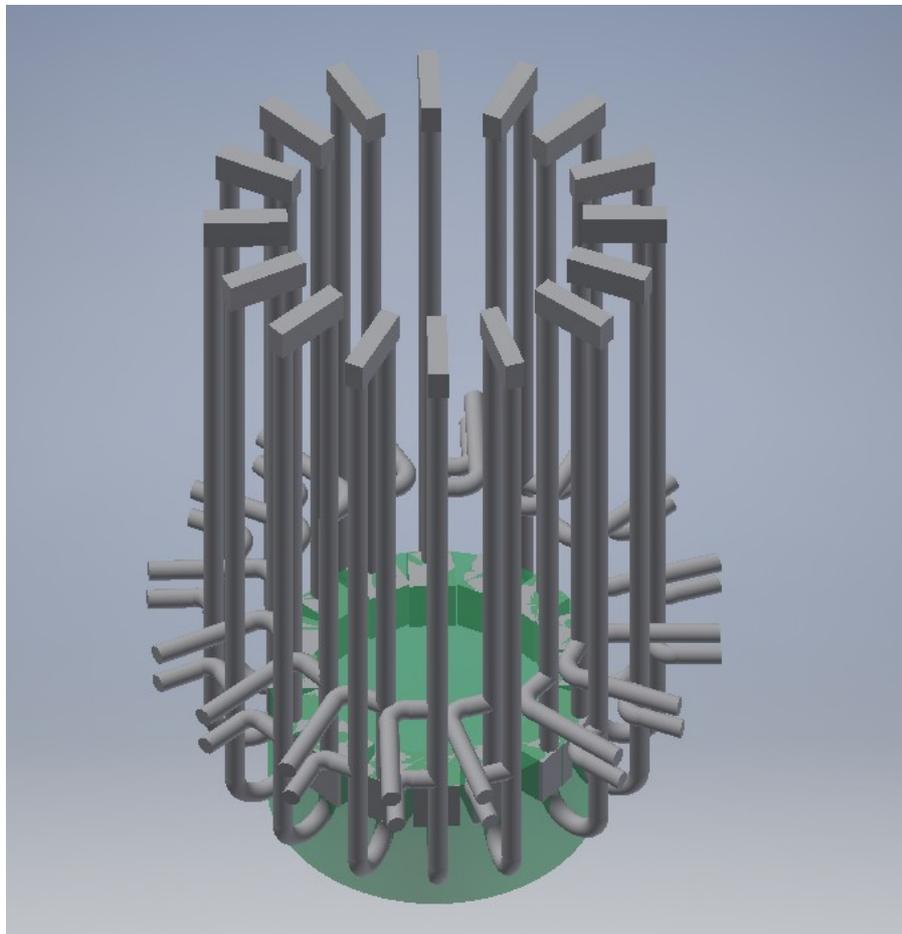


IUT : Génie Thermique et Énergie
Grenoble

Laboratoire de Physique
Subatomique et Cosmologique

Rapport de stage de fin d'étude :

Etude de la faisabilité d'une extraction passive de la puissance résiduelle du réacteur MSFR



Maître de stage : Daniel Heuer

Dates : avril-juin 2018

Etudiant : Marceau Daronnat

Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier Daniel HEUER pour m'avoir permis de faire ce stage de fin d'études à ses côtés au Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologique. Je le remercie pour toute l'aide qu'il m'a apportée lors de mon stage ainsi pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Je remercie également Elsa MERLE ainsi que les deux doctorants Delphine et Johann qui m'ont très bien accueilli au sein de leur équipe et n'ont pas hésité à prendre de leur temps pour répondre à mes questions.

Cette petite équipe m'a permis de découvrir le métier de chercheur. Les connaissances que j'en tire vont au-delà de ce stage et me sont très précieuses personnellement.

Table des matières

1- Introduction.....	4
2- Environnement du stage.....	4
3- Présentation du concept MSFR.....	5
4 - Objectif du stage.....	6
5 -Méthode de calculs.....	7
a) Mise en circulation du gaz.....	7
b) Pertes de charge.....	8
c) Échanges thermiques.....	9
d) Détermination de la température de plaque coté chaud.....	11
6 -Application au problème.....	14
a) Description de l'échangeur cœur.....	14
b) Pertes de charge de la boucle.....	14
c) Échanges thermiques au sein de l'échangeur.....	15
d) Présentation des résultats, discussions.....	15
7) Conclusion.....	19
Annexe.....	20

1- Introduction

Après avoir intégré l'IUT GTE pour pouvoir faire mûrir mes convictions et devenir acteur de la transition énergétique et constructeur du monde de demain, je viens de terminer ces deux années d'études par un stage. Passionné par les énergies et leurs productions, j'ai recherché un stage qui me permettrait d'approfondir mes connaissances sur ce domaine tout en me faisant découvrir le monde de la recherche.

2- Environnement du stage.

Ce stage de fin d'année a eu lieu au Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologique (LPSC) de Grenoble qui est sous la tutelle de l'Université Grenoble Alpes (UGA), de l'Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du CNRS ainsi que l'Institut Polytechnique de Grenoble. Cette unité de recherche concentre plusieurs spécialités dont la physique des réacteurs nucléaires de fission, domaine dans lequel j'ai intégré l'équipe du MSFR.

L'énergie nucléaire est une énergie dite non carbonée et dont le potentiel pour une transition énergétique est énorme. En effet, la fission nucléaire est un procédé produisant de grandes quantités d'énergie à partir d'une très faible quantité de combustible.

Le parc nucléaire français actuel produit 75 % de l'électricité du pays et est composé de centrales de génération II appelées réacteurs à eau pressurisée (REP) et qui produisent l'électricité française à faible coût depuis plus de trente ans et qui font débat sur différents points :

- La production de déchets. Ces réacteurs sont certes neutres pour le réchauffement climatique et pour la couche d'ozone mais ils produisent des déchets radioactifs qu'il faut stocker et gérer sur des durées très longues de plusieurs milliers à millions d'années.
- Le principe de fonctionnement même : les REP fonctionnent ainsi à hautes pressions par exemple ce qui augmente les risques d'accidents. Enfin leur durée de vie va être prolongée ce qui peut inquiéter pour la sûreté.

Il est donc nécessaire de penser à un autre mode de production d'énergie qui à terme devra remplacer les centrales actuelles en garantissant la production d'une grande quantité d'énergie tout en assurant un aspect social de par son utilisation sécuritaire. C'est l'objectif des réacteurs des futures générations (4^{ème} génération). C'est ainsi que le MSFR (Molten Salt Fast Reactor) est l'un des six concepts de réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération retenus par le forum international GEN IV. Ce forum est une initiative du département de l'Énergie des États-Unis destinée à instaurer une coopération internationale dans le cadre du développement des systèmes nucléaires de nouvelle génération.

Cette technologie repose sur l'utilisation d'un sel liquide qui sert au support de combustible mais aussi en tant que fluide caloporteur. Elle peut potentiellement représenter une alternative durable à la production d'énergie respectueuse de l'environnement en limitant les déchets ainsi que leur dangerosité. Elle apporte aussi des solutions quant à la sécurité de l'utilisation du nucléaire. Le MSFR permet de résoudre les problèmes de sûreté grâce à un fonctionnement plus « doux » :

- Il ne nécessite pas de hautes pressions pour son fonctionnement.
- La manipulation de combustible liquide est plus simple et moins risqué que celle de combustible solide.
- La conception d'un cœur simple et compact.
- Les systèmes de sécurité passifs, dont l'un d'eux est le sujet de ce stage.

Ce réacteur est à l'honneur et est très bien expliqué dans un documentaire Arte disponible sur YouTube : « Thorium, la face gâchée du nucléaire. »

L'équipe de recherche MSFR est actuellement composée de deux chercheurs permanents (Elsa et Daniel) ainsi que de deux doctorants (Delphine et Johann) qui se partagent différentes tâches pour faire évoluer ce projet : plusieurs études sont menées en parallèle et en accord comme les modélisations du cœur, les études de sûreté, les études d'échelles ainsi que le développement d'outils informatiques de simulations et de calculs.

3- Présentation du concept MSFR

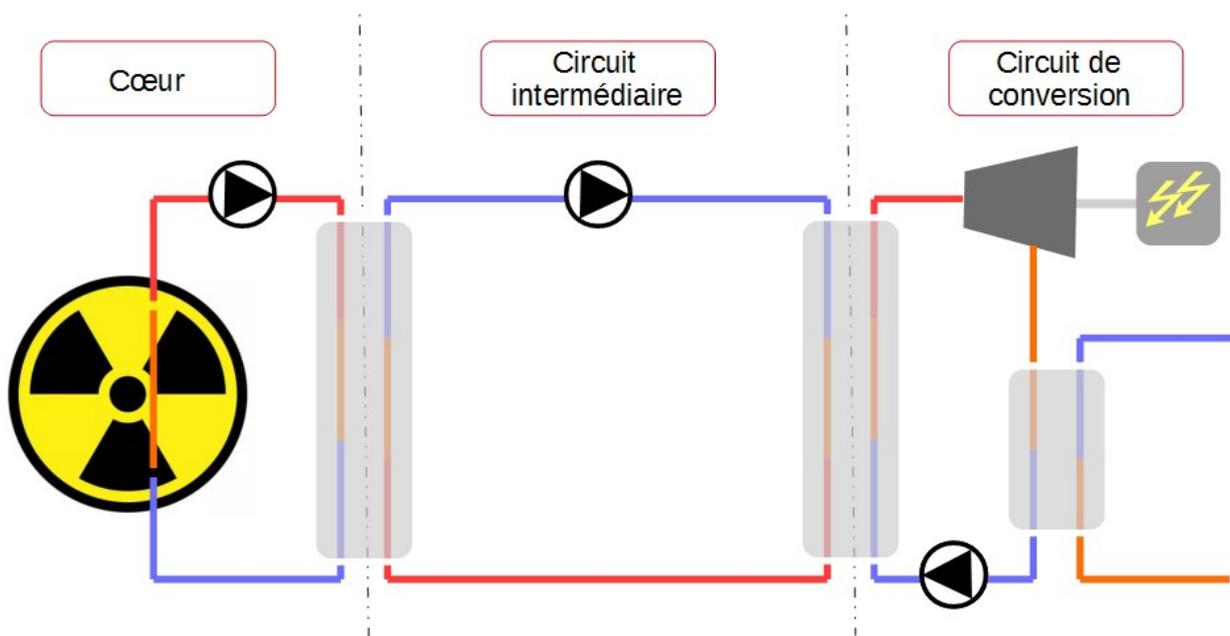


Schéma 1 : Schéma du fonctionnement général.

Le réacteur MSFR est composé de trois grandes parties : le cœur, le circuit intermédiaire et le circuit de conversion électrique.

La conception du cœur est simple, c'est un cylindre torique de 2.25 mètres de diamètre et 2.25 mètres de haut dans lequel le sel combustible effectue les réactions de fissions et produit l'énergie. Un système de pompes et d'échangeurs appelé boucles de recirculation permet de transférer la chaleur au circuit intermédiaire. Les échangeurs de ces boucles sont appelés « échangeurs cœur ». Ces boucles de recirculation ou secteurs sont au nombre de 16 (voir Schéma modélisation en couverture). Le circuit intermédiaire a pour rôle de transmettre l'énergie au circuit de conversion. C'est un circuit en boucle fermée dans lequel circule un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur est plus précisément un autre sel liquide qui lui sera inerte (ne contenant aucun produit radioactif). Le circuit de conversion électrique est classique et n'est pas à l'étude dans ce projet. Le fonctionnement est schématisé avec la Figure 1 : les traits vont de bleu (le plus froid) à rouge (le plus chaud).

4 - Objectif du stage.

Comme détaillé dans la section précédente, le concept MSFR est un projet cherchant la production d'énergie grâce au nucléaire et de façon sûre.

En cas d'anomalie, par exemple si le refroidissement du côté cœur est défectueux, la température du sel combustible augmentera. Le sel fera alors fondre des bouchons de sel solide et le combustible liquide sera déversé par gravité dans un réservoir de vidange prévu pour en assurer le refroidissement et la sûreté sur le cours à long terme (Objet du stage de fin d'études d'Edouard Montanet en 2017). Mais l'intégralité de ce sel ne va pas s'écouler dans le réservoir, une partie va rester collée aux parois. De plus, lors du fonctionnement normal du réacteur, certains dépôts métalliques sont créés lors des réactions de fissions. Dans le cas où aucun système de nettoyage (comme le bullage) n'est mis en place pour « éliminer » ces déchets de fission, nous pouvons faire l'hypothèse qu'ils se déposeront en majeure partie dans les échangeurs car c'est là qu'il y a le plus de surface en contact avec le sel combustible.

Ces restes de sel combustible non vidangés ainsi que les dépôts de métaux radioactifs sur les échangeurs produisent de l'énergie par décroissance radioactive même après vidange et arrêt du cœur et constituent donc une puissance résiduelle qu'il faut évacuer pour ne pas endommager les échangeurs.

Pour considérer le cas le plus grave, en cas d'anomalie, il est possible en plus que le circuit intermédiaire soit perdu (fluide intermédiaire perdu). Cela peut être dû à une fuite par exemple. Dans ce cas extrême il n'y a plus de sel dans le circuit mais un gaz.

Le stage a pour objectif de savoir s'il est possible d'évacuer cette puissance résiduelle de manière passive, en utilisant les échangeurs avec du gaz et le principe de convection naturelle. Pour mener à bien ce stage, j'ai fait appel à mes connaissances en mécanique des fluides pour comprendre la nature des écoulements, aux aspects transferts thermiques avec les cours concernant la convection et la conduction ainsi que le cours « échangeur » plus mes connaissances de thermodynamique. J'ai commencé en utilisant simplement un fichier Excel pour prendre en main le sujet, la physique associée et bien appréhender les ordres de grandeurs. La complexité de cette étude m'a très vite conduit à utiliser la programmation Java apprise grâce au site « openclassroom » et avec l'aide des experts de l'équipe de recherche. Le programme terminé a été un outil de calcul très pratique et sur-mesure pour l'étude que j'ai effectuée.

5 -Méthode de calculs

Comme expliqué plus haut, la problématique a été d'étudier s'il est possible d'évacuer la puissance résiduelle de manière passive. Le circuit intermédiaire présente une fuite et le sel intermédiaire a disparu et a été remplacé par du gaz. Le cœur est vidangé de son sel combustible. Pour simplifier le problème, nous ne nous intéressons pas à l'état du cœur. Nous connaissons la puissance à évacuer (thèse de Mariya BROVCHENKO soutenue en 2013) et nous la prendrons également répartie sur les échangeurs. Pour assurer l'intégrité des échangeurs, leur température de surface ne doivent pas dépasser un certain seuil, selon le matériau utilisé. Cette étude portera donc sur le calcul de cette température de parois sous différentes conditions.

a) Mise en circulation du gaz

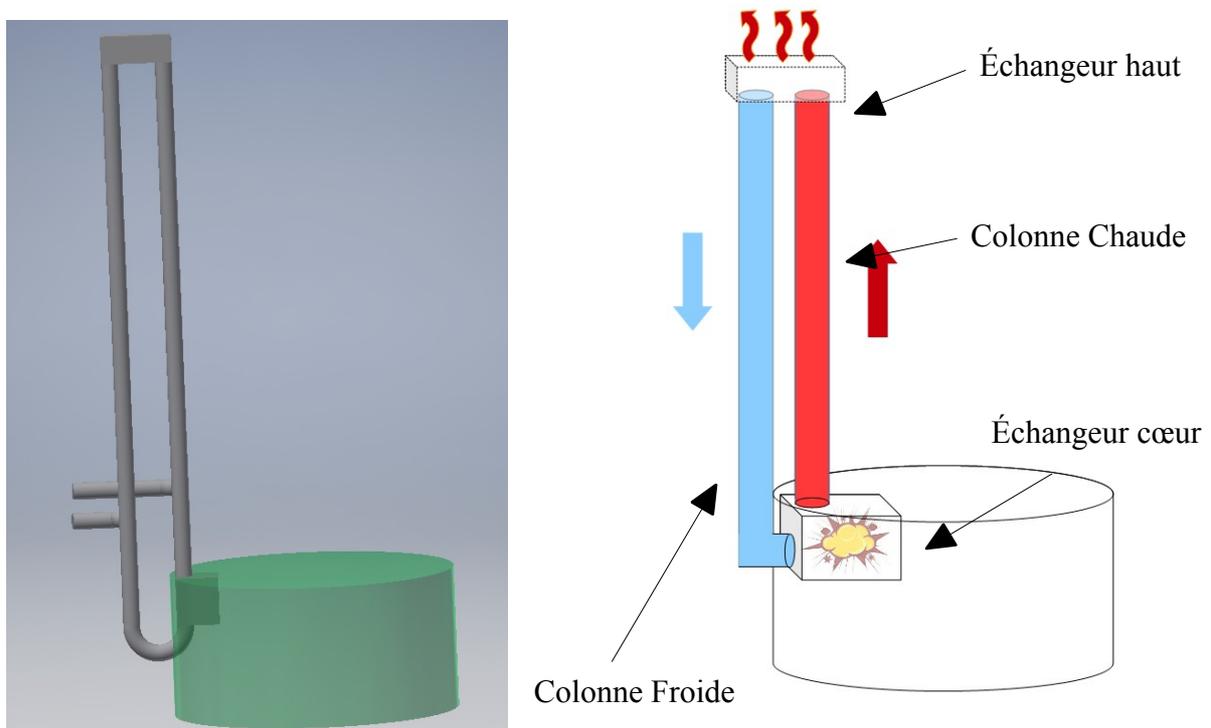


Schéma 2 : modélisation (gauche) et schéma (droite) du cœur et d'un circuit de refroidissement. :

Ce gaz a un trajet en boucle très simple : il passe dans l'échangeur cœur où il est chauffé par les résidus métalliques. Après son augmentation de température, le gaz monte dans ce que l'on appellera une colonne chaude. Au bout de cette colonne se trouve un second échangeur qui servira à extraire l'énergie du gaz caloporteur en le refroidissant et dont la géométrie est libre. Une fois refroidi, le gaz est renvoyé vers l'échangeur cœur grâce à un canal froid. La circulation du gaz dans cette boucle se fait grâce à la différence de pressions entre la colonne chaude et la colonne froide. En effet, la différence de température entre les deux colonnes implique une différence de masse volumique et donc de pression. Cette différence de pression se calcule grâce à l'équation de Pascal :

$$\Delta P = P_{\text{colonne froid}} - P_{\text{colonne chaud}}$$

$$\Delta P = \rho_{\text{colonne froid}} h_{\text{colonne froid}} g - \rho_{\text{colonne chaud}} g h_{\text{colonne chaud}}$$

Avec :

P = pression [Pa]

ρ = masse volumique du fluide [kg/m³]

h = hauteur de colonne [m]

g = constante de pesanteur [m/s²]

La masse volumique dépendant directement de la température, ce paramètre est un point clef de la résolution de ce problème. Pour qu'une circulation soit possible, il faut que la différence de pression ΔP soit égale aux pertes de charge de l'ensemble de la boucle.

b) Pertes de charge

Les pertes de charge sont calculées avec les formules de base de mécanique des fluides et à l'aide d'un coefficient de pertes de charge appelé coefficient de Darcy qui est adimensionnel. Ce dernier dépend du régime d'écoulement du fluide. En effet, la différence entre régime d'écoulements implique l'utilisation de formules différentes. Ce régime est déterminé par un autre nombre adimensionnel, le nombre de Reynolds. Il permet de mesurer l'importance relative du phénomène de convection et de diffusion visqueuse.

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} \quad \text{et} \quad d = \frac{4S}{p}$$

Avec :

Re = nombre de Reynolds

ρ = masse volumique du fluide [kg/m³]

p = périmètre [m]

S = section [m²]

d = diamètre hydraulique du canal [m]

v = vitesse du fluide [m/s]

μ = viscosité dynamique du fluide [Pa.s]

Si $Re < 1000$ alors l'écoulement est laminaire et son coefficient de Darcy est donné par la formule :

$$\Lambda_{\text{Lam}} = \frac{64}{Re}$$

Si $Re > 4000$ alors le régime est turbulent et le nombre de Darcy est égale à :

$$\Lambda_{\text{Turb}} = \left[-1,8 \text{Log}_{10} \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3,7d} \right)^{1,11} \right) \right]^{-2}$$

Avec :

ε = rugosité de la paroi [m]

Dans le cas où $1000 < Re < 4000$, le régime est dit transitoire. Le nombre de Darcy est donc calculé grâce à une pondération des deux régimes. Cette technique permet d'éviter la cassure engendrée par le changement brutal de formule et d'homogénéiser le calcul. Cela se fait avec une formule de la forme :

$$\Lambda_{\text{Trans}} = X\Lambda_{\text{Turb}} + (1-X)\Lambda_{\text{Turb}}$$

Le coefficient de Darcy nous permet maintenant de calculer les pertes de charge de notre circuit. Ces pertes de charge sont une somme des pertes de charge linéaires et singulières. Les pertes de charge linéaires sont engendrées par le frottement du fluide contre les parois, elles dépendent de la formule :

$$\Delta P_{dc \text{ Lin}} = \Lambda \rho \frac{v^2 l}{2d}$$

Avec :

l = longueur de canalisation [m]

d = diamètre hydraulique [m]

v = vitesse [m/s]

Les pertes de charge singulières, elles, sont engendrées par des singularités dans le circuit (ex : coude, changement de diamètre ..) et la formule à utiliser est :

$$\Delta P_{dc \text{ Sing}} = \xi \rho \frac{v^2}{2}$$

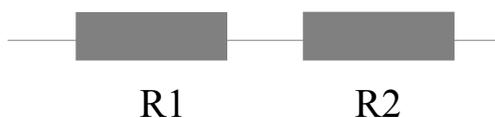
Avec :

ξ = Coefficient de pertes de charge (propre à chaque singularité)

Une fois la partie aéraulique des fluides calculée, nous pouvons commencer les calculs de transferts thermiques. Dans notre cas, seul le transfert par convection et celui par conduction ont une influence sur notre système.

c) Échanges thermiques

Pour calculer le coefficient total, il suffit de sommer le coefficient de transfert par conduction ainsi que celui par convection. Cela est possible car notre cas est une association en série. Une analogie électrique peut être faite avec une association de résistances



$$R_{\text{totale}} = R1 + R2$$

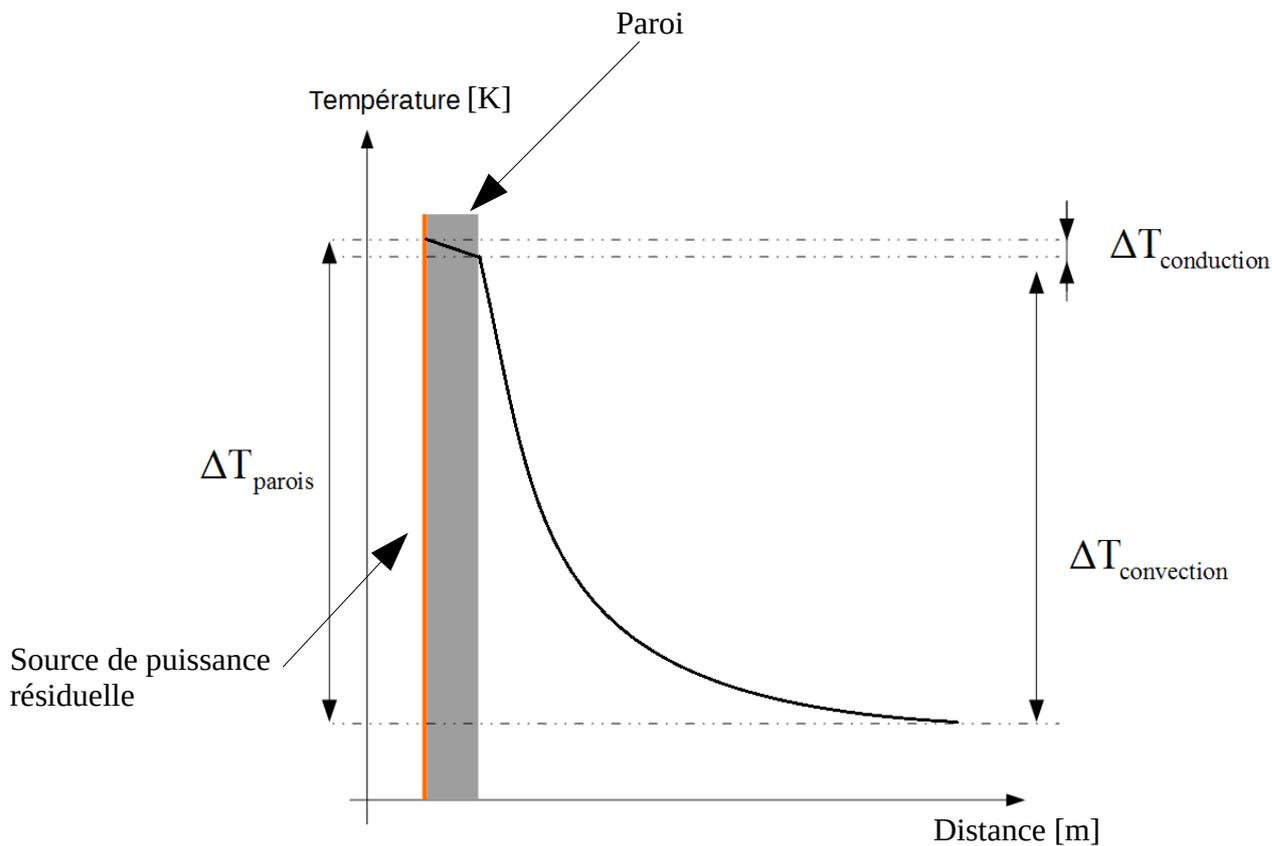


Figure 3: Schéma du profil de température sur une coupe d'un canal de l'échangeur

La figure 3 représente schématiquement l'évolution de la température. On peut voir que la paroi elle-même n'implique pas beaucoup de résistance thermique et que la majorité de la chute de température se fait avec la convection.

Les transferts thermiques par conduction sont résolus par l'équation de base :

$$h = \frac{\lambda}{e}$$

Avec :

h = coefficient d'échange thermique [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

e = épaisseur de la plaque [m]

λ = conductivité thermique [$\text{W}/(\text{m}.\text{K})$]

Pour calculer un coefficient d'échange thermique convectif à partir des corrélations, il est nécessaire de connaître le nombre de Nusselt. La géométrie de l'échangeur cœur étant fixée, les formules utilisées le sont aussi et elles nécessitent le nombre de Reynolds ainsi qu'un nouveau nombre, celui de Prandtl. Le nombre de Prandtl caractérise la diffusion thermique et visqueuse. Il est le résultat de l'opération :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

Avec :

$$Pr = [K^{-1}]$$

μ = viscosité dynamique du fluide [Pa.s]

C_p = capacité calorifique [J/(kg.K)]

λ = conductivité thermique [W/(m.K)]

Le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique, il dépend du régime d'écoulement et donc du nombre de Reynolds. En effet, plus le régime d'écoulement est turbulent, plus il favorise les transferts thermiques convectifs entre le fluide et la paroi. Comme pour les pertes de charge, le nombre de Reynolds nous permet de nous situer dans un régime d'écoulement et ainsi d'utiliser la corrélation correspondante.

Avec un régime d'écoulement laminaire :

$$Nu_{Lam} = 7,54$$

Avec un régime d'écoulement turbulent (Corrélation de Dittus et Boelter) :

$$Nu_{Turb} = 0,0243 Re^{0,8} Pr^{1/3}$$

Pour le régime transitoire, nous utiliserons la même technique qu'avec les pertes de charge. Désormais, nous pouvons calculer le coefficient d'échange thermique convectif h .

$$h = \frac{Nu \lambda}{l}$$

Avec :

h = coefficient d'échange thermique [W/(m².K)]

l = longueur caractéristique [m]

Ce coefficient d'échange thermique lie la puissance aux températures, il est donc très utile dans notre étude.

d) Détermination de la température de plaque coté chaud

Dans cette partie, deux différences de températures ΔT sont à distinguer. Le ΔT_{fluide} qui est la différence de températures du gaz entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, et le ΔT_{parois} qui est la différence entre la température du fluide à la sortie de l'échangeur et celle du côté chaud de la paroi.

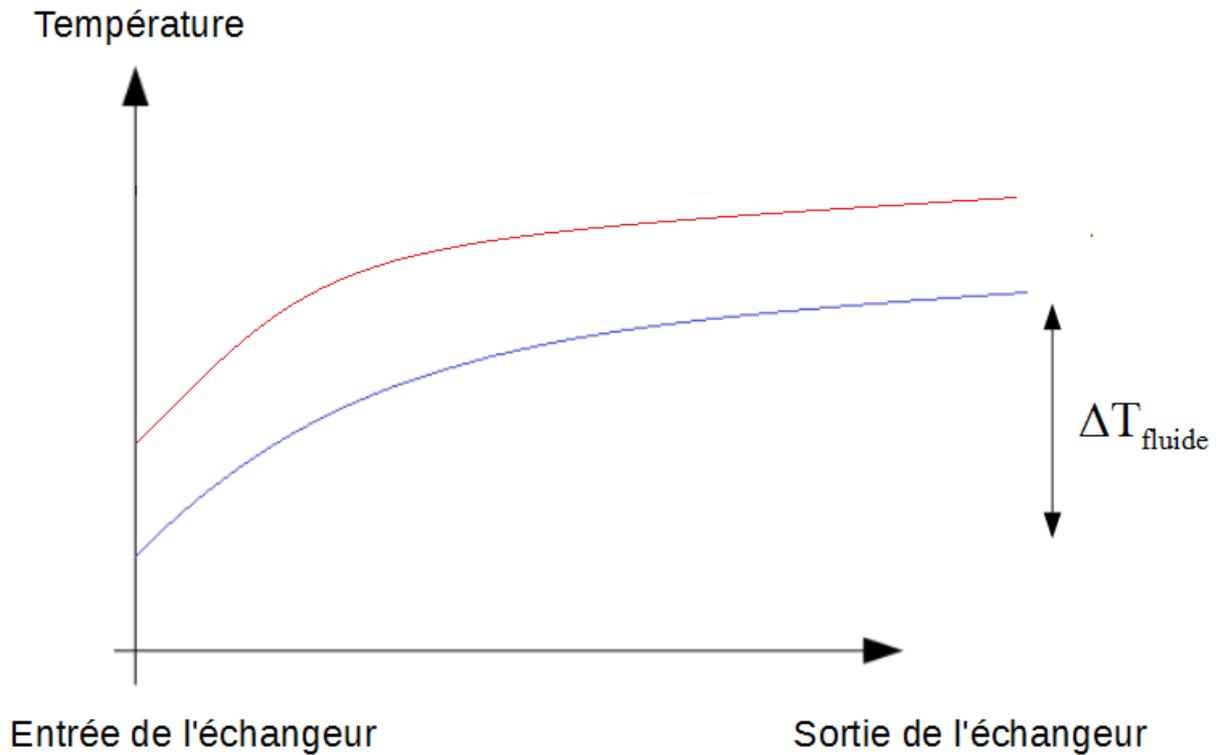


Figure 4 : représentation de l'évolution de la température au sein de l'échangeur cœur

La Figure 4 illustre l'évolution de la température des deux côtés de l'échangeur (en rouge le canal chaud et en bleu le canal froid). Nous constatons que la différence de température est presque constante entre les deux fluides (exemple en figure 6). Cela est dû à l'hypothèse selon laquelle les dépôts sont homogènes sur toute la surface de l'échangeur. La température du fluide froid augmente au fur et à mesure que le fluide avance dans l'échangeur. La température de sortie est régie par le développement de l'équation suivante :

$$Q = m C_p \Delta T_{\text{fluide}}$$

$$T_{\text{sortie}} = T_{\text{entrée}} + \frac{Q}{m C_p}$$

Avec :

Q = puissance à évacuer [W]

m = débit massique [kg/s]

ΔT , T = température [K]

Vient alors le problème le plus complexe : déterminer le débit massique. En effet le débit massique dépend de la différence de masse volumique et donc de la température. Or on peut voir avec l'équation ci-dessus que la température de sortie, qui est donc la température de la colonne chaude, dépend directement du débit massique. On a donc deux grandeurs qui dépendent l'une de l'autre. Pour résoudre cela, on utilise une méthode de dichotomie.

La dichotomie est une technique qui permet d'éviter de parcourir toute une étendue de valeurs pour trouver la bonne. Elle est possible grâce à la programmation et aux boucles. Le programme est écrit de sorte à trouver le débit qui équilibre tout le système. Ce débit nous fournit la température de

sortie de l'échangeur. Nous pouvons désormais déterminer la température de la paroi côté chaud avec la formule qui lie la puissance à la température et aux coefficients de transfert thermique :

$$Q = h S \Delta T$$
$$T_{\text{parois}} = T_{\text{sortie}} + \frac{Q}{hS}$$

Cette température de paroi est le caractère limite de cette étude. En effet, elle ne doit pas dépasser un certain seuil pour pouvoir assurer l'intégrité des capacités mécaniques du matériau utilisé lors de la construction des échangeurs.

6 -Application au problème

a) Description de l'échangeur cœur

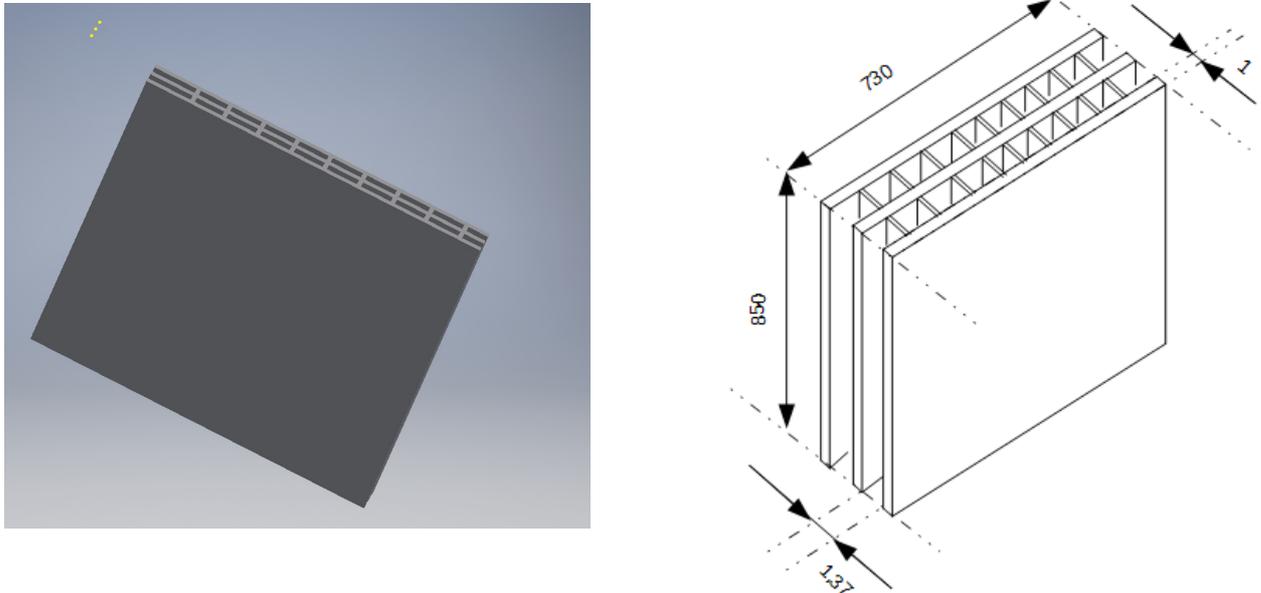


Figure 5 : modélisation (gauche) et schéma coté (droite) d'un échangeur élémentaire

L'échangeur cœur est la pièce centrale de ce système, en effet c'est la seule partie dont la géométrie est imposée pour son utilisation en régime nominal (3GW). En temps normal les côtés froid et chaud voient circuler le sel caloporteur, il permet l'échange entre le cœur du réacteur, où la réaction exothermique a lieu et le circuit intermédiaire. Ils sont décomposés en 16 secteurs, disposés tout autour du cœur. Ils sont tous identiques et sont une première barrière de sécurité contre la radioactivité.

Ce sont des échangeurs à plaques, choisis pour leur compacité et leur efficacité. Ils ont été étudiés par Sophie Roussel lors d'un stage ingénieur chez Framatome en 2017. Chaque échangeur est composé d'« échangeurs élémentaires » (voir Figure 5) Ces échangeurs élémentaires sont plus précisément divisés en plusieurs canaux dans le sens de circulation du fluide en raison des contraintes mécaniques liées à la faible épaisseur des plaques devant leur longueur (deux forme de plaques sont possible, détail caractéristiques annexe 2).

b) Pertes de charge de la boucle

Les pertes de charge de l'ensemble (échangeur + tubes) doivent s'égaliser à la différence de pression des deux colonnes qui fixe le débit de circulation. Nous avons choisi de prendre les pertes de charge totales égales au double des pertes de charge dues à l'échangeur cœur. En effet, l'échangeur du haut n'ayant aucune obligation de géométrie il entraînera forcément moins de pertes de charge, et les pertes de charge dans les tubes ainsi que par les singularités sont incluses dans la marge prise sur les pertes de charge totales

J'ai donc étudié les pertes de charge et les phénomènes physiques d'un canal avant de propager cette

étude sur l'ensemble de l'échangeur. Deux types de plaques sont disponibles dans la géométrie fixée : les plaques lisses, et les plaques corruguées. Ces dernières permettent d'imposer un régime turbulent à bas Reynolds et donc des transferts thermiques plus efficaces à faible vitesse. Le calcul des nombres de Darcy et de Nusselt est fait à partir d'abaques et de corrélations spécifiques aux fluides en phase liquide (développé dans le rapport de Sophie Roussel). Hors, dans le cas présent, le fluide est un gaz. Cette différence est une approximation qui peut être source d'erreurs.

c) Échanges thermiques au sein de l'échangeur

La géométrie de l'échangeur cœur étant fixée, les formules utilisées le sont aussi. On a vu que ces échanges thermiques sont favorisés à grand nombre de Reynolds en raison de la création de turbulences. Or, au sein de l'échangeur, plus le gaz monte en température, plus il se dilate. Le débit volumique augmente à diamètre constant, ce qui accélère la vitesse et donc fait augmenter le nombre de Reynolds. Cela implique que les échanges thermiques ne sont pas linéaires au fil de l'échangeur, et l'utilisation de formule reposant sur les moyennes est donc remise en question car trop approximatif. Pour pallier ce problème, des tranches d'échangeurs ont été créées. En pratique, c'est comme si on avait plusieurs échangeurs en séries, dont la sortie de l'un est l'entrée de l'autre et ainsi de suite. Le calcul sur ces tranches se fait toujours sur la base de moyennes, mais avec l'avantage de prendre en compte le changement d'état du fluide au sein de l'échangeur. Plus le nombre de tranches est élevé, plus les résultats sont précis mais cela rend le calcul plus long.

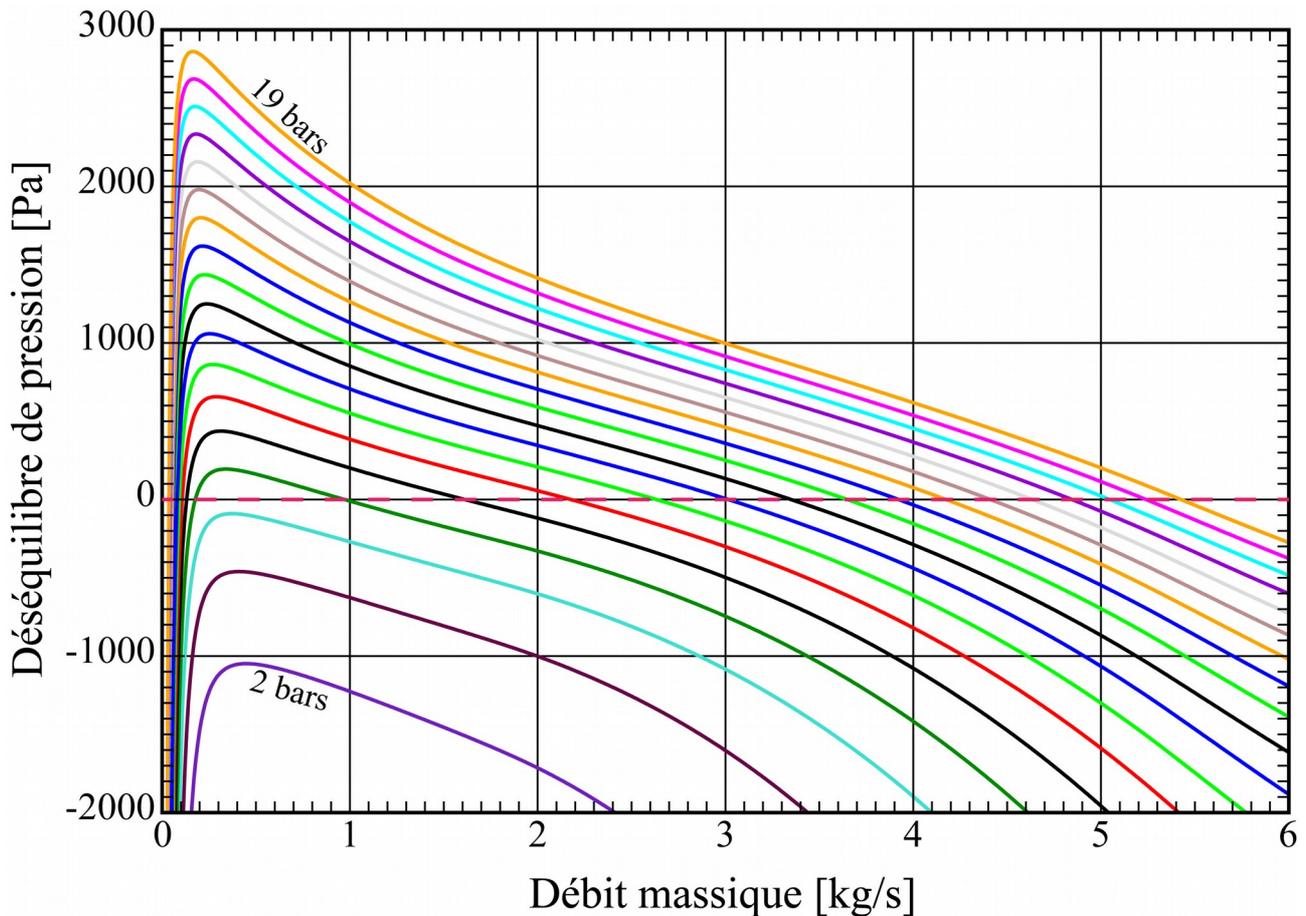
d) Présentation des résultats, discussions

Une plus grande pression interne du circuit augmente le débit massique sans faire varier le volume ce qui permet d'augmenter la capacité calorifique d'un même volume de gaz. La figure 6 nous permet d'analyser le comportement du système, en fonction de cette pression interne.

Le déséquilibre de pression correspond à la différence entre la force moteur (générée par la différence de pression de deux colonnes) et les pertes de charge. Rappel : pour qu'une circulation stable ait lieu, on cherche à ce que ce déséquilibre soit nul. La figure 6 permet d'établir l'existence de deux points de stabilisation si la pression interne est suffisante. Cela ne nous permet de savoir sur le quel de ces points le système se stabilisera. Ce point nécessitera donc une étude spéciale. Le premier à très faible débit implique une ultra haute température de sortie. Ce cas n'est pas analysé dans cette étude car il sort des possibilités physiques de notre problème.

Le second cas renvoie un débit et des températures dont l'ordre de grandeur est adapté au problème. On a donc concentré notre étude sur ce dernier.

On observe aussi que, plus la pression interne est élevée plus le second débit de fonctionnement est élevé. Cela implique une baisse de la température de sortie, température qui ne doit pas dépasser un certain seuil (voir formule 5.d).



*Figure 6 : tracé du déséquilibre de pression en fonction du débit pour plusieurs pressions internes
 $P = 0,5 / H = 20 / \text{Air} / \text{Planes Hastelloy-N}$*

Pour le cas étudié, plusieurs valeurs de jeux de paramètres peuvent varier. Chaque changement de valeur permet d'obtenir une pression interne de circulation nominale, l'objectif étant de la faire diminuer au maximum. Ces valeurs ne sont pas imposées et permettent d'améliorer les résultats. Le programme a été construit de manière à pouvoir utiliser les jeux de paramètres de l'échangeur et de son utilisation afin de pouvoir tester plusieurs configurations et de les comparer entre elles. Les paramètres pouvant varier sont :

- a) - La hauteur des colonnes
- b) - La puissance à évacuer
- c) - La nature du gaz dans le circuit
- d) - Le type d'échangeur

a) La hauteur de colonne possible est de dix mètres, mais peut potentiellement être augmentée à 20 mètres. Une plus haute colonne permet d'augmenter la différence de pression et ainsi d'augmenter les pertes de charge possible dans l'échangeur. Cela implique une augmentation de vitesse et donc de meilleurs transferts thermiques.

b) La puissance à évacuer n'est pas constante dans le temps : en effet, la source d'énergie s'épuise, et on sait que la puissance résiduelle est divisée par deux au bout d'une heure (voir annexe 1). Cette particularité est importante dans le choix des matériaux car ils peuvent supporter des températures supérieures à leur limite nominale mais sur de courtes durées.

c) Trois gaz ont été considérés:

L'air : il est facilement accessible et à des caractéristiques physiques assez intéressantes pour notre étude.

L'hélium : il a une capacité calorifique cinq fois supérieure à l'air ce qui en a fait un concurrent sérieux. Mais sa très faible masse volumique empêche une mise en circulation de gaz en dessous d'une vingtaine de bars, car la pression du moteur n'est pas suffisante devant les pertes de charges. Il n'a donc pas été étudié.

Le xénon : C'est un gaz parfait qui a une masse volumique plusieurs fois supérieure à celle de l'air mais une conductivité thermique plus faible. Malgré cela, les résultats sont intéressants.

d) Pour cet échangeur cœur, deux géométries sont possibles : l'un est constitué de plaques planes en SiC, l'autre de plaques corruguées en Hastelloy-N. Ces deux échangeurs ont donc été évalués et comparés.

Le tableau 1 présente une synthèse des résultats obtenus avec chaque jeu de paramètres. Celui du dessus indique la pression à partir de laquelle une circulation a lieu, sans se préoccuper des limites de températures. Le second lui indique la pression qui donne lieu à une circulation mais en respectant une certaine température limite de parois pour l'Hastelloy-N. En effet, contrairement au SiC, l'Hastelloy-N est un métal dont la limite de température qui doit être prise en compte dans notre problème.

Dans le tableau :

« p max » correspond à la puissance max de 20,25 MW.

« p demi max » correspond à la puissance max divisée par deux.

« H10,H20 » correspondent à la hauteur de colonne : respectivement 10 et 20 mètres.

Les températures limites de l'Hastelloy-N sont de 1200K à « p max » et 1000K à « p demi max ».

	Pression min de fonctionnement [bar]			
	Air		Xénon	
	Hastelloy-N	SiC	Hastelloy-N	SiC
p max, H10	2,5	5	1,9	3,9
p max, H20	1,8	3,6	1,4	2,8
p demi max, H10	1,8	3,7	1,3	2,6
p demi max, H20	1,3	2,6	1	1,9
	Pression de fonctionnement avec température limite [bar]			
	Air		Xénon	
	Hastelloy-N	SiC	Hastelloy-N	SiC
p max, H10	2,7	5	2,2	3,9
p max, H20	1,9	3,6	1,6	2,8
p demi max, H10	2	3,7	1,4	2,6
p demi max, H20	1,4	2,6	1,1	1,9

Tableau 1 : synthèse des pressions de fonctionnement en fonction des paramètres

Le premier tableau donne pour chaque jeu de valeurs de paramètres les pressions internes minimum pour qu'une circulation ait lieu. Dans le second tableau, le paramètre thermique a été ajouté. Le SiC ayant une très bonne résistance à la chaleur, il n'est pas impacté par ce paramètre supplémentaire. L'Hastelloy-N lui, demande de plus fortes pressions internes pour pouvoir respecter ces limites thermiques.

Cette étude permet de mettre en avant un échangeur et un gaz, l'échangeur à plaques corruguées en Hastelloy-N avec du Xénon. Voici un graphique représentant les températures de sortie et de paroi selon la pression du système. Le fait d'augmenter la pression nous permet de faire diminuer les températures de sortie et de paroi. Le graphique en figure 7 représente cette évolution.

Evolution de la température en fonction de la pression

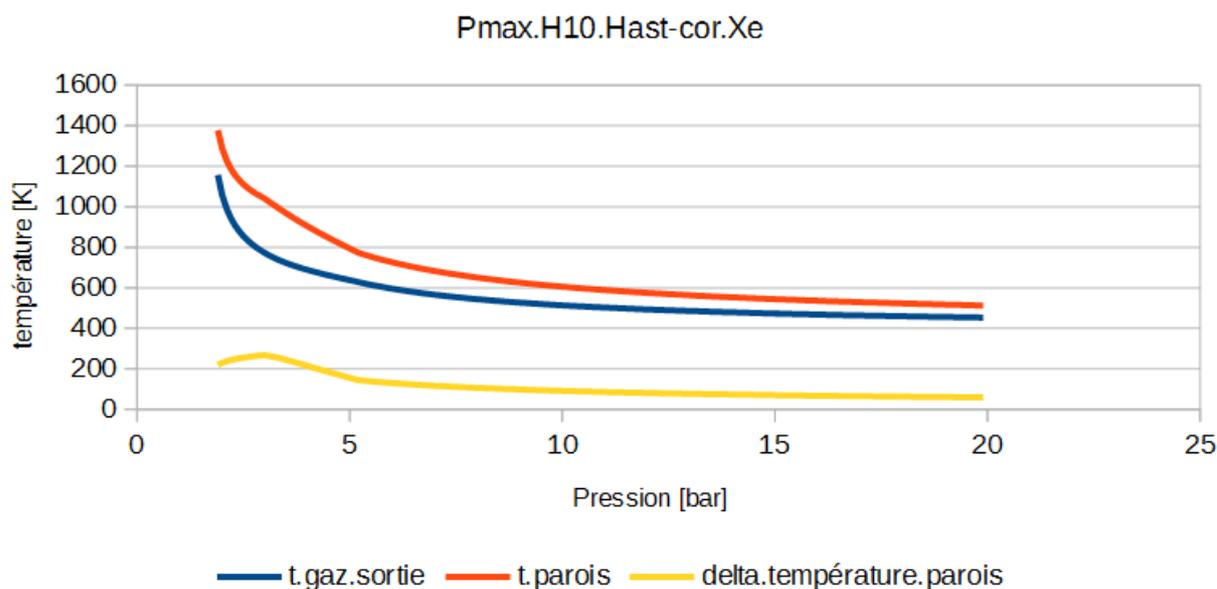


Figure 7 : graphique des températures en fonction des pressions.

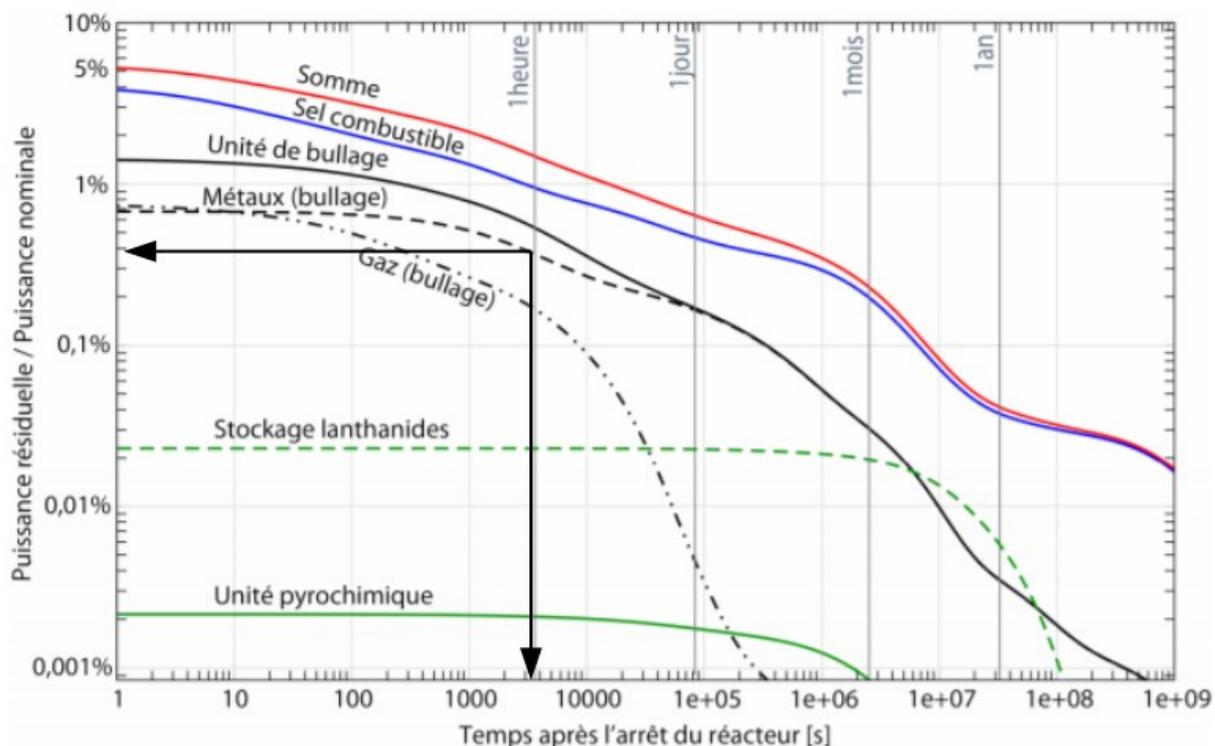
7) Conclusion

Cette étude est incomplète et encore très approximative. Les résultats qu'elle donne sont réalistes à un facteur deux, dû à l'utilisation de température moyenne ou aux corrélations. Beaucoup d'hypothèse sont à ajuster au niveau des pertes de charge mais surtout sur la répartition de la puissance résiduelle. En effet, les dépôts métalliques ont été supposés uniformément répartis sur la surface des échangeurs, hypothèse qui n'est probablement pas vérifiée. Un second point non étudié lors de cette étude est le choix de débit de stabilisation par le système. Une étude complémentaire sera nécessaire pour savoir comment il se stabiliserait puis comment lui imposer qu'il se stabilise au point de fonctionnement étudié. Néanmoins, ces résultats sont encourageants pour lancer une étude plus approfondie de ce système de refroidissement passif, constituant une barrière de sécurité supplémentaire à ce réacteur prometteur.

Pour ma part, cette expérience en laboratoire m'a apporté beaucoup de compétences, que ce soit dans ma réflexion ou dans le domaine technique avec la programmation. Je me dirige aujourd'hui vers un cycle ingénieur avec, je l'espère, une première année dans une section « Valorisation Énergétique » afin de poursuivre mon projet d'engagement dans la transition énergétique.

Annexe

Annexe 1 : Evolution de la puissance résiduelle due aux métaux (courbe noire) en fonction du temps (Sources : Thèse de M. Brovchenko, UGA, 2013)



Annexe 2 : Caractéristiques détaillées des deux géométries d'échangeurs.

	plaques corruguées Hastelloy-N	plaque plane SIC
Nombres d'échangeurs élémentaires	124	75
Nombres de canaux	26	24
Longueur des canaux [m]	0,587	0,769
Epaisseur fluide [m]	0,00201	0,00216
Epaisseur parois [m]	0,00104	0,00287
Largeur des canaux [m]	0,05	0,05
Profondeur totale de l'échangeur [m]	1,297	1,179
Largeur totale de l'échangeur [m]	0,765	0,765
Hauteur totale de l'échangeur [m]	0,652	0,855
Volume de sel combustible [m ³]	0,190	0,149