



Hugo PITOIS
hugo.pitois@grenoble-inp.org

Grenoble INP - PHELMA 3^{ème} année
& Master EMINE 2^{ème} année
2019/2020

Convection naturelle dans le MSFR

Cycle ingénieur - Projet de fin d'études
Effectué du 17/02/2020 au 28/08/2020
au LPSC - IN2P3 - CNRS

Sous la supervision de :

Elsa MERLE

elsa.merle@lpsc.in2p3.fr

Daniel HEUER

daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr

Axel LAUREAU

axel.laureau@epfl.ch

Tuteur école :

Yves DELANNOY

yves.delannoy@grenoble-inp.fr

Rapport non confidentiel

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Daniel Heuer pour son encadrement, ses explications et sa contribution en général dans le bon déroulement de ce stage ; et pour sa disponibilité au téléphone quand j'en avais besoin.

J'adresse ensuite mes remerciements à Elsa Merle pour son accompagnement et pour m'avoir permis, avec Daniel, de réaliser ce stage.

Un grand merci à Axel Laureau, le développeur de LiCore (entre autres), qui a pris sur son temps libre pour m'expliquer le fonctionnement de ce code et sans qui ce travail aurait été nettement plus dur.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Yves Delannoy pour son suivi, et aux personnes qui se sont impliquées au niveau administratif pour ce stage.

Glossaire

- AHX : échangeur air (ou autre fluide)/air entre le circuit du bâtiment réacteur et le circuit d'air extérieur du MSFR

- CERN : Centre Européen pour la Recherche Nucléaire
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
- CPZ : Cinétique Point par Zone

- ECR : Electron Cyclotron Resonance
- EDS : Emergency Draining System, ou Système de Vidange d'Urgence

- Fertile : noyau d'atome pouvant devenir fissile par capture neutronique (suivie de décroissances radioactives éventuelles)
- Fissile : noyau d'atome pouvant fissionner quelque soit l'énergie du neutron qui le percute

- GIF : Generation IV International Forum - Forum International pour la 4e Génération de réacteurs nucléaires
- GV : Générateur de Vapeur

- IHX : échangeur de chaleur sel/sel entre le circuit combustible et le circuit intermédiaire du MSFR
- IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

- JVM : Java Virtual Machine, Machine Virtuelle Java où s'exécute le code Java.

- LHC : Large Hadron Collider, collisionneur de particules du CERN.
- LiCore : Liquid Core, code système dédié au MSFR
- LPSC : Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

- MSFR : Molten Salt Fast Reactor, ou Réacteur Rapide à Sels Fondus

- PF : Produit(s) de Fission
- PMCN : Pression Motrice de Convection Naturelle

- REB : Réacteur à Eau Bouillante
- REP : Réacteur à Eau Pressurisée

- SNCF : Simulateur Numérique de Circulation de Fluides

- UHX : échangeur air/air entre le bâtiment réacteur et l'air extérieur

Table des matières

Remerciements	1
Glossaire	2
Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
Présentation du LPSC	6
1 Introduction	7
2 Concept du MSFR & objet du stage	9
2.1 Présentation du MSFR [9]	9
2.2 Sûreté et vidange d'urgence	9
2.3 Problématiques liées à la vidange d'urgence	11
2.4 Alternative à la vidange d'urgence	12
3 Convection naturelle - physiques mises en jeu	13
3.1 Flux de chaleur	13
3.2 Les pertes de charge	15
3.3 La mise en place de la convection naturelle	16
4 Programmation d'un modèle simple	17
4.1 Introduction	17
4.2 Implémentation de la physique	17
4.2.1 Neutronique & Radioactivité	17
4.2.2 Thermohydraulique	18
4.2.3 Paramètres surveillés	20
4.3 Résultats	21
4.3.1 Configuration 2 boucles	21
4.3.2 Configuration 4 boucles	29
4.4 Discussion	32
4.4.1 Configuration 2 boucles	32
4.4.2 Configuration 4 boucles	33
5 Implémentation dans LiCore	35
5.1 Présentation de LiCore	35
5.1.1 Introduction	35
5.1.2 Neutronique	36
5.1.3 Thermohydraulique	38
5.1.4 Configuration	38
5.2 Implémentation de la convection naturelle	39
5.2.1 Géométrie	39
5.2.2 Physique	39
5.2.3 Numérique	41
5.2.4 Interface	41
5.3 Résultats	41
5.4 Discussion	42
6 Conclusion & Perspectives	47
Bibliographie	48

Annexes	49
1 Diagramme de Gantt	49
2 Gestion des trains, par Daniel Heuer le 7 avril 2020	49
3 Propriétés de l'Hastelloy-N	51
4 Résultats de simulations LiCore : variation de la hauteur de colonne et de la température imposée en paroi de SHX	51
5 Résultat de la simulation LiCore de référence de 3000s	54

Table des figures

1 Vue conceptuelle du coeur du MSFR [5]	9
2 Schéma du système MSFR avec le circuit combustible au-dessus de l'EDS	10
3 Configuration étudiée du MSFR en convection naturelle	13
4 Corrélations utilisées selon les valeurs de Re et Pr	14
5 Puissance résiduelle du réacteur MSFR dans le sel combustible (en bleu), l'unité de bullage (en noir) et l'unité de retraitement (en vert), et somme de ces puissances (en rouge) après 100 ans de fonctionnement du réacteur démarré à l' ^{233}U	18
6 Evolution des températures dans les boucles combustibles et intermédiaires	23
7 Evolution des PMCN dans les boucles combustibles et intermédiaires	24
8 Evolution de la vitesse moyenne du fluide dans les boucles combustibles et intermédiaires	25
9 Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la hauteur de la colonne chaude de la boucle intermédiaire	26
10 Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la température imposée sur la paroi extérieure de SHX	27
11 Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la longueur de SHX	28
12 Températures dans les 4 boucles (situation de référence)	31
13 Evolution de la puissance de fission (configuration 4 boucles, référence)	32
14 Interface de LiCore	35
15 Rendu de la simulation de référence de LiCore	36
16 Aperçu du fichier de configuration de LiCore	38
17 Nouvelle géométrie de LiCore	40
18 Code source de LiCore résolvant le débit massique en convection naturelle	40
19 Résultats (interface) de la situation de référence pour la convection naturelle dans LiCore	42
20 Températures dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)	43
21 PMCN dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)	44
22 Vitesse du fluide dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)	45
23 Diagramme de Gantt du stage	49
24 Températures maximales dans les deux circuits en fonction de la hauteur de la colonne chaude du circuit intermédiaire	52
25 Températures maximales dans les deux circuits en fonction de la température imposée sur la paroi extérieure de SHX	53
26 Résultat (interface) de la configuration de référence sous LiCore pour un temps de simulation de 3000s	54

Liste des tableaux

1 Propriétés physiques du combustible LiF - ThF ₄ (78% - 22%)	15
2 Propriétés physiques du fluoroborate	15
3 Propriétés physiques de l'Hastelloy-N	15
4 Propriétés physiques de l'air	16
5 Valeurs de la fraction de puissance résiduelle pour différents temps	19
6 Paramètres de la configuration de référence (2 boucles)	21
7 Paramètres de la configuration de référence (4 boucles)	29

8	Demi-vie et fraction de neutrons retardés pour chaque famille de précurseur intégrée dans LiCore	37
9	Composition de l'Hastelloy-N	51
10	Propriétés de l'Hastelloy-N	51

Présentation du LPSC [6]

Le LPSC, pour Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie, est une unité mixte de recherche fondée en 1967. Il est sous la tutelle de l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) (un des constituants du Centre National de la Recherche Scientifique), de l'Université Grenoble Alpes et de Grenoble INP. Son site principal se trouve à Grenoble.

Ses activités de recherche s'orientent autour de quatre axes.

L'axe 1, nommé "Des particules aux noyaux", est composé de 4 équipes de recherche :

- **Atlas** (Caractérisation de la nature de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible et la recherche de signes d'une physique au-delà du Modèle Standard de la physique des particules. Nommé d'après l'expérience Atlas concernant le détecteur ATLAS du LHC au CERN pour laquelle l'équipe s'investie)
- **Alice** (nommée d'après le détecteur ALICE du CERN, au coeur d'expériences dont elle a contribué avec son expertise technique dans les algorithmes de reconstruction et d'identification des photons et des jets. Caractérisation du plasma quark-gluon.)
- **Neutrons Ultra-Froids** (étudie les neutrons de très basse énergie (vitesse autour de 30 km/h). Mesure du moment dipolaire électrique du neutron (expérience nEDM), et mesure des états quantiques des neutrons bondissants (expérience GRANIT).)
- **Physique Théorique** (calculs de précision en chromodynamique quantique, et recherche d'extensions du modèle standard avec un accent mis sur la supersymétrie)

L'axe 2, "Astroparticules, cosmologie et neutrinos" est formé de 5 équipes :

- **Auger** (nommé d'après l'Observatoire Pierre Auger, l'équipe travaille sur les rayons cosmiques d'ultra haute énergie ($E > 10^{19}$ eV))
- **Cosmo ML** (contributions aux projets NIKA2 et CORE, travail sur des détecteurs dans le domaine de la Cosmologie)
- **Dark** (cosmologie observationnelle, rayonnement cosmique et matière noire, gravité quantique)
- **Mimac**
- **Neutrinos** (étude des neutrinos et recherche d'un type de neutrino dit stérile)

L'axe 3, "Energie et santé", regroupe 3 équipes :

- **Physique des réacteurs** (études système sur des réacteurs existants où en développement, études multidisciplinaires pour réaliser des scénarios énergétiques, intérêt portés aux RSF et aux ADS)
- **MSFR** (développement du réacteur rapide à sels fondus (Molten Salt Fast Reactor), de son concept de référence et de ses déclinaisons)
- **Applications médicales** (actuellement impliqué dans la thérapie ciblée par capture de neutrons, et dans la mise au point d'un détecteur diamant de grande surface pour la hadronthérapie)

L'axe 4, "Accélérateurs, sources d'ions et plasma-matériaux" intègre 2 équipes :

- **Accélérateurs & sources d'ions** (conception et exploitation d'accélérateurs de particules ; développement de prototypes de sources d'ions ECR)
- **Plasma** (plus largement le Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures, travaille sur des sources de plasmas micro-onde, l'élaboration de nouveaux matériaux et la micro-nanofabrication)

Il est impossible d'explicitier dans ce rapport tous les concepts de physique mentionnés ci-dessus, aussi le choix de s'informer sur ces sujets est laissé à la discrétion du lecteur.

Le personnel permanent pour la recherche regroupe 40 chercheurs du CNRS, 19 enseignants-chercheurs de l'UGA, 9 enseignants-chercheurs de Grenoble INP. Le laboratoire accueille également environ 35 doctorants, 15 post-doctorants et CDD, et une cinquantaine de stagiaires. Enfin, le personnel ITA (Ingénieurs, Techniciens, Administratif) compte plus de 90 personnes.

1 Introduction

A partir de la révolution industrielle, l'utilisation de plus en plus conséquente des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) a rendu possible le développement de la société jusqu'à son niveau actuel (mécanisation et tertiarisation des emplois, élévation du niveau de vie moyen, démocratisation des moyens de transports individuels ...). Cependant, la surutilisation des énergies fossiles s'accompagne de l'émission massive dans l'atmosphère de gaz à effets de serre, résultant aujourd'hui en un dérèglement du climat et à l'augmentation de la température moyenne de la planète. Dans ces conditions, il semble vital de se tourner vers des sources d'énergies décarbonées, l'énergie nucléaire en étant une parmi d'autres permettant une production massive et continue.

Actuellement, l'énergie nucléaire, dans son utilisation civile, est dédiée à la production d'électricité. L'immense majorité des réacteurs électrogènes actuels sont des réacteurs à eau pressurisée (REP) ou à eau bouillante (REB) fonctionnant avec un spectre neutronique thermique : les neutrons servant à la fission sont ralentis par un modérateur. L'industrie nucléaire actuelle fait face à (au moins) deux problèmes : la technologie actuelle peine à convaincre de son très haut niveau de sûreté exigé après les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ; elle produit chaque année des déchets radioactifs dont une partie, les actinides mineurs, concentre la majeure partie de la radioactivité et surtout de la haute radioactivité à vie longue. Dans ces conditions, des technologies alternatives sont aujourd'hui à l'étude.

En 2000 fut créé le Forum International Génération (GIF) IV, pour choisir les modèles de réacteurs nucléaires à étudier en vue de pérenniser la filière. Le GIF a établi quatre grands critères pour sélectionner ces futurs réacteurs [3] :

- **la durabilité** (production massive d'énergie en maximisant l'utilisation de la ressource et en minimisant la production de déchets)
- **la viabilité économique** (le risque financier doit être similaire à tout autre projet concernant une production d'énergie équivalente)
- **la sûreté et la fiabilité** (le niveau de sûreté doit être au moins égal à celui des réacteurs de troisième génération et doit justifier de ne jamais avoir à évacuer la population vivant à proximité du site)
- **la sécurité et la résistance à la prolifération** (le réacteur doit être à l'abri des agressions extérieures, et le combustible utilisé doit être continuellement résistant à la prolifération).

Six concepts de réacteurs furent retenus par ce forum en 2002 [3] :

- le GFR (Gaz-cooled Fast Reactor), refroidi à l'hélium
- le LFR (Lead-cooled Fast Reactor), refroidi par du plomb ou un mélange de plomb-bismuth
- le MSR (Molten Salt Reactor), refroidi par des sels fondus
- le SCWR (SuperCritical Water-cooled Reactor), refroidi par de l'eau supercritique
- le SFR (Sodium-cooled Fast Reactor), refroidi au sodium
- le VHTR (Very High Temperature Reactor) refroidi par de l'hélium

Le premier concept de MSR (le Molten Salt Breeder Reactor, avec matrice de graphite et spectre neutronique thermique) a été remplacé en 2008 par le MSFR pour Molten Salt Fast Reactor, c'est-à-dire une version en spectre neutronique rapide du réacteur car la version en spectre neutronique thermique a été jugée moins compatible avec les critères de sélection. Ce concept a été imaginé et est développé par une équipe du LPSC (CNRS, Grenoble). Pour des raisons détaillées plus tard, ce modèle de réacteur possède une excellente sûreté intrinsèque, mais cela n'exclut par pour autant le risque d'incident ou d'accident. Comme tout réacteur à l'étude, sa sûreté doit être démontrée, notamment via des simulations de comportement du réacteur. Par ailleurs, le MSFR ayant la particularité d'avoir un combustible liquide, des nouveaux outils numériques ont été créés et sont à ce jour en développement. C'est le cas du code système LiCore [7], dont le développement par Axel Laureau a été commencé pendant son stage M2 puis sa thèse.

Ce stage porte sur l'étude d'une configuration particulière du réacteur. Pour des raisons évoquées au paragraphe 2.4, on souhaite démontrer la possibilité d'évacuer passivement la chaleur résiduelle [10] par la mise en place d'une première boucle de convection naturelle dans le circuit combustible, et d'une seconde

dans le circuit intermédiaire.

Ce rapport commence par une présentation générale du concept de MSFR et explicite la raison de ce stage. Une deuxième partie introduit les notions de physique mises en jeu pour la convection naturelle. Dans une troisième partie, une première modélisation de cette convection dans un modèle simple et ses résultats sont proposés. Finalement, l'implémentation de la convection naturelle dans le code LiCore et des résultats de simulations sont présentés.

2 Concept du MSFR & objet du stage

2.1 Présentation du MSFR [9]

Le Molten Salt Fast Reactor, ou réacteur rapide à sels fondus est un concept de réacteur utilisant des sels fondus circulants et un spectre rapide (vue conceptuelle du coeur figure 1). Sa particularité principale vient de son combustible liquide : les isotopes fissibles sont dissous dans un sel (fluorure ou chlorure) porté à haute température. Ce sel joue à la fois les rôles de combustible et de caloporteur. Cette particularité lui confère une sûreté intrinsèque excellente (détaillée au paragraphe suivant) et permet un fonctionnement à haute température (650°C contre 300°C en REP) à basse pression (1 à 3 bars contre 155 bars en REP), ces deux paramètres permettant respectivement une meilleure efficacité théorique et une réduction des risques d'origine mécanique.

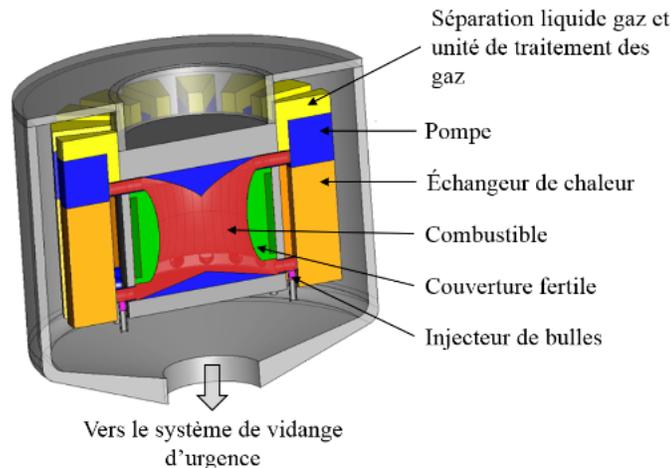


FIGURE 1 – Vue conceptuelle du coeur du MSFR [5]

Le concept actuel du MSFR comprend trois circuits. Premièrement, le circuit combustible qui est composé en fonctionnement normal du réacteur et des boucles de recirculation où sont situés les échangeurs de chaleur. Deuxièmement, le circuit intermédiaire, contenant un sel d'une composition différente du sel combustible. Son rôle est d'extraire la chaleur du cœur pour la transmettre au dernier circuit. Troisièmement le circuit de conversion comprenant le nécessaire pour la production d'électricité. Il peut utiliser de l'eau supercritique ou du CO₂ supercritique.

Ce concept peut fonctionner avec une large variété de compositions de combustibles. Le concept de référence fonctionne en cycle thorium, les isotopes fissile (²³³U principalement) et fertile (²³²Th) sont dissous sous forme fluorure dans des fluorures de lithium. Il est à noter qu'une autre version pour le cycle U/Pu utilisant des sels chlorures existe, dans lesquels le plutonium est plus soluble. Cette version pourrait être plus attrayante pour des industriels dans le cas particulier de la France, qui possède un large inventaire de plutonium (et d'uranium appauvri pouvant jouer le rôle d'élément fertile).

2.2 Sûreté et vidange d'urgence

En fonctionnement normal, le MSFR dispose via son combustible liquide d'excellents coefficients de contre-réaction négatifs (effet Doppler et dilatation du sel). Cette stabilité intrinsèque n'exclut pas la possibilité d'incidents ou d'accidents d'autres origines, ce qui implique deux choses. Il faut identifier les scénarios conduisant à une situation anormale, et disposer d'outils pour modéliser le comportement du réacteur tant en fonctionnement normal qu'incidentel ou accidentel.

Si des outils existent déjà pour modéliser des REPs, la forme liquide du combustible et sa circulation hors de la zone critique du cœur nécessitent d'en créer de nouveaux pour étudier le MSFR. En particulier,

ce système présente un fort couplage entre la neutronique et la thermohydraulique. Par conséquent, divers codes de calcul ont été mis au point en fonction des besoins des utilisateurs.

TFM-OpenFOAM par exemple, est un code de couplage neutronique-thermohydraulique utilisé pour modéliser le circuit combustible. Il a été développé pendant la thèse d’Axel Laureau et est à ce jour le code le plus validé et utilisé pour simuler le coeur du MSFR. Des codes systèmes ont également été créés, comme PANDAS développé par Delphine Gérardin [5] pour l’étude de la sûreté, SONGE, par Daniel Heuer, pour dimensionner le MSFR d’un point de vue thermohydraulique, ou LiCore, développé par Axel Laureau à partir de 2013 pour l’étude de transitoires [7]. Ce dernier code devant être modifié pendant ce stage, une description plus précise de son fonctionnement est présentée au paragraphe 5.1.

La sûreté de ce concept de réacteur est analysée depuis 2013, notamment dans le cadre de projets européens comme EVOL ou SAMOFAR. Mariya Brovchenko [2] et Delphine Gérardin [5] ont chacune réalisé une thèse au LPSC (CNRS) sur la sûreté du MSFR. Delphine Gérardin a notamment formalisé une méthodologie d’analyse de sûreté et passé en revue plusieurs scénarios d’incidents et d’accidents. Axel Laureau lors de sa thèse [7] ainsi qu’Emeline Rosier lors de son stage master 2 (rapport confidentiel Framatome) ont étudié le comportement du MSFR en situation normale et lors de transitoires. A ce jour, il apparaît qu’un système de vidange d’urgence pour extraire le sel combustible de la zone critique est indispensable, en dernier recours.

Ce système de vidange d’urgence, ou EDS (pour Emergency Draining System, présenté figure 2), a été envisagé dès la création du MSFR. Pour en comprendre la raison, il faut s’intéresser à la définition d’un coeur de réacteur sûr, et aux conditions associées exigées.

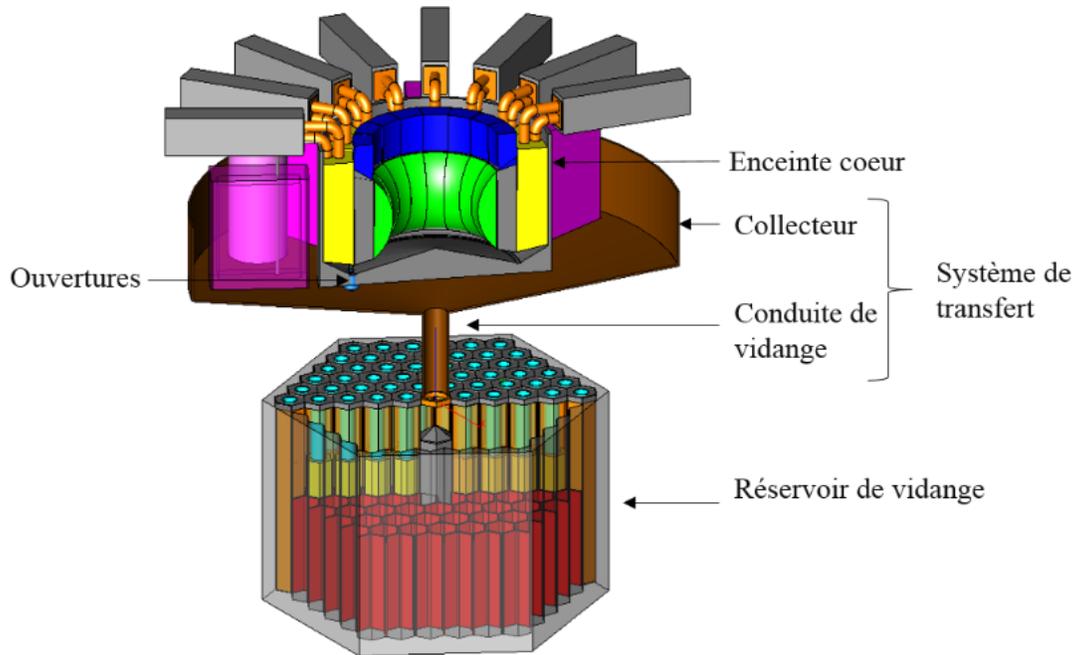


FIGURE 2 – Schéma du système MSFR avec le circuit combustible au-dessus de l’EDS

La sûreté d’un réacteur nucléaire est caractérisée par trois fonctions.

Tout d’abord, le refroidissement doit être assuré continuellement. Un cœur de réacteur nucléaire continue à produire de la chaleur même après l’arrêt de la réaction en chaîne, c’est ce que l’on appelle la puissance résiduelle. Elle est produite par la décroissance des produits de fission et par celle des noyaux lourds instables [10].

Ensuite, la criticité doit être maîtrisée à tout instant. Autrement dit, le réacteur ne doit jamais se trouver

dans une situation où la réaction en chaîne devient incontrôlable et provoque une augmentation exponentielle de la puissance.

Enfin, le confinement doit être préservé, ce qui veut dire qu'il ne doit pas y avoir de rejet de matières radioactives dans l'environnement.

Il faut garder à l'esprit que ces critères ont été pensés et définis pour des réacteurs à combustible solide, qui ne peut donc pas être extrait en situation accidentelle et doit être refroidi activement dans tous les réacteurs commerciaux actuels. La vidange d'urgence permet par simple transfert gravitationnel de placer le sel combustible dans une géométrie sous-critique, et a été pensée pour évacuer la chaleur résiduelle de façon passive. Dans cette situation, le confinement est théoriquement assuré par trois barrières de confinement et par le fait que le sel joue un rôle efficace pour piéger les produits de fission. Cependant l'utilisation de ce système n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes développés par la suite, et des solutions pour éviter d'y avoir recours sont à l'étude, d'où l'existence de ce stage.

2.3 Problématiques liées à la vidange d'urgence

L'utilisation du réservoir de vidange d'urgence soulève des problématiques ayant deux responsables principaux : la puissance résiduelle, et les matériaux. Pour commencer, la vidange sous-entend l'extraction totale du sel combustible de son circuit habituel. Dans les faits, ce liquide a une certaine tension de surface, il est donc probable que des gouttes de sel ne soient pas évacuées. Cette situation est particulièrement susceptible de se produire au niveau des échangeurs de chaleur qui sont dimensionnés pour offrir le plus de surface disponible au sel, afin d'améliorer l'extraction de la chaleur en conditions normales. En plus des gouttes de sel combustible, des produits de fission métalliques ont tendance à se déposer dans les échangeurs pendant le fonctionnement du réacteur et ces derniers sont également une source de puissance résiduelle. Ces conditions peuvent entraîner une accélération de la détérioration des échangeurs.

Ensuite, avant de se retrouver dans le réservoir, le sel doit d'abord être recueilli dans le collecteur, puis passer par une conduite de vidange. L'intégralité du processus implique des dépôts de chaleur dans les matériaux au contact du sel et il faut s'assurer de l'intégrité du confinement tout au long du déplacement du sel. Un important travail de modélisation de cet écoulement a été réalisé par Thibault Le Meute [8], avec l'étude des contraintes perçues par les matériaux.

Puis, une fois que le sel se trouve dans le réservoir, il faut continuer à extraire la chaleur résiduelle. Le réservoir se veut conçu pour extraire passivement cette chaleur. Les parois du réservoir doivent être refroidies par convection naturelle avec le gaz présent dans l'enceinte du réacteur (probablement de l'air), lui-même refroidi par convection naturelle avec l'air du bâtiment réacteur (les parois dudit bâtiment étant finalement refroidies par l'air extérieur). Cependant, le sel doit être rapidement récupérable en cas de vidange intempestive, ce qui implique de limiter au maximum la pollution du sel par des intrants, comme de l'oxygène possiblement présent dans le réservoir.

Le sel dans le réservoir doit préférentiellement être maintenu à l'état liquide pour mieux évacuer la chaleur. En effet, en cas de formation d'une croûte à sa surface (comme cela a été observé lors d'études de coriums), le flux de chaleur du sel liquide peut se concentrer en certains points, ce qui peut conduire à une détérioration rapide locale des matériaux et mettre en danger le confinement. La surface est par ailleurs moins bien refroidie puisque la convection naturelle n'a plus lieu à ce niveau.

Par ailleurs, une utilisation évitable de la vidange d'urgence provoque une usure tout aussi évitable des matériaux au contact du sel, à la fois lors de la vidange puis lorsque le sel est renvoyé en cœur. Cette dernière phase nécessite de plus l'utilisation de dispositifs supplémentaires qui doivent générer la pression requise pour chasser le sel du réservoir d'urgence.

Pour finir, il n'est pas impossible que le réservoir d'urgence soit indisponible. On suppose que l'EDS est une défense forte [5], c'est-à-dire que sa probabilité d'être indisponible est inférieure à 1/1000. Cette

probabilité est certes faible mais non nulle.

2.4 Alternative à la vidange d'urgence

L'alternative à la vidange d'urgence envisagée est de garder le sel combustible en cœur. Ce choix implique donc que le cœur restera critique de part sa géométrie et composition. Mais un cœur sûr est aujourd'hui considéré comme tel s'il est sous-critique, ce qui devrait interdire ce choix. Cependant, ce critère a été défini pour un cœur à combustible solide, et sa pertinence est remise en cause pour un réacteur à combustible liquide. Garder le cœur critique a en effet un avantage : les contre-réactions sont conservées puisqu'elles sont liées à la réaction en chaîne. Le MSFR ayant des coefficients de contre-réactions très négatifs, il est donc très stable lorsqu'il est critique.

La puissance résiduelle doit toujours être évacuée, et si possible de façon passive (à cette chaleur s'ajoute d'ailleurs celle produite par la réaction en chaîne, mais elle n'est pas déterminante dans ce problème, puisqu'on suppose une puissance neutronique très faible voire nulle et une réactivité sous contrôle). La solution envisagée est donc de mettre en place une convection naturelle dans le circuit combustible et également dans le circuit intermédiaire. Cela permettrait d'assurer le refroidissement du combustible même en cas de perte totale d'alimentation électrique du site.

Une configuration présentant des similarités avec celle-ci a été étudiée par Marceau Daronnat [4]. Son stage a consisté en l'analyse d'une situation où le sel intermédiaire a été perdu et remplacé par de l'air. Le cœur a été vidangé mais des produits de fission ont été déposés dans les échangeurs et continuent de produire de la chaleur. Il s'agissait alors de prouver s'il était possible de refroidir les échangeurs par convection naturelle avec cet air (à pression atmosphérique) uniquement pour extraire la puissance résiduelle. Les résultats semblent montrer que cette puissance n'est pas extractible correctement dans de telles conditions. Une autre configuration mérite d'être étudiée et fait l'objet de ce stage. Elle présente les caractéristiques suivantes (figure 3) :

- Le circuit de conversion est perdu
- Le sel combustible n'est pas vidangé
- Le sel intermédiaire est disponible
- Les échangeurs de chaleur sel intermédiaire/sel combustible fonctionnent (nommés IHX)
- Le sel intermédiaire est refroidi par des échangeurs sel/air (nommés SHX). Cet air circule dans un circuit dédié, dans le bâtiment réacteur. Les vannes V1a et V1b sont fermées pour interrompre la circulation vers le circuit de conversion.
- Le circuit d'air du bâtiment réacteur est refroidi par l'air extérieur (échangeurs nommés AHX) après ouverture de la vanne V2. L'air extérieur est considéré à une température relativement élevée (supérieure à 40°C, on souhaite faire une hypothèse conservatrice en cas de conditions météorologiques défavorables, dégradant l'efficacité du puits de chaleur).

Remarque : la figure 3 présente également des échangeurs de chaleur nommés UHX qui servent en cas de vidange. Ils ne seront pas considérés dans le cadre de ce stage.

On cherche à dimensionner un système permettant l'établissement d'une convection naturelle dans tous les circuits.

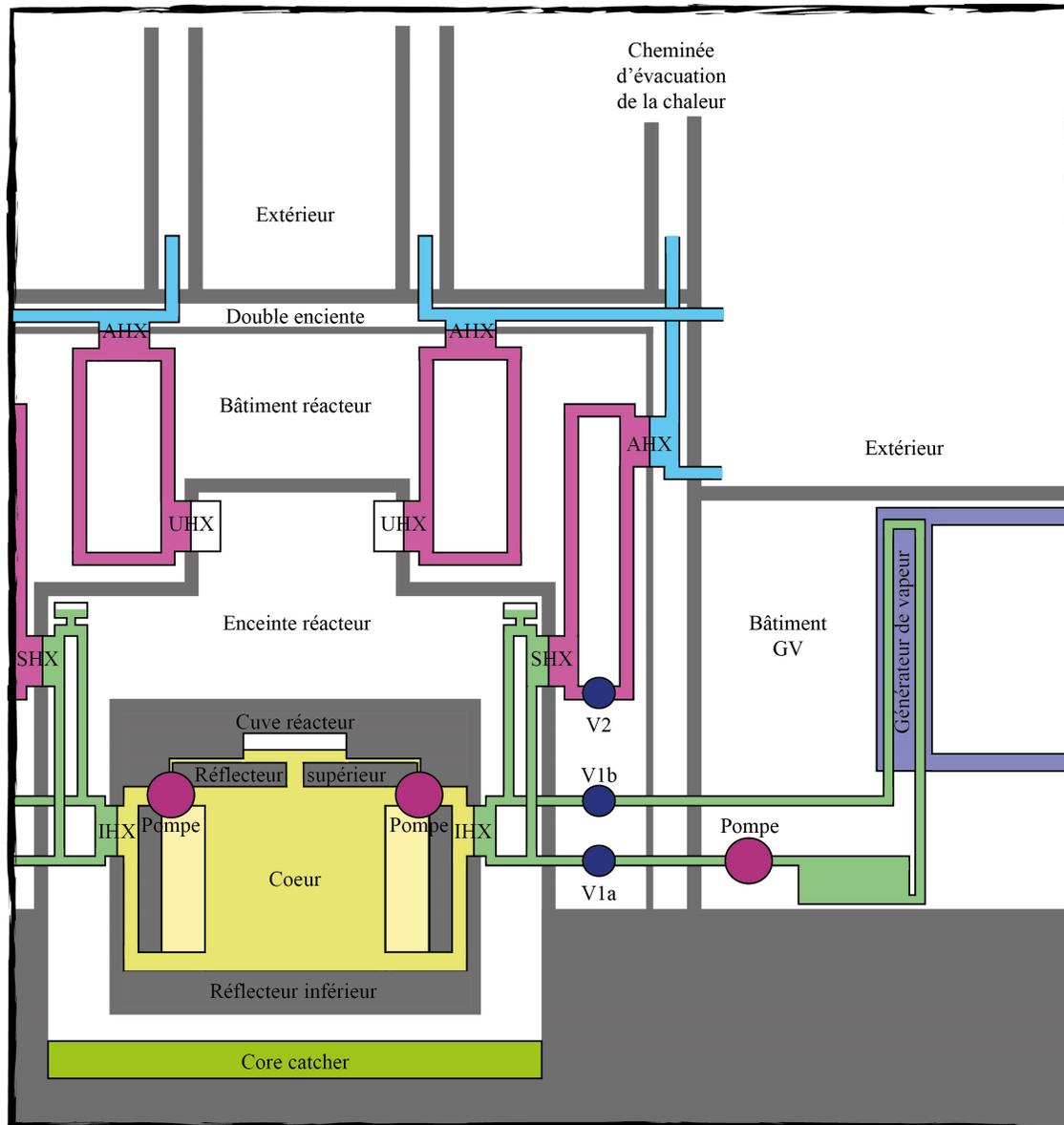


FIGURE 3 – Configuration étudiée du MSFR en convection naturelle

3 Convection naturelle - physiques mises en jeu

Deux phénomènes sont impliqués dans la convection naturelle : les flux de chaleur et les pertes de charge. Le mouvement de convection s'établira pour équilibrer les deux forces résultant de ces phénomènes.

3.1 Flux de chaleur

L'équation quantifiant la chaleur transférée entre deux fluides séparés par une paroi est la suivante.

$$Q = hS\Delta T \quad (1)$$

avec Q la chaleur (W), h le coefficient d'échange thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), S la surface d'échange (m^2) et ΔT la différence de températures entre les deux fluides (K).

h est calculé de la façon suivante :

$$h = \frac{1}{R_f + R_p + R_c} \quad (2)$$

$$R_{f,c} = \frac{1}{h_{f,c}} \quad (3)$$

$$R_p = \frac{\lambda_p}{e_p} \quad (4)$$

$$h_{f,c} = \frac{\text{Nu}(\text{Re}, \text{Pr})\lambda_{f,c}}{D_{h_{f,c}}} \quad (5)$$

avec les indices f et c pour les fluides respectivement froid et chaud, p la paroi, R la résistance thermique (K.m.W^{-1}), λ la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), e_p l'épaisseur de la paroi (m), D_h le diamètre hydraulique (m), Nu, Re et Pr les nombres adimensionnels de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl.

Le nombre de Reynolds est vu comme le rapport des forces d'inerties sur les forces de viscosité du fluide. Il détermine le régime d'écoulement qui peut être laminaire, turbulent, ou en transition quand il présente des caractéristiques de l'un et de l'autre. Il se calcule ainsi :

$$\text{Re} = \frac{\rho D_h v}{\mu} = \frac{D_h v}{\nu} \quad (6)$$

avec ρ la masse volumique (kg.m^{-3}), v la vitesse du fluide (m.s^{-1}), μ la viscosité dynamique du fluide ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) et ν la viscosité cinématique du fluide ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

Le nombre de Prandtl est vu comme le rapport entre la viscosité et la diffusivité du fluide, et est calculé ainsi :

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (7)$$

avec c_p la chaleur spécifique à pression constante (ou capacité calorifique) ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Le calcul du nombre de Nusselt s'effectue à l'aide de corrélations, chacune étant valide dans un domaine spécifique défini par les valeurs de Re et Pr . La figure 4 donne la corrélation utilisée en fonction du domaine.

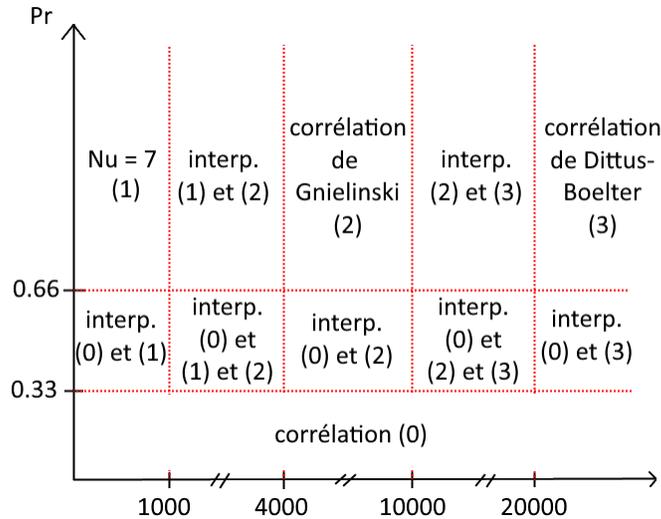


FIGURE 4 – Corrélations utilisées selon les valeurs de Re et Pr

avec la corrélation (0) :

$$\text{Nu} = [(0.00205458 \cdot \text{Pr} + 0.00863736) \cdot \text{Pr} + 0.01602813] \cdot \text{Re}^{(0.057952 \cdot \text{Pr} + 0.843448)} \quad (8)$$

la corrélation de Gnielinski :

$$Nu = \frac{f}{8}(Re - 1000) \frac{Pr}{(1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1))} \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{(0.76 \ln(Re) - 1.64)^2} \quad (10)$$

la corrélation de Dittus et Boelter :

$$Nu = 0.0243 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^a \left(\frac{\mu_s}{\mu} \right)^{a-0.8} \quad (11)$$

avec $a = 0.3$ pour le fluide chaud, $a = 0.4$ pour le fluide froid, μ_s la viscosité dynamique à la surface et μ la viscosité dynamique "loin" de la surface.

Les propriétés physiques des matériaux dépendent de la température. Leurs valeurs sont donc locales et calculées à l'aide de corrélations. Les tableaux 1, 2, et 3 fournissent ces corrélations pour le combustible LiF - ThF4 (78%-22%), le fluoroborate (bon candidat pour le sel intermédiaire en cycle Th-U) et l'hastelloy-N (alliage prévu pour les parois) [5]. Ces corrélations sont celles implémentées dans tous les codes de calcul utilisés pour le MSFR. Les propriétés de l'air sont données dans le tableau 4.

TABLE 1 – Propriétés physiques du combustible LiF - ThF4 (78% - 22%)

Propriété	Valeur / Formule
Masse volumique [kg/m ³]	4983 - 0.882 · T[K]
Capacité calorifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	(-1,111 + 0,00278 · T[K]) · 10 ³
Conductivité thermique [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	0.928 - 8.397 · 10 ⁻⁵ · T[K]
Viscosité dynamique [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	$\rho(T) \cdot 5.55 \cdot 10^{-8} \cdot \exp 3689/T[K]$

TABLE 2 – Propriétés physiques du fluoroborate

Propriété	Valeur / Formule
Masse volumique [kg/m ³]	2446,3 - 0,711 · T[K]
Capacité calorifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1506
Conductivité thermique [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	0,66 - 2,37 · 10 ⁻⁴ · T[K]
Viscosité dynamique [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	8.77 ⁻⁵ · exp 2240/T[K]

TABLE 3 – Propriétés physiques de l'Hastelloy-N

Propriété	Valeur / Formule
Masse volumique [kg/m ³]	8860
Capacité calorifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	480
Conductivité thermique [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	18

Remarque : pour le combustible, on fait l'hypothèse implicite que l'impact des variations de sa composition (dues aux fissions) sur ses propriétés physiques est négligeable.

3.2 Les pertes de charge

Les pertes de charge correspondent à l'énergie mécanique dissipée par frottement du fluide à viscosité non nulle contre les parois des tubes. On distingue les pertes de charge linéaires des singulières, ces dernières

TABLE 4 – Propriétés physiques de l'air

Propriété	Valeur / Formule
Masse volumique [kg/m ³]	1.293
Capacité calorifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	919.48 + 0.222823·T[K]
Conductivité thermique [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	((1.5207 ⁻¹¹ · T[K] - 4.8570 ⁻⁸) · T[K] + 1.0184 ⁻⁴) · T[K] - 3.9333 ⁻⁴
Viscosité dynamique [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	((8.8848 ⁻¹⁵ · T[K] - 3.2398 ⁻¹¹) · T[K] + 6.2657 ⁻⁸) · T[K] + 2.3543 ⁻⁶

étant spécifiques à un changement local de la géométrie des tuyaux. La formule brute des pertes de charge totales dans un système s'écrit ainsi :

$$\text{PdC} = \sum_i \frac{f_i \rho_i v_i^2 l_i}{2D_{h,i}} + \sum_j \frac{\xi_j \rho_j v_j^2}{2} \quad (12)$$

$$f_{\text{lam}} = \frac{64}{Re} \quad (13)$$

$$f_{\text{turb}} = \left[-1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D_h} \right)^{1.11} \right) \right]^{-2} \quad (14)$$

avec ξ le coefficient de perte de charge singulière (adimensionnel), ϵ/D_h la rugosité relative du tuyau, ϵ la hauteur moyenne de rugosité du tuyau (m), f_{lam} et f_{turb} les coefficients de Darcy respectivement en régime laminaire et en régime turbulent.

3.3 La mise en place de la convection naturelle

Le moteur de la convection naturelle est la différence de pression entre deux zones liées à la différence de masses, elle-même due à la différence de températures. Plus simplement, le fluide chaud aura une masse volumique plus faible que le fluide froid. Cette différence de pression appelée pression motrice de convection naturelle ou PMCN dans ce rapport se calcule ainsi :

$$\text{PMCN} = \Delta(\rho gh) = (\rho gh)_f - (\rho gh)_c \quad (15)$$

Un système où la circulation du fluide est basée sur la PMCN est appelé thermosiphon. De la chaleur est fournie en un point et est extraite en un autre, faisant apparaître une PMCN qui met le fluide en mouvement. Ce mouvement s'accompagne de pertes de charge qui s'opposent à la PMCN. Le circuit va constamment chercher un équilibre, correspondant à la vitesse pour laquelle les deux forces se compensent. A partir de cette vitesse on calculera le débit massique.

4 Programmation d'un modèle simple

4.1 Introduction

Le Simulateur Numérique de Circulation de Fluides, ou code SNCF, a été créé pendant ce stage pour plusieurs raisons. La première raison était l'étude de la convection naturelle dans un modèle plus simple que celui de LiCore, notamment du point de vue de la neutronique. La deuxième raison était purement pratique, et permettait une première approche du langage Java pour moi.

Le code est développé par Daniel Heuer avec ma contribution, et a été nommé ainsi en référence à sa manière de gérer le déplacement du fluide. Les particules de fluide sont assimilées à des colis placés dans des wagons. Chaque section du circuit possède un ou plusieurs trains constitués d'un nombre quelconque de wagons. L'idée est de se focaliser uniquement sur les wagons aux extrémités des trains pour les échanges de masse et de chaleur. Ce système permet d'obtenir une bonne précision en évitant la diffusion numérique grâce à un maillage mobile fin, tout en gardant un temps de calcul raisonnable (les wagons ne sont jamais parcourus un à un).

Ce code a aussi été pensé comme un outil de comparaison pour contrôler l'implémentation de la convection naturelle dans LiCore. Il avait été prévu à l'origine de modéliser uniquement deux boucles de circulation (circuit combustible et intermédiaire), et a été progressivement complexifié. Il peut à présent simuler autant de boucles que le veut l'utilisateur ; pour cette étude il est intéressant d'aller jusqu'à quatre (fluide combustible, fluide du circuit intermédiaire, du bâtiment réacteur et air extérieur) pour réaliser une étude phénoménologique globale.

4.2 Implémentation de la physique

4.2.1 Neutronique & Radioactivité

Neutronique :

La zone critique dans un réacteur nucléaire correspond à l'endroit où les conditions sont telles que la réaction en chaîne peut avoir lieu. Dans le cas d'un réacteur à combustible solide immobile, il s'agit du coeur. Pour un combustible liquide circulant, cette zone n'est pas aussi clairement définie car tout le circuit combustible contient des noyaux fissiles. Il s'agira de l'endroit où la température et les conditions géométriques permettent la réaction en chaîne, nommées respectivement température critique et masse critique.

La masse critique correspond à la masse minimale requise de combustible pour maintenir la réaction en chaîne dans la géométrie utilisée.

La température critique est la température pour laquelle le coefficient de multiplication effectif k_{eff} sera égal à 1. k_{eff} peut être défini de la manière suivante :

$$k_{eff} = \frac{n_c}{n_a + n_f} \quad (16)$$

avec n_c le nombre de neutrons créés par unité de temps, n_a le nombre de neutrons absorbés par unité de temps, et n_f le nombre de neutrons de fuite par unité de temps.

En chauffant, le combustible se dilate. Une fraction de ce combustible est chassé dans le volume libre, cette partie du combustible passe d'une zone de haut flux neutronique (zone critique) à une zone de faible flux. Le rapport $\frac{n_a}{n_c}$ est pratiquement constant, mais la zone de haut flux devient plus transparente aux neutrons, ce qui augmente la valeur de n_f et fait ainsi diminuer k_{eff} . Si k_{eff} diminue, le combustible se refroidit et revient à la température critique.

Remarque : l'effet Doppler intervient également : lorsque la température augmente, davantage de neutrons sont capturés par l'élément fertile, ce qui diminue le nombre de neutrons contribuant aux fissions.

Pour rendre compte de ces phénomènes dans le code SNCF, la section "Coeur" de la boucle combustible contient deux attributs : la température critique, et une puissance de fissions. Cette puissance de fission est

ajustée continument de façon à ce que la température moyenne de la section ne soit jamais inférieure à la température critique. On ne considère ici que les neutrons prompts, on ne tient pas compte des neutrons retardés : c'est donc un modèle simplifié par rapport à LiCore (voir section 5.1.2). Cette simplification ne permet pas de modéliser des transitoires rapides, seules les tendances sur des temps longs (plusieurs dizaines de secondes) sont pertinentes.

Radioactivité :

Le combustible est chauffé par les réactions de fission mais aussi par la puissance résiduelle [10]. Pour tenir compte de ce phénomène, on définit une fraction de puissance résiduelle dans le circuit combustible. C'est une fraction de la puissance nominale, on fait l'hypothèse que le réacteur a fonctionné pendant des années à cette puissance avant le transitoire. Elle dépend du temps et est modélisée par l'exponentielle d'un polynôme de degré 10 dont les coefficients proviennent d'un fit de la courbe de la figure 5 obtenue par Mariya Brovchenko durant sa thèse [2].

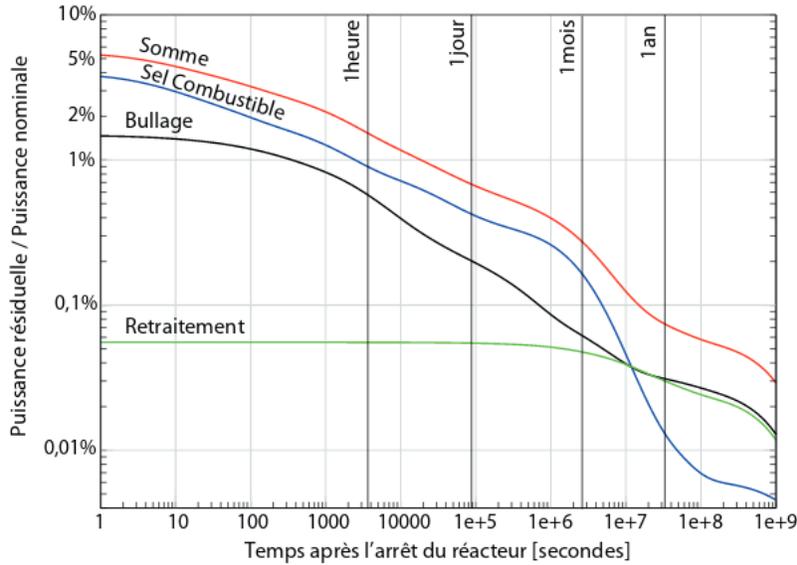


FIGURE 5 – Puissance résiduelle du réacteur MSFR dans le sel combustible (en bleu), l'unité de bullage (en noir) et l'unité de retraitement (en vert), et somme de ces puissances (en rouge) après 100 ans de fonctionnement du réacteur démarré à l' ^{233}U

Le calcul de la fraction de cette puissance dans le code SNCF est montré ci-dessous.

$$\begin{aligned}
 x &= \ln(t) \\
 g &= 1.3319 + (-0.064846 + (-0.029412 + (0.019529 + (-0.012294 + (0.003743 + (-0.00060925 \\
 &\quad + (5.6144 \cdot 10^{-5} + (-2.9206 \cdot 10^{-6} + (7.9383 \cdot 10^{-8} + (-8.692 \cdot 10^{-10})x)x)x)x)x)x)x)x \\
 f_{pres} &= \frac{\exp(g)}{100}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Quelques valeurs de cette fraction sont fournies à titre d'exemple dans le tableau 5.

4.2.2 Thermohydraulique

Cette section détaillera la physique des échanges de chaleur, du transport des fluides et de la dilatation des fluides.

Echanges de chaleur :

Comme vu au paragraphe 3.1, déterminer à un instant t la quantité de chaleur transférée d'une boucle à

TABLE 5 – Valeurs de la fraction de puissance résiduelle pour différents temps

t(s)	$f_{p,res}$
1	3.79 %
10	2.97 %
100	1.96 %
500	1.44 %
1000	1.25 %
10 000	0.71 %
100 000	0.41 %

l'autre nécessite de calculer le coefficient h associé à cet échange. On rappelle la formule de h .

$$h = \frac{1}{R_c + R_p + R_f} \quad (18)$$

$$R_c = \frac{1}{h_c} = \frac{D_{h,c}}{Nu\lambda_c} \quad R_p = \frac{e}{\lambda_p} \quad R_f = \frac{1}{h_f} = \frac{D_{h,f}}{Nu\lambda_f} \quad (19)$$

Les termes λ dépendent des températures locales des fluides et de la paroi. Il n'est pas souhaitable de parcourir les wagons transportant les particules de fluide pour faire des moyennes locales. Aussi il a été décidé de segmenter les échangeurs, la précision obtenue sur les propriétés étant proportionnelle au nombre de segments.

Transport du fluide :

La circulation du fluide dans une boucle nécessite de connaître le débit massique associé. A chaque pas en temps, on calcule le déséquilibre de pressions entre la PMCN, les pertes de charge et la contribution de la pompe mécanique (décroissance exponentielle ici). Ce bilan traduit l'accélération du fluide, qui est intégrée sur le pas de temps pour ajuster la vitesse et donc le débit massique. Les équations de ce processus sont présentées ici.

$$\Delta P = (\rho gh)_f - (\rho gh)_c - PdC + \Delta P_{pompe} \quad (20)$$

$$\Delta P_{pompe} = N_0 \exp\left(\frac{-(t - t_0)}{T}\right) \quad (21)$$

$$a = \frac{\Delta P S}{m} \quad (22)$$

$$v = a \cdot dt \quad (23)$$

$$t_{circ} = \frac{L_{boucle}}{v} \quad (24)$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t_{circ}} \quad (25)$$

$$(26)$$

avec :

- les indices f et c pour les fluides froid et chaud
- N_0 [W] la puissance nominale de la pompe
- t_0 [s] l'instant où on déclenche l'arrêt de la pompe
- T [s] la période de décroissance de la pompe
- a [m.s⁻²] l'accélération globale du fluide
- S [m²] la section moyenne des tuyaux dans la boucle
- m [kg] la masse de fluide circulant, c'est-à-dire la masse totale à laquelle on soustrait la masse de fluide présente dans le volume libre considérée comme immobile dans ce processus
- v [m.s⁻¹] la vitesse moyenne du fluide dans le circuit
- t_{circ} [s] le temps de circulation, soit le temps mis par une particule de fluide pour faire le tour de la boucle

— L_{boucle} [m] la longueur moyenne de la boucle

Remarque : si la vitesse est négative (ce qui peut arriver ponctuellement lorsque le flux de chaleur reçu par le circuit varie brutalement), les pertes de charge ne sont pas soustraites mais ajoutées, elles sont toujours opposées à la circulation du fluide.

Dilatation du fluide :

La dilatation est un phénomène que tous les matériaux expérimentent, qui est le changement de densité en fonction de la température. Les sels fondus ont un fort coefficient négatif de dilatation : leur densité diminue de façon significative avec l'augmentation de la température. C'est particulièrement visible dans les échangeurs de chaleur où l'on trouve un fort gradient de température (potentiellement plus de 100K). Ainsi, une particule de fluide dans une section soumise à des flux de chaleur va se dilater ou se comprimer : son volume effectif le long de la section sera différent de son volume à l'entrée de cette section. Puisqu'on suppose un débit massique global et qu'une section est à volume de fluide constant, il faut calculer le volume effectif de la particule à la sortie de la section.

On peut démontrer (voir annexe) que pour une particule de fluide de masse m , et de chaleur q , il suffit de connaître le flux de chaleur reçu (positif comme négatif) par la section et l'instant d'entrée de la particule pour calculer son volume effectif à la sortie.

Le volume excédentaire, qui peut être négatif (refroidissement), sera envoyé dans la section suivante jusqu'à atteindre un volume libre qui accommodera la variation de volume du fluide.

4.2.3 Paramètres surveillés

Afin de déterminer si une configuration est digne d'intérêt, plusieurs paramètres sont à vérifier. Il s'agit principalement de températures, mais on surveillera également des paramètres neutroniques. Pour finir, des questions de conception seront abordées.

Températures

Le premier paramètre à contrôler sera la température maximale atteinte dans le circuit combustible, située à la sortie de la zone critique. Il s'agit de vérifier que les matériaux seront à même de résister aux contraintes thermiques subies lors des transitoires. La valeur limite considérée sera $T_{max} = 1200^{\circ}\text{C}$. Il s'agit de la température à partir de laquelle les propriétés mécaniques du matériau de structure du circuit, l'Hastelloy-N, ne sont plus suffisantes pour assurer la sûreté du réacteur (voire propriétés de l'alliage, annexe 3).

Une deuxième température à surveiller est la température maximale atteinte dans le circuit intermédiaire (sortie de l'échangeur sel/sel). La valeur limite de référence ici est 800°C [1], température à laquelle le fluoroborate (le sel utilisé) a une pression de vapeur qui devient trop importante (plus d'1 bar).

Toujours dans le circuit intermédiaire, la température minimale atteinte doit être au-dessus de la température de fusion du fluide, soit 657K [5] dans le cas du fluoroborate.

Enfin, pour les simulations avec 4 boucles, on s'assurera que les températures d'entrée (imposée) et de sortie de l'air extérieur sont raisonnables. La température minimale requise en entrée pour assurer la convection naturelle ne doit pas être trop basse (idéalement 40°C , hypothèse conservatrice). La température maximale de sortie n'est pas nécessairement préoccupante mais on peut lui attribuer une limite dépendant de la zone où cet air est rejeté.

Surveiller les températures est également important pour juger de la validité de certaines corrélations. Beaucoup de propriétés physiques (densités, viscosités, conductivités ...) des matériaux dépendent de la température et les corrélations utilisées pour les calculer sont définies dans certains intervalles. Sortir de ces intervalles n'est pas toujours réhibitoire pour la validité de la simulation. Mais il convient d'en tenir compte dans la discussion des résultats.

Remarque : dans tout système hydraulique, les débits sont surveillés. Dans le cas de la convection naturelle, ces débits sont directement liés aux températures.

Criticité

Dans tout transitoire pour un réacteur nucléaire, la criticité doit être surveillée. Comme évoqué au paragraphe 2.4, il peut être très intéressant de conserver une zone critique pour bénéficier de la stabilité apportée par les contre-réactions. Le code SNCF n'a pas de modèle neutronique explicite, aussi le paramètre surveillé sera l'attribut "puissance de fissions" de la zone critique. Une valeur nulle ou anormalement élevée impliquera respectivement un sous-refroidissement ou un surrefroidissement.

Pour l'étude phénoménologique il est également intéressant de voir dans quelle mesure cette puissance de fission évolue en relation avec la puissance résiduelle. La zone critique étant paramétrée pour s'équilibrer à la température critique, une augmentation progressive de la puissance de fission pour compenser la décroissance de la puissance résiduelle est attendue.

Conception

Un premier point concernant la conception est lié aux échangeurs de chaleur. Il s'agira de vérifier si l'échangeur employé est favorable ou non pour l'établissement de la convection naturelle, c'est-à-dire si sa conception interne n'entraîne pas de pertes de charge inhibant la circulation du fluide. Dans le cadre de ce travail, les caractéristiques des échangeurs ont été fournies par le code SONGE. Ce code, écrit en C par Daniel Heuer, est un code d'optimisation multicritères basé sur un algorithme génétique : il a été conçu pour trouver les meilleures caractéristiques d'une situation en fonction de contraintes imposées. Dans ce cas, il s'agit de la géométrie permettant au mieux d'extraire la chaleur, pour un échangeur à plaques lisses.

Un deuxième point vient d'une considération pratique. La configuration en thermosiphon des boucles ne prévoit pas a priori de hauteur maximale d'une colonne (chaude ou froide) pour engendrer la différence de pression utile. Cependant, il n'est pas techniquement réaliste d'envisager une boucle d'une hauteur excédant des dizaines de mètres, sachant que trois de ces boucles sont contenues dans le bâtiment réacteur.

4.3 Résultats

Sont présentés dans cette partie les résultats pour des configurations à deux puis à quatre boucles. Chaque simulation commence par une phase de mise à l'équilibre du système qui dure 100 secondes. A $t = 100s$, les pompes utilisées pour la mise à l'équilibre commencent leur arrêt, leur contribution suit une décroissance exponentielle de période $T = 10s$.

4.3.1 Configuration 2 boucles

La configuration de référence pour les simulations suivantes est renseignée dans le tableau 6.

TABLE 6 – Paramètres de la configuration de référence (2 boucles)

<i>Boucle combustible</i>	
Diamètre coeur	2.25 m
Hauteur coeur	2.25 m
Longueur IHX	0.77 m
Diamètre hydraulique IHX	0.0027 m
Section totale IHX	0.1644 m ²
<i>Boucle intermédiaire</i>	
Hauteur totale	6 m
Longueur SHX	1.5 m
Diamètre hydraulique SHX	0.02624 m
Section totale SHX	1.57 m ²
Température imposée (paroi extérieure) SHX	700 K

Dans ces conditions, les résultats obtenus sont les suivants. Les figures 6a et 6b représentent les températures des éléments des boucles combustible et intermédiaire, les figures 7a et 7b représentent les PMCN et les figures

8a et 8b représentent les vitesses.

Les différents graphes décrivant la situation de référence montrent que le système atteint un premier équilibre, puis les paramètres évoluent brusquement à partir de $t = 100$ s. Le système atteint ensuite un nouvel équilibre. Ce dernier est atteint aux environs de $t = 600$ s, c'est-à-dire en 10 min.

Entre $t = 100$ s et $t = 200$ s, le gradient de température dans le circuit combustible passe de 40K à 180K entre les tubes haut et bas (figure 6a). Celui dans le circuit intermédiaire passe de 25K à 50K (figure 6b). Les PMCN augmentent (en valeur absolue, le signe est arbitraire) (figure 7), alors que les vitesses diminuent (figure 8).

À $t = 200$ s environ, les vitesses se stabilisent, respectivement à 0.05m/s dans la boucle combustible et autour de 0.08m/s dans la boucle intermédiaire. La température moyenne du circuit intermédiaire augmente alors pendant environ 400 secondes. On voit dans le circuit combustible que le gradient de température se réduit légèrement, avec d'abord une légère hausse de la température en sortie d'échangeur (IHXChaud4, à $t = 390$ s) qui se propage pendant environ 190s pour atteindre l'entrée de l'échangeur (IHXChaud0, $t = 580$ s).

À partir de $t = 600$ s, tous les paramètres sont à peu près stables, ils oscillent autour d'une valeur d'équilibre.

Afin de vérifier la physique implémentée, diverses simulations furent menées en faisant varier les valeurs de paramètres clés, ici la hauteur de la colonne chaude dans l'intermédiaire, la température appliquée à la paroi de l'échangeur SHX, et la longueur de cet échangeur. Le circuit combustible n'a pas vocation à être modifié dans le cadre de ce stage, aussi ses paramètres restent inchangés. On utilise comme outil de comparaison les températures maximales des boucles, atteintes respectivement en sortie de coeur (section "TubeHaut") et en sortie de l'échangeur IHX (section "ColonneChaude").

Les figures 9a et 9b présentent les résultats des simulations où la hauteur de la colonne chaude dans le circuit intermédiaire varie de 3m à 15m.

On voit que plus la hauteur de la colonne augmente, plus la température maximale atteinte dans la boucle combustible augmente, et plus la température maximale atteinte dans la boucle intermédiaire diminue.

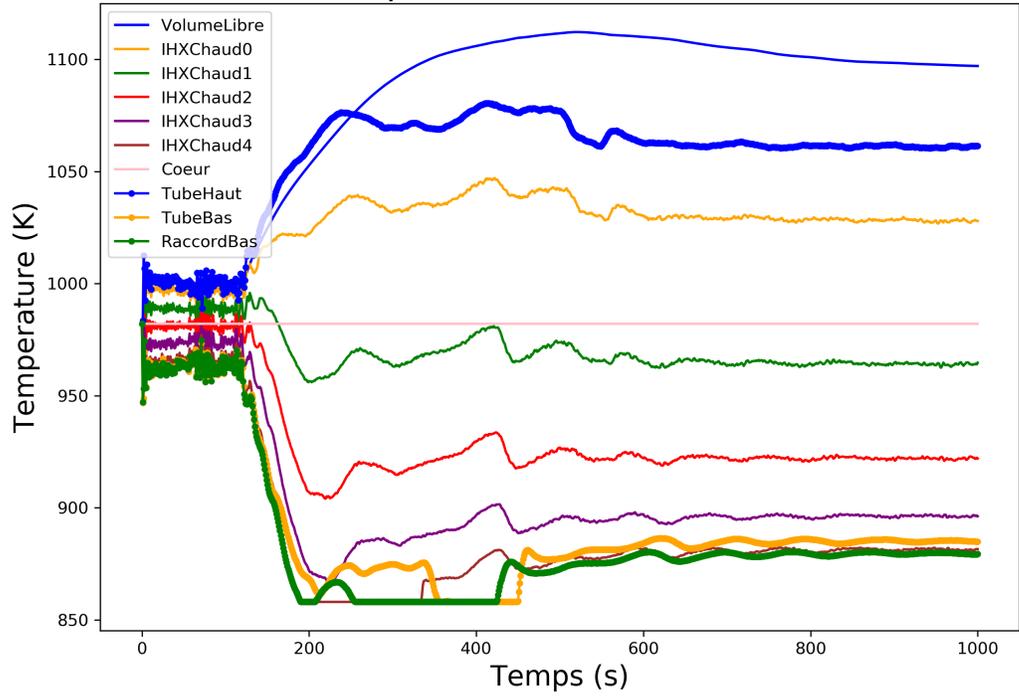
Les figures 10a et 10b présentent les résultats des simulations où la température imposée en paroi dans SHX varie de 600K à 800K.

On voit que plus la température imposée à la paroi augmente, plus la température maximale atteinte dans la boucle combustible diminue, et plus la température maximale atteinte dans la boucle intermédiaire augmente.

Les figures 11a et 11b présentent les résultats des simulations où la longueur de l'échangeur SHX varie de 1m à 3m.

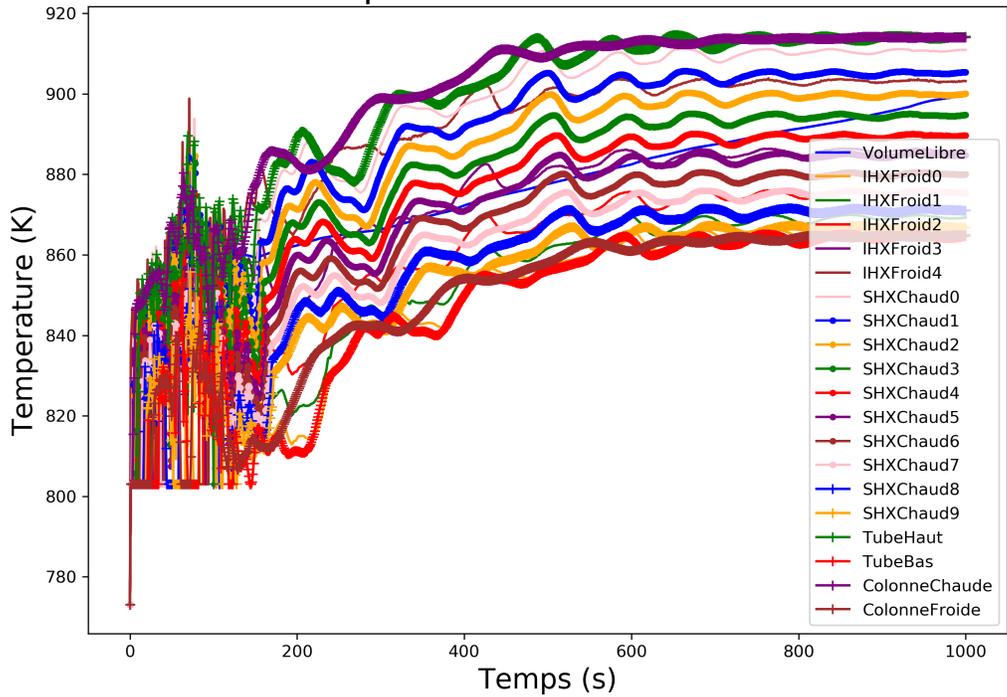
On voit que plus la longueur de SHX augmente, plus la température maximale atteinte dans la boucle combustible augmente, et plus la température maximale atteinte dans la boucle intermédiaire diminue.

Evolution des températures dans le circuit combustible



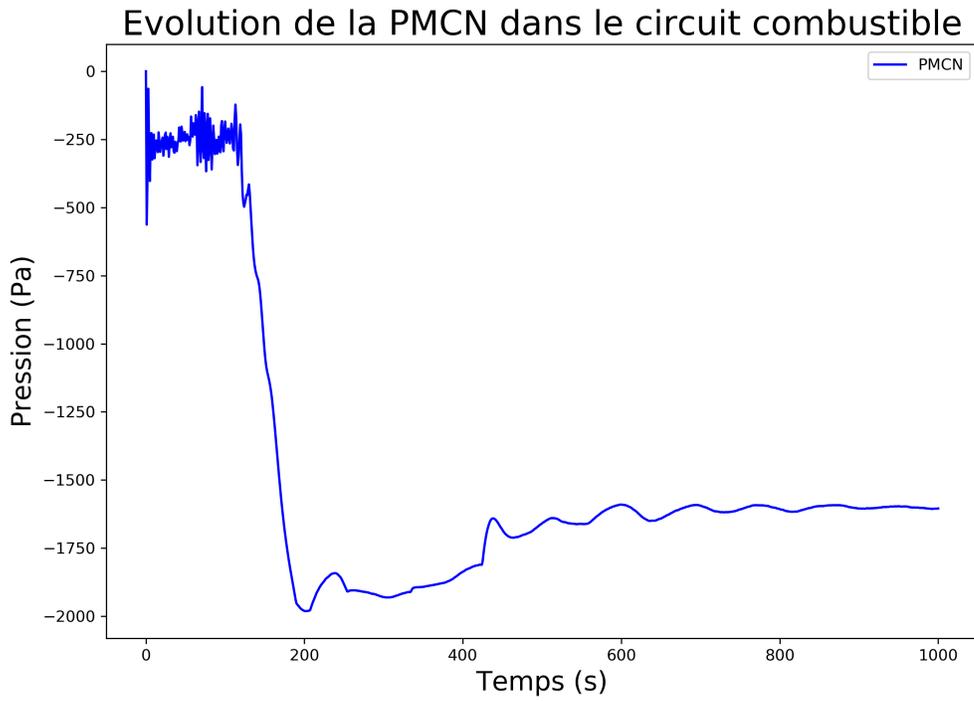
(a) Boucle combustible

Evolution des températures dans le circuit intermédiaire

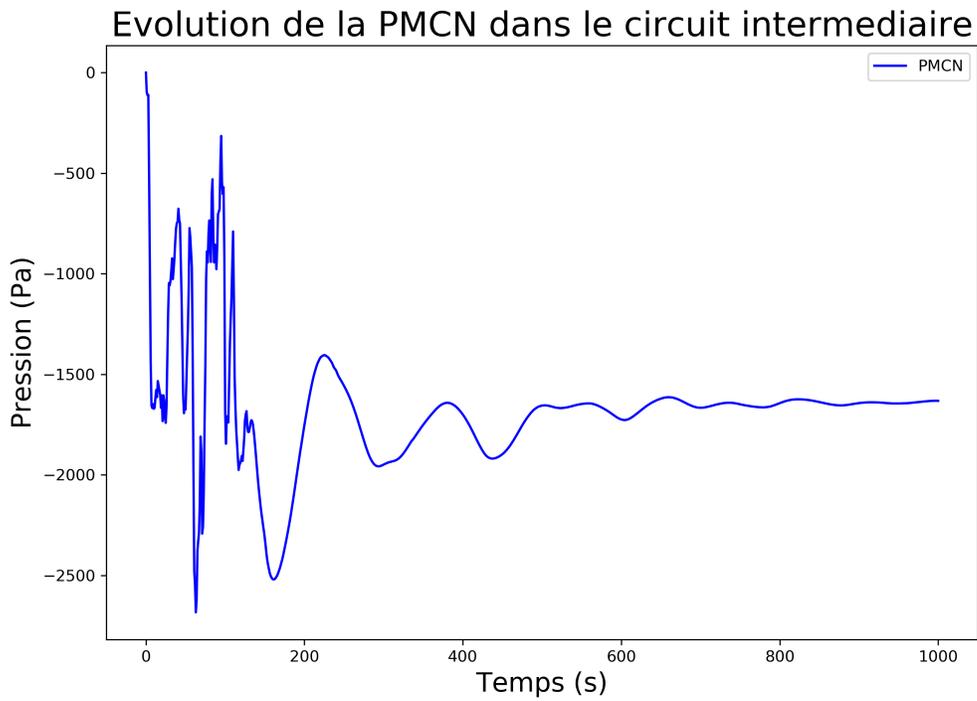


(b) Boucle intermédiaire

FIGURE 6 – Evolution des températures dans les boucles combustibles et intermédiaires



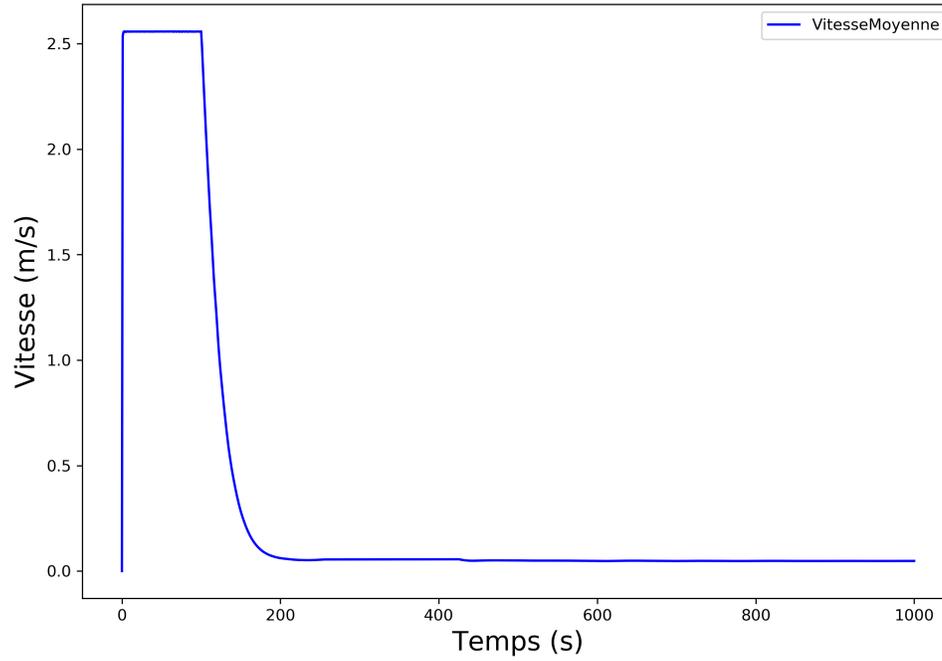
(a) Boucle combustible



(b) Boucle intermédiaire

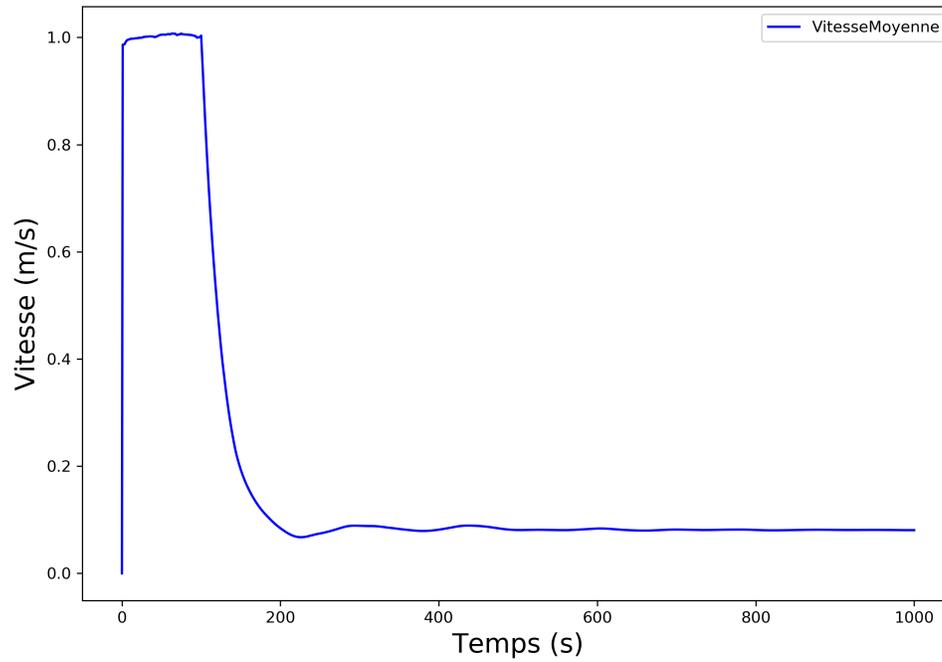
FIGURE 7 – Evolution des PMCN dans les boucles combustibles et intermédiaires

Evolution de la vitesse du fluide dans le circuit combustible



(a) Boucle combustible

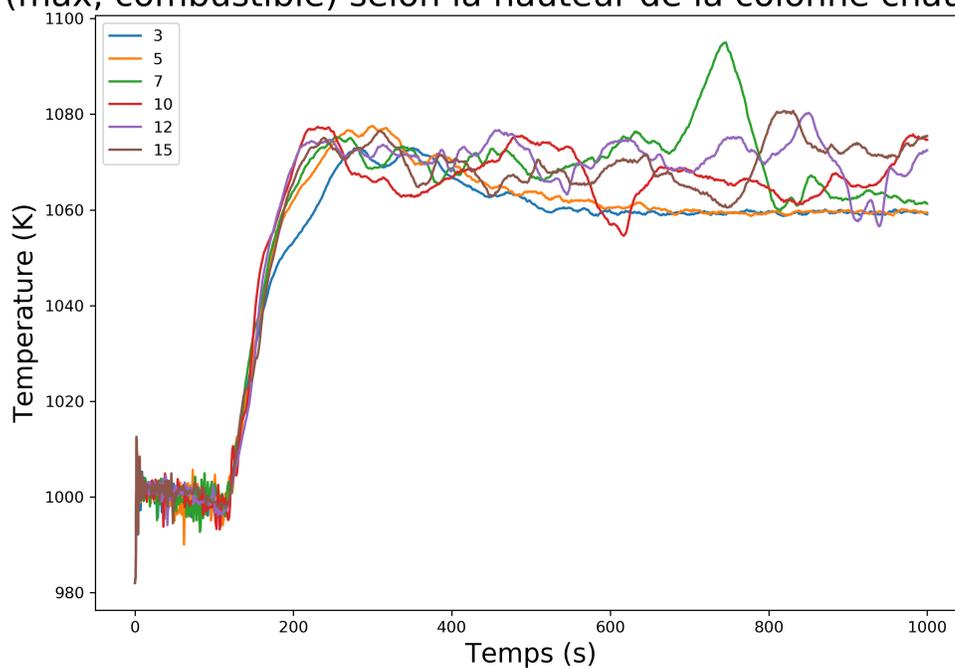
Evolution de la vitesse du fluide dans le circuit intermediaire



(b) Boucle intermédiaire

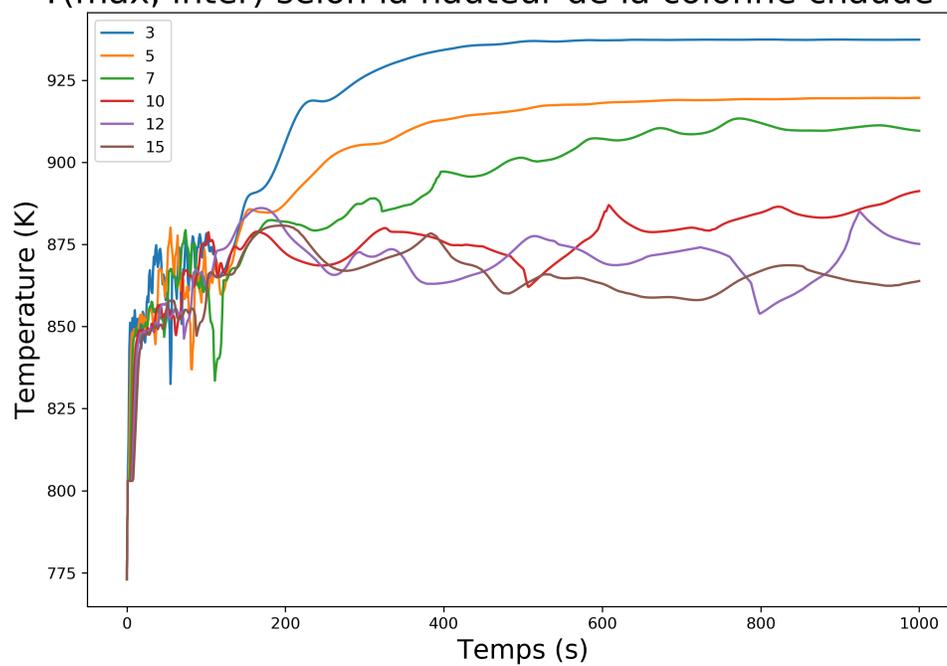
FIGURE 8 – Evolution de la vitesse moyenne du fluide dans les boucles combustibles et intermédiaires

T(max, combustible) selon la hauteur de la colonne chaude (m)



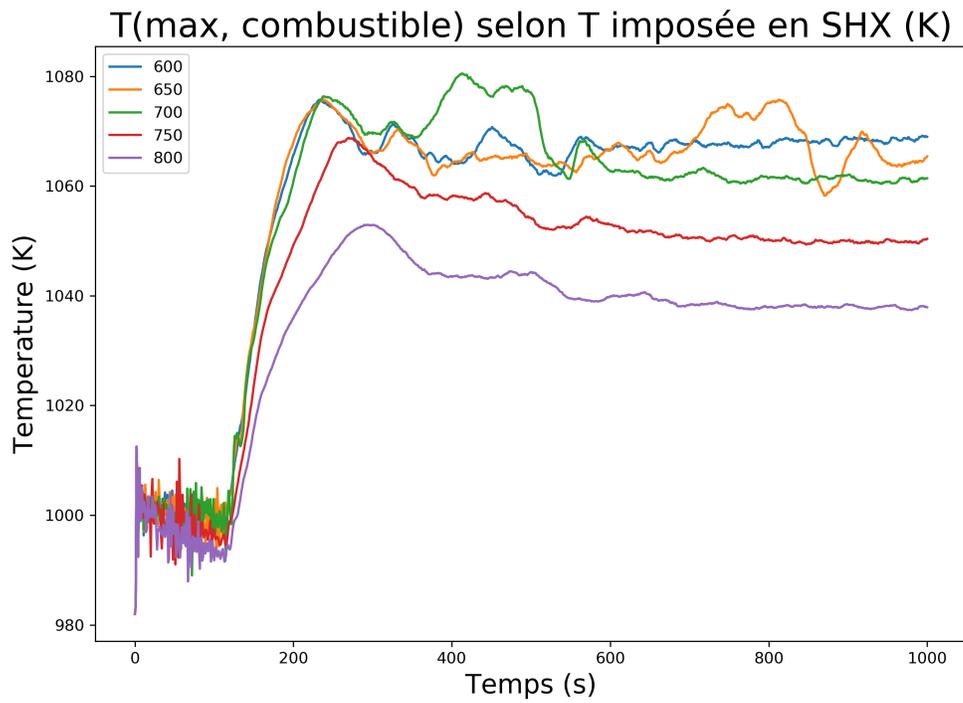
(a) Boucle combustible

T(max, inter) selon la hauteur de la colonne chaude (m)

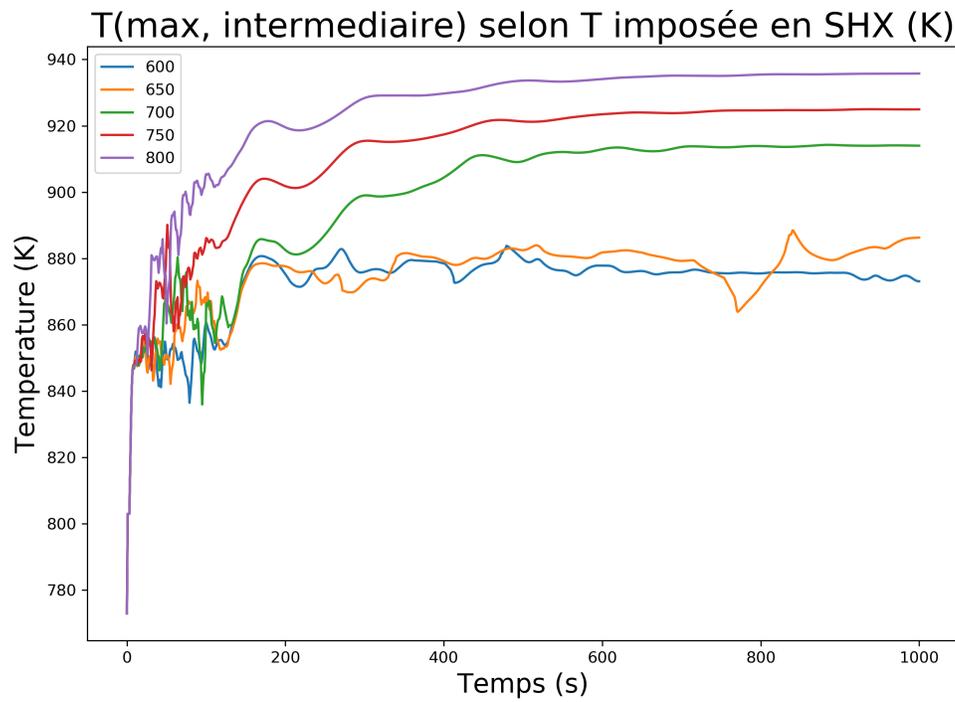


(b) Boucle intermédiaire

FIGURE 9 – Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la hauteur de la colonne chaude de la boucle intermédiaire

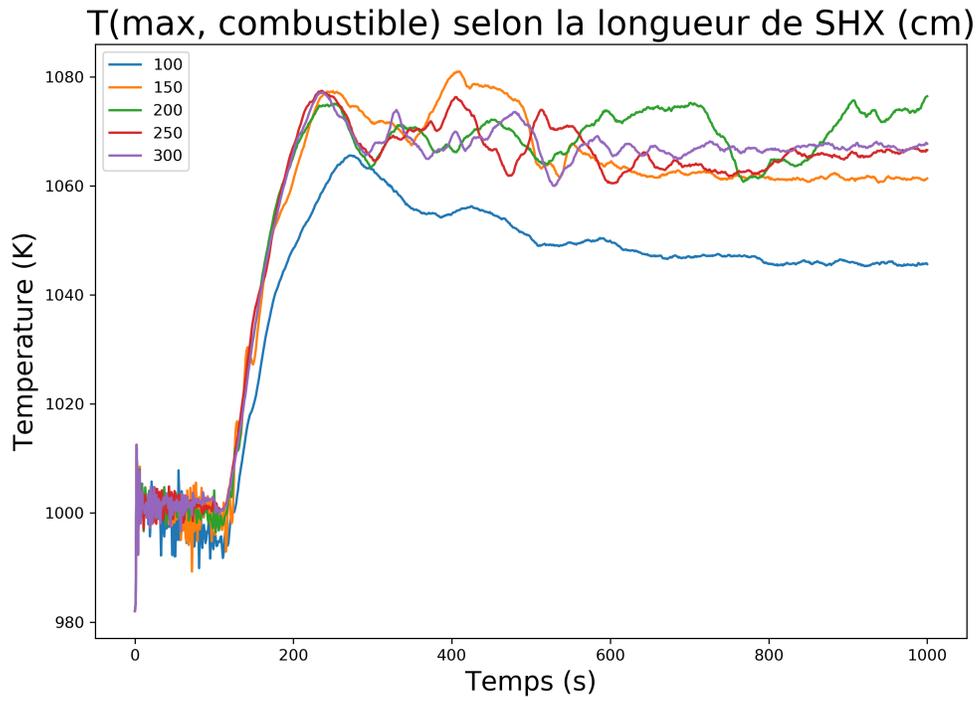


(a) Boucle combustible

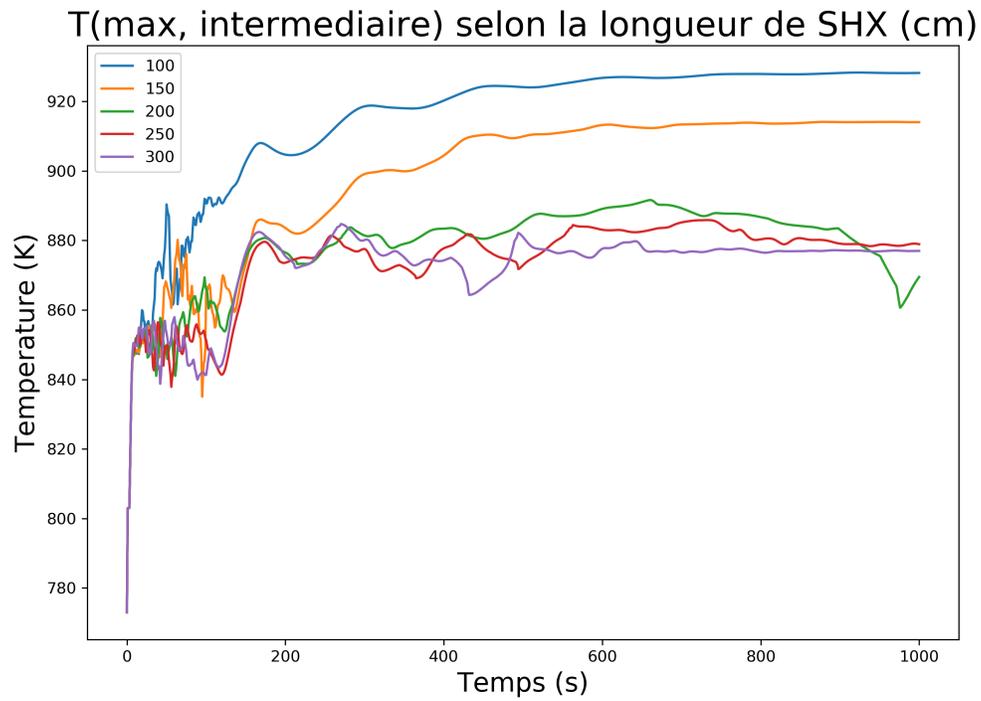


(b) Boucle intermédiaire

FIGURE 10 – Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la température imposée sur la paroi extérieure de SHX



(a) Boucle combustible



(b) Boucle intermédiaire

FIGURE 11 – Températures maximales dans les deux boucles en fonction de la longueur de SHX

4.3.2 Configuration 4 boucles

La situation de référence pour la configuration quatre boucles est renseignée dans le tableau 7.

TABLE 7 – Paramètres de la configuration de référence (4 boucles)

<i>Boucle combustible</i>	
Diamètre coeur	2.25 m
Hauteur coeur	2.25 m
Longueur IHX	0.77 m
Diamètre hydraulique IHX	0.0027 m
Section totale IHX	0.1644 m ²
<i>Boucle intermédiaire</i>	
Hauteur totale	5 m
Longueur SHX	2 m
Diamètre hydraulique SHX	0.02626 m
Section totale SHX	1.571 m ²
<i>Boucle bâtiment réacteur</i>	
Hauteur totale	10 m
Longueur AHX	2 m
Diamètre hydraulique AHX	0.02626 m
Section totale AHX	1.571 m ²
<i>Boucle (ouverte) air extérieur</i>	
Hauteur totale	15 m
Température imposée de l'air admis (entrée colonne froide)	313 K

Les températures obtenues dans les boucles pour cette simulation sont présentées dans les figures 12a, 12b, 12c, 12d.

Remarque : Le temps de simulation a été augmenté à $t = 30\,000$ s pour qu'il n'y ait pas de doute sur le fait que l'équilibre soit atteint.

On observe le même comportement des températures dans toutes les boucles. Lorsque le transitoire débute à $t = 100$ s, les températures augmentent, passent par une valeur maximale aux environs de $t = 4000$ s, puis décroissent jusqu'aux environs de $t = 14\,000$ s pour ensuite se stabiliser jusqu'à la fin de la simulation.

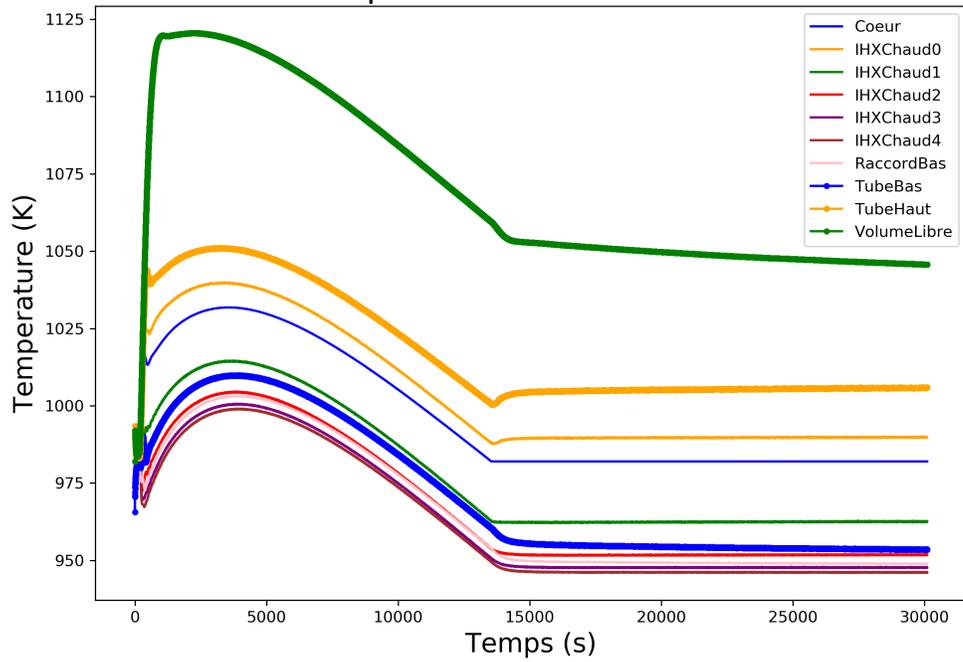
Les températures extrêmes dans le circuit combustible (hors volume libre) sont respectivement 1039K (entrée de l'IHX, $t = 3432$ s) et 946.0K (sortie d'IHX, fin de simulation). Celles du circuit intermédiaire sont respectivement 1003.4K (TubeHaut, $t = 3983$ s) et 944.0K (TubeBas, fin de simulation).

L'air extérieur est rejeté au maximum à 581.2K (308°C) (TubeHaut, $t = 177$ s).

L'évolution de la puissance de fission est fournie figure 13.

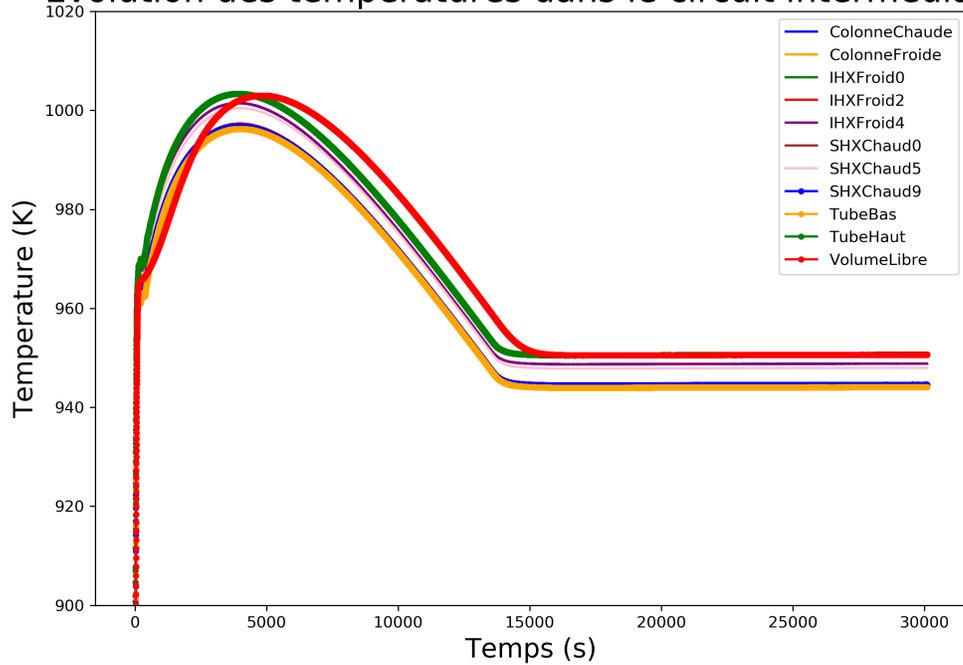
On voit que la puissance de fissions devient nulle peu après le début du transitoire ($t = 180$ s) et reste nulle jusqu'à $t = 13549$ s, instant à partir duquel elle prend des valeurs comprises entre 10^4 W et 10^6 W.

Evolution des températures dans le circuit combustible

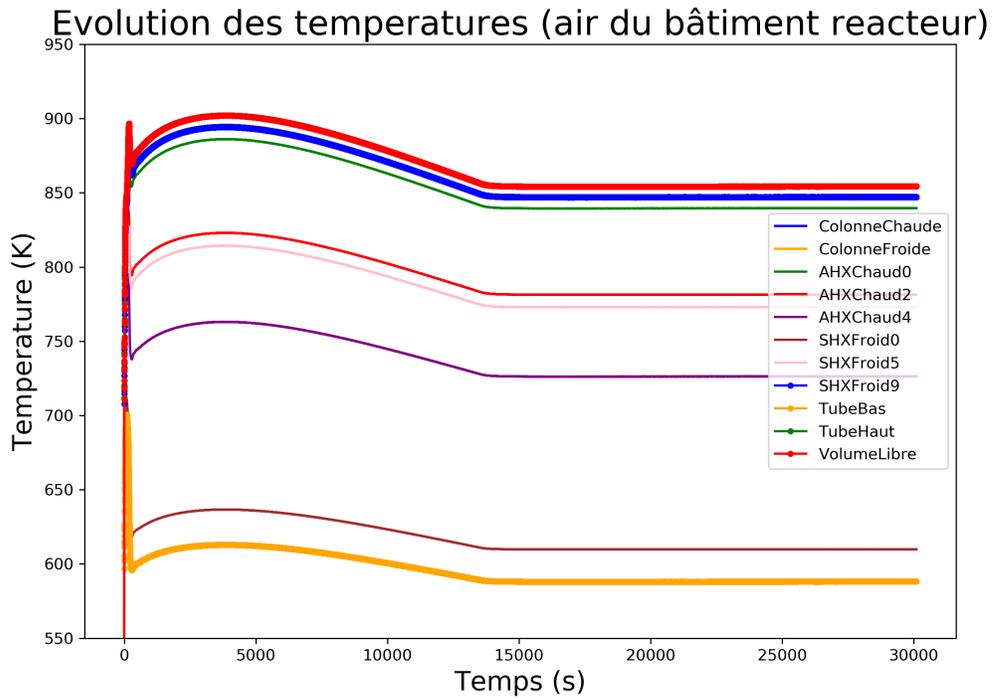


(a) Boucle combustible

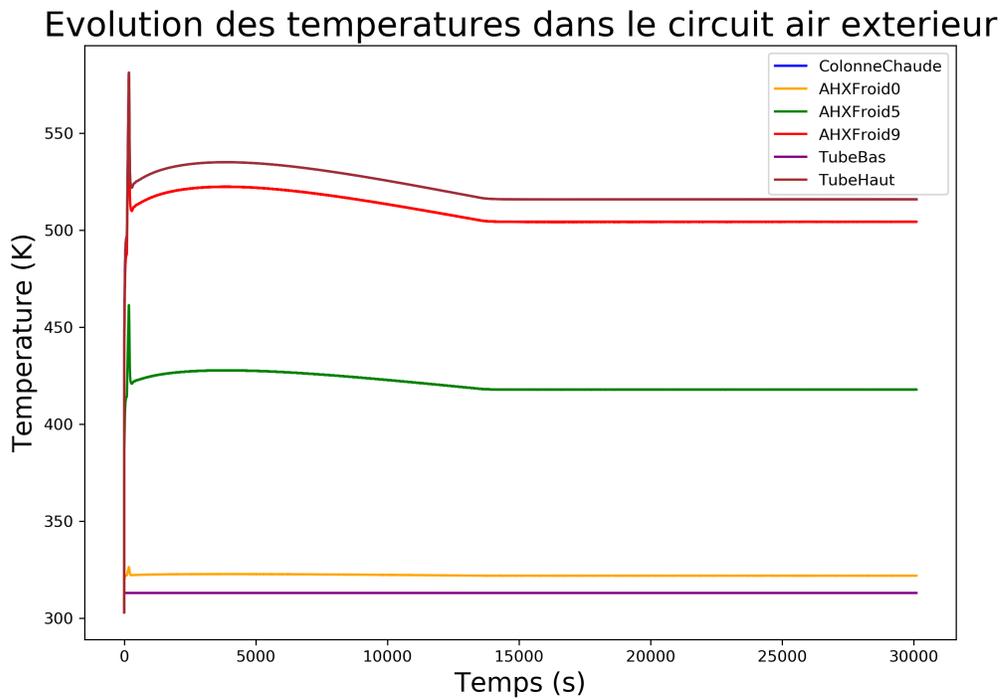
Evolution des températures dans le circuit intermediaire



(b) Boucle intermédiaire



(c) Boucle air réacteur



(d) Boucle air extérieur

FIGURE 12 – Températures dans les 4 boucles (situation de référence)

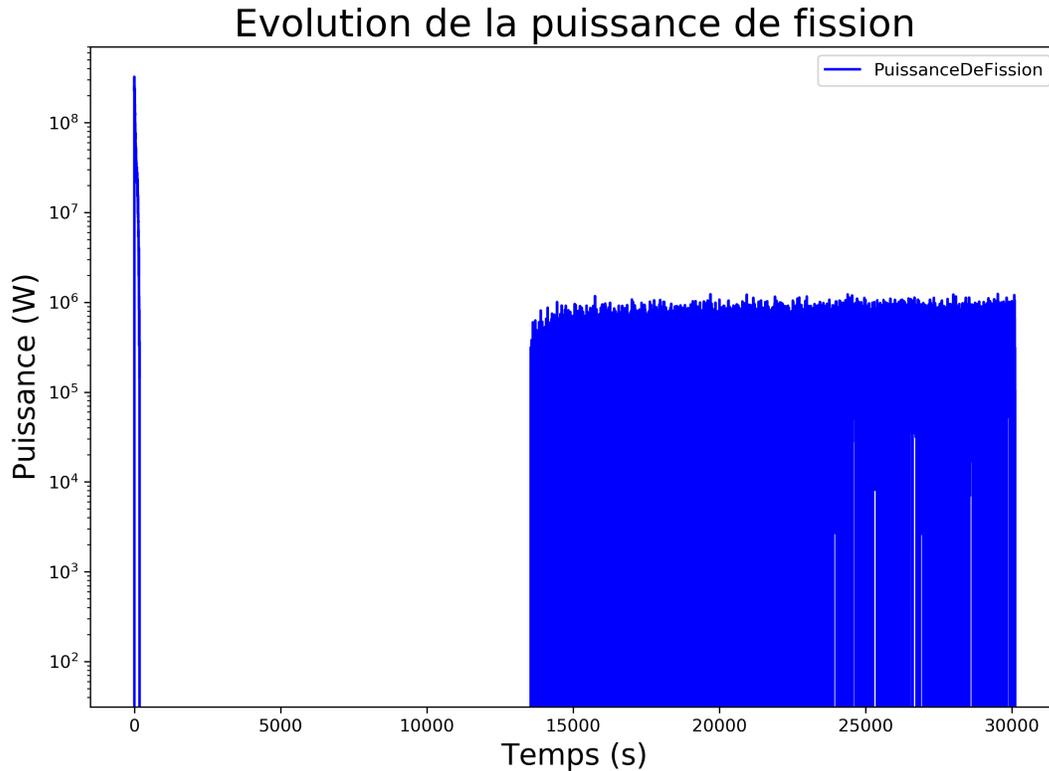


FIGURE 13 – Evolution de la puissance de fission (configuration 4 boucles, référence)

4.4 Discussion

4.4.1 Configuration 2 boucles

La phénoménologie est la suivante.

Les 100 premières secondes servent à la mise à l'équilibre du système.

A $t = 100$ s, les pompes des boucles commencent leur décroissance exponentielle. Lors des 100 secondes suivantes, les vitesses chutent à cause des pertes de charge, les fluides restent de plus en plus longtemps dans les sections, en particulier les échangeurs de chaleur. La température baisse dans le circuit intermédiaire, provoquant un surrefroidissement en entrée de coeur. La température en sortie de coeur augmente car le fluide reste plus longtemps en coeur également (la diminution des fissions (de 70 MW à 10 MW de $t = 100$ s à $t = 200$ s) n'est pas suffisante pour compenser la perte de vitesse). Les gradients de température montent dans les deux circuits.

A $t = 200$ s environ, les pompes peuvent être considérées complètement à l'arrêt. La vitesse se stabilise dans les deux boucles et n'est plus suffisante pour correctement refroidir le circuit intermédiaire qui continue de recevoir de la chaleur du combustible. Sa température augmente donc progressivement.

A $t = 600$ s environ, le système a atteint un nouvel équilibre. Les températures ainsi que les PMCN se stabilisent, elles s'équilibrent avec les pertes de charge.

Les résultats sont conformes aux attentes du point de vue physique. Cette situation de référence répond aux exigences de sûreté formulées précédemment. Le pic de température dans le circuit combustible est

inférieur à la température maximale autorisée (1100K pour 1473K), les températures du fluoroborate restent dans l'intervalle souhaité : $T \in [805; 910] \subset]657; 1073[$.

Il faut cependant garder à l'esprit que cette configuration suppose une température de paroi fixée à 700K pour le SHX. Cette hypothèse n'est pas réaliste sachant que cette paroi sera en réalité refroidie par un autre fluide dont la température sera variable. La configuration sert avant tout à tester la physique implémentée. L'étude est principalement phénoménologique et qualitative, on ne cherche pas ici à précisément quantifier les valeurs, aussi elles ne sont pas accompagnées de leurs incertitudes.

Effet de la hauteur de la colonne chaude :

On peut voir sur les figures 9a et 9b l'importance de la hauteur de la colonne chaude dans la simulation. Plus cette hauteur augmente, plus la PMCN dans le circuit intermédiaire augmente, plus la vitesse augmente. A débit massique plus élevé et à extraction de puissance similaire, le gradient de température requis dans l'échangeur est plus faible. On voit donc que la température maximale de l'intermédiaire est d'autant plus faible que la hauteur est grande.

Par ailleurs, un meilleur débit signifie un meilleur coefficient d'échange, donc la possibilité pour le coeur de s'équilibrer à une puissance supérieure (environ 6MW pour une hauteur de 3m, contre 9 MW pour une hauteur de 15m). On voit donc que la température maximale en coeur est plus grande avec la hauteur de la colonne.

Effet de la température imposée à la paroi :

Plus la température imposée à la paroi est haute, plus la PMCN est dégradée. Augmenter la température a un effet semblable à diminuer la hauteur de la colonne, aussi les conséquences sont phénoménologiquement semblables : la température maximale dans le circuit combustible décroît et la température maximale dans le circuit intermédiaire croît avec l'augmentation de la température imposée à la paroi de SHX (figures 10a et 10b).

Effet de la longueur de SHX :

On voit sur les figures 11a et 11b qu'augmenter la longueur de SHX revient à amplifier le transfert de chaleur. On retrouve les conséquences associées à l'augmentation de la hauteur de la colonne chaude.

4.4.2 Configuration 4 boucles

Le principal résultat de cette simulation est le suivant : l'équilibre trouvé par le système à partir d'environ $t = 14\ 000$ s est corrélé avec la réapparition de la puissance de fissions.

La phénoménologie est la suivante. Lorsque l'on arrête les pompes, on dégrade fortement les échanges de chaleur dans les échangeurs en réduisant considérablement les débits. La convection forcée est remplacée par la convection naturelle qui ne permet pas l'extraction de la même puissance. Par conséquent, les températures augmentent dans tous les circuits.

Cette augmentation de température se traduit dans le combustible par la chute de la puissance de fissions, qui n'est plus nécessaire pour maintenir la température du coeur supérieure ou égale à la température critique, 982K. Il reste toutefois la puissance résiduelle qui continue de chauffer le sel combustible, à un certain pourcentage de la puissance nominale (5).

A $t \simeq 3500$ s, l'extraction de chaleur dans IHX devient supérieure à la puissance générée dans le combustible, les températures commencent donc à décroître.

Enfin, à $t \simeq 13\ 500$ s, la température en coeur atteint 982K (figure 12a). A partir de cet instant, la puissance résiduelle (qui continue de décroître) à elle-seule n'est plus suffisante pour compenser la chaleur extraite dans l'IHX, aussi les fissions réapparaissent (figure 13) : on peut considérer que le coeur redevient critique et trouve une nouvelle puissance d'équilibre.

On peut constater, même si le phénomène est discret, que la puissance de fission croît très légèrement avec le temps, pour compenser la perte de puissance résiduelle.

La température maximale atteinte dans le combustible est largement en dessous de la limite fixée ($1039\text{K} < 1473\text{K}$), et la température du sel intermédiaire ne sort pas de l'intervalle voulu : $T \in [946; 1039] \subset]657; 1073[$. On peut donc conclure que cette configuration respecte les exigences de sûreté (définies au paragraphe 4.2.3), et qu'il est donc possible d'évacuer passivement la chaleur sans recourir à la vidange d'urgence avec cette géométrie et les conditions associées.

5 Implémentation dans LiCore

5.1 Présentation de LiCore

5.1.1 Introduction

LiCore est un code système dédié au réacteur MSFR, il est nommé ainsi en référence au combustible liquide (Liquid Core). Son développement par Axel Laureau a commencé lors de son stage de master au LPSC en 2011 et son édition est toujours en cours à ce jour. Ce code a été créé pour l'étude de transitoires dans un système où la neutronique et la thermohydraulique sont fortement couplées, due à la circulation du combustible hors de la zone critique. Les figures 14 et 15 présentent respectivement son interface ainsi que le rendu de la situation de référence.

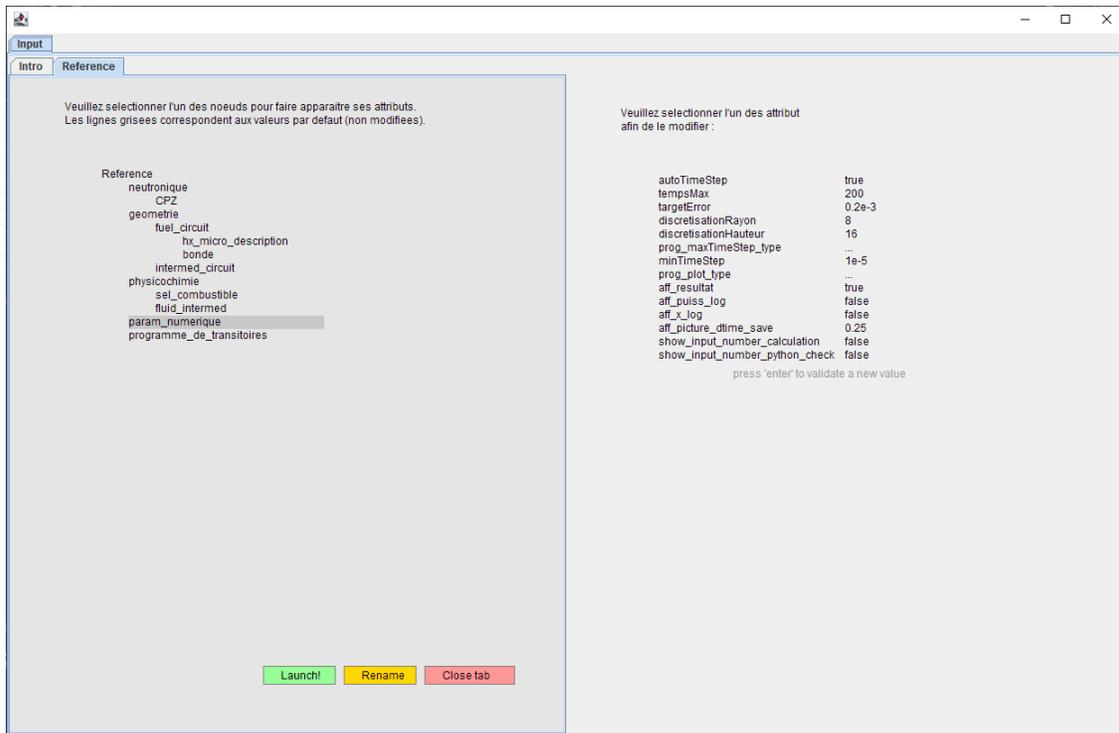


FIGURE 14 – Interface de LiCore

On voit d'abord ici l'étape de configuration, où les paramètres peuvent être ajustés au lancement du programme. Une autre méthode consiste à directement modifier le fichier "input" (détails au paragraphe 5.1.4). Le rendu de la simulation est divisé en deux.

On visualise d'abord trois circuits : le circuit combustible, le circuit intermédiaire, et le circuit de vidange d'urgence. Ils sont adjoints d'une ligne de temps (possibilité de revoir la simulation) et du gradient de températures, ajustable dynamiquement si besoin (hausse ou baisse de températures hors de l'intervalle par défaut). Pour finir, au niveau de l'échangeur de chaleur du circuit combustible, on peut lire la valeur du coefficient d'échange volumique $h_v = \frac{h S_{ech}}{V_{HX}}$ (avec S_{ech} la surface totale d'échange et V_{HX} le volume total de l'échangeur) et enfin, au-dessus du circuit de vidange, l'écart entre la température actuelle et la température limite entraînant la vidange d'urgence (fonte d'un bouchon de sel par exemple).

La deuxième partie comprend six graphes, montrant respectivement l'évolution des températures, des débits des pompes, des précurseurs, de la marge à la criticité prompte, des puissances, et du pas de temps.

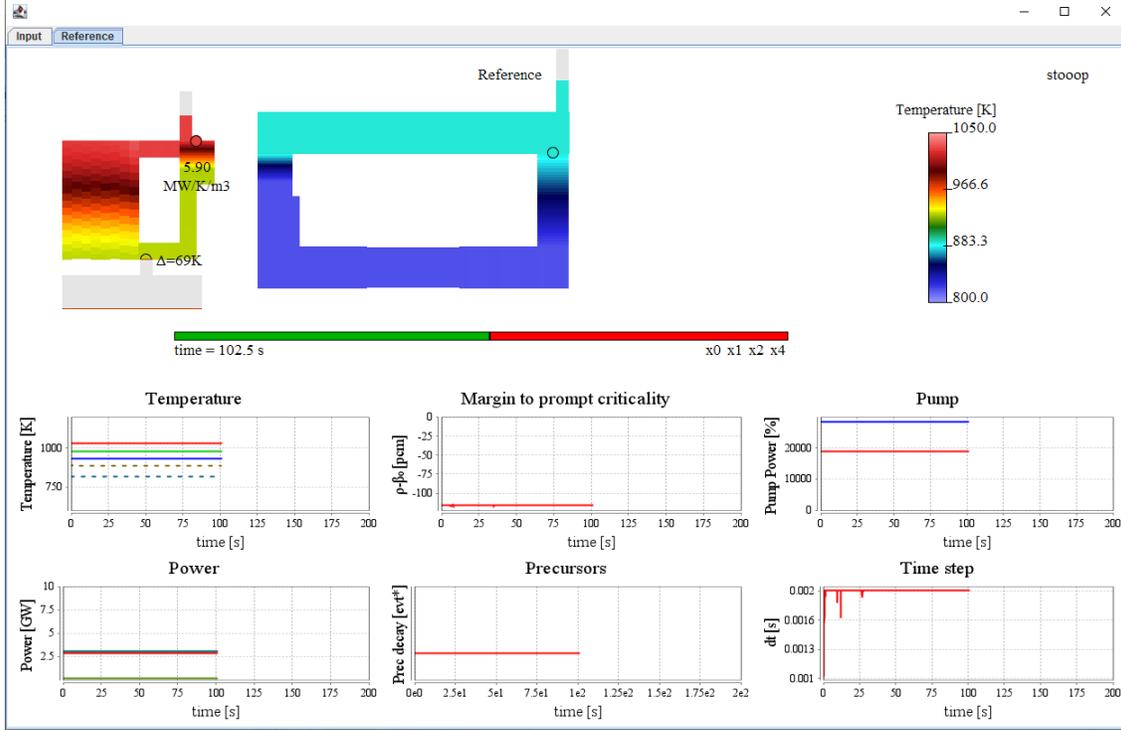


FIGURE 15 – Rendu de la simulation de référence de LiCore

5.1.2 Neutronique

Rappels de neutronique :

Dans un coeur de réacteur nucléaire, la chaleur est produite par la fission de noyaux lourds induite par des neutrons. L'ensemble des neutrons présents en coeur à un instant t est appelé population neutronique et noté $n(t)$.

Un noyau lourd fissionnant donne naissance à au moins deux produits de fission (PF) et à un ou plusieurs neutrons. Ces neutrons directement émis ($t \simeq 10^{-12}$ s) lors de la fission sont appelés neutrons prompts. Les PF présentent souvent un excédent d'énergie et sont donc instables (ou radioactifs, ou dans un état excité), et sont donc amenés à décroître. Une partie de ces PF vont émettre un neutron lors de leur décroissance : ils sont appelés précurseurs, notés p , et les neutrons ainsi produits sont appelés neutrons retardés. Le rapport de neutrons retardés sur le nombre total de neutrons produits est noté β .

Les précurseurs sont classés en familles (p_f) dépendant de leur période (λ_f) qui peut aller d'une fraction de seconde à la minute. Chaque famille apporte sa contribution β_f à la fraction de neutrons retardés totale.

Le rapport moyen de neutrons d'une génération à la suivante, aussi appelé facteur de multiplication, est noté k . La population neutronique est régie par les équations suivantes :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{k(1-\beta) - 1}{l} n(t) + \sum_f \lambda_f p_f(t) \Leftrightarrow \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_f \lambda_f p_f(t) \quad (27)$$

$$\frac{dp_f(t)}{dt} = \frac{k\beta_f}{l} n(t) - \lambda_f p_f(t) \Leftrightarrow \frac{dp_f(t)}{dt} = \frac{\beta_f}{\Lambda} n(t) - \lambda_f p_f(t) \quad (28)$$

avec l la durée de vie moyenne d'un neutron, $\rho = \frac{k-1}{k}$ la réactivité et $\Lambda = l/k$ le temps de génération.

Lorsque que k vaut 1 (qui équivaut à $\rho = 0$), la réaction en chaîne se maintient et on dit que le réacteur est critique. Pour $k < 1$ on parle de sous-criticité, et de surcriticité pour $k > 1$.

La deuxième formulation des équations (27) fait apparaître le terme $\rho - \beta$ appelé marge à la criticité prompte. Si cette valeur est supérieure ou égale à 0, la réaction en chaîne ne nécessite plus de neutrons retardés pour s'auto-entretenir et la population neutronique croît exponentiellement, on parle de surcriticité prompte.

Les neutrons retardés sont émis avec une énergie moyenne plus faible que les neutrons prompts (400 keV contre 2 MeV en moyenne en REP). Sachant que la probabilité de fission dépend de l'énergie du neutron incident, un neutron prompt et un neutron retardé ne sont pas équivalents. Pour tenir compte de ce fait, les termes β et Λ sont corrigés dans les équations par leur valeur effective, respectivement β_{eff} et Λ_{eff} .

Modèle implémenté dans LiCore :

Le modèle neutronique implémenté dans LiCore est appelé CPZ pour Cinétique Point par Zone. Cette méthode est amplement détaillée dans la thèse d'Axel Laureau [7]. La Cinétique Point est un modèle simple de la neutronique où l'on sépare les dépendances spatiale et temporelle du flux angulaire (équation (29)).

$$\psi(r, E, \Omega, t) = \hat{\psi}(r, E, \Omega)n(t) \quad (29)$$

avec $\psi(r, E, \Omega, t)$ le flux angulaire, $\hat{\psi}(r, E, \Omega)$ la distribution spatiale normalisée et $n(t)$ la population de neutrons. La forme de la composante spatiale est un produit d'une fonction de Bessel (contribution radiale) et d'un cosinus (contribution axiale).

La CPZ est une amélioration impliquant le suivi spatial des précurseurs de neutrons retardés dans le circuit combustible, incluant les zones non-critiques. Cela permet d'attribuer aux neutrons retardés un poids statistique w_f lié à leur zone d'émission : un neutron créé dans l'échangeur de chaleur ne contribuera pas à la réaction en chaîne, par conséquent son poids sera faible voire nul. Les équations de la population neutronique de la CPZ par rapport à la cinétique point sont donc :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda_{eff}}n(t) + \sum_f \int w_f \lambda_f P_f(r, t) dr \quad (30)$$

$$\frac{dP_f(r, t)}{dt} = \frac{\beta_f}{\Lambda_{eff}}n(t)\hat{\phi}(r) - \lambda_f P_f(r, t) \quad (31)$$

$$w_f = \frac{\int \phi^*(E, r)\chi_{d_f}(E)\lambda_f\widehat{P}_f(r, t)dr dE}{\int \phi^*(E, r)\chi(E)\nu\widehat{\Sigma}_f\phi(r)dr dE} \quad (32)$$

avec

- $\phi^*(E, r)$ le flux adjoint approximé par le flux direct
- $P_f(r, t)$ la distribution spatiale des précurseurs de la famille f
- $\chi(E)$ le spectre d'émission des neutrons prompts
- $\chi_{d_f}(E)$ le spectre d'émission des neutrons retardés (d pour delayed). Dans LiCore les différences entre ce spectre et le précédent sont négligées
- $\lambda_f P_f(r, t)$ la distribution normalisée des décroissances de précurseurs
- $\nu\widehat{\Sigma}_f\phi(r)$ la distribution normalisée d'émission des neutrons prompts.

Il est à noter qu'ici, à l'équilibre, ρ est non-nulle mais est égale à la fraction de neutrons retardés perdus hors de la zone critique.

LiCore utilise huit familles de précurseurs. La demi-vie et la fraction de neutrons représentés sont données dans le tableau 8.

TABLE 8 – Demi-vie et fraction de neutrons retardés pour chaque famille de précurseur intégrée dans LiCore

Famille	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{1/2}$	55.9	24.5	16.3	5.2	2.4	1	0.4	0.2
β_f	0.0789	0.1544	0.1337	0.2066	0.3099	0.0399	0.06312	0.0131

5.1.3 Thermohydraulique

Chaque circuit est divisé en sections (tuyau, échangeur de chaleur, ...). Ces sections contiennent des cellules transportant le fluide. Une cellule contient les paramètres physiques locaux du fluide (température, masse) et est générée à l'entrée d'une section. Elle se remplit jusqu'à atteindre une certaine taille, avant de se détacher pour laisser place à une nouvelle cellule. Leur déplacement est modélisé par un mouvement piston unidimensionnel, et le débit massique global est contrôlé par une pompe.

Cette pompe est également l'élément faisant la liaison entre la fin du circuit et son début (classiquement respectivement un volume libre et un échangeur de chaleur). De part sa géométrie et ses symétries, le MSFR peut être divisé en 16 parties équivalentes comprenant une portion du cœur et une boucle de recirculation, c'est ce qui est affiché dans le rendu. Cependant, les valeurs générales comme la puissance produite par le cœur représentent le réacteur dans son ensemble. L'astuce numérique consiste à "cacher" l'entièreté de la structure dans l'attribut "profondeur" des sections, profondeur qui est donc 16 fois plus importante relativement aux autres dimensions. Ce point est important car le calcul des pertes de charge suppose des sections indépendantes, sa valeur est inversement proportionnelle au diamètre hydraulique (involontairement multiplié par 16) et devra être corrigée au besoin.

En ce qui concerne les propriétés physiques des matériaux utilisés, celles-ci sont fournies dans le fichier d'input et proviennent de diverses sources. Les valeurs peuvent être trouvées dans la thèse d'Axel Laureau [7]. Certaines propriétés comme les densités sont calculées avec des corrélations provenant d'expériences et sont résolues au besoin pendant l'exécution du code.

Pour finir, certains phénomènes physiques ne sont pas implémentés. Cela inclut la physique liée à la convection naturelle qui fait l'objet de ce stage.

5.1.4 Configuration

Les simulations dans LiCore sont configurées à partir d'un fichier input dont un aperçu est présenté figure 16.

```
neutronique
extension_J0          0.05
extension_h0          0.05
CPZ
  beta_0              300e-5
  tab_beta_i          0.078851976925349773 0.15441630296845646 0.13
  tab_lambda_i        1.24667E-02          2.82917E-02          4.25
  beta_resi_0          0.055
  tab_beta_resi_i     1.60820397668 2.46004313526 1.98447836101 2.1
  tab_lambda_resi_i   0.306640829751 0.0314716691896 0.003511024307
  generation_time     1040e-9
  dKp_dT              -8e-5
  Tref_dKp_dT         973

geometrie
with_inter            true
pandora               false
with_CN               false
fuel_circuit
  hauteur              1.9
  rayon                (9/1.9/pi)**0.5
  hauteur_pipe         (pi*0.15**2)**0.5
  profondeur_pipe      (pi*0.15**2)**0.5*16
  long_pipe            0.65
  rayonDebutHx         (9/1.9/pi)**0.5+0.65-2*(pi*0.15**2)**0.5
  rayonFinHx           (9/1.9/pi)**0.5+0.65-2*(pi*0.15**2)**0.5+0.4
  h_hx                 0.69
  profondeurHx         1.*16
  larg_hx              (18-(2.104+0.735+9))/0.69/16
```

FIGURE 16 – Aperçu du fichier de configuration de LiCore

Ce fichier contient plusieurs types de données correspondant à :

- la neutronique : il s'agit ici de la forme du flux et des données pour la CPZ (données sur les précurseurs entre autres) ;

- la géométrie : cela inclut des booléens indiquant la nécessité ou non de simuler un circuit (le circuit combustible étant tout le temps représenté), en plus des paramètres de dimensionnement des sections ;
- les propriétés des matériaux : les valeurs utilisées pour le calcul des densités, des capacités calorifiques etc sont indiquées ici ;
- les paramètres numériques : cette catégorie regroupe les informations comme la finesse du pas de temps pour le calcul ou la taille des cellules de fluide ;
- le programme de transitoire : comme évoqué dans l'introduction, LiCore a été créé pour simuler des transitoires, on indique ici les caractéristiques du transitoire voulu comme une chute de réactivité ou une baisse du débit des pompes.

Un point intéressant dans le cadre de ce stage est que le nombre d'entrées dans ce fichier n'est pas fixe. Il est donc possible d'ajouter des informations pertinentes liées à la convection naturelle par exemple, à condition de respecter un certain format, notamment les indentations (sans quoi l'exécution du code est avortée).

5.2 Implémentation de la convection naturelle

L'ajout de cette physique passe par l'édition du code à plusieurs niveaux, détaillés ici.

5.2.1 Géométrie

La convection naturelle est favorisée par la différence de hauteur entre la source froide et la source chaude. Or dans le circuit intermédiaire de référence de LiCore, les échangeurs intermédiaire et de conversion sont à la même hauteur, il est donc extrêmement difficile pour la convection naturelle de s'établir (besoin d'un très fort gradient de température). Par conséquent il est nécessaire de penser le circuit dans lequel on souhaite que cette circulation passive soit possible. Après discussions, il a été décidé d'ajouter au circuit intermédiaire une sorte d'extension, une boucle dans laquelle on forcerait une fraction du fluide à circuler en permanence. En cas de perte du circuit de conversion, des vannes seraient alors fermées pour que le sel intermédiaire ne circule que dans cette boucle. Le résultat est représenté figure 17.

La circulation forcée par la géométrie est modélisée par une pompe, qui comme les autres sert également à fermer le circuit en connectant le volume libre de la boucle supplémentaire à l'échangeur de chaleur sel/air. Cette pompe sera ensuite remplacée par une pompe modélisant la convection naturelle, et dont la méthode de calcul est décrite au paragraphe suivant.

Enfin, un nouveau type d'échangeur de chaleur a été implémenté pour que les simulations sous LiCore et SNCF soient plus aisément comparables. SNCF utilise des échangeurs de chaleur à plaques lisses, les caractéristiques de l'échangeur sel/sel étant obtenues par le code de calcul SONGE.

5.2.2 Physique

La méthode pour résoudre le système en convection naturelle est donnée figure 18.

Premièrement, il s'agit de déterminer la PMCN, qui est pour rappel la différence de pression engendrée par la différence de masse volumique dans les colonnes chaude et froide de la boucle, résultant de la différence de température. Pour cela, il faut ajouter dans la classe Section une méthode calculant sa contribution à la PMCN, et sommer la contribution de toutes les sections. La convention choisie ici est de compter positivement la zone froide et négativement la zone chaude. Selon le niveau de précision souhaité, on peut faire le calcul en utilisant la température moyenne de la section, ou bien sommer la contribution de chaque cellule de fluide à laquelle est attribuée une température propre. Le temps de calcul restant raisonnable avec cette dernière méthode, elle fut adoptée. En vue d'optimiser le temps de calcul, il aurait été possible d'utiliser les températures moyennes pour les tuyaux simples, et de discrétiser le calcul dans les échangeurs de chaleur.

Deuxièmement, il faut calculer les pertes de charge. La contribution majeure à ces pertes vient des échangeurs de chaleur, on leur définit donc une méthode pour les résoudre. On calcule également les pertes de charge dans le reste du circuit, mais dans le cas de la convection naturelle, elles sont négligeables (0.1% du total).

Un point important à vérifier ici est le sens de circulation du fluide. Il peut arriver, en particulier dans les

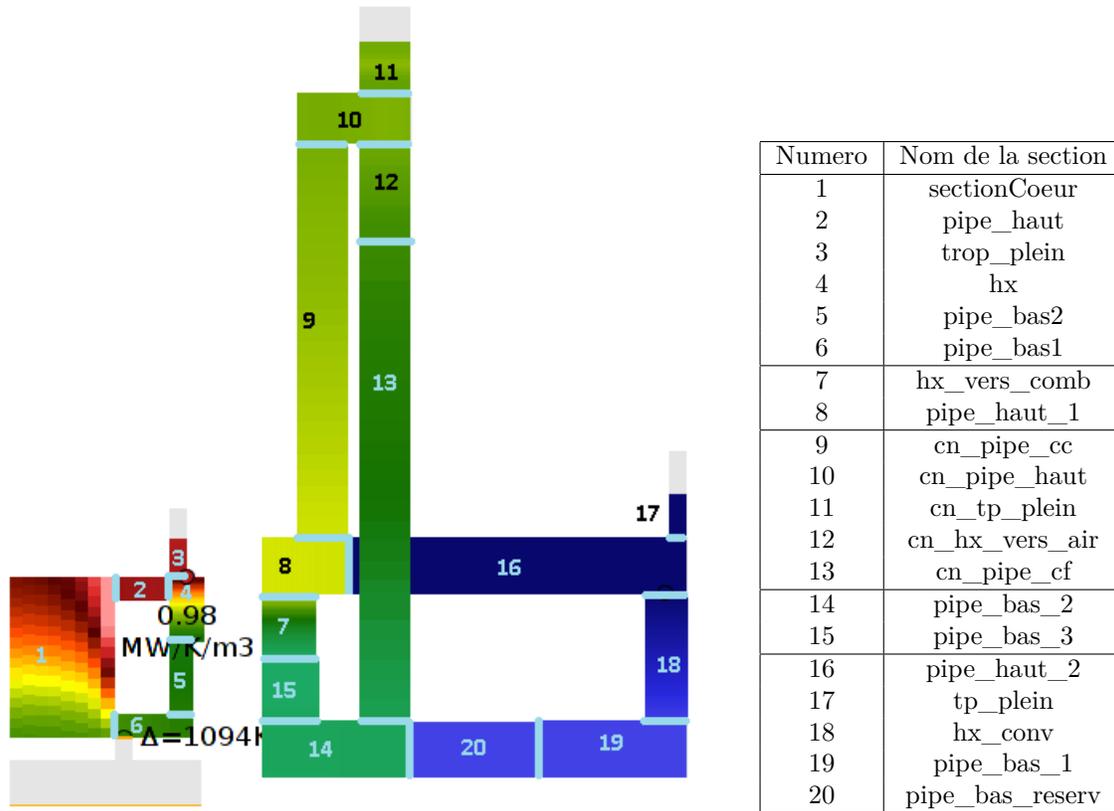


FIGURE 17 – Nouvelle géométrie de LiCore

```

double desequilibrePression = 0;

double pmcn = this.circuit.calculPMCN();
double pdc = this.circuit.calculPDC(this.dernierDebit);

if(this.derniereVitesse <0) desequilibrePression = pmcn + pdc;
else desequilibrePression = pmcn - pdc;

double puissancePompe = this.puissanceLastPompe*Math.exp(-(t - tTransition)/tempsDecroissanceLastPompe);
double contributionPompe = puissancePompe*this.sec_inlet.get_last_cell().getDensite()/this.dernierDebit;

if(contributionPompe < 0.1) contributionPompe = 0;
desequilibrePression += contributionPompe;

double acceleration = desequilibrePression*this.circuit.getSectionMoyenneCN()/this.circuit.getMasseCirculante();
this.derniereVitesse += acceleration*dt;
this.circuit.lastSpeed = this.derniereVitesse;

double tempsDeCirculation = this.circuit.getLongueurCN()/this.derniereVitesse;
double masseCirculante = this.circuit.getMasseCirculante();
this.dernierDebit = masseCirculante/tempsDeCirculation;

```

FIGURE 18 – Code source de LiCore résolvant le débit massique en convection naturelle

échangeurs de chaleur où le gradient de température peut très vite grandir, que le fluide circule ponctuellement dans le sens contraire au cas de référence. Dans ce cas, les pertes de charge doivent être ajoutées et non soustraites car elles sont toujours opposées à la circulation.

Dernièrement, on calcule la contribution de la pompe mécanique en train de s'arrêter. Pour être précis, la

situation modélisée dans LiCore suppose la fermeture de vannes séparant cette pompe du reste du circuit, mais on la garde pour deux raisons : la fermeture des vannes ne sera pas instantanée en situation réelle, et cet ajout permet de simuler une certaine inertie du fluide. Suivant le scénario envisagé, le calcul de cette contribution varie, mais pour le cas de référence, on choisit une décroissance exponentielle de cette contribution d'une période de 10 secondes.

5.2.3 Numérique

En ce qui concerne les paramètres numériques, l'édition a lieu dans le fichier input, selon les besoins. Outre l'ajout des paramètres géométriques, d'autres paramètres peuvent être ajustés. Le processus de calcul lié à la convection naturelle peut être chronophage. Une façon d'améliorer l'implémentation est de définir un pas de temps pertinent pour la re-détermination de la PMCN et des pertes de charge. LiCore possède une méthode pour ajuster le pas de temps dynamiquement en fonction des événements, du point de vue neutronique. Cependant ces événements ont des durées caractéristiques très inférieures à celles de la thermohydraulique. Il semble raisonnable de penser que de ce dernier point de vue, l'évolution d'un centième de seconde à l'autre du système sera très faible compte tenu de la capacité thermique du sel, par conséquent on peut fixer un pas de temps minimum en dessous duquel le débit résultant de la convection naturelle n'est pas recalculé.

Un problème rencontré lors des simulations concernait la mémoire requise pour le calcul par Java. Il est arrivé plusieurs fois que la simulation s'interrompe dû à une saturation de la mémoire dédiée à la JVM (Java Virtual Machine) dans laquelle LiCore s'exécute. Cette saturation peut être évitée, en réduisant par exemple le pas de temps à laquelle la simulation est enregistrée pour pouvoir ensuite être revue dans l'interface graphique.

5.2.4 Interface

Quelques modifications mineures de l'interface ont été effectuées. Les éléments ont été repositionnés pour permettre une visualisation complète du circuit intermédiaire dont la boucle de circulation naturelle sortait du premier cadre, de part ses dimensions. La courbe du débit provenant de la pompe dans cette boucle a aussi été ajoutée.

5.3 Résultats

Le résultat de la simulation de référence est visible dans la figure 19 en ce qui concerne l'interface, dans les figures 20a 20b pour les températures, dans les figures 21a et 21b pour les PMCN et dans les figures 22a et 22b pour les vitesses.

Remarque : contrairement aux simulations avec le code SNCF, le transitoire commence à partir de $t = 10s$ puisque LiCore effectue une mise à l'équilibre de 150s (non visible sur les graphes). Par ailleurs, certaines valeurs impliquées dans la convection naturelle ne sont pas calculées avant le début du transitoire, ce qui explique que la PMCN dans les circuits présente un pic à $t = 10s$, il s'agit de l'instant de la première affectation de sa valeur dans le code.

La situation de référence présente les résultats suivants.

L'évolution des températures dans le circuit combustible (figure 20a est semblable à celle obtenue par le code SNCF (figure 6a)). Le gradient de température augmente brusquement pendant une première phase (d'environ 110s), passant de 42K ($t = 11s$) à 287K ($t = 122s$) (écart entre "pipe_haut" et "pipe_bas1"). La température maximale atteinte en sortie de coeur est de 1143K.

Une seconde phase d'évolution a lieu de $t = 122s$ à $t = 800s$ environ, pendant laquelle le gradient diminue pour atteindre une valeur de 172K.

Puis une troisième phase a lieu, pendant laquelle les températures semblent relativement stables.

L'évolution des températures dans le circuit intermédiaire (figure 20b) est plus chaotique. Globalement, les températures augmentent continuellement pendant la simulation. En observant les courbes des colonnes chaude ("cn_pipe_cc", courbe bleu fine) et froide ("cn_pipe_cf"), on voit que l'écart en température augmente pendant environ 230s jusqu'à culminer à 64K ($t=240s$) puis se réduit jusqu'à $t=600s$ environ, avant de brièvement augmenter, puis de décroître à nouveau. Ces deux courbes ont une évolution semblable mais avec un décalage : elles croissent, se stabilisent à une valeur pendant un certain temps, croissent à nouveau, se

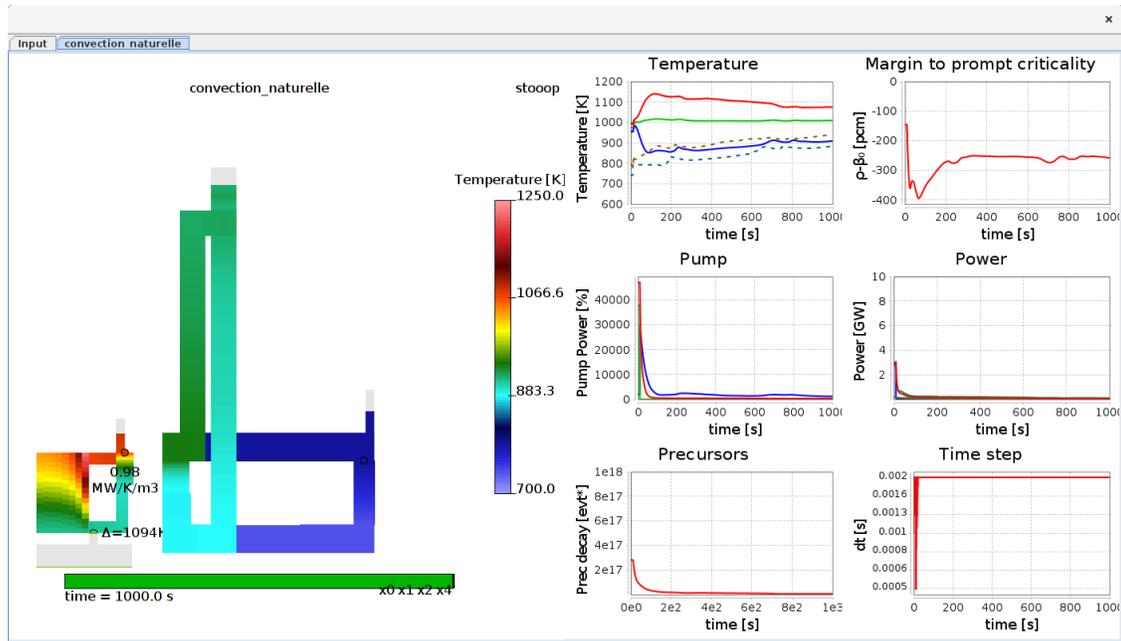


FIGURE 19 – Résultats (interface) de la situation de référence pour la convection naturelle dans LiCore

restabilisent à une plus grande valeur, et ainsi de suite.

Les PMCN (figures 21a et 21b) sont fonctions des gradients de température dans le système. Dans le circuit combustible, elle augmente donc pendant environ 110s avant de continement décroître. Dans le circuit intermédiaire, elle augmente pendant 230s avant de décroître, puis de remonter pour à nouveau décroître, tout comme l'écart en température dans les colonnes.

Les résultats des configurations avec variation de la hauteur de la colonne chaude (figures 24a, 24b) ou de la température imposée en paroi du SHX (figures 25a, 25b), pour valider la physique, sont fournis en Annexe (pages 52 à 53).

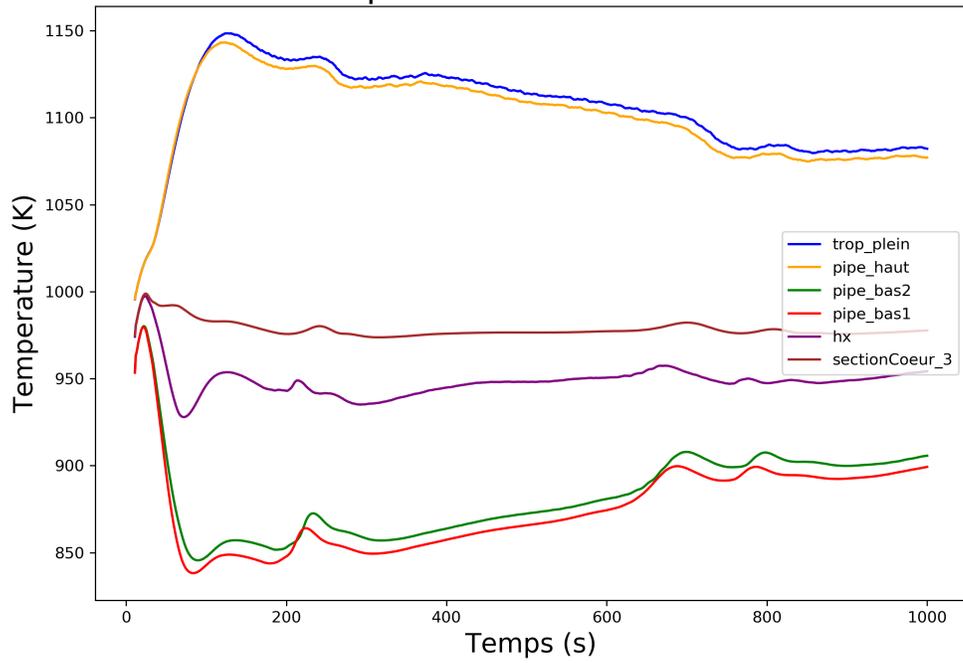
5.4 Discussion

On constate que les résultats obtenus dans ce LiCore modifié sont cohérents d'un point de vue physique.

L'équilibre n'est pas atteint en 1000s, cela se voit sur la figure 20b : les températures dans le circuit intermédiaires ne sont pas stabilisées, elles continuent de croître. Une simulation plus longue (résultats en annexe, page 54, figure 26), sur 3000s, montre que les gradients de température dans les circuits continuent de décroître, et que les températures semblent avoir un comportement asymptotique. A $t=1800s$, LiCore indique que la marge à la criticité prompte augmente en valeur absolue : l'élévation générale de température fait baisser la criticité et donc la puissance produite en coeur, par le jeu des contre-réactions négatives.

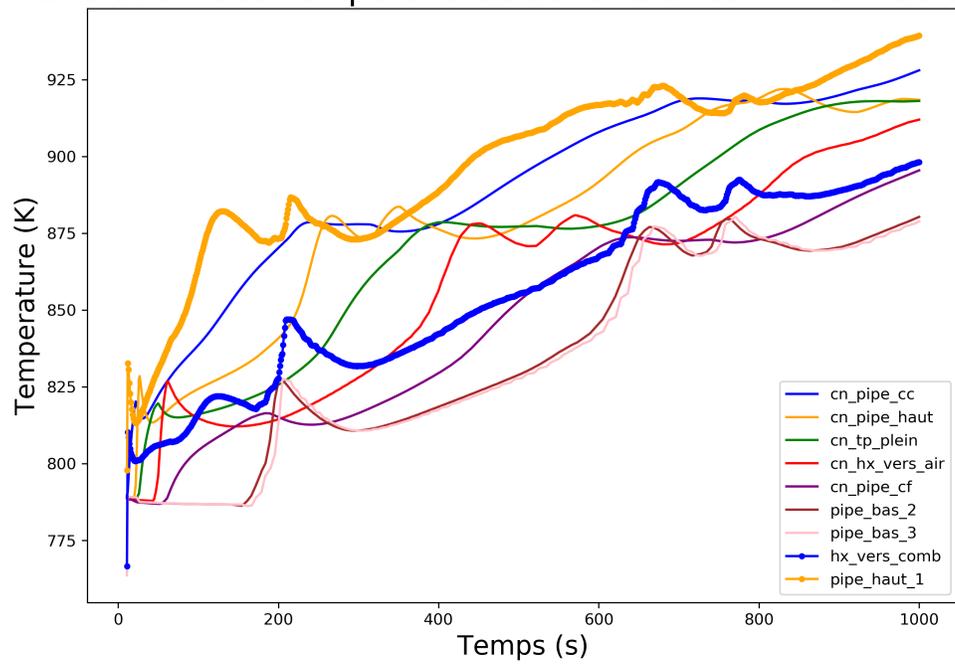
On voit aussi que l'évolution des températures du circuit combustible est similaire, que le calcul soit réalisé avec LiCore ou avec SNCF. Ce point n'est pas surprenant puisque la physique de la convection naturelle a été implémentée de façon très similaire dans les deux codes. Les différences concernent principalement le modèle neutronique et le transport local du fluide. LiCore ayant un modèle neutronique avancé, les températures du circuit combustible fournies seront plus réalistes. Les températures du circuit intermédiaire semblent plus chaotiques, cela est du à la géométrie et aux variations ponctuelles du flux de chaleur dans les échangeurs. Lorsque le flux de chaleur varie brusquement, une petite masse de fluide verra sa température plus nettement modifiée par rapport à ses voisins. Sa contribution à la température moyenne sera moins visible dans les longues sections (cn_pipe_cc la colonne chaude, et cn_pipe_cf la colonne froide) que dans les courtes sections, ce qui explique les pics dans les sections courtes.

Evolution des températures dans le circuit combustible



(a) Circuit combustible

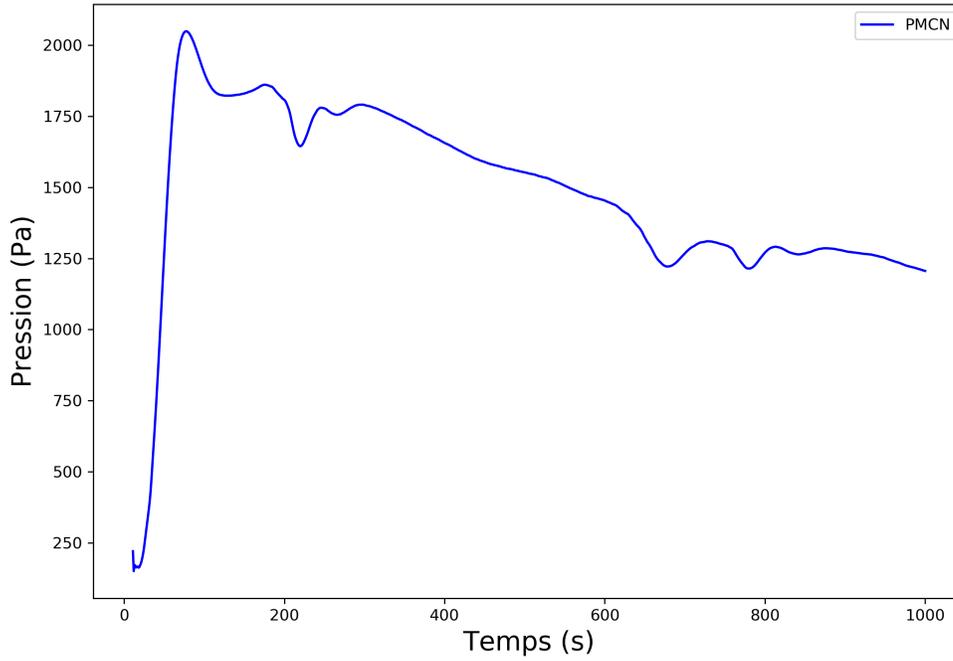
Evolution des températures dans le circuit intermédiaire



(b) Circuit intermédiaire

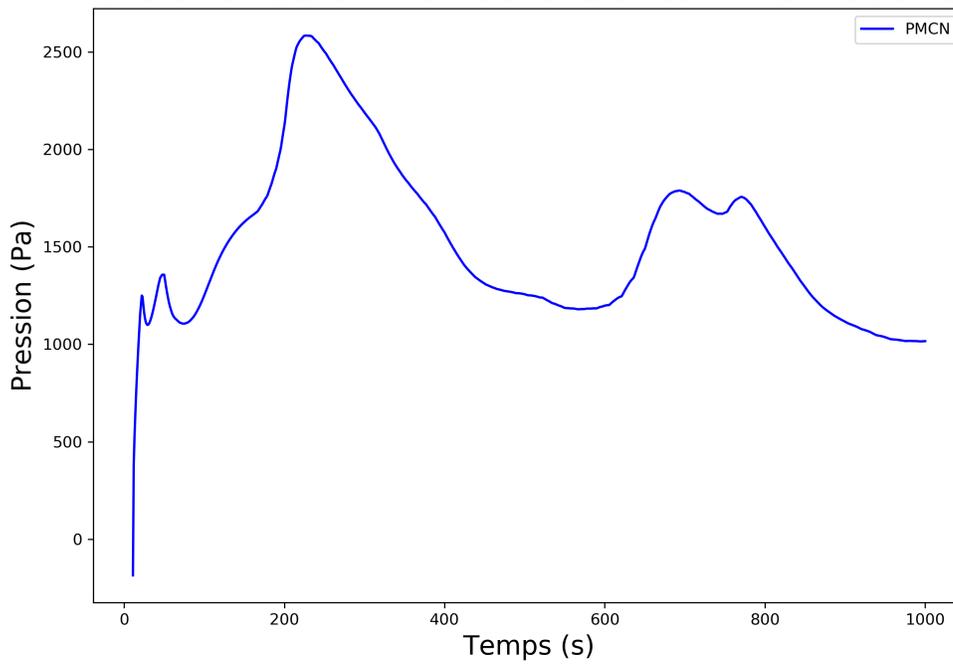
FIGURE 20 – Températures dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)

Evolution de la PMCN dans le circuit combustible



(a) Circuit combustible

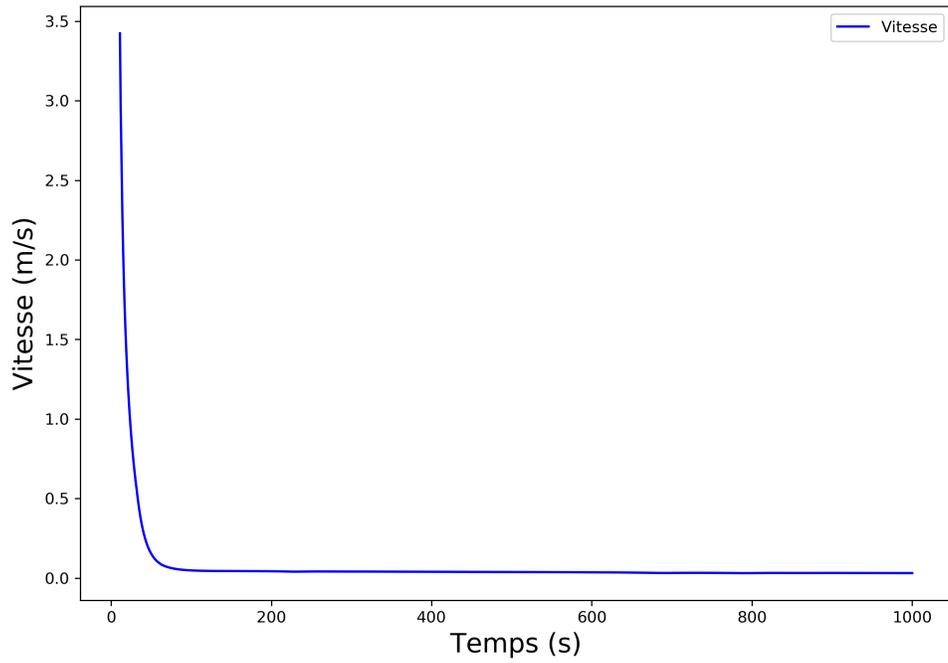
Evolution de la PMCN dans le circuit intermediaire



(b) Circuit intermédiaire

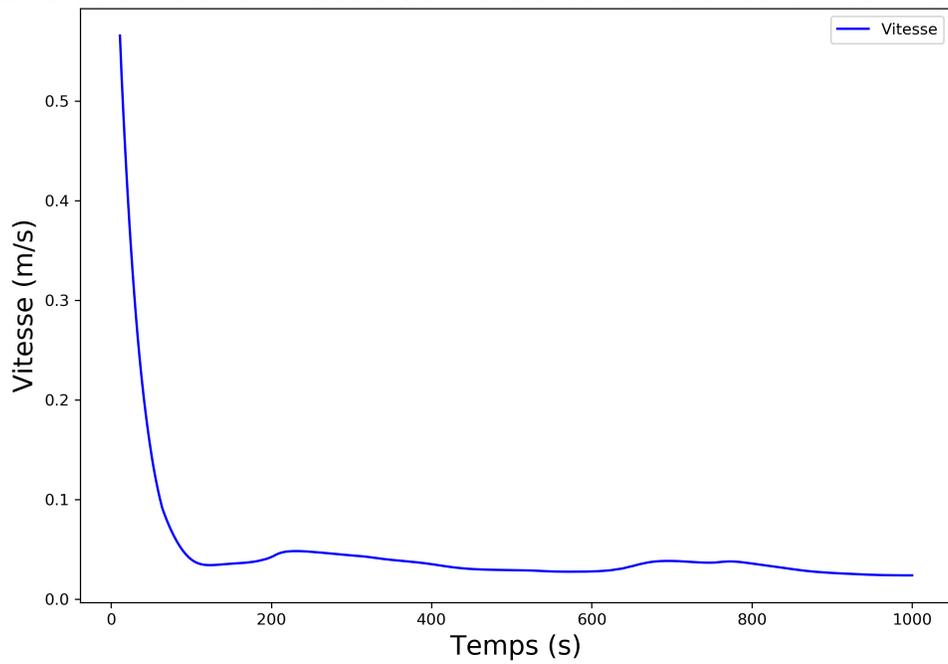
FIGURE 21 – PMCN dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)

Evolution de la vitesse du fluide dans le circuit combustible



(a) Boucle combustible

Evolution de la vitesse du fluide dans le circuit intermediaire



(b) Boucle intermédiaire

FIGURE 22 – Vitesse du fluide dans les deux circuits pour la configuration de référence (LiCore)

Par ailleurs, la comparaison entre les codes doit être faite prudemment. Les géométries ne sont pas tout à fait équivalentes et celle de LiCore est modifiée par fermeture des vannes au début du transitoire. La mise à l'équilibre est faite différemment et l'équilibre atteint est différent dans les deux codes.

6 Conclusion & Perspectives

Dans le contexte du développement du MSFR, des études de sûreté sont conduites. Le réacteur utilisant un combustible liquide circulant, il requiert l'analyse de configurations qui sont introuvables dans les réacteurs commerciaux actuels, notamment dans les REPs. Cette analyse passe par une étape de création de nouveaux outils adaptés à ce concept de réacteur, et par la définition de nouveaux scénarios de fonctionnements (normaux, incidentaux, accidentaux).

Afin de respecter les exigences de sûreté, le MSFR possède un dispositif de vidange d'urgence permettant la mise à l'abri du combustible par simple transfert gravitationnel dans un réservoir adapté. Cependant, cette vidange présente certains inconvénients. Aussi, des alternatives propres à certaines situations incidentelles ou accidentelles ont été imaginées. Dans le cadre de ce stage, on suppose que le circuit de conversion du MSFR est perdu. On souhaite alors vérifier s'il est possible de refroidir le réacteur recourir à la vidange d'urgence, par convection naturelle.

Ce stage avait deux objectifs : l'étude de la convection naturelle dans le MSFR, et l'implémentation de la physique associée dans le code système LiCore.

Le premier objectif a été atteint par l'écriture du code SNCF. Ce code a été pensé pour avoir un modèle neutronique plus simple que celui de LiCore, et un modèle plus complexe du transport du fluide. Il peut de plus simuler autant de boucles de circulation que nécessaire. Pour cette étude, jusqu'à quatre boucles ont été modélisées (sel combustible, sel intermédiaire, fluide du bâtiment réacteur et air extérieur), permettant une étude phénoménologique globale du système. Une simulation avec quatre boucles a également permis de prouver l'existence d'au moins une configuration permettant le refroidissement du combustible sans recourir à la vidange d'urgence. Cette possibilité rendrait le réacteur MSFR encore plus intéressant du point de vue de la sûreté.

Pour le deuxième objectif, l'implémentation de la convection naturelle dans LiCore a été effectuée en deux étapes. Il a fallu d'abord concevoir une nouvelle géométrie du réacteur, plus favorable à la mise en place d'une convection naturelle efficace. Une extension dédiée a donc été ajoutée. Ensuite, la physique de la convection naturelle a été implémentée dans le code. Les simulations réalisées ont permis, par comparaison avec le code SNCF, de vérifier que l'implémentation a été correctement faite. Cependant, des différences sur le point d'équilibre du système avant le transitoire et sur la géométrie du système nécessitent de faire preuve de prudence sur la comparaison des codes.

La configuration à 4 boucles utilisée dans le code SNCF pour démontrer l'existence d'au moins une solution au problème n'a pas été optimisée dans le cadre de ce stage. Elle pourrait l'être dans le cadre d'un futur travail : une géométrie plus optimisée pourrait permettre de meilleures performances de la convection naturelle, et ainsi garantir de meilleures marges de sûreté (températures maximales atteintes dans les circuits plus basses).

Références

- [1] M Allibert, D Gérardin, D Heuer, E Huffer, A Laureau, E Merle, S Beils, A Cammi, B Carluec, S Delpéch, A Gerber, E Girardi, J Krepel, D Lathouwers, D Lecarpentier, S Lorenzi, L Luzzi, S Pומרouly, M Ricotti, and V Tiberi. *Description of initial reference design and identification of safety aspects of the MSFR*, 2016. Work-Package WP1, Deliverable 1.1, SAMOFAR European H2020 Project.
- [2] Mariya Brovchenko. *Études préliminaires de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2013.
- [3] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, 2002. GIF-002-00.
- [4] Marceau Daronnat. *Etude de la faisabilité d'une extraction passive de la puissance résiduelle du réacteur MSFR*. Rapport de stage IUT Université Grenoble Alpes, LPSC-IN2P3-CNRS Grenoble, avril-juin 2018.
- [5] Delphine Gerardin. *Développement d'outils numériques et réalisation d'études pour le pilotage et la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2018.
- [6] Site internet du LPSC. 2020 (consulté en Août). <http://lpsc.in2p3.fr/>.
- [7] Axel Laureau. *Développement d'outils numériques et réalisation d'études pour le pilotage et la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France, 2015.
- [8] Thibault Le Meute. *Modélisation de l'évacuation de puissance résiduelle lors du transitoire de vidange du circuit combustible d'un réacteur à sels fondus de Génération IV*. Rapport de stage M2 Phelma, CEA Cadarache/SESI et CNRS/LPSC Grenoble, mars-septembre 2019.
- [9] E Merle-Lucotte, M Allibert, M Brovchenko, D Heuer, V Ghetta, A Laureau, and P Rubiolo. *Introduction to the Physics of Thorium Molten Salt Fast Reactor (MSFR) Concepts*. Springer International Publishing, 2016.
- [10] Hugo Pitois. *Développement de calculs de puissance résiduelle pour un concept de réacteur à neutrons rapides et à sels fondus*. Rapport de stage M1 Phelma, CNRS/Subatech Nantes, avril-juillet 2018.

Annexes

1 Diagramme de Gantt

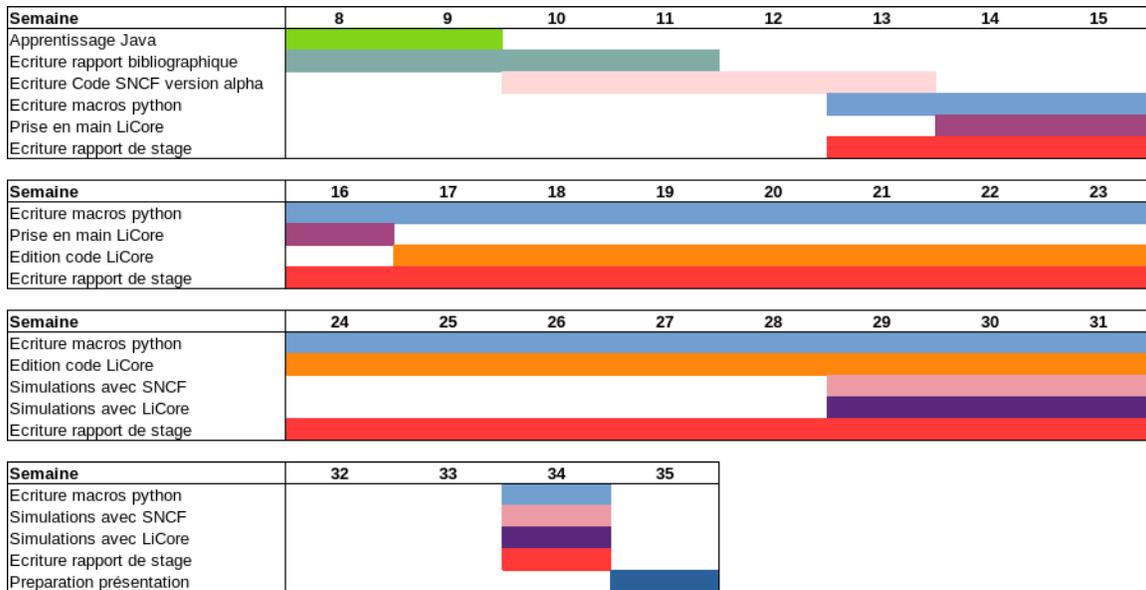


FIGURE 23 – Diagramme de Gantt du stage

Les semaines 32 et 33 ont été des congés. Les semaines 12 à 22 ont été effectuées en télétravail à cause de la pandémie de Covid-19.

2 Gestion des trains, par Daniel Heuer le 7 avril 2020

Problématique

Il s'agit de transporter de la matière à travers un élément de circuit en respectant l'ordre d'entrée-sortie. En entrée de l'élément de circuit on voit arriver un volume de matière à une température donnée. En sortie on doit rendre un volume de matière à la température estimée de sortie. Le volume total de matière dans l'élément de circuit doit être conservé mais les températures d'entrée et de sortie sont différentes et donc, à un instant donné, le volume transitant en sortie n'est pas le même qu'à l'entrée. Tout le problème est de déterminer cette différence.

Il faut aussi tenir compte d'un transfert de chaleur par les parois et d'une production interne de chaleur due à la puissance résiduelle et à d'éventuelles fissions. Il est aussi nécessaire de pouvoir transiter dans les deux sens.

Température moyenne

A un instant donné on a besoin de connaître la température moyenne TT_m dans l'élément de circuit connaissant la masse présente M . Par définition de la chaleur spécifique C_p , la chaleur accumulée Q_{T_m} entre $T = 0K$ et la température moyenne peut-être décomposée sous la forme

$$Q_{T_m} = M \int_0^{T_0} C_p(T) dT + M \int_{T_0}^{T_m} C_p(T) dT$$

On supposera que dans la gamme des températures contenant T_m et T_0 la quantité $C_p(T)$ est linéaire et donc de la forme $C_p(T) = C_{p_1}T + C_{p_0}$.

On a donc, en posant $Q_{T_0} = M \left(C_{p_1} \frac{T_0^2}{2} + C_{p_0} T_0 \right)$:

$$Q_{T_m} = M \int_0^{T_0} C_p(T) dT + M \left(C_{p_1} \frac{T_m^2}{2} + C_{p_0} T_m \right) - M \left(C_{p_1} \frac{T_0^2}{2} + C_{p_0} T_0 \right)$$

Posons $Q_0 = M \int_0^{T_0} C_p(T) dT - M \left(C_{p_1} \frac{T_0^2}{2} + C_{p_0} T_0 \right)$, ce qui permet d'écrire

$$Q_{T_m} - Q_0 = \widetilde{Q}_{T_m} = M \left(C_{p_1} \frac{T_m^2}{2} + C_{p_0} T_m \right)$$

Si $C_{p_1} = 0$ alors $T_m = \frac{\widetilde{Q}_{T_m}}{MC_{p_0}}$, sinon on obtient une équation d'ordre 2 en T_m qui a pour solution :

$$T_m = \frac{C_{p_0}}{C_{p_1}} \left[\pm \sqrt{1 + 2 \frac{\widetilde{Q}_{T_m} C_{p_1}}{MC_{p_0}^2}} - 1 \right]$$

Il s'avère que pour certains fluides C_{p_0} est négatif. Pour ne garder que la solution positive il faut donc distinguer deux cas :

$$C_{p_0} < 0 \implies T_m = \frac{C_{p_0}}{C_{p_1}} \left[-\sqrt{1 + 2 \frac{\widetilde{Q}_{T_m} C_{p_1}}{MC_{p_0}^2}} - 1 \right]$$

$$C_{p_0} > 0 \implies T_m = \frac{C_{p_0}}{C_{p_1}} \left[\sqrt{1 + 2 \frac{\widetilde{Q}_{T_m} C_{p_1}}{MC_{p_0}^2}} - 1 \right]$$

Dans le cas du LiF ThF₄ UF₃ on a $C_{p_0} = -1111$ J/kg/K et $C_{p_1} = 2.78$ J/kg. La température pour laquelle \widetilde{Q}_{T_m} devient négatif est $T_m = -2 \frac{C_{p_0}}{C_{p_1}} = 799.3$ K, soit 526.3°C. Cette température est inférieure à la température de fusion qui est 585°C. Il est donc nécessaire de se maintenir au-dessus de cette température. Par ailleurs, la quantité de chaleur pour laquelle le radical devient négatif est donnée par $Q_{T_m} = \frac{-MC_{p_0}^2}{C_{p_1}}$.

Dans ce cas : $T_m = \frac{-C_{p_0}}{C_{p_1}} = 399.64$ K.

Finalement on peut bien déterminer à chaque instant la température moyenne de la cellule en fonction des échanges globaux de chaleur et des masses injectée M_i et extraite M_e qui modifient la valeur de M .

Volume effectif

Cette température moyenne permet de déduire le volume effectif \tilde{V} de fluide dans l'élément de circuit connaissant l'évolution de la température $T(x)$ le long de l'élément de circuit et la masse volumique du fluide en fonction de la température $\rho(T)$. On a :

$$\tilde{V} = \frac{M}{\frac{1}{L} \int_0^L \rho(T(x)) dx}$$

Sachant que cette évolution de température est telle que $\frac{1}{L} \int_0^L \rho(T(x)) dx = T_m$. Alors, si $\rho(T) = \sum_{i=0}^n \rho_i T^i$, il vient :

$$\frac{1}{L} \int_0^L \rho(T(x)) dx = \frac{1}{L} \int_0^L \sum_{i=0}^n \rho_i T^i dx = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^n \rho_i \int_0^L T^i dx$$

Si $n = 1$, ce qui est généralement le cas :

$$\frac{1}{L} \int_0^L \rho(T(x)) dx = \frac{1}{L} \rho_0 \int_0^L dx + \frac{1}{L} \rho_1 \int_0^L T(x) dx = \rho_0 + \rho_1 T_m = \rho(T_m)$$

En en déduit que si la masse volumique est une quantité linéaire en fonction de T dans le domaine des températures à l'intérieur de l'élément de circuit, on a $\tilde{V} = \frac{M}{\rho(T_m)}$

La cellule ayant un volume fixe V_c , il est nécessaire d'extraire le volume $V_s = \tilde{V} - V_c$.

Chaleur accumulée

Pendant son séjour dans l'élément de circuit un élément de matière de masse m cumule de la chaleur provenant des sources internes (puissance résiduelle et éventuelles fission) et des sources externes (échanges de chaleur). On supposera que l'élément de circuit transfère uniformément cette chaleur à toute la masse présente. Soit $P(t)$ la puissance reçue et $M(t)$ la masse présente dans l'élément de circuit en fonction du temps t . L'énergie cumulée Q entre le temps d'entrée t_e et le temps de sortie t_s est :

$$Q = m \int_{t_e}^{t_s} \frac{P(t)}{M(t)} dt = m \left[\int_0^{t_s} \frac{P(t)}{M(t)} dt - \int_0^{t_e} \frac{P(t)}{M(t)} dt \right]$$

On constate qu'il suffit de mémoriser la quantité $\int_0^{t_e} \frac{P(t)}{M(t)} dt$ pour déterminer, en sortie, la chaleur cumulée.

Puissance de fission

On peut définir une température de criticité T_c dans un élément de circuit. Dans ce cas la température moyenne de cet élément de circuit ne peut pas descendre en dessous de T_c . Si la température moyenne T_m , déterminée par la méthode précédente, est inférieure à T_c , il faut rajouter l'énergie Q_f pour revenir à T_c . En définissant la chaleur spécifique critique $Q_c = \left[\frac{C_{p1}}{2} T_c + C_{p0} \right] T_c$, on a :

$$Q_f = M \int_{T_m}^{T_c} C_p(T) dT = M \left[\frac{C_{p1}}{2} T_c + C_{p0} \right] T_c - \left[\frac{C_{p1}}{2} T_m + C_{p0} \right] T_m = MQ_c - Q_{T_m}$$

3 Propriétés de l'Hastelloy-N

TABLE 9 – Composition de l'Hastelloy-N

Ni	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	C	Autres
71	7	16	5	1	0.80	0.08	Co = 0.20; Cu = 0.35; W = 0.50; Al + Ti = 0.35

TABLE 10 – Propriétés de l'Hastelloy-N

Propriété	valeur
Zone de fusion	1300 - 1400 °C
Plus haute température de traitement thermique	1185 °C

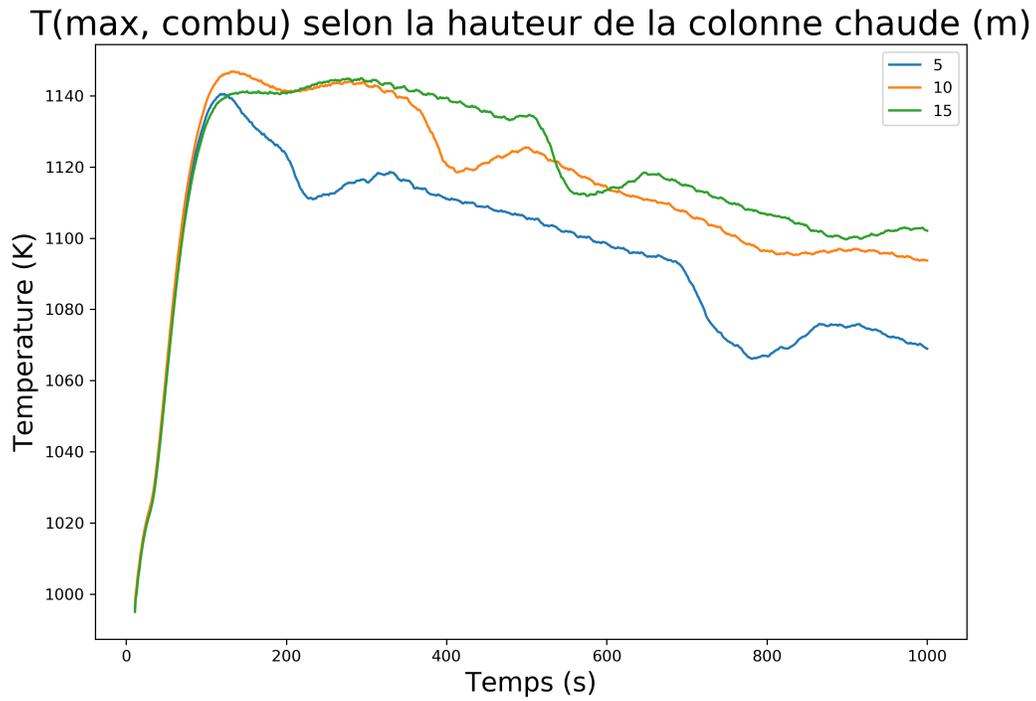
Les données sur cet alliage proviennent d'un document de HAYNES International (compagnie américaine spécialisée dans la production d'alliages résistants aux hautes températures et à la corrosion).

La plus haute température de traitement thermique étant de 1185 °C, on en déduit qu'au-delà de cette température, les propriétés mécaniques de l'alliage se dégradent et ne répondent plus aux exigences de sûreté.

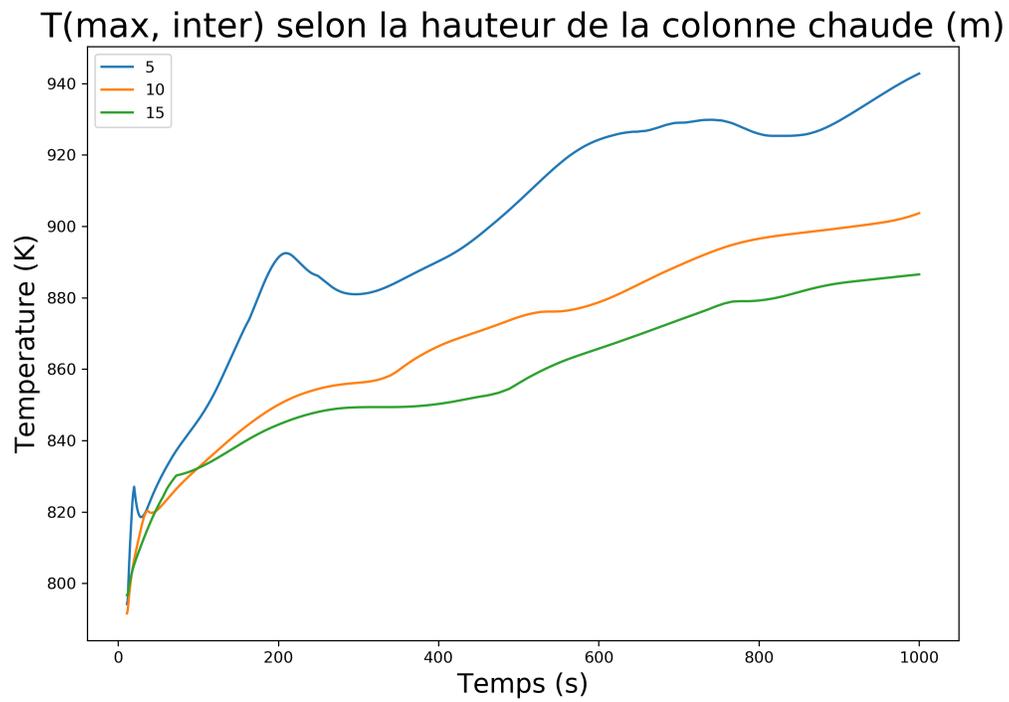
4 Résultats de simulations LiCore : variation de la hauteur de colonne et de la température imposée en paroi de SHX

L'augmentation de la hauteur de la colonne chaude se traduit bien par une augmentation de la température maximale dans le circuit combustible (figure 24a), et d'une diminution de la température maximale dans le circuit intermédiaire (figure 24b).

On retrouve sur les figures 25a et 25b le phénomène attendu : augmenter la température imposée à la paroi de SHX provoque une diminution de la température maximale dans le combustible et une augmentation de la température maximale dans le circuit intermédiaire.

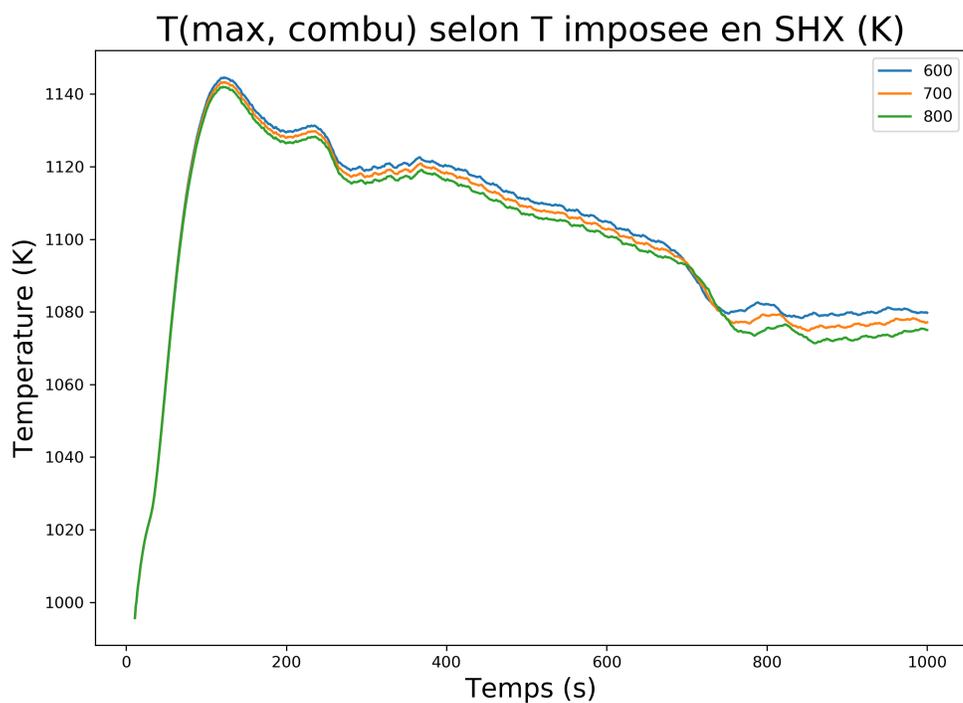


(a) Circuit combustible

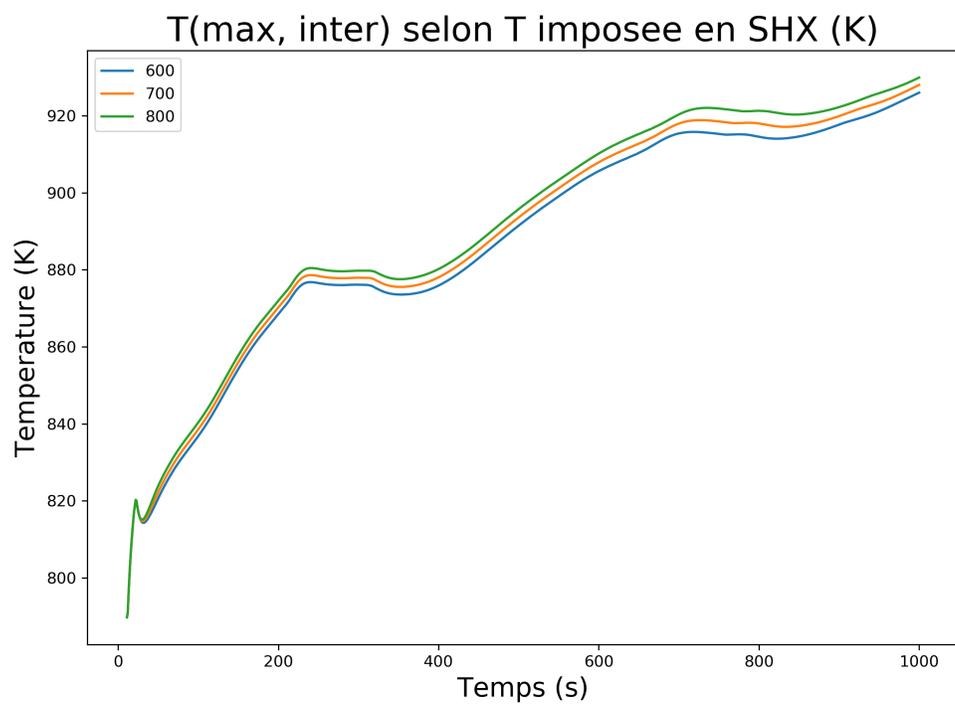


(b) Circuit intermédiaire

FIGURE 24 – Températures maximales dans les deux circuits en fonction de la hauteur de la colonne chaude du circuit intermédiaire



(a) Circuit combustible



(b) Circuit intermédiaire

FIGURE 25 – Températures maximales dans les deux circuits en fonction de la température imposée sur la paroi extérieure de SHX

5 Résultat de la simulation LiCore de référence de 3000s

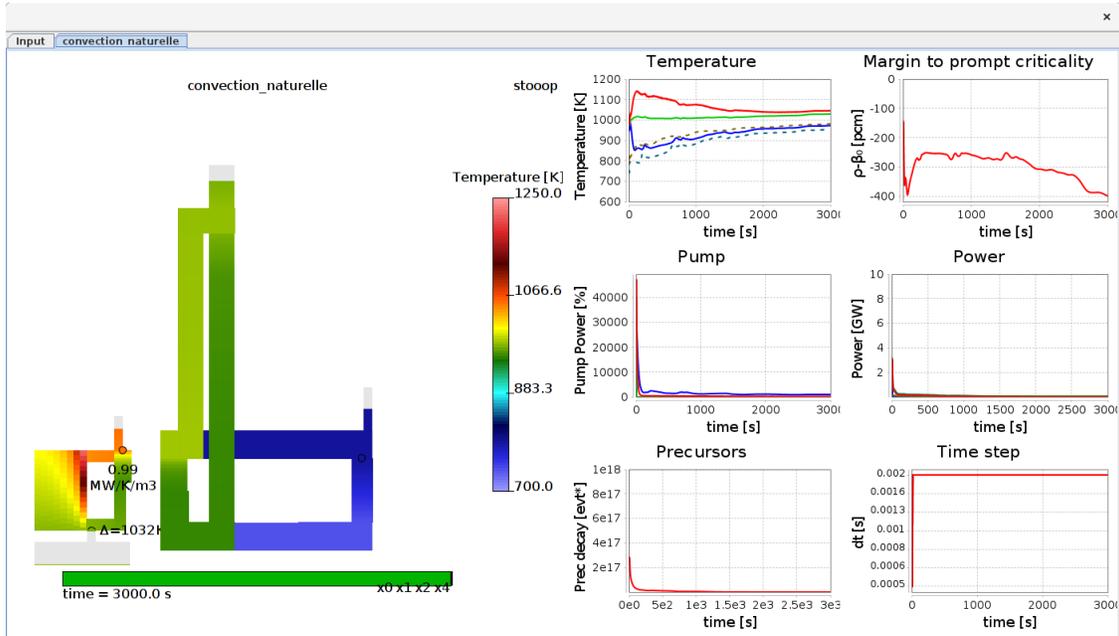


FIGURE 26 – Résultat (interface) de la configuration de référence sous LiCore pour un temps de simulation de 3000s

Cette simulation montre que l'équilibre n'est pas atteint en 1000s, et ne l'est toujours pas en 3000s, dans la configuration de référence de LiCore. L'échange de chaleur n'est pas assez efficace dans l'échangeur SHX, aussi la température dans l'intermédiaire continue de croître. Par contre-réactions négatives, la réactivité en coeur baisse comme montré par la courbe de la marge à la criticité prompte, qui croît en valeur absolue.

Résumé

Ce stage avait pour objectifs l'étude de la convection naturelle au sein du réacteur MSFR, et l'implémentation de la physique mise en jeu dans le code de calcul LiCore.

Dans un premier temps, le code de calcul SNCF (Simulateur Numérique de Circulation de Fluides) a été développé pour permettre l'étude de la convection naturelle dans un modèle simplifié. Ce code a permis une étude phénoménologique globale en intégrant l'ensemble des boucles de circulation envisagées pour l'évacuation de la chaleur (circuit combustible, circuit intermédiaire, fluide du bâtiment réacteur, air extérieur). Une simulation avec ces quatre boucles a permis de proposer une configuration dans laquelle la chaleur peut être totalement évacuée de façon passive.

Dans un second temps, la physique de la convection naturelle a été implémentée dans le code LiCore après une évolution de la géométrie de référence du circuit intermédiaire. Les résultats ont été cohérents avec ceux obtenus par le code SNCF pour une configuration et des contraintes similaires, validant l'implémentation.

Abstract

To contribute to the safety analysis of the MSFR, this internship had two objectives. First, the natural circulation had to be studied for the reactor, and then, the related physics should be implemented to the computation code named LiCore.

To reach the first goal, the SNCF (French acronym standing for Fluid Circulation Numerical Simulator) computation code was written. With a simplified neutronic model yet a more complex management of the fluids, this code allowed a complete study of the phenomena related to the natural circulation, with the modelization of four fluid loops (fuel salt, intermediary salt, fluid of the reactor building and the outside air). One simulation with those four loops showed the existence of (at least) one configuration allowing a full passive cooling of the reactor.

The second objective was preceded by an update of the reference design of the intermediary circuit. The physics were then implemented. The results, by showing large similarities with the ones obtained with SNCF simulations, confirmed that the implementation was successful.