal resistance can be activated, otherwise the intermediate salt solidification could lead to "obstruction of the intermediate pipe".

Locally, in the channels of the heat exchanger between the intermediate and the conversion fluid, the temperature of the intermediate salt decreases too. It is plausible to reach solidification of the intermediate salt in this HX. The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel salt in the fuel circuit increases: the increase of the fuel temperature can damage some components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure in the fuel circuit cannot be controlled. The higher temperature of the fuel will lead to a negative insertion of reactivity. The fuel salt has to be drained to the EDS."

If there the intermediate salt doesn't solidify on the HX between the intermediate circuit and the conversion circuit, the temperature of the intermediate salt decrease. The heat extraction of the fuel is more efficiency and can lead to an over cooling of the fuel salt. Locally, in contact with the HX the fuel salt temperature decreases too. It is plausible to reach the solidification of the fuel salt if the intermediate salt working temperature is lower than the fuel salt solidification temperature. Then The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel salt in the fuel circuit increases: the increase of the fuel temperature can damage some components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure in the fuel circuit cannot be controlled. The higher temperature of the fuel will lead to a negative insertion of reactivity. The fuel salt has to be drained to the EDS.

Rupture of a part of pipes

CONSEQUENCES:

Leakage of the intermediate salt from a pipe going to or coming from the heat exchanger inside the core vessel (case a) or leakage of the intermediate salt in the reactor vessel (case b) or in the reactor building (case c).

Case a : see item 31 "" Rupture of a heat exchanger plate/channel ""

Case b : the intermediate salt flows in the reactor vessel. In case of a small leakage, the intermediate salt solidifies because there is not residual power in the intermediate salt and the intermediate salt circulation allowing the cooling of the fuel is maintained. In case of a large leakage, the amount of remaining salt is insufficient to maintain its circulation. After some time, the circulation stops completely. The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel in the fuel circuit increases. The warming of the fuel can damage some components that are not designed to manage too high temperatures, e.g. it can cause structural damages to the pumps. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure in the fuel circuit cannot be controlled. The higher temperature of the fuel salt in the core means an insertion of negative reactivity. The fuel salt has to be drained to the EDS. The intermediate leakage can damage some components in the reactor vessel, and can cause further losses of integrity.

Case c : The intermediate salt flows in the reactor building. In case of a small leakage, the intermediate solidifies because there is no residual power in the intermediate salt and the intermediate salt circulation allowing the cooling of the fuel is maintained. In case of a large leakage, the amount of remaining salt is insufficient to maintain its circulation. After some times, the circulation stops completely. The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel in the fuel circuit increases. The warming of the fuel can damage some components that are not designed to manage too high temperatures, e.g. it can cause structural damages to the pumps. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The higher temperature of the fuel salt in the core means an insertion of negative reactivity. The fuel salt has to be drained to the EDS. The intermediate leakage can damage some components in the reactor building, and can cause further losses of integrity.

In addition, people in the reactor building could be contaminated due to the intermediate irradiation (even if it is very low). The intermediate salt has to be drained to the intermediate storage tank."PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

Possibility of isolation valve.

The system could be designed in order to have the draining tank under the reactor vessel to limit the expansion of the leakage.

the intermediate circuit can be designed in order to have the most of the part in the reactor vessel.

NOTES:

The radioactivity of the intermediate have to be evaluate to know the dangerousness in case of leakage in the reactor building.

Rupture of the purification system of the intermediate circuit

CONSEQUENCES:

The intermediate salt cannot be purified anymore. Some corrosive products, humidity, gases will stay in the intermediate salt. The chemical potential of the intermediate salt can evolve increasing the risk of corrosion that c damage the intermediate circuit components or structures. Activated products will stay in the intermediate salt, and in case of leakage, it could increase the amount of radioactive element released. If gaseous fissions products are produced in the intermediate salt, they will lead to an increase of the pressure, but it may be negligible.

In addition, the insoluble fissions product can stick on the walls. Therefore, there will be an accumulation of fission products in cold areas, mainly situated on the heat exchanger with the energy conversion circuit. Those accumulations can obstruct some channels as item obstruction of the HX, or also can form some more or less big agglomerates that could cause abrasion on the walls and potentially some obstructions.

Broken pieces of the intermediate salt purification system can go in the intermediate circuit and further damage its structures/components.

Gaseous chemical impurities (if any) may go out of the intermediate circuit through the rupture. The pressure in the reactor vessel may slightly increase. The pressure in the intermediate circuit cannot be controlled anymore.

In case of salt leakage, the intermediate salt flows in the reactor vessel.

In case of a small leakage, the intermediate salt solidifies because there is no residual power in the intermediate salt and the intermediate salt circulation allowing the cooling of the fuel is maintained. In case of large leakage, the salt inventory needed to cool down the fuel is lost. An isolating valve/gate (if any) is closed to limit the intermediate salt loss. After some time, the circulation stops completely. The heat extraction becomes less and less efficient. The fuel temperature increases. The warming inside the fuel circuit can damage some components that are not designed to manage too high temperatures, e.g. it can cause structural damages to the pumps. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump

increases, and they can disappear. The pressure in the fuel circuit cannot be controlled. The higher temperature of the fuel means a negative insertion of reactivity that can shut down the reaction. The fuel salt is drained to the EDS. The intermediate salt is drained in the intermediate draining tanks to allow maintenance “

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

Possibility to put redundant devices of purification system in case of one will not working.

If there is a sampling device for the intermediate, this will enable to clean the salt by an other way.

NOTES:

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concerned the other connected circuits and those consequences can lead to a more severe accident.

The radioactivity of the intermediate have to be evaluate to know the dangerousness in case of leakage in the reactor building.

Rupture of the temperature sensor for the intermediate circuit

CONSEQUENCES:

Possibility of leakage of the intermediate salt in the reactor vessel. in case of a little leakage the intermediate salt will solidify. In case of a big leakage the loss of intermediate salt will be more important and The cooling of the fuel salt became impossible. Over heating of the fuel in the core. The overheating can damage some component and we can loose the integrity. The pressure will increase. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The temperature measurement system can (give no data) or an incorrect value.

If there is no temperature data available: the temperature could increase (case a) or decrease (case b) without being detected.

Case a : the intermediate temperature increases. The cooling of the fuel is less efficient, and its global temperature increases .

The increase of the fuel temperature can damage some components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps . If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump.

The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure of the core increases and cannot be controlled.

The higher temperature of the fuel salt leads to a negative insertion of reactivity. If the reactivity insertion is small, the core reaches a new equilibrium at another power level. In case of important reactivity insertion, the chain reaction shuts down.

The fuel have to be drained to the fuel storage tank or the emergency draining tank to allow maintenance."

Case b : the temperature of the intermediate salt decreases. In case of a small temperature decrease, the fuel is overcooled in the heat exchanger to a temperature higher than the fuel melting point. The cold fuel entering the core means an insertion of positive reactivity. If the reactivity insertion is small, the core reaches a new equilibrium at another power level. In case of an important temperature decrease, the fuel is overcooled in the heat exchanger to a temperature lower than the fuel melting point. The fuel salt solidifies on the HX side. The solidified fuel salt can be transported to the core cavity and it represents a positive reactivity insertion or it can obstruct the heat exchanger plates/channel and the heat extraction becomes less efficient. If the fuel solidification in the heat exchanger completely prevents the fuel circulation, The fuel temperature in the rest of the core increases. The increase of the fuel temperature can damage some components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps . If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump.

The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear.

The pressure of the core increase and cannot be controlled.

The higher temperature of the fuel salt lead to a negative reactivity insertion that will shut down the chain reaction.

After a long time, by conduction (the conduction in the fuel salt is poor) the salt melts and then the circulation starts again.

Otherwise, the fuel have to be drained to the emergency draining tank

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

A redundant devices of temperature measurement system, in case of one will not working, can be designed.

Thank to the pressure data and density data we can deduce the temperature.

NOTES:

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concern the other connected circuits and those consequences can lead to a more severe accident.

Rupture or deformation of the support of the intermediate circuit

CONSEQUENCES:

The support for the intermediate circuit is broken (case a) or deformed (case b).

Case a: The support is broken and some broken pieces can damage other components in the reactor vessel and the reactor building. The intermediate circuit is subject to mechanical stress, and can break after a while. In this case, the leaktightness of the intermediate circuit is not maintained anymore. Gaseous chemical impurities (if any) may go out of the intermediate circuit through the rupture. The pressure in the reactor vessel may slightly increase. The pressure in the intermediate circuit cannot be controlled anymore. The intermediate salt goes in the reactor building or in the reactor vessel depending on the location of the breach. If the breach occurs in the reactor building, the release of radioactive element could affect the people working in the building. The intermediate leakage can damage some components in the reactor vessel/building and can cause further losses of integrity. The amount of remaining salt in the intermediate circuit is insufficient to maintain its circulation. After some time, the circulation stops completely. The heat extraction becomes less and less efficient. The temperature of the fuel salt increases. The increase of the fuel temperature can damage the fuel circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps. If the failure is not promptly detected, structural damages can occur in the pump. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure of the fuel circuit increases and cannot be controlled. The higher temperature of the fuel salt in the core causes a negative reactivity insertion. The fuel salt has to be drained to the emergency draining tank and the intermediate salt to the intermediate storage tank.

Case b: The intermediate circuit can not be maintained in the correct position. The displacement of the intermediate circuit might compromise the correct flow of intermediate salt. The pressure losses increase because of the deformation of the intermediate circuit. Therefore, the heat extraction from the fuel salt is less efficient. A part of the intermediate salt can accumulate where there are too abrupt elbows. This could lead to an obstruction of the intermediate circuit. Because of the flow reduction of the intermediate circuit, the intermediate salt can solidify on the heat exchanger with the conversion circuit side. The temperature of the fuel salt increases and can damage fuel circuit components that are not designed to manage too high temperatures. e.g. it can cause structural damages to the pumps. The fuel salt volume increases because of the thermal dilation and the free levels may disappear, e.g. the free level in the pump increases, and they can disappear. The pressure of the fuel circuit, in the concerned sector, increases and cannot be controlled. The higher

temperature of the fuel salt in the core causes a negative reactivity insertion . The fuel salt has to be drained to the EDS and the intermediate salt to the intermediate storage tank..

In addition, the displacement of the HX might damage the leak tightness of the junction between the intermediate circuit and the heat exchangers. The intermediate salt enters in the fuel salt circuit, because the pressure of the intermediate salt is higher than the pressure of the fuel salt. The salts volume in the core cavity increases and the free surfaces levels increase. The isolating valve of the broken intermediate circuit is closed in order to limit the loss of intermediate salt. If the valve is not closed soon enough, the pressure in the core cavity reaches the equilibrium with the pressure of the intermediate salt circuit. The mixture fuel/intermediate salt enters the intermediate circuit and may damage the components of the intermediate circuit. The composition of the salt in the core becomes subcritical because of the decrease of the fissile matter density. Broken pieces can damage the component of the fuel circuit (e.g. HX; pumps) and accelerate the chain reaction shut down. The chain reaction shut down and fuel salt heats up because of residual heat

PREVENTIVE ACTIONS:

Preventive maintenance

MITIGATING ACTIONS :

Isolating valves

NOTES:

If the intermediate circuit of the fertile is connected to the intermediate circuit for the fuel and the intermediate circuit to cool down the structure, the issues in one circuit will also concerned the other connected circuits and those consequences can lead to a more severe accident.

This accident is very serious but has a very low probability.

Annexe 8 : Le circuit intermédiaire et ses options de design

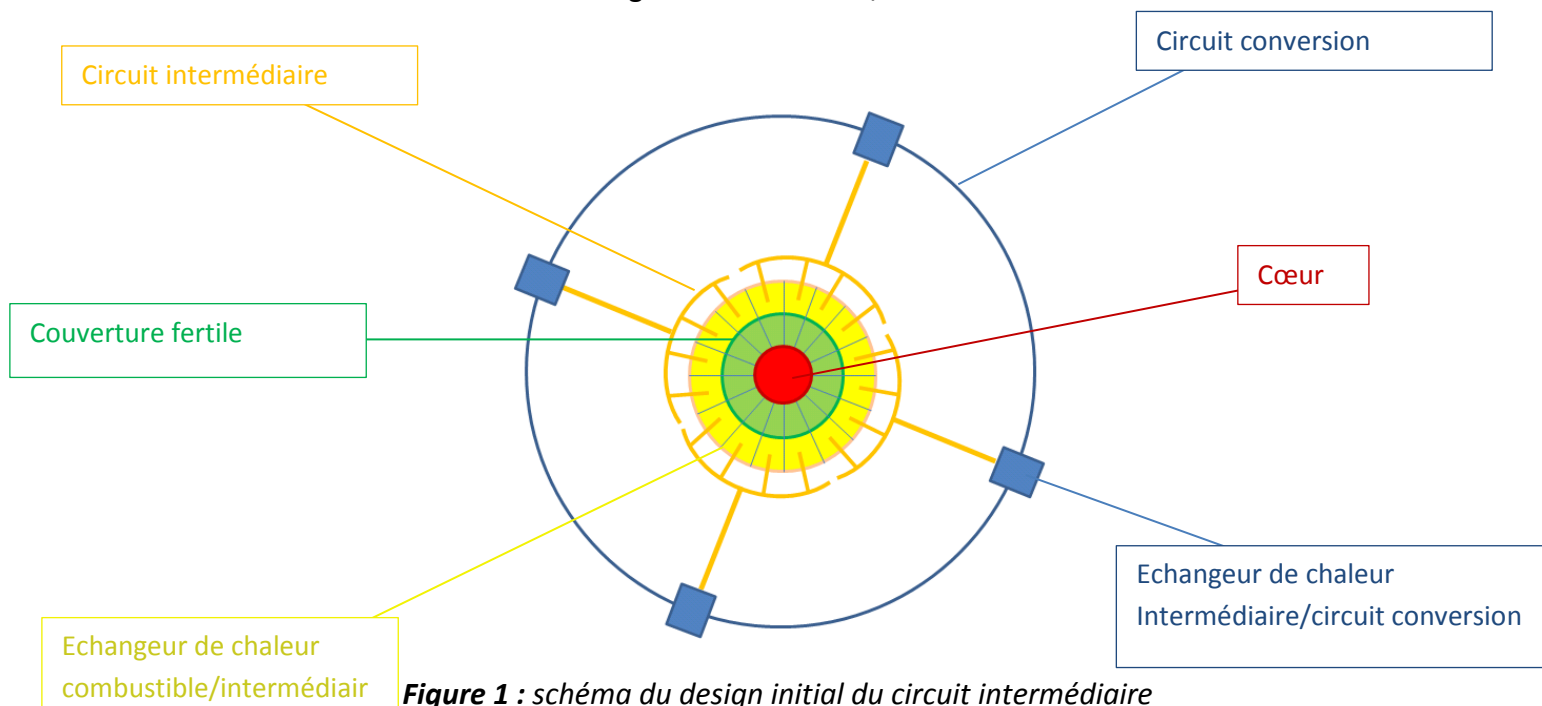
L'analyse de sûreté effectuée avec la méthode FFMEA concernant le circuit intermédiaire a porté sur un premier design de ce circuit. Celle-ci a permis d'identifier un certain nombre d'accidents. En parallèle un autre design du circuit intermédiaire a été proposé. Ce document a pour objectif de vous décrire les deux propositions de design du circuit intermédiaire (initial et modifié) et de présenter leurs atouts et leurs défauts afin de parvenir au meilleur choix du point de vue de la sûreté.

Dans chaque cas, la composition du sel intermédiaire n'est pas fixée, mais devra l'être par des études à venir.

Design initial du circuit intermédiaire : cette description est basée sur le PBS (Plant breakdown structure) écrit à l'issue du livrable 1.1 du projet SAMOFAR [12].

Le circuit comprend des conduites contenant le sel intermédiaire mis en mouvement par des pompes, des échangeurs de chaleur combustible/intermédiaire et intermédiaire/circuit convection permettant respectivement d'extraire la chaleur du combustible et de l'évacuer de l'intermédiaire. Un réservoir de vidange est disponible dans le cas où une vidange d'urgence ou une maintenance est nécessaire. Des résistances chauffantes sont disponibles au cas où le sel viendrait à se solidifier dans les conduites.

Le circuit s'organise en 4 circuits intermédiaires, relié chacun à 4 secteurs (voir figure 1) ainsi qu'à leurs échangeurs de chaleur combustible/intermédiaire. Les 4 circuits intermédiaires sont aussi reliés chacun à un échangeur intermédiaire/circuit conversion.



Avantage : Dans le cas d'un problème sur une branche de l'intermédiaire, un seul des quatre circuits sera impacté, comme par exemple lors d'une rupture d'un échangeur de chaleur combustible/intermédiaire : seul $\frac{1}{4}$ de l'intermédiaire sera contaminé par les radioéléments, même si aucune vanne n'est fermée. Le combustible pourra toujours être refroidi par les trois autres circuits, en faisant varier leurs débits.

Inconvénient: en cas de panne de pompe sur une branche du circuit d'intermédiaire, celui-ci ne pourra plus assurer le refroidissement des secteurs (du circuit combustible) concernés.

En cas de rupture d'un échangeur de chaleur intermédiaire/ circuit de conversion, la surpression, engendrée par la pression du circuit de conversion, dans le circuit intermédiaire sera trop grande et risque de causer de lourds dégâts sur les structures du circuit intermédiaire.

Nouveau design du circuit intermédiaire :

Le circuit comprend des conduites contenant le sel intermédiaire mis en mouvement par des pompes, des échangeurs de chaleur combustible/intermédiaire et intermédiaire/circuit convection permettant respectivement d'extraire la chaleur du combustible et de l'évacuer de l'intermédiaire. Des résistances chauffantes sont disponibles au cas où le sel viendrait à se solidifier dans les conduites. Des échangeurs de secours sel/gaz permette un échange par convection naturelle. Des réservoirs de pressurisation sont placés en hauteur pour avoir un écoulement du sel par pression hydrostatique.

Le sel intermédiaire froid passe dans les réservoirs de pressurisation supérieures, qui par leur hauteur, permettent un écoulement par pression hydrostatique. Ensuite il passe à travers un collecteur toroïdal (vert en haut voir figure 3) pour alimenter les 16 secteurs en sel froid. Le sel passe dans les échangeurs combustible/intermédiaire afin d'extraire la chaleur du combustible. Il est par la suite envoyé dans un deuxième collecteur toroïdal (vert en bas voir figure 3) puis passe à l'intérieur du réservoir de vidange (en rouge voir figure 3) d'où il est pompé pour accéder à l'échangeur intermédiaire/circuit conversion.

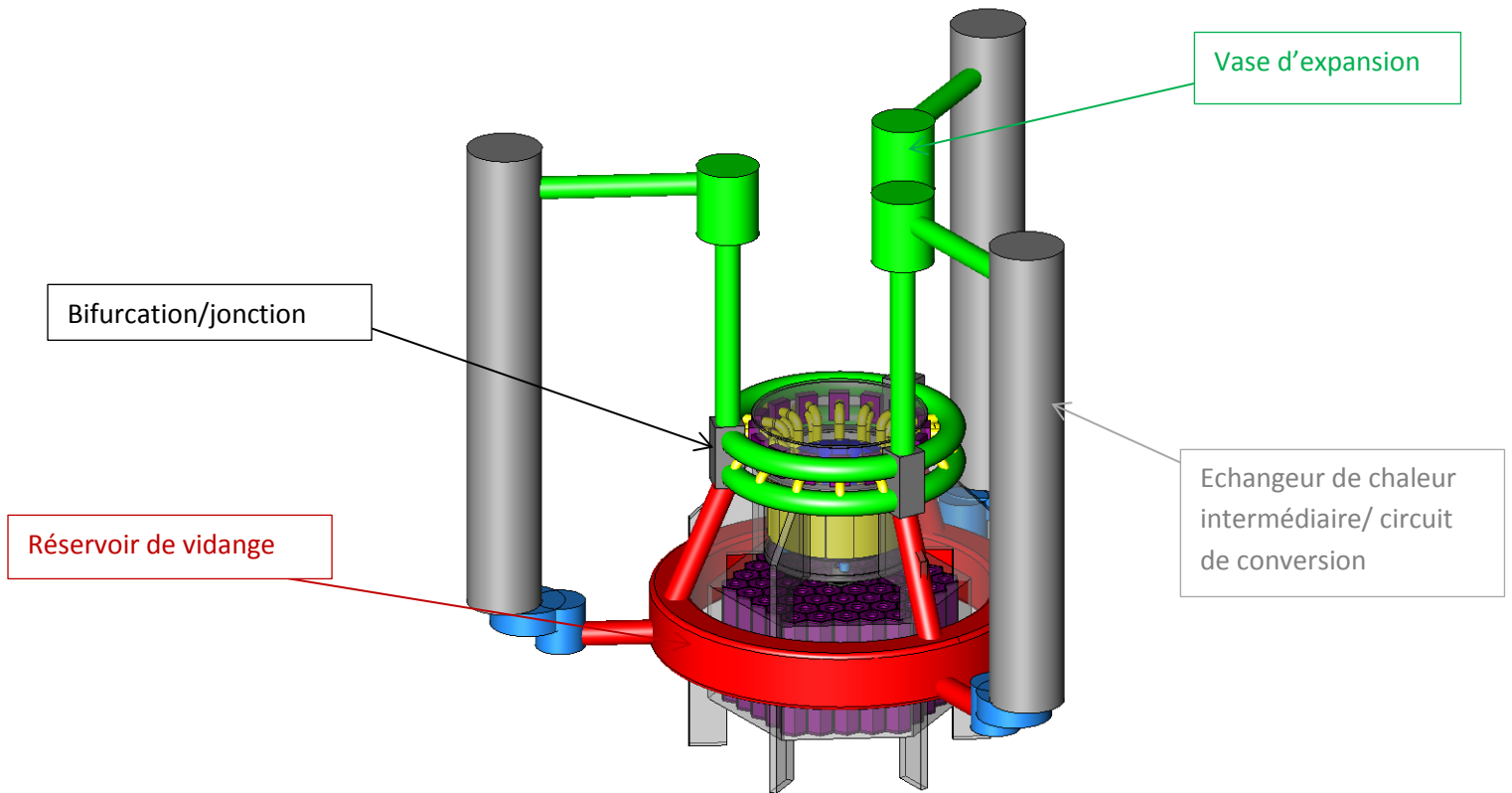


Figure 2: représentation du nouveau design du circuit intermédiaire (fonctionnement normale).

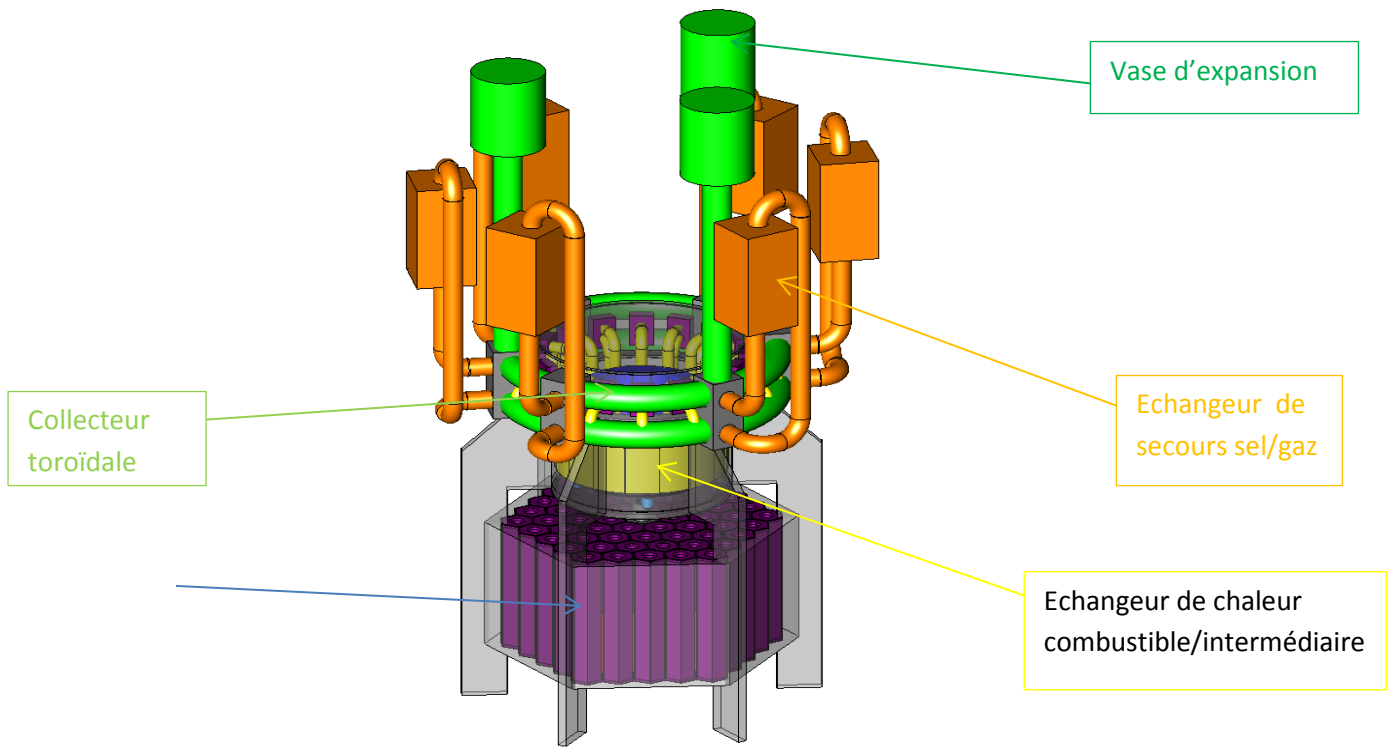


Figure 3: représentation du nouveau design du circuit intermédiaire (fonctionnement accidentel : perte de la source froide)

Avantages : en cas de mélange avec le fluide de conversion, qui est à haute pression, les réservoirs de pressurisation supérieur et le réservoir de vidange, tous deux possédant des niveaux libres, pourront permettre un amortissement de l'augmentation de la pression dans le circuit intermédiaire.

En cas de panne de pompe ou des échangeurs de chaleur intermédiaire/conversion ou perte de la source froide, les échangeurs de chaleur par convection naturel sel/gaz permettront d'évacuer la puissance résiduelle du combustible.

Inconvénient : les différents réseaux de circuit intermédiaire sont tous reliés entre eux grâce aux collecteurs toroïdaux permettant de distribuer et collecter respectivement le sel intermédiaire froid et chaud. Ainsi en cas de fuite de l'intermédiaire, toutes les branches de l'intermédiaire sont touchées, ce qui peut être compromettant du point de vue de la sûreté. Néanmoins, des vannes permettront d'isoler certaines parties du réseau afin d'éviter la propagation de l'accident.

Cette nouvelle configuration présente de nombreuses bifurcations/jonctions entre les différentes parties du circuit intermédiaire. Celles-ci peuvent engendrer à un risque plus important concernant les fuites, et donc compromettre la sûreté du MSFR.

Conclusion : chacune des deux propositions possède des avantages et des inconvénients. La première proposition permet de séparer la distribution de sel intermédiaire afin d'éviter qu'un accident sur une branche se répercute sur les autres. De plus, les circuits non endommagés permettront quand même d'évacuer la chaleur du combustible et ainsi les échangeurs sel/gaz par convection naturelle, comme dans la deuxième proposition, seront moins nécessaire, mais pourraient quand être utile en cas d'arrêt de toutes les pompes (ex : panne de courant généralisé). Quand à la deuxième proposition, son avantage est la possibilité d'atténuer l'excès de pression lors d'un accident avec le fluide de conversion (ex : rupture d'un échangeur intermédiaire/circuit conversion, grâce aux niveaux libres disponibles dans le réservoir de pressurisation supérieur et dans le réservoir de vidange. Néanmoins, il est envisageable que des réservoirs de pressurisation soient ajoutés à la première proposition afin de faire face au même type d'accident.

Annexe 9 : Convergence des calculs neutroniques

Les résultats issus de la méthode de Monte-Carlo peuvent ne pas être pertinents. En effet, cela peut être dû à la convergence de la distribution des sources de neutrons, du nombre d'histoires, et des corrélations inter-cycles. Pour cela, des cycles inactifs permettent à la source de fission et au k_{eff} de converger avant de commencer les cycles actifs pour la collecte des résultats. Il faut donc déterminer le nombre de cycles inactifs nécessaires afin que le k_{eff} et la distribution des sources convergent.

Une méthode nous permet de vérifier la convergence des sources de fission : elle consiste à utiliser l'entropie de Shannon. Elle caractérise la répartition des sources de fission et permet de vérifier que les neutrons parcourent bien toute la géométrie et ainsi de pouvoir analyser par la suite la convergence.

Les calculs ont été réalisés avec un nombre de neutrons de 200000 avec 500 cycles inactifs et 1 cycle actif (avec la base de données Jeff 3.1.1) puisqu'on ne regarde que la convergence, et ainsi, le temps de calcul est amoindri.

Enfin le nombre de neutrons doit être assez grand afin que tout l'espace soit recouvert avec une bonne statistique ainsi que toutes les réactions possibles.

Ainsi, on a tracé une série de graphiques, représentant la valeur de k_{eff} et de l'entropie de Shannon en fonction du nombre de cycles, afin de vérifier que leur valeur soit bien convergée. Voir figure 1-12)

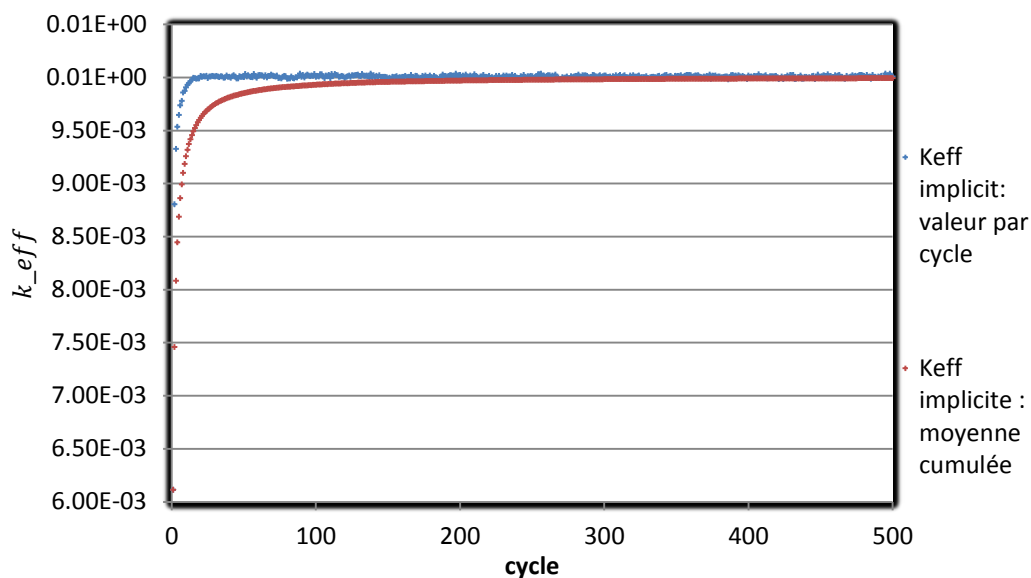


Figure 1 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle

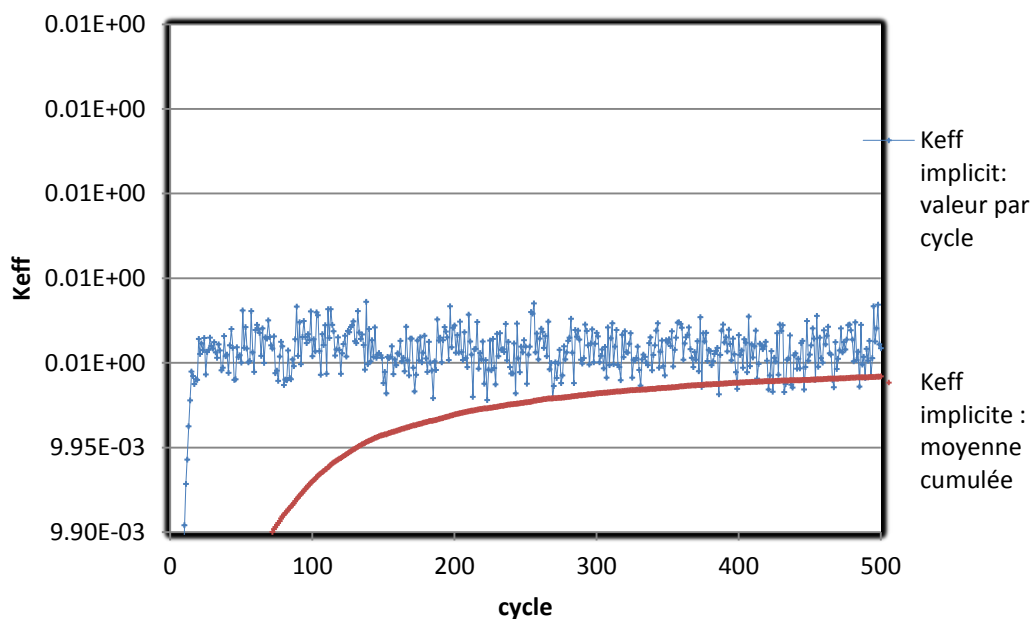


Figure 2 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle (ZOOM)

On peut voir que le k_{eff} converge environ vers 50 cycles et, en étant conservatif, on est assuré de sa convergence après 250 cycles inactifs. En effet on s'aperçoit que les variations pour les valeurs de k_{eff} par cycle restent les mêmes au-delà du 250^{ème} cycle. Si on veut diminuer ces variations, et donc diminuer l'incertitude sur les résultats, on doit augmenter la statistique, mais le calcul prendrait plus de temps.

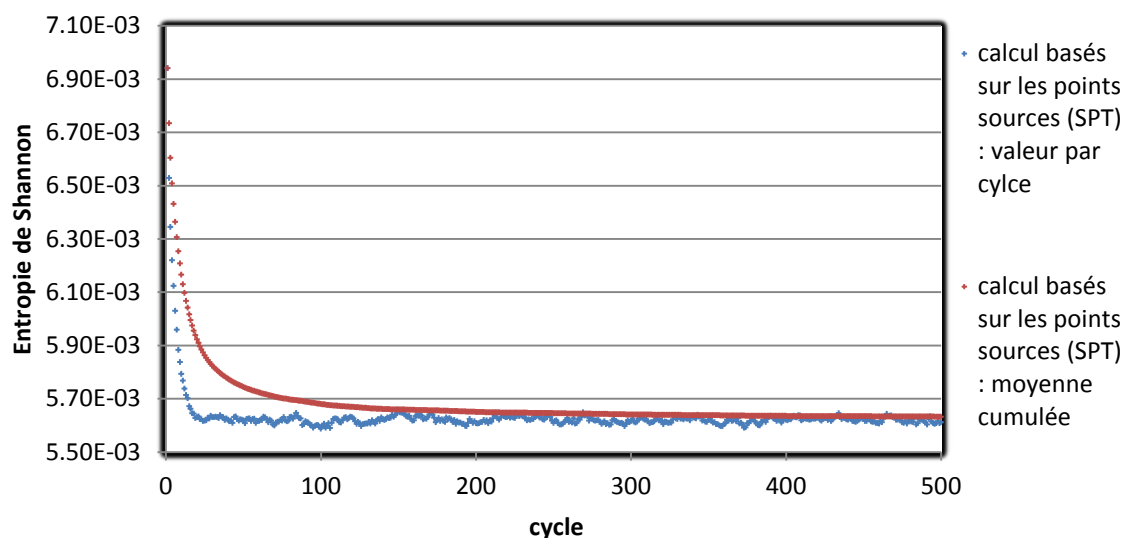


Figure 3 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle

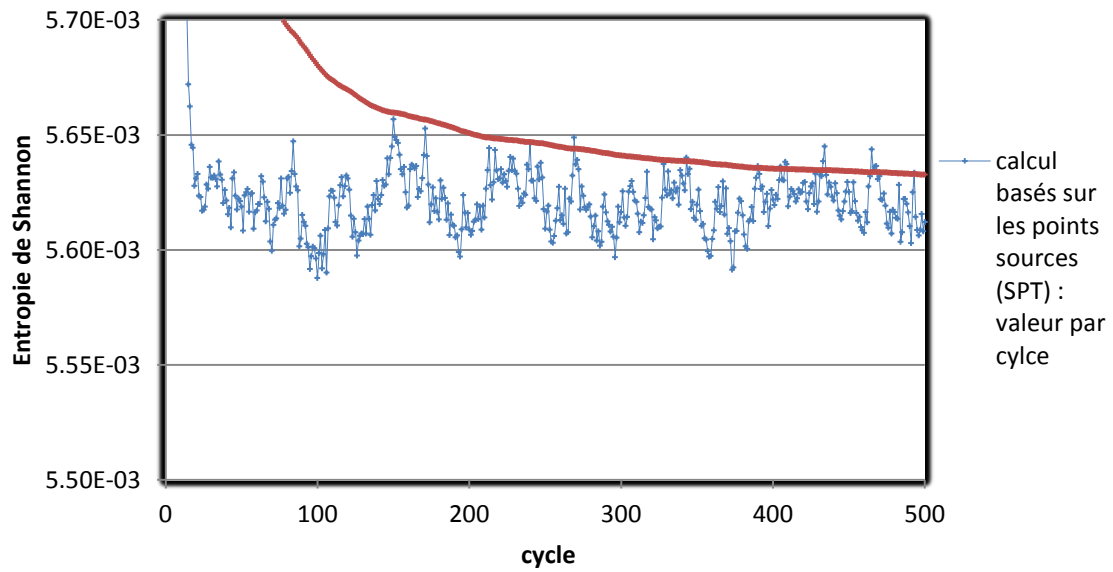


Figure 4 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle (ZOOM)

De même pour l'entropie de Shannon, on peut voir (figure4) que les variations de celle-ci semblent constantes à partir du cycle 250/300.

A titre de comparaison, les mêmes calculs ont été effectués mais avec une statistique inférieure : 5000 neutrons (figure5):

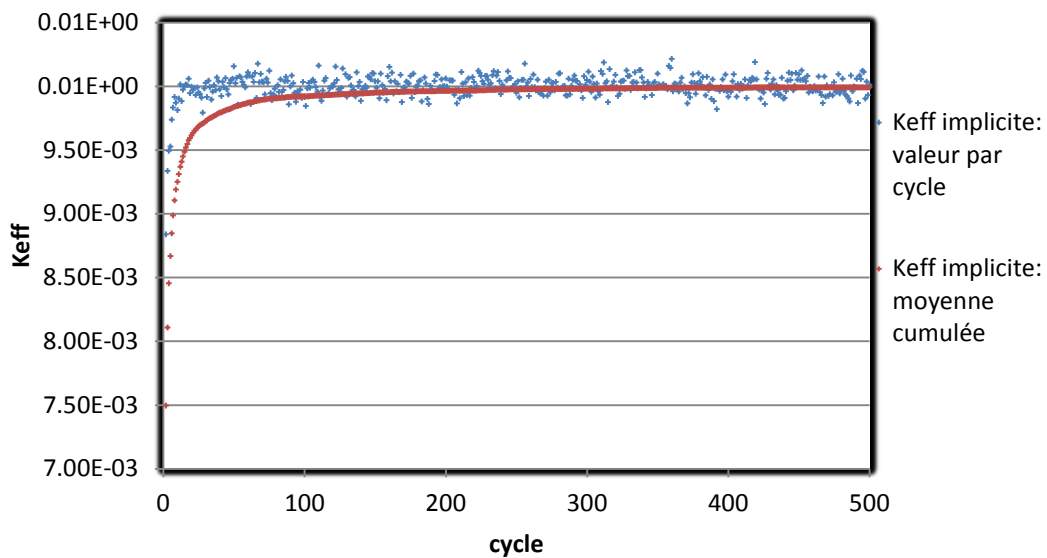


Figure 5 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle

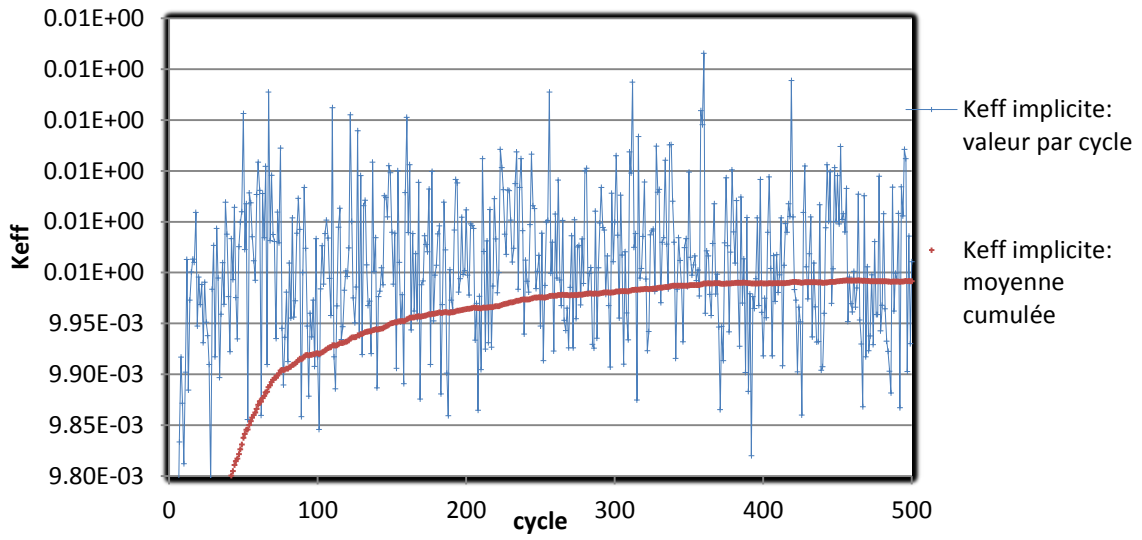


Figure 6 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle (ZOOM)

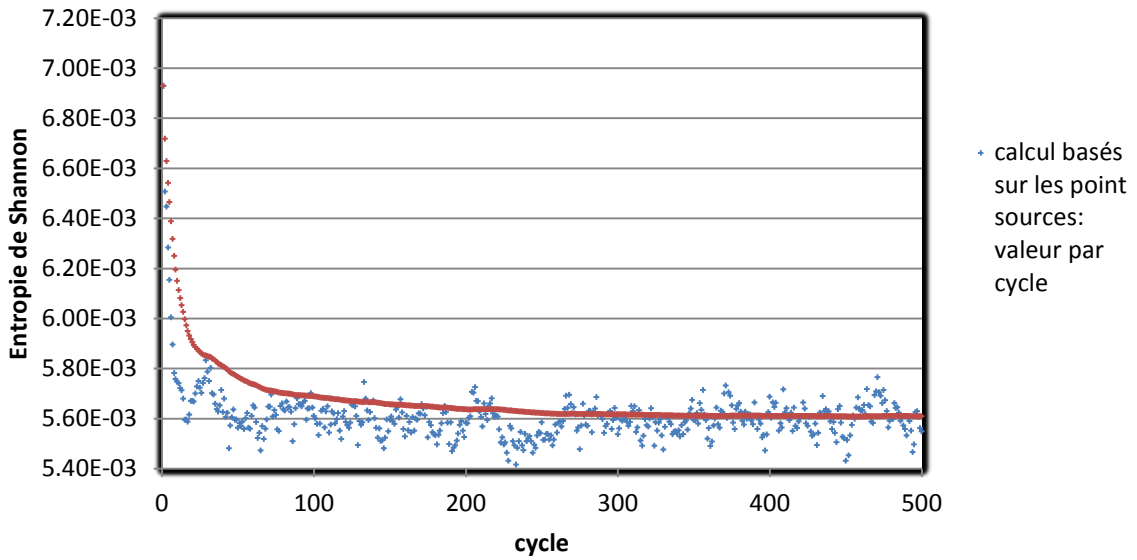


Figure 7 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle

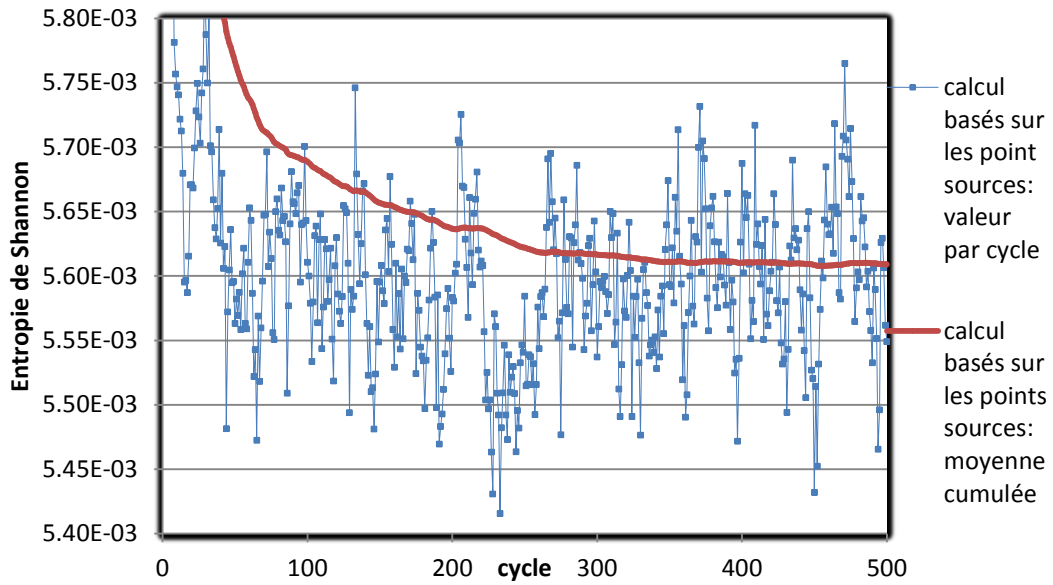


Figure 8 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle (ZOOM)

On voit que le k_{eff} converge toujours : les variations restent inchangées à partir du 250^{ème} cycle, mais les amplitudes de variation sont plus importantes. De même pour l'entropie de Shannon (figure 8)

Le même calcul à été réalisé, mais avec 200 cycles inactifs et 500 cycles actifs pour 200000 neutrons (figure 9)

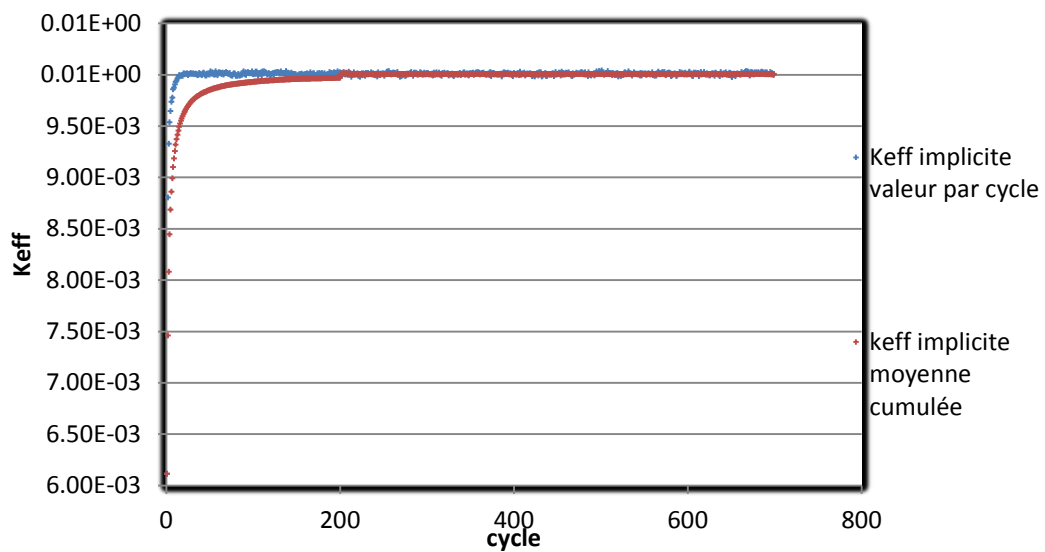


Figure 9 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle

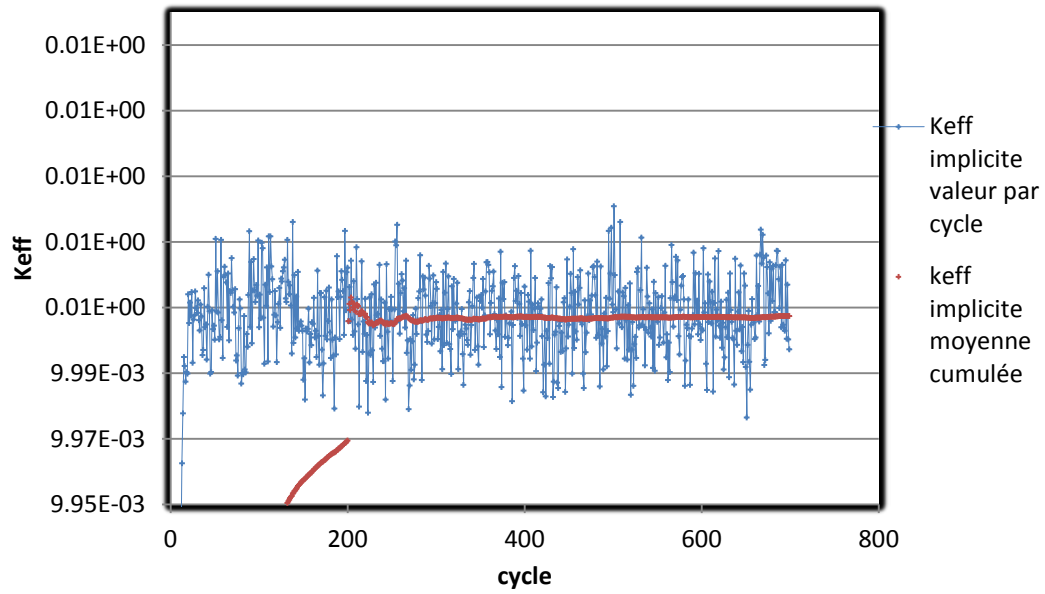


Figure 10 : valeur de k_{eff} en fonction du cycle (ZOOM)

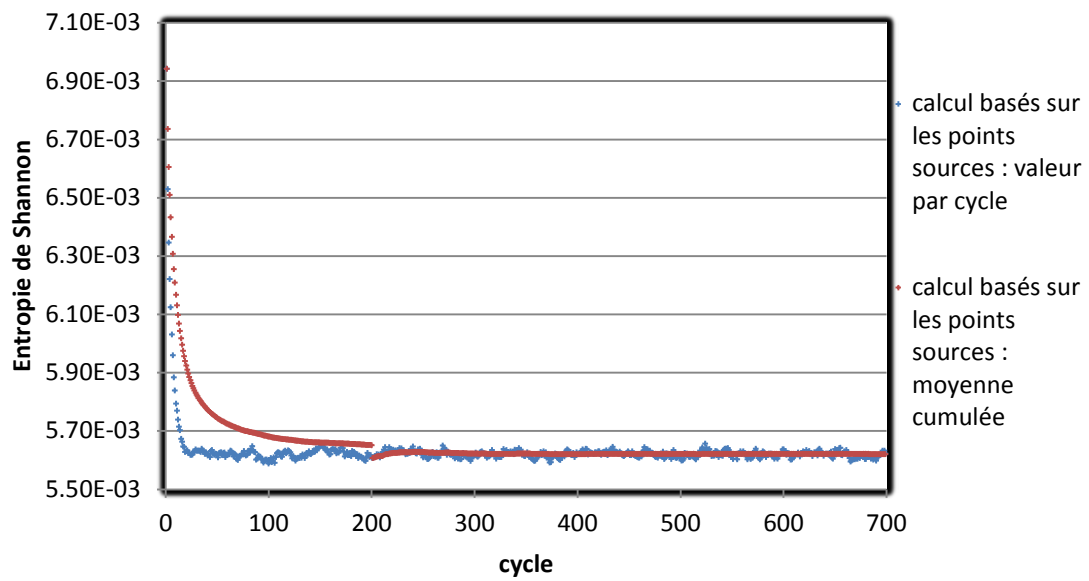


Figure 11 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle

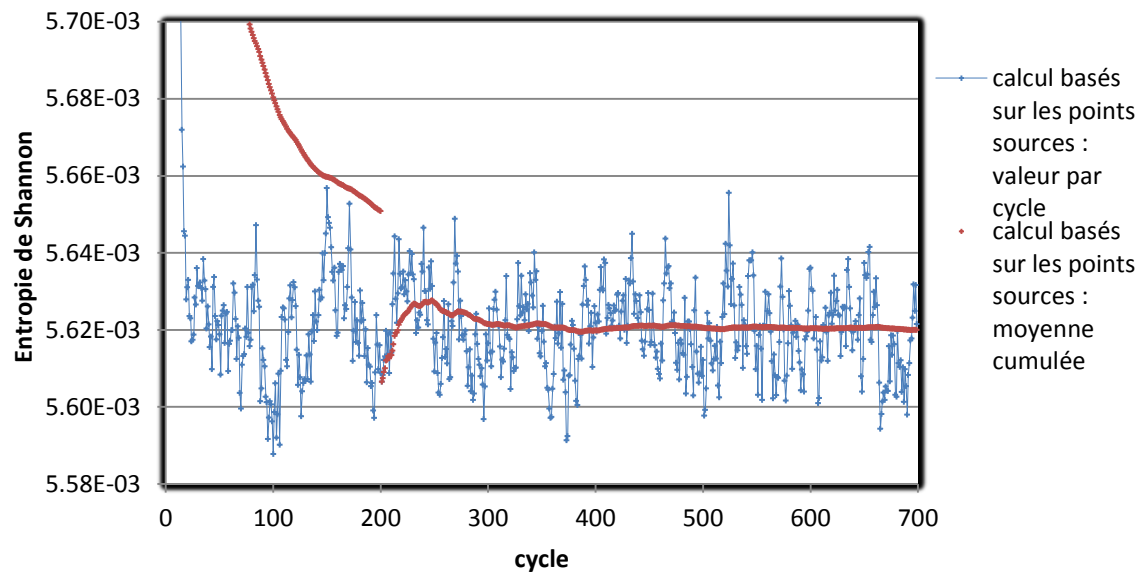


Figure 12 : valeur de l'entropie de Shannon en fonction du cycle (ZOOM).

On voit qu'après les 200 cycles inactifs, on a bien les cycles actifs qui convergent.

Annexe 10 : Diagramme de Gantt

stage LPC 2017

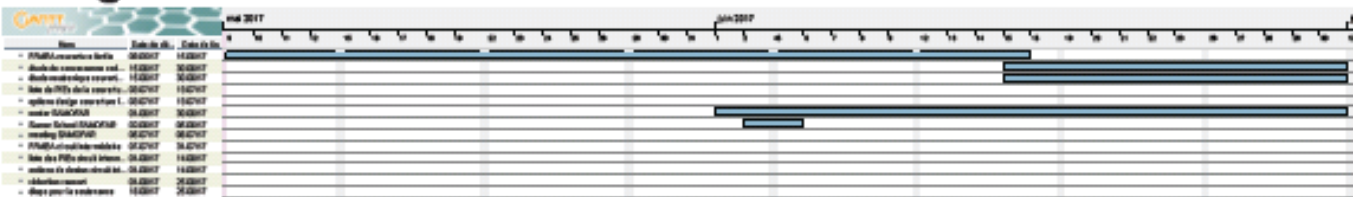
23 août 2017

Tâches

Nom	Date de début	Date de fin
FFMEA couverture fertile	09/05/17	15/06/17
étude de convergence code serpent 2	15/06/17	30/06/17
étude neutronique couverture fertile	15/06/17	30/06/17
liste de PIEs de la couverture fertile	03/07/17	13/07/17
options design couverture fertile	03/07/17	13/07/17
poster SAMOFAR	01/06/17	30/06/17
Sumer School SAMOFAR	02/06/17	05/06/17
meeting SAMOFAR	05/07/17	06/07/17
FFMEA circuit intermédiaire	07/07/17	31/07/17
liste des PIEs circuit intermédiaire	01/08/17	14/08/17
options de design circuit intermédiaire	01/08/17	14/08/17
rédaction rapport	01/08/17	25/08/17
diapo pour la soutenance	16/08/17	25/08/17

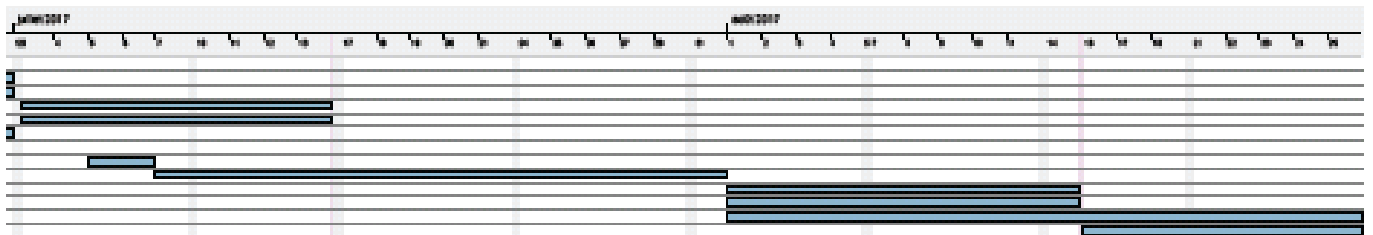
stage LPC 2017

Diagramme de Gantt



23 août 2017

3



Résumé

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet européen SAMOFAR, dont le but est de prouver les concepts innovants de sûreté du réacteur à sels fondus à spectre rapide (MSFR).

Le travail présenté ici contribue à l'analyse de sûreté du MSFR en utilisant des outils d'analyse de risque tel que le FFMEA, afin de pouvoir faire évoluer conjointement le design de ce réacteur tout en intégrant des éléments de sûreté. Ainsi cette méthode a été appliquée à la couverture fertile et au circuit intermédiaire du MSFR, le but étant de lister les divers évènements initiateurs d'accident. S'en suivent des études neutroniques avec le code Serpent 2, afin de quantifier les conséquences de ces accidents. Ainsi en fonction des résultats, des options de design ont été proposées lors du stage dans l'objectif d'améliorer la sûreté du MSFR.

Abstract

The internship takes place in the frame of the SAMOFAR European project, the aim of which is to prove the innovative safety of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR).

This work presented here contributes to the safety analysis of the MSFR using risk analysis tools such as FFMEA, in order to be able to jointly develop the design of this reactor while integrating safety elements. Thus this method has been applied to the fertile blanket tank and to the intermediate circuit of the MSFR, the aim being to list the postulated initiating events. This has been followed by neutronic studies with the Serpent 2 code, in order to quantify the consequences of the identified accidents. Thus, depending on the results, some design options have been proposed in order to improve the safety of the MSFR.