REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MÉDÉA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière: Génie Mécanique
Spécialité: Énergétiques

Contribution à la simulation numérique d'un écoulement tridimensionnel à travers un assemblage combustible

Présenté par

KHIR SALEH

Proposé et Dirigé par

Dr. HADJAM AHMED

Pr. KORICHI ABDELKADER

Promotion 2020

DÉDICACE

Ce travail est dédié à mes chers parents, mes frères et mes sœurs

REMERCIEMENTS

Je dois tout d'abord remercier **Allah** mon créateur, pour m'avoir donné la force pour accomplir ce travail et de m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir.

Le projet a été réalisé au sein du département de thermohydraulique du Centre de Recherche Nucléaire de Birine (CRNB). Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur **ABDELLANI Idir,** Directeur Général du CRNB, d'avoir accepté de m'accueillir dans son établissement et de mettre à ma disposition tous les moyens nécessaires pour l'accomplissement de ce travail.

Je remercie très chaleureusement le Docteur **HADJAM Ahmed**, Maitre de recherche au CRNB, pour le partage de toute sa compétence, son savoir et ses nombreuses idées, avec confiance. Cette confiance, associée à son soutien et à sa gentillesse, a été un enrichissement incroyable, et pas seulement scientifique.

Mes remerciements vont également à Monsieur **KADOUMA Mourad** Directeur de Division Technologie Nucléaire au CRNB et à Monsieur **BOUAM Abdallah** Chef de Département Thermohydraulique au CRNB d'avoir m'accordé la réalisation de ce projet à cette division.

Je remercie vivement le Professeur **Hamid AIT ABDERRAHIM** Directeur Adjoint du Centre d'Etude Nucléaire de Mol-Belgique et chef du projet du réacteur de quatrième génération MYRRHA, de mettre à ma disposition, via Monsieur HADJAM Ahmed, toutes les données nécessaire jugées utiles de la boucle CALLISTO afin d'accomplir ce travail de Master.

Je remercie très chaleureusement le Professeur **KORICHI Abdelkader**, à l'université Dr. YAHIA Farés du Médéa pour leur bon encadrement, soutiens et formation à distance pendant la durée de stage.

Je saisis l'occasion de remercier tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l'université Dr. YAHIA Farés du Médéa surtout le Chef du département le Docteur **ZIRARI Mounir**, pour son aide et ses conseils précieux dans mon cursus d'étude.

Mes remerciements sont destinés aussi à Messieurs le président et les membres du jury de m'avoir honoré par leur présence pour juger et évaluer mon travail.

Enfin, ma reconnaissance va également à l'équipe de recherche du C.R.N. Birine surtout Monsieur **TAGUEMOUNT Hatem** pour son aide, et à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation et à la simulation tridimensionnelle de l'écoulement et du transfert de chaleur à travers un assemblage d'éléments combustibles d'une boucle d'irradiation dénommée Callisto de type PWR. On a commencé l'étude pour un canal de réfrigération composé d'un seul crayon combustible (UO2+Gap en He et Gaine en Alliage de Zirconium) entouré d'un fluide caloporteur en eau pressurisée. Ensuite, on a étalé l'étude pour un canal composé de deux crayons combustibles, quatre crayons combustibles et enfin neuf crayons combustibles. L'étude a été réalisée par ANSYS-Thermique Stationnaire pour le transfert de chaleur dans le crayon combustible et ANSYS-CFX pour l'écoulement du fluide caloporteur. Les résultats obtenus sont présentés sous formes de contour et de profil de température, de vitesse et de pression. Une comparaison a été faites entre les résultats du codes ANSYS et ceux obtenu via le code système RELAP5 et mesure expérimentale. On a observé une certaine concordance dans les résultats sauf quelques écarts dans le profil radial de la température dans le crayon combustible. Cet écart est dû aux modèles de conduction et de convection utilisé par les deux codes.

Mots Clés : Assemblage combustible, ANSYS-CFX, ANSYS-Thermal Stationnaire, Boucle Callisto de type_ PWR, RELAP5.

ABSTRACT

In this work, we are interested in the three-dimensional modeling and simulation of the flow and heat transfer through a fuel assembly of an irradiation loop called Callisto type PWR. We started the study for a refrigeration channel composed of a single fuel rod (UO2 + He Gap and Zirconium cladding) surrounded by a pressurized water coolant. Then, the study was extended to a channel composed of two fuel rods, four fuel rods and finally nine fuel rods. The study was carried out by ANSYS-Thermal Steady State for heat transfer in the fuel rod and ANSYS-CFX for the coolant flow. The results obtained are presented in the form of contour and profile of temperature, velocity and pressure. A comparison was made between the results of the ANSYS code and those obtained by the RELAP5 system code and experimental measurement. A certain agreement was observed in the results except for a few deviations in the radial temperature profile in the fuel rod. This difference is due to the conduction and convection models used by the two codes.

Key Words: Assembly of fuel, ANSYS-CFX, ANSYS-Thermal Stationnaire, Callisto loop type_PWR, RELAP5.

ملخص

في هذا العمل، نحن مهتمون بالنمذجة الثلاثية الأبعاد لمحاكاة التدفق ونقل الحرارة عبر تجميع عناصر الوقود لحلقة إشعاع تسمى كاليستوا من نوع .PWR أولا نبدأ بدراسة قناة تبريد مكونة من عنصر وقود واحد (UO2+Gap en He et Gaine en Alliage de Zirconium) محاطًا بمبرد ماء مضغوط. بعد ذلك، نقوم بتوسيع الدراسة على قناة مكونة من عنصرين وقود وأربعة عناصر وقود وأخيراً تسعة عناصر وقود عن طريق ANSYS-CFX. وتم في نفس السياق إجراء دراسة بواسطة ANSYS-Thermique Stationnaire لنقل الحرارة داخل عنصر الوقود. يتم تقديم النتائج التي تم الحصول عليها في شكل رسوم بيانية ومخططات لتعريف لدرجة الحرارة والسرعة والضغط. تم إجراء مقارنة بين نتائج كود ANSYS وتلك التي تم الحصول عليها عن طريق كود نظام RELAP5 والقياس التجريبي. لوحظ بعض التوافق في النتائج باستثناء بعض الانحرافات في المخطط البياني لدرجة الحرارة القطرية داخل عنصر الوقود. يرجع هذا الاختلاف إلى نماذج التوصيل والحمل الحراري التي يستخدمها الرمزان.

الكلمات المفتاحية: تجميع عناصر وقود، ANSYS-CFX،ANSYS-Thermal Stationnaire ، حلقة كاليستوا من نوع PWR، RELAP5.

SOMMAIRE

DÉDICACE i
REMERCIEMENTS ii
RÉSUMÉ iii
INTRODUCTION GÉNÉRALE 14
CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE 18
I.1- INTRODUCTION 19
I.2- ÉNERGIE NUCLEAIRE 19
I.2.1- DESCRIPTION DE LA REACTION DE FISSION 20
I.2.2- PRODUITS DE FISSION 22
I.3- CLASSIFICATION DES REACTEURS : 23
I.3.1- REACTEUR DE PUISSANCE 23
I.3.2- RÉACTEUR DE RECHERCHE 25
I.4- RÉACTEUR NUCLEAIRE A EAU PRESSURISÉE 26
I.4.1- DESCRIPTION GÉNÉRALE 26
I.4.2- CIRCUIT PRIMAIRE 28
I.4.3- CIRCUIT SECONDAIRE 31
I.4.4- CIRCUIT TERTIAIRE 31
I.4.5- LES CIRCUITS DE SAUVEGARDE 31
I.4.6- LES BARRIERES DE CONFINEMENT 31
I.5- LES MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR 32
I.5.1- INTRODUCTION 32
I.5.2- CHAMP DE TEMPERATURE 32
I.5.3- GRADIENT DE TEMPERATURE 33
I.5.4- FLUX DE CHALEUR 33
I.5.5- FORMULATION D'UN PROBLEME DE TRANSFERT DE CHALEUR 34
I.6- TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION en nucleaire 37
I.6.1- INTRODUCTION 37
I.6.2- EQUATION DE LA CHALEUR 38
I.6.3- DISTRIBUTION DE TEMPÉRATURE DANS UN ÉLÉMENT COMBUSTIBLE 39
I.6.4- DISTRIBUTION DE TEMPÉRATURE DANS UNe GAINE DE COMBUSTIBLE 40
I.6.5- INTÉGRATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE 41
I.7- TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION 43
I.7.1- INTRODUCTION 43

I.7.2- COUCHES LIMITES 44
I.7.3- ANALYSE DIMENSIONNELE 45
I.7.4- CONVECTION FORCÉE 48
I.7.5- CONVECTION NATURELLE 49
I.8- PERTE DE CHARGE 50
I.8.1- PERTES DE CHARGE SINGULIERES 50
I.8.2- PERTES DE CHARGES LINEAIRES 51
I.9- CONCLUSION 51
CHAPITRE II : DESCRIPTION DE LA BOUCLE D'ESSAI CALLISTO 52
II.1- INTRODUCTION 53
II.2- DESCRIPTION DE LA BOUCLE D'ESSAI CALLISTO 53
II.2.1- GÉNÉRALITES 53
II.3- DESCRIPTION DE LA SECTION EN PILE : 54
II.3.1- DESCRIPTION DES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UNE I.P.S 56
II.4- MODELE RELAP5 DE LA BOUCLE CALLISTO ET SIMULATION A L'ETAT STATIONNAIRE 56
II.4.1- INTRODUCTION 56
II.4.2- PROCEDES DE MODELISATION 57
II.4.1- MODELISATION DES STRUCTURES DE CHALEUR DES TROIS I.P.SS. 59
II.5- CONCLUSION : 60
CHAPITRE III : MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUES 61
III.1- INTRODUCTION 62
III.2- MODELISATION DE L'ECOULEMENT DES FLUIDES : 63
III.2.1- EQUATION DE CONTINUITE 63
III.2.2- EQUATIONS DE QUANTITE DE MOUVEMENT 63
III.2.3- ÉQUATION DE L'ENERGIE 64
III.2.4- MODELE DE TURBULENCE 64
III.3- MODELESATION NUMERIQUE 67
III.3.1- METHODES DE DISCRETISATION DES EDP : 67
III.3.2- PRINCIPE DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS : 68
III.3.3- FORME GENERALE DES EQUATIONS DU SYSTEME [34] 69
III.4- ENVIRONNEMENTS LOGICIELS 69
III.4.1- PRE PROCESSING 70
III.4.2- LA RESOLUTION 70
III.4.3- POST PROCESSING 70

III.5- STRUCTURE DU CODE ANSYS-CFX 70
III.5.1- CFX-PRE 71
III.5.2- CFX-SOLVER 72
III.5.3- CFX-POST 72
III.6- ANSYS-ICEM-CFD 72
III.7- MISE EN ŒUVRE NUMERIQUE : METHODOLOGIE 73
III.7.1- REPRESENTATION GEOMETRIQUE DU DOMAINE 73
III.7.2- REPRESENTATION DU MAILLAGE DU DOMAINE 78
III.8- SIMULATION NUMERIQUE 81
III.8.1- INTRODUCTION 81
III.8.2- CONDITIONS AUX LIMITES 81
III.8.3- CRITERES DE CONVERGENCE 84
III.9- CONCLUSION 84
CHAPITRE IV : DISCUSSION DES RESULTATS 85
IV.1- INTRODUCTION 86
IV.2- RÉSULTATS 87
IV.2.1- PROFIL DE TEMPÉRATURE DANS L'ELEMENT COMBUSTIBLE 87
IV.2.2- RÉSULTATS DE L'ECOULEMENT DU FLUIDE 87
IV.2.3- PROFIL RADIALE GLOBALE DE LA TEMPERATURE DANS LE CANAL DE REFRIGERATION 93
IV.3- COMPARAISON DES RESULTATS 93
IV.3.1- PROFIL RADIAL DE LA TEMPERATURE OBTENU PAR LE CODE RELAP 5 94
IV.3.2- COMPARAISON DU PROFIL RADIAL DE LA TEMPERATURE 94
IV.3.3- COMPARAISON DU PROFIL AXIAL DE LA TEMPERATURE 96
IV.3.4- COMPARAISON DU PROFIL AXIAL DE LA PRESSION 96
IV.4- RESULTATS DES DIFFERENT CANAUX 97
IV.4.1- CANAL COMPOSE DE DEUX ELEMENTS COMBUSTIBLES 97
IV.4.2- CANAL COMPOSE DE QUATR ELEMENTS COMBUSTIBLES 98
IV.4.3- CANAL COMPOSE DE NEUF ELEMENTS COMBUSTIBLES 99
IV.5- CONCLUSION 101
CONCLUSION GÉNÉRALE 102
BIBLIOGRAPHIE 105
ANNEXE 108

Tableau I-1: Différents types de réacteurs de puissance 25
Tableau I-2: Conductivité thermique du UO_2 à 95% de densité théorique 42
Tableau I-3: Conductivité thermique du Zircaloy. 43
Tableau I-4: Ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection 44
Tableau III-1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les 69
Tableau III-2 : Données Géométriques du domaine Etudié 76
Tableau III-3 : Diférentes caractéristique de chaque matériau. 81
Tableau III-4 : récapitulaltion des conditions aux limites et initiales imposées au domaine. 83

Figure I-1: Réaction de fission 20
Figure I-2 : Réaction en chaîne 22
Figure I-3 : Site industriel D'un réacteur de puissance 24
Figure I-4 : Principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire 24
Figure I-5 : composantes d'une réacteur de recherche 26
Figure I-6 : Schéma descriptif d'une centrale nucléaire à eau pressurisée avec aéroréfrigérant 27
Figure I-7: Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire avec aéroréfrigérant. 28
Figure I-8: Cuve avec assemblage 17x17 d'un REP. 29
Figure I-9: Les barrières de confinement 32
Figure I-10 : gradient de température. 33
Figure I-11: System et Bilan énergétique. 34
Figure I-12: Schéma du transfert de chaleur convectif 35
Figure I-13: transfert de chaleur radiatif 36
Figure I-14 : Volume de control dx dy dz, conduction en coordonnées cartésienne. 38
Figure I-15 : Écoulement laminaire dans une conduite. 43
Figure I-16 : Écoulement turbulent dans une conduite. 44
Figure I-17 : Schématisation du développement d'une couche limite dynamique sur une plaque plane. 45
Figure I-18 : Schématisation de la couche limite thermique sur une plaque plane 45
Figure I-19 : Représentation schématique de la convection forcée. 48
Figure I-20: Principe physique de la convection naturelle. 49
Figure II-1 : Photo aérienne du parc du réacteur de recherche BR2. 53
Figure II-2 : Schéma synoptique des canaux du réacteur BR2 54
Figure II-3 : Schéma descriptif du cœur du réacteur BR2. 54
Figure II-4 : Schéma descriptif de la boucle CALLISTO. 55
Figure II-5 : Schéma descriptif du panier d'irradiation des crayons combustibles. 55
Figure II-6 : Modèle RELAP5 de la boucle CALLISTO. 58
Figure II-7 : Modèle RELAP5 de la section d'essai on pile (IPS). 58
Figure II-8 : Discrétisation géométrique de l'élément combustible. 59
Figure II-9 : Profile radiale de température dans l'élément combustible. 60
Figure III-1 : Structure du code ANSYS CFX 71
Figure III-2 : Surfaces limitant la géométrie du domaine de calcul par ANSYS CFX-PRE. 71
Figure III-3 : Interface graphique de l'ANSYS ICEM CFD 73
Figure III-4 : Représentation tridimensionnelle de la géométrie du canal de réfrigération. 74
Figure III-5 : Représentation de la géométrie en 2D avec le dimensionnement du domaine. 75

Figure III-6 : Différents composants du domaine. 75
Figure III-7 : Canal de réfrigération comportant deux éléments combustibles. 76
Figure III-8 : Canal de réfrigération comportant quatre éléments combustibles. 77
Figure III-9 : Canal de réfrigération comportant neuf éléments combustibles. 77
Figure III-10 : Maillage d'un élément combustible. 78
Figure III-11 : Maillage d'un canal de réfrigération pour un élément. 79
Figure III-12 : Maillage d'un canal de réfrigération pour deux éléments combustibles. 79
Figure III-13 : Maillage d'un canal de réfrigération pour quatre éléments. 80
Figure III-14 : Maillage d'un canal de réfrigération pour neuf. 80
Figure III-15 : Module de l'ANSYS-Thermique Stationnaire pour la simulation du transfert de chaleur au sein du crayon combustible. 81
Figure III-16 : Modèle CFX du calcul thermohydraulique du canal de réfrigération 82
Figure IV-1: Modèle de calcul sous ANSYS-WORKBENCH-CFX-Thermique Stationnaire 86
Figure IV-2: Profil radial de la température dans l'élément combustible obtenu par le code ANSYS-Thermique Stationnaire pour différentes zones selon l'axe Z : z=0m, z=0.25m z=0.5m z=0.75m et z=1m. 87
Figure IV-3: Contour de température dans le réfrigérant. 88
Figure IV-4: Variation axiale de la température du réfrigérant selon plusieurs zones radiale. 88
Figure IV-5: Profil radial de la température dans le réfrigérant pour différentes zones selon l'axe Z : z=0m, z=0.25m z=0.5m z=0.75m et z=1m. 89
Figure IV-6: Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 90
Figure IV-7: (a)-Variation axiale de la vitesse D'écoulement sur des lignes radiales. (b)- Contour de vitesse dans le plan z=1 m. 90
Figure IV-8: Contour de pression en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 92
Figure IV-9: Variation axiale de la pression du réfrigérant. 92
Figure IV-10: Profil radial de température global dans le canal de réfrigération 93
Figure IV-11: Profil radiale de la température dans le crayon combustible obtenu par le code RELAP5. 94
Figure IV-12: comparaison le calcul numérique via les deux codes RELAP5 et ANSYS-Thermique Stationnaire de la distribution radiale de la température dans le crayon combustible 95
Figure IV-13: Variation axiale de la température de la gaine en comparaison avec le résultat du code RELAP5. 96
Figure IV-14: Variation axiale de la pression en comparaison avec les données expérimentales 96
Figure IV-15: Contour de température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 97
Figure IV-16: Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 98
Figure IV-17: Contour de température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 98
Figure IV-18 : Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 99

Figure IV-19 : Vecteurs de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 99
Figure IV-20 : Contour de Température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 100
Figure IV-21 : Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m. 100
Figure : Schéma de couplage entre Thermique Stationnaire et CFX à travers la plateforme Workbench. 104

Notation	Signification	Unité
E	Énergie cinétique **d'Einstein**	J
C	La célérité de la lumière dans le vide C=3.10^8	$m.s^{-1}$
m_p, m_n, m_x	La masse du proton, neutron et du noyau.	Kg
E_L	L'énergie de liaison	J
Z	Nombre de protons	
A	Nombre de nucléons	
α	La diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
$\emptyset$	Densité de flux de chaleur	$W.m^{-2}$
Q	Quantité de chaleur	J
t	Le temps	s
φ	Flux de chaleur	w
S	Aire de la section	m^2
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W.m^{-2}.°C^{-1}$
T	Température	°C ou °K
σ	Constante de Stefan Boltzmann $5,67.10^{-8}$	$W.m^{-2}.K^{-4}$
ε_P	Facteur d'émission de la surface	
$\dot{m}$	Débit massique	$Kg.s^{-1}$
C_p	Chaleur spécifique	$J.°K^{-1}.Kg^{-1}$
ρ	Masse volumique	$Kg.m^{-3}$
$\dot{q}$	Densité volumique d'énergie générée	$W.m^{-3}$
V	Volume	m^3
U	Vitesse moyenne du fluide	$m.s^{-1}$
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
g	Gravité 9.81	$m.s^{-2}$
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
β	Coefficient d'expansion volumique.	$°K^{-1}$
J_s	Pertes de charge singulières	$J.kg^{-1}$
J_l	Pertes de charge linéaire	$J.kg^{-1}$
K_s	Coefficient de Pertes de charge singulières	

K_l	Coefficient de Pertes de charge linéaire	
SST	Shear Stress Transport	
K-ω et K-ε	Modèles de turbulence à 2 équations	
ε	Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-2}$
ω	Le taux de dissipation spécifique par unité d'énergie cinétique turbulente	$m^3.s^{-1}$
k	Energie cinétique de turbulence	$m^2.s^{-2}$
μ_T	La viscosité dynamique de turbulence	Pa.s
P_k	Caractérise la génération d'énergie cinétique turbulente	
G	La génération d'énergie cinétique turbulente ou de la dissipation effective	
Γ_k , Γ_ω	La diffusivité effective de $(k \; et \; \omega)$	
Y_k , Y_ω	La dissipation de $(k \; et \; \omega)$ par la turbulence	
CALLISTO	Capability of Lwr Irradiation in Steady and Transient Operations	
BR2	Belgian Reactor 2	
PWR	Pressurized Water Reactor	
IPS	In Pile Section	
RELAP5/MOD3.2	Reactor Excursion and Leak Analysis Program	
SCRAM	Safety Control Rode Action Men	
MDF	Méthodes Des Différences Finies	
MEF	Méthodes Des Eléments Finis	
MVF	Méthodes Des Volumes Finis	
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations	
MFN	Mécanique Des Fluides Numérique	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
MOX	Mixed Oxydes	
Mev	méga électron volte	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la découverte de la fission nucléaire en 1938, les scientifiques se sont fortement intéressés à cette propriété de la matière qui, bien maîtrisée, permet de produire une grande quantité d'énergie pouvant être convertie en électricité dans des réacteurs nucléaires de puissance. Mais, parallèlement, les réacteurs de recherche ont vu leur utilisation étendue à bien d'autres domaines tels que : la production de flux neutronique, l'analyse par activation neutronique, dopage du silicium,….etc. Le développement de l'utilisation de cette forme d'énergie au cours du temps a nécessité de nombreuses études et expériences, très largement menées à l'aide de réacteurs de recherche, boucles d'expérimentation indispensables pour l'acquisition des connaissances et le développement des techniques nécessaires à la conception et à l'exploitation, la compréhension des phénomènes mis en jeu et pour la validation et la qualification des codes de calcul, à étudier et à qualifier le comportement sous irradiation des matériaux de structure et des combustibles, dans des conditions de sûreté satisfaisantes.

Parmi ces boucles expérimentales, on trouve la boucle CALLISTO se trouvant en Belgique au Centre d'Etude Nucléaire de Mol. Cette boucle d'essais en pile, CALLISTO [1], à eau pressurisée, est destinée principalement aux tests d'irradiation des crayons combustibles dans les canaux du réacteur de recherche BR2 et la réalisation d'expériences des transitoires de puissance et des essais de sûreté [2].

En général, les analyses de sureté sont réalisées à l'aide des codes de calculs sophistiqués et de différents types qui peuvent être catégorisés en six grandes familles [3]:

a. Code de physique des réacteurs (reactor physics code).

b. Code de comportement du combustible (fuel behaviour code).

c. **Code de thermohydraulique (thermalhydraulic codes).**

d. Code de confinement (containment analysis codes).

e. Codes de dispersion atmosphérique et de calcul de dose (Atmospheric dispersion and dose codes)

f. Codes de génie civil et de structures (Structural codes).

L'analyse thermohydraulique des réacteurs de puissance et de recherche est effectué par des codes systèmes tels que : RELAP5, APROS, CATHARE, etc. [4]. Ces codes sont fondés sur des modèles à deux fluides à six équations. Les modèles de transfert interfaciaux de masse de quantité de mouvement et d'énergie en milieu gaz-liquide se sont appuyés sur des corrélations expérimentales

appliquées à des écoulements plus ou moins compliqués et dont le domaine de validité est limité. Ainsi ces modélisations essentiellement monodimensionnelles ne permettent pas d'évaluer finement les paramètres thermohydrauliques importants tels que la distribution tridimensionnelle de la température et de la pression. Ces deux grandeurs sont identifiées comme étant les paramètres dominants des chargements thermohydrauliques en situation accidentelle. Pour une analyse fine et complémentaire, l'utilisation des codes CFD nous permettra d'analyser finement et localement et une meilleure description à trois dimensions de différentes régions d'un système ou d'un circuit et renseignent sur les phénomènes localisées qui sont occultés (approximations ou corrélations) dans les codes systèmes tels que les débits localisés [4], les transferts de chaleur en des points spécifiques (partition de flux de chaleur par exemple), les transferts de chaleur entre le combustible nucléaire et le fluide, de mieux comprendre les principaux mécanismes de transfert (convectif, radiatif, diphasique) au sein de l'écoulement vapeur-gouttes le long de l'élément combustible, l'interaction fluide-structure, l'étude du phénomène du jet liquides libres suite à une injection de sécurité,……etc. De plus, une nouvelle tendance pour l'utilisation des codes CFD couplés avec des codes systèmes est en voie de développement et de validation [3].

À travers ce mémoire, on propose de compléter l'étude thermohydraulique réaliser avec le code système RELAP5 par une modélisation géométriques tridimensionnels via le code CFD (Computational Fluid Dynamics) ANSYS-CFX et ANSYS-Thermique Stationnaire afin d'examiner en 3D l'écoulement du réfrigérant à travers un canal de réfrigération composé de neuf crayons combustible et de s'affranchir aux corrélations empiriques utilisées dans la simulation par le code système RELAP5.

L'utilisation de la CFD dans les analyses de sureté des réacteurs nucléaires est largement recommandée par l'Agence internationale de l'énergie atomique [3].

Le présent mémoire est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur l'énergie nucléaire et les différents réacteurs qu'existe à travers le monde en se basant sur la filière des réacteurs à eau sous-pression. Puis nous avons présenté les différents modes du transfert de chaleur en se basant sur celui de la convection thermique forcée et la conduction dans la structure.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la boucle d'essai en pile (IPS), Callisto à eau pressurisée de réacteur de recherche BR2.

- Le troisième chapitre présente les formulations mathématiques nécessaires. Il s'agit donc de l'établissement des équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et l'équation d'énergie. Ainsi que les caractéristiques géométriques d'un canal de réfrigération autour d'un assemblage combustible. Puis on va présenter le maillage et la simulation par logiciel (ANSYS-ICEM-CFX-Thermique Stationnaire) de l'écoulement du fluide.
- Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation et l'interprétation.

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- INTRODUCTION

L'énergie produite dans un réacteur nucléaire par la fission en chaine des atomes de l'uranium 235 et le plutonium 239, au sein d'un élément combustible, sous forme de chaleur est évacuée du combustible par conduction. Les éléments combustibles sont groupés en assemblages et placés dans des canaux dans lesquels circule un fluide caloporteur pour évacuer l'énergie hors du réacteur. Dans un réacteur à eau pressurisée, l'énergie est évacuée hors du cœur par convection forcée. Cette énergie est cédée à un fluide secondaire au niveau d'un générateur de vapeur puis à la tour de refroidissement.

Les réacteurs nucléaires ont pour objectif de [5]:

- La production de l'énergie électrique.
- La conversion de ^{238}U en ^{239}Pu pour la fabrication des armes nucléaires.
- La recherche scientifique.
- La production de radio-isotopes utilisés en médecine.
- La propulsion des navires et des sous-marins.

Dans ce chapitre on donne une description générale sur les déférents circuits thermohydraulique d'une centrale nucléaire à eau pressurisée et un bref rappel sur les modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé.

I.2- ÉNERGIE NUCLEAIRE

L'origine de l'énergie nucléaire c'est la fission des noyaux lourde comme l'uranium 235 ou le plutonium 239. Ou la fusion des atomes légère comme l'hydrogène. On prend la réaction de fission qui se produit au cœur du réacteur qui est le site d'une libération d'énergie nucléaire.

L'utilisation de l'uranium naturel qui est présent dans l'écorce terrestre n'est constitué que de trois isotopes : l'uranium 238, le plus lourd atome naturel et le plus abondant (99,28%), l'uranium 235 (0,71%) ainsi que des traces d'uranium 234 (0,006%) [6], on s'intéresse au 0.7% de l'uranium 235, ce dernier seul étant pratiquement fissile, mais on peut soit procéder à un enrichissement isotopique en l'uranium 235 à partir de cet uranium naturel, soit par irradiation dans les réacteurs eux même de l'uranium 238 ou TH232 produire de PU239 ou de U233 qui sont fissiles et chimiquement séparables de l'uranium et thorium.

I.2.1- DESCRIPTION DE LA REACTION DE FISSION

Nous appelons réaction de fission, lorsqu'un neutron entre en collision avec le noyau atome lourd et le diviser en deux fragments plus légers. Cette réaction nucléaire Comme il est illustré sur la figure ci-dessous de la réaction de fission se traduit aussi par l'émission de neutrons (2 ou 3) et la libération d'énergie sous forme de chaleur très importante (≈ 200 MeV) [7].

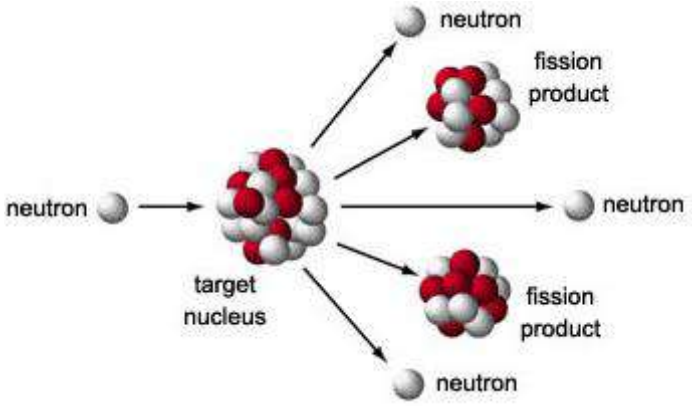


Figure I-1: Réaction de fission

Lors de la réaction de fission, le nombre total des nucléons est conservé, mais la somme des masses des nucléons est toujours inférieure à la masse du noyau atomique. La disparition de la masse engendre l'éjection des particules avec une énergie cinétique. Cela s'explique par le fait qu'une partie de la masse est transformée en énergie cinétique, ce qui est prouvé par la fameuse équation d'équivalence masse-énergie **d'Einstein** [8]:

$$E = m.c^2$$

En effet, cette énergie libérée correspond à l'énergie de liaison, qui assure le maintien de la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau.

L'énergie de liaison s'écrit [8]:

$$E_L = \Delta m.C^2$$

Avec :

Δm : représente défaut de masse.

Avec : $\Delta m = Z.m_p + (A - Z).m_n - m_x.$

- m_p : la masse du proton.
- m_n : la masse du neutron.

- m_x : la masse du noyau.

C : représente la célérité de la lumière dans le vide ($C=3.10^8$ m.s^{-1}).

Equation générale de la réaction de fission de l'uranium 235 est de ce type [7]:

$$^1_0n + ^{235}_{92}U \rightarrow X + Y + k.\,^1_0n + \Delta Q$$

- X et Y : étant deux noyaux fils et généralement radioactifs, on les appelle : des produits de fission.
- *k* : nombre de neutrons émis ~ 2-3.
- ΔQ : énergie thermique importante libérée ~ 200 MeV (1 MeV = 1.609 x 10^{-13} J).

On distingue classiquement deux types de neutrons issus de la réaction de fission [7]:

- **Les neutrons rapides** : sont caractérisés par une très grande vitesse (20 000 km/s). Leur énergie est importante de l'ordre de 2 millions d'électronvolts, ils traverseront le noyau d'uranium sans être capturé.
- **Les neutrons thermiques** : également appelés neutrons lents sont caractérisés par une vitesse de l'ordre de 2 à 3 km/s. Leur énergie est faible, inférieure à 1 électronvolt, grâce à leur collision avec les noyaux légers (hydrogène) du modérateur utilisé dans un réacteur nucléaire. Les neutrons relativement lents (thermiques) qui ont plus de probabilité d'une réaction nucléaire de se produire.

Les 2 ou 3 neutrons thermiques libérés de la réaction de fission vont déclencher à leurs tours d'autres fissions par le bombardement des autres noyaux d'uranium. La réaction nucléaire se produit ainsi de suite : c'est la réaction en chaîne comme indiqué ci-dessous :

La réaction en chaîne est contrôlée par la présence d'une petite quantité de neutrons retardés (2 ou 3) issus de la fission. Cette réaction en chaîne capable de dégager de grandes quantités d'énergies et de chaleur. À partir de là, c'est le rôle de la centrale nucléaire de transformer cette chaleur en électricité [7].

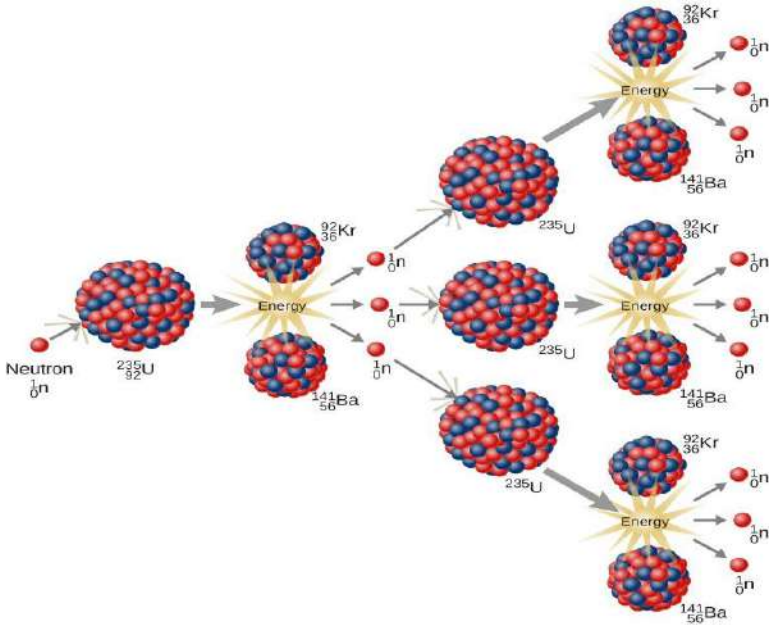


Figure I-2 : Réaction en chaîne

I.2.2- PRODUITS DE FISSION

Les produits de fissions sont les éléments qui se situent à peu près au milieu du Tableau Périodique des Eléments (Tableau de Mendeleïev), dont le nombre de nucléons autour de A=95 pour l'un des fragments (Brome (Br), strontium (Sr), Krypton (Kr), Zirconium (Zr)) et autour de A=139 pour l'autre (Iode (I), Césium (Cs), Xénon (Xe), Baryum (Ba). Mais la nature probabiliste de la réaction fait qu'il existe plusieurs centaines de combinaisons possibles de fissions du noyau d'uranium. Ainsi parmi les multitudes possibilités de réactions de fissions d'uranium-235, on distingue les réactions générales suivantes [7]:

^{235}U + neutron → ^{93}Kr + ^{140}Ba + 3 neutrons + *hv*.

^{235}U + neutron → ^{90}Kr + ^{144}Ba + 2 neutrons + *hv*.

^{235}U + neutron → ^{94}Sr + ^{140}Xe + 2 neutrons + *hv*.

^{235}U + neutron → ^{94}Zr + ^{139}Te + 3 neutrons + *hv*.

Dans chacune de ces réactions, le nombre total de nucléons (protons + neutrons) est conservé : 235+1 = 93+140+3, etc.

L'énergie qui accompagne cette réaction est libérée sous forme [5]:

- D'énergie cinétique des fragments de fission de 168 Mev.
- D'énergie cinétique des neutrons émis de 5 Mev.
- D'énergie de rayonnement γ qui sont émis par le noyau fissile à l'instant même de la réaction (prompt) de 7 Mev.
- D'énergie des rayonnements émis lors de désintégration des produits de fission :
  - Rayonnement β de 8 Mev.
  - Rayonnement γ de 7 Mev.
  - Neutrinos (qui s'accompagnent la désintégration β) de 12 Mev.
  - Capture radiative (n, γ) de 3 à 12 Mev.

Au totale, une énergie de 198 à 207 Mev est dégagée au cours d'une réaction, environ 90% de cette énergie est libérée dans le combustible et environs 5% dans le modérateur, les 5% restant sont produite dans les réflecteurs et les écrans biologiques. La majeure partie de l'énergie produite au cours de la fission est convertie en chaleur dans diverses parties du cœur [5].

I.3- CLASSIFICATION DES REACTEURS :

I.3.1- REACTEUR DE PUISSANCE

I.3.1.i- DÉSCRIPTION

Un réacteur de puissance est un site industriel regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité comme illustré sur la Figure I-3. Dans le cœur, sous l'effet d'une collision avec un neutron, le noyau atomique de certains gros atomes, dits fissiles, peut se casser en deux (se fissionner), en libérant une grande quantité de chaleur et en produisant 2 ou 3 neutrons chacun étant capables de produire une nouvelle fission lors d'une collision avec un autre atome (créant potentiellement une réaction en chaîne). La matière fissile qui constitue le cœur des réacteurs est de l'uranium enrichi ou du plutonium, encapsulé dans des crayons regroupés en assemblages de combustible nucléaire [9].

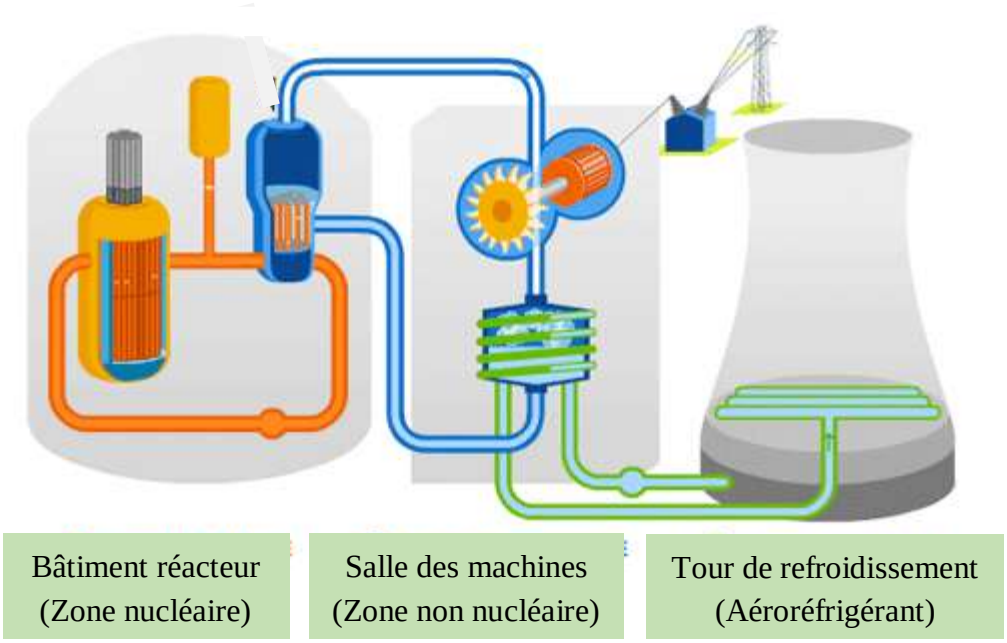


Figure I-3 : Site industriel D'un réacteur de puissance

Une centrale nucléaire comporte quatre parties principales [10]:

- Bâtiment contenant le réacteur dans lequel a lie la fission.
- Salle des machines ou est produite l'électricité.
- Départs de lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité.
- Tours de refroidissement uniquement en bord de rivière.

I.3.1.ii- PRINCIPE DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire peut être schématisée comme suit [7]:

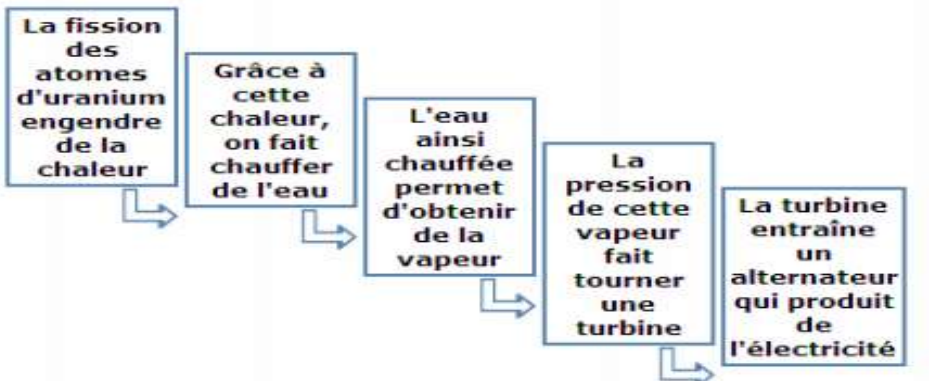


Figure I-4 : Principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire

I.3.1.iii- FILIERES DES REACTEURS DE PUISSANCES :

Il existe différents types de réacteurs de puissance, développés et construits comme reproduit dans le Tableau I-1 [8]:

GWe = capacity in thousands of megawatts

Reactor type	Main Countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurized Water Reactor (PWR)	US, France, Japan, Russia	252	235	Enriched UO_2	Water	Water
Boiling Water Reactor (BWR)	US, Japan, Sweden	93	83	Enriched UO_2	Water	Water
Gas-cooled Reactor (Magnox & AGR)	UK	34	13	natural U (metal), enriched UO2	CO_2	Graphite
Pressurized Heavy Water Reactor "CANDU" (PHWR)	Canada	33	18	natural UO2	Heavy water	heavy water
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Russia	14	14	Enriched UO_2	Water	Graphite
Fast Neutron Reactor (FBR)	Japan, France, Russia	4	1.3	PuO2 and UO2	liquid sodium	-

Tableau I-1: Différents types de réacteurs de puissance

I.3.2- RÉACTEUR DE RECHERCHE

I.3.2.i- DESCRIPTION

Un réacteur de recherche comme illustré sur la Figure I-5 est une installation destinée à la création des rayonnements d'intensité et de qualité désirée suite à une réaction en chine. Cette énergie dégagée est dissipée dans l'atmosphère à l'aide d'une tour de refroidissement.

Ce réacteur comporte essentiellement le cœur et un ensemble d'échangeurs de chaleur et de tours de refroidissement reliés entre eux par des conduites où circulent des fluides à l'aide d'un certain nombre de pompes [5].

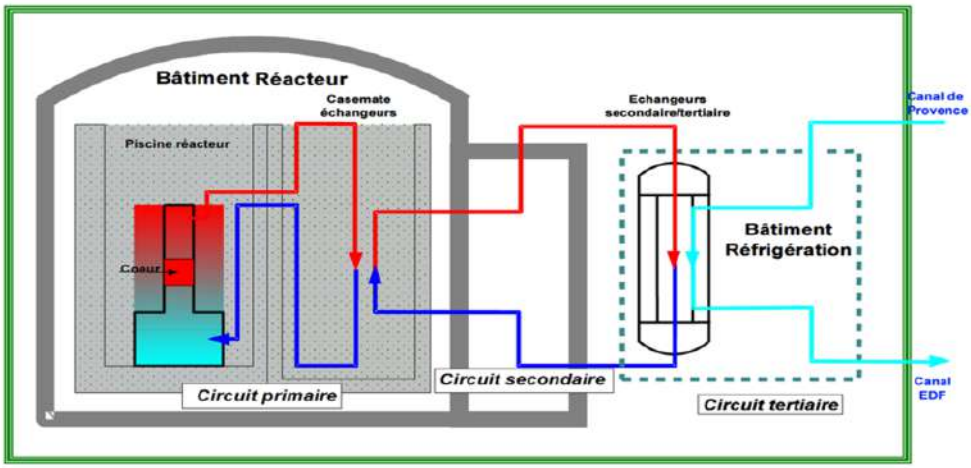


Figure I-5 : composantes d'une réacteur de recherche [41]

I.3.2.ii- APPLICATION

Ce type de réacteur est destiné uniquement pour la recherche scientifique, et fonctionne sous une pression de 3bar, et une température entre 40~60°C. Les réacteurs de recherche jouent un rôle important dans le développement de la science et de la technologie nucléaires. Ils sont utilisés pour la recherche fondamentale, la production de radio-isotopes, la diffusion neutronique et la neutronographie, ainsi que la caractérisation et l'essai de matières. Ce sont aussi des outils importants pour la formation théorique et pratique avancée à l'utilisation de la technologie nucléaire dans le cadre d'applications énergétiques et autres [11].

I.4- RÉACTEUR NUCLEAIRE A EAU PRESSURISÉE

I.4.1- DESCRIPTION GÉNÉRALE

Le réacteur à eau pressurisée « REP », est la filière des réacteurs nucléaires la plus répandue dans le monde depuis 2006 [12], il destiné à la production de l'électricité.

Ce réacteur utilise un combustible à oxyde d'uranium légèrement enrichi, ou un combustible mixte composé d'un mélange d'oxyde d'uranium faiblement enrichi et d'oxyde de plutonium (combustible MOX). Le fluide qui circule dans le cœur est l'eau légère pressurisée, qui représente à la fois le réfrigérant et le modérateur. Pour le contrôle neutronique du réacteur, on utilise à la fois des barres de contrôle et un absorbant neutronique « acide borique » en solution dans le caloporteur [13].

La FigureI-6 décrit schématiquement ce type de réacteur. Son architecture est principalement caractérisée par la présence des trois circuits de refroidissement :

- Le circuit primaire : dans lequel circule le fluide de refroidissement du cœur pour extraire la chaleur produite par réaction de fission en chaine.
- Le circuit secondaire : sert à la production de vapeur et à la production d'énergie mécanique à la turbine.
- Le circuit tertiaire : pour condenser la vapeur du circuit secondaire et évacuer la chaleur au tour de refroidissement.

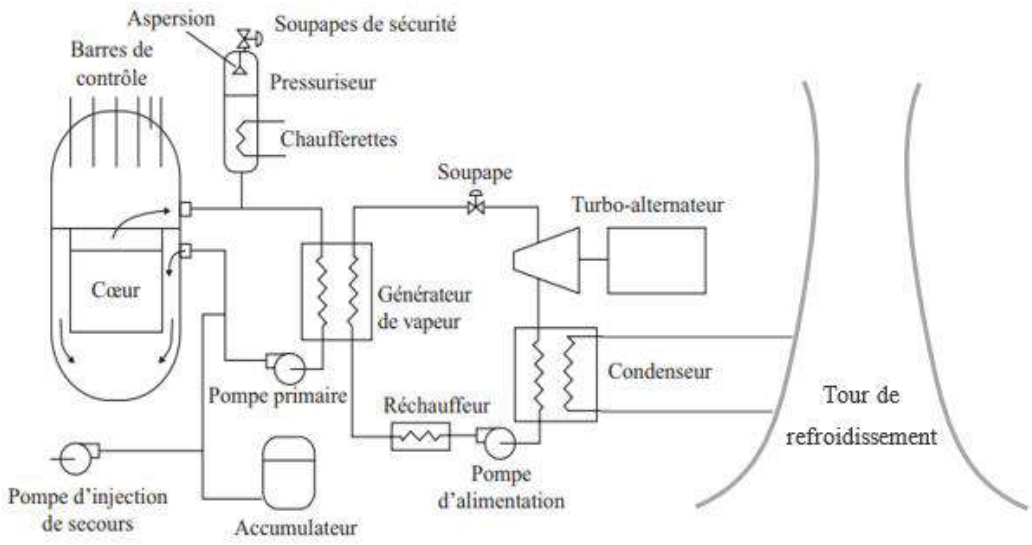


Figure I-6 : Schéma descriptif d'une centrale nucléaire à eau pressurisée avec aéroréfrigérant.

La Figure I-7 représente le principe de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée qui est basé sur trois circuits indépendants remplis d'eau qui opère des échanges thermiques.

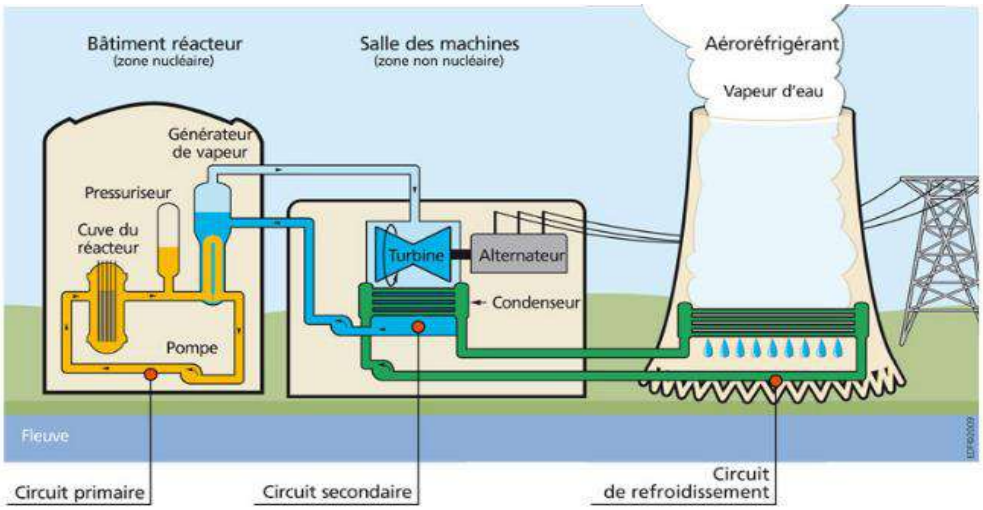


Figure I-7: Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire avec aéroréfrigérant.

I.4.2- CIRCUIT PRIMAIRE

C'est le circuit de refroidissement du cœur du réacteur. Ce circuit est fermé et assure la transmission de la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur (où se situe le combustible et s'opère la réaction en chaîne) aux générateurs de vapeur qui transforment cette chaleur en vapeur. Seule l'eau du circuit primaire est radioactive, l'eau du circuit secondaire et l'eau du circuit de refroidissement (tertiaire) ne sont jamais en contact avec le combustible nucléaire [14].

Il est composé des éléments suivants : la cuve qui contient le cœur, les générateurs de vapeur pour convertir l'énergie apportée par le cœur en vapeur disponible pour la turbine, les pompes primaires qui fournissent le travail nécessaire pour assurer un bon débit de refroidissement du cœur, le pressuriseur qui sert au maintien et au contrôle de la pression, les tuyauteries de circulation de l'eau [13].

I.4.2.i- CUVE ET CŒUR

Le cœur du réacteur à eau sous pression est le siège de la réaction de fission et la production de la chaleur. Il est composé d'assemblages combustibles et des barres de contrôles et de commandes. Chaque assemblage combustible comporte, selon le type, environ 264 crayons combustibles, 24 tubes pouvant contenir les crayons d'une grappe de commande et un tube d'instrumentation [14], comme illustré sur la Figure I-8.

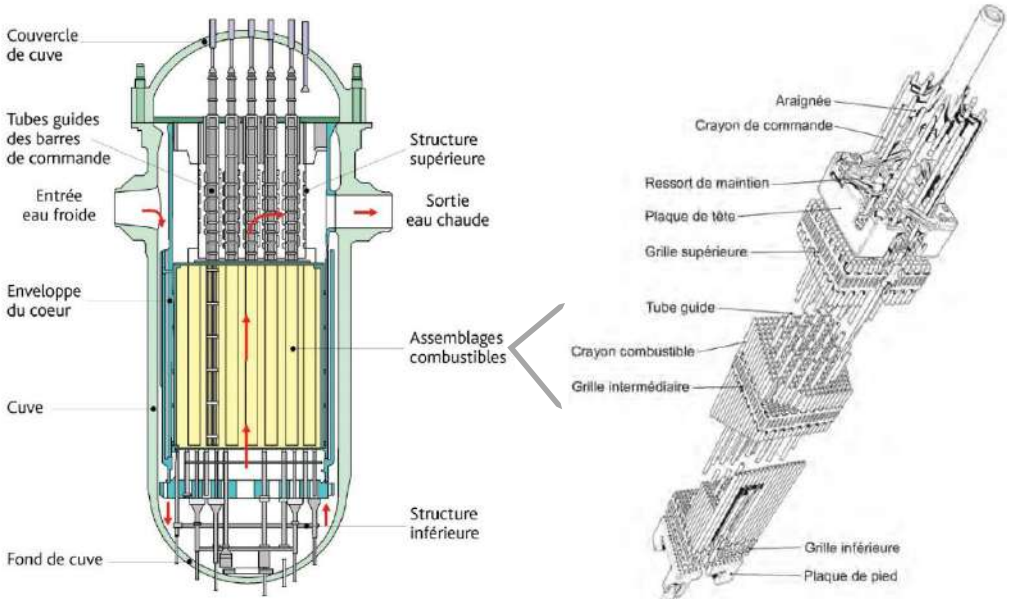


Figure I-8: Cuve avec assemblage 17x17 d'un REP.

Le crayon combustible est constitué d'un empilement de pastilles d'UO_2 faiblement enrichi (de 3 à 5 %) ou d'un mélange de PuO_2 et d'UO_2 (combustible MOX). **Le gainage** du combustible est assuré par un alliage de zirconium (Zircaloy) qui, constitue la première des trois barrières de sûreté qui empêche la dispersion des produits radioactifs contenus dans le combustible. Le combustible est renouvelé partiellement lors des arrêts programmés du réacteur dont la périodicité varie entre 12 et 18 mois [14]. Pour **le mode de liaison** combustible-gaine il est important que l'échange entre le combustible et sa gaine soit plus intime possible, pour cela il est préférable d'utiliser un corps intermédiaire gazeux comme l'hélium pour son bonne conductibilité [15].

Le contrôle permanent de la réaction en chaîne est assuré dans un réacteur nucléaire grâce à **des barres de contrôles**. Ces barres se plongent dans le réacteur entre les barres du combustible pour absorber une partie des neutrons émis, constituées par exemple du Bore ou du Graphite ou du Cadmium, selon la filière du réacteur. Ces barres sont mobiles dans le cœur du réacteur. Elles peuvent d'ailleurs être remontées ou enfoncées en fonction du nombre de neutrons à retirer du cœur et donc de l'électricité à produire. De plus, en cas d'accident comme l'élévation de la température entraîne l'enfoncement complet de ces barres au sein du combustible et stoppe presque instantanément la réaction en chaîne. Le contrôle de la réaction est assuré alors par la concentration du Bore dans l'eau du circuit primaire et par la hauteur des barres de contrôle insérées dans les assemblages du combustible [14].

I.4.2.ii- LE PRESSURISEUR

Le pressuriseur assure le maintien du fluide caloporteur du circuit primaire à l'état liquide et l'empêcher de bouillir par la régulation de la pression du circuit primaire.

I.4.2.iii- L'EAU DU CIRCUIT PRIMAIRE

L'eau légère pressurisée circule entre les crayons combustibles pour extraire les calories (la chaleur) produites dans le cœur pour les transporter aux générateurs de vapeur. D'où l'eau ordinaire est appelée fluide caloporteur du circuit primaire du REP (PWR). L'eau du circuit primaire fait également office de modérateur : elle a la capacité de ralentir ou thermaliser les neutrons issus de la fission nucléaire. La thermalisation des neutrons permet l'interaction des neutrons avec les noyaux d'uranium 235 et déclencher la fission des noyaux de nouveau. Par ailleurs, les produits de fission sont confinés avec l'oxyde d'uranium à l'intérieur de la gaine des crayons pour éviter leur dissémination et la contamination du circuit primaire [7]. Les paramètres typiques de fonctionnement du fluide (l'eau ordinaire liquide) du circuit primaire sont :

- Pression : 155 bar.
- Température moyenne de 300 °C (286 °C en entrée de la cuve de réacteur et 327 °C en sortie de la cuve).
- Débit : environ 60 000 m^3/h.

I.4.2.iv- GENERATEUR DE VAPEUR

Trois ou quatre générateurs de vapeur (GV) (suivant le type de la tranche 900 ou 1450 MW), sont situés dans l'enceinte du réacteur et associés respectivement à une pompe primaire centrifuge

(une par GV, masse de 90t environ). Ils assurent le transfert de la chaleur du circuit primaire (de la chaudière nucléaire) vers le circuit secondaire comportant la turbine à vapeur [7].

En sortie des générateurs de vapeur, la vapeur d'eau possède les caractéristiques moyennes suivantes :

- Pression : 55 bar.
- Température : 270 °C.
- Débit: 7000 m³/h - 1500kg/s.

I.4.3- CIRCUIT SECONDAIRE

Est un circuit fermé qui amène la vapeur produite dans les générateurs de vapeur à la turbine du groupe turbo-alternateur qui produit l'électricité. Ensuite, la vapeur est retransformée en eau dans le condenseur.

I.4.4- CIRCUIT TERTIAIRE

Alimente en eau froide le condenseur. Cette eau (la source froide) est prélevée dans un fleuve, une rivière ou la mer. Selon le modèle de réacteur, l'eau peut être ensuite rejetée à la source à une température légèrement plus élevée (réacteur sans aéroréfrigérant) ou bien refroidie dans un aéroréfrigérant puis réinjecté dans le circuit de refroidissement (réacteur avec aéroréfrigérant) [14].

I.4.5- LES CIRCUITS DE SAUVEGARDE

Le rôle des circuits de sauvegarde est de maîtriser et de limiter les conséquences des incidents et accidents en assurant les fonctions de sûreté suivantes :

- Maintien d'un inventaire en eau suffisant dans la cuve pour refroidir le combustible,
- Évacuation de la puissance résiduelle,
- Maintien de conditions dans l'enceinte assurant l'étanchéité du confinement.

Les circuits de sauvegarde sont essentiellement les circuits d'injection de sécurité (RIS), le circuit d'aspersion dans l'enceinte (EAS) du bâtiment réacteur, et le circuit d'eau alimentaire de secours des générateurs de vapeur (ASG) [13].

I.4.6- LES BARRIERES DE CONFINEMENT

Dans un Réacteur à Eau sous Pression, la prise en compte du concept de défense en profondeur implique l'existence de 3 barrières de confinement des produits radioactifs contenus dans le cœur du réacteur [14]:

- La gaine qui enveloppe les crayons de combustible retient les produits radioactifs créés dans les pastilles de combustible. Une mauvaise évacuation de la chaleur entraînerait la rupture des gaines, voire la fusion plus ou moins importante des pastilles.
- Le circuit primaire : les crayons combustibles sont constamment refroidis par l'eau primaire qui circule en circuit fermé entre le cœur et les boucles des générateurs de vapeur. Le circuit primaire constitue une deuxième enveloppe capable de retenir la dispersion des produits radioactifs contenus dans le combustible si les gaines sont défaillantes.
- L'enceinte de confinement : elle est constituée par le bâtiment en béton qui abrite le circuit primaire.

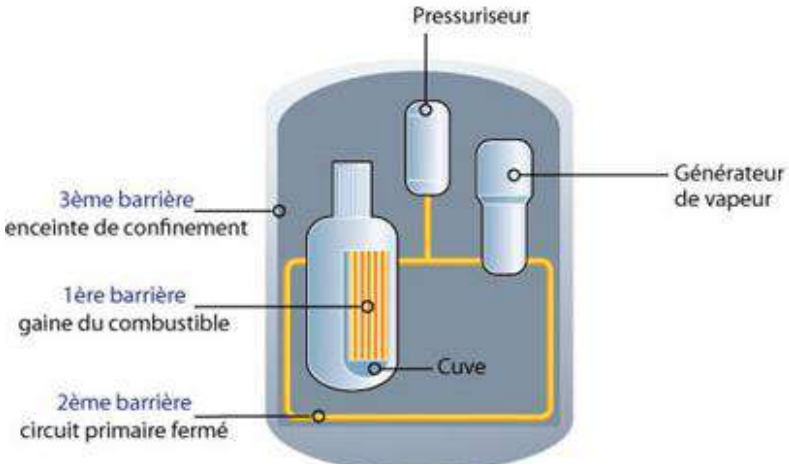


Figure I-9: Les barrières de confinement

I.5- MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

I.5.1- INTRODUCTION

Le transfert de la chaleur est un phénomène de transfert d'énergie d'une zone chaude à une autre froide sous l'influence de la différence de la température. On distingue trois modes de transfert de chaleur : le rayonnement, la conduction et la convection.

I.5.2- CHAMP DE TEMPERATURE

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température [16]. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

I.5.3- GRADIENT DE TEMPERATURE

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme [16]. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

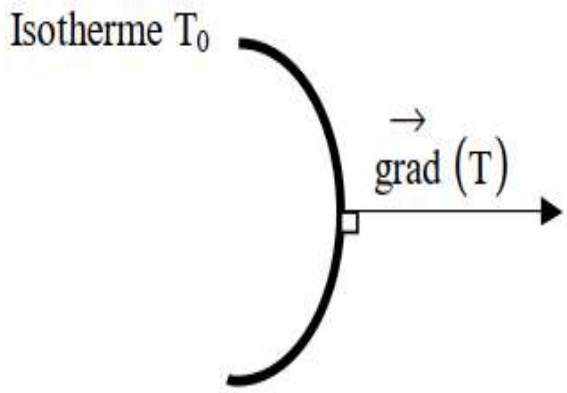


Figure I-10 : gradient de température.

$$\overrightarrow{grad}(T) = \vec{n}\frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{(I-1)}$$

Avec : - $\vec{n}$: Vecteur unitaire de la normale.
- $\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

I.5.4- FLUX DE CHALEUR

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [16] :

$$\emptyset = \frac{1}{S}\frac{dQ}{dt} \quad \text{(I-2)}$$

Avec : - S : l'air de la surface (m^2).
- Q : quantité de chaleur (J).
- t : le temps (s).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad \text{(I-3)}$$

I.5.5- FORMULATION D'UN PROBLEME DE TRANSFERT DE CHALEUR

I.5.5.i- BILAN D'ENERGIE

La Figure I-11 définit un système thermodynamique (S) par ses limites dans l'espace, et les différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système [16].

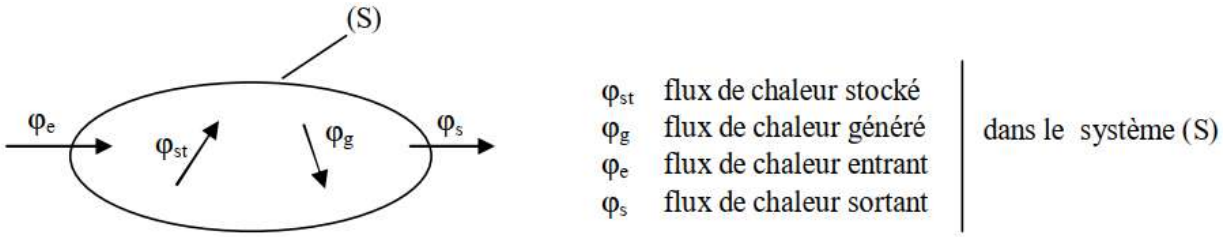


Figure I-11: System et Bilan énergétique.

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie sur (S) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_s \qquad \text{(I-4)}$$

I.5.5.ii- EXPRESSION DES FLUX D'ENERGIE [16]

Après l'établissement du bilan énergétique, il faut ensuite d'établir les expressions des déférents flux de chaleur, pour l'obtention de l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

I.5.5.ii.a- CONDUCTION

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda . S . \overrightarrow{grad}(T) \qquad \text{(I-5)}$$

Avec :
- φ : Flux de chaleur transmis par conduction. [W]
- λ : Conductivité thermique du milieu. [$Wm^{-1}°C^{-1}$]
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur. [m^2]

I.5.5.ii.b- CONVECTION

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

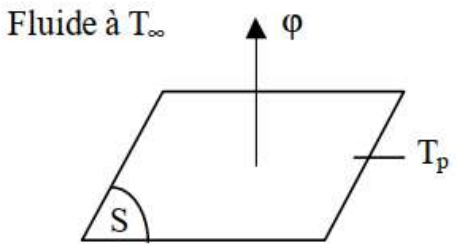


Figure I-12: Schéma du transfert de chaleur convectif

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = h.s.(T_P - T_\infty) \qquad \text{(I-6)}$$

Avec :
- φ : Flux de chaleur transmis par convection. [W]
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection. [$Wm^{-2}°C^{-1}$]
- T_P : Température de surface du solide. [°C]
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide. [°C]
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide. [m^2]

I.5.5.ii.c- RAYONNEMENT

C'est un transfert d'énergie par mode électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_P S(T_P^4 - T_\infty^4) \qquad \text{(I-7)}$$

Avec :
- φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement. [W]
- σ : Constante de Stefan Boltzmann. [$5{,}67.10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}]
- ε_p : Facteur d'émission de la surface.
- T_P : Température de la surface. [°K]
- T_∞ : Température du milieu environnant la surface. [°K]

- S : Aire de la surface. [m^2]

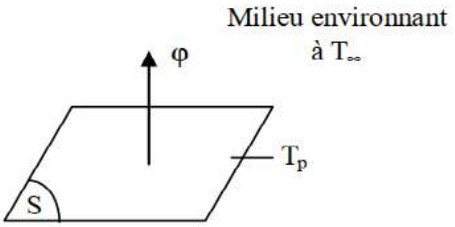


Figure I-13: transfert de chaleur radiatif

I.5.5.ii.d- FLUX DE CHALEUR LIE A UN DEBIT MASSIQUE

Lorsqu'un débit massique $\dot{m}$ de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2, on doit considérer dans le bilan (I-4) un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\varphi_e = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \qquad \text{(I-8)}$$

Avec :
- φ : Flux de chaleur entrant dans le système. [W]
- $\dot{m}$: Débit massique. [$Kg.s^{-1}$]
- C_p : Chaleur spécifique. [$J.°K^{-1}.Kg^{-1}$]
- T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie. [°K]

I.5.5.ii.e- STOCKAGE D'ENERGIE

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à l'augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état) :

$$\varphi_{st} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-9)}$$

Avec :
- φ_{st} : Flux de chaleur stocké. [W]
- ρ : Masse volumique. [$Kg.m^{-3}$]
- V : Volume. [m^3]
- C_p: Chaleur spécifique. [$J\ kg^{-1}\ °C^{-1}$]
- T : Température. [°C]
- t : Temps. [s]

I.5.5.ii.f- GENERATION D'ENERGIE

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\varphi_g = \dot{q}V \qquad \text{(I-10)}$$

Avec :
- φ_g : Flux d'énergie thermique générée. [W]
- $\dot{q}$: Densité volumique d'énergie générée [$W.m^{-3}$]
- V : Volume. [m^3]

I.6- TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION EN NUCLEAIRE

I.6.1- INTRODUCTION

Un réacteur nucléaire produit de l'énergie sous forme de chaleur, migré à travers le combustible, c'est le phénomène de conduction vive. Cette énergie traverse ensuite la gaine conductrice par conduction sans génération de puissance.

Ce mode d'échange implique le transfert de la chaleur par l'interaction entre les molécules adjacentes d'un matériau, dépond de la force motrice, de la différence de température et de la résistance au transfert de la chaleur. La résistance au transfert de la chaleur dépond de la nature et des dimensions du milieu au sein du quel ce transfert s'opère [5]. Tous les problèmes de transfert de chaleur par conduction impliquent la différence de températures, la géométrie et les propriétés physiques de l'objet étudié. Le transfert de chaleur par conduction est géré par la loi de Fourier qui se présente dans l'équation (I-5).

Les valeurs de (λ) sont fonction de la composition chimique, de son état physique, de sa température et de la pression. La conductivité thermique s'exprime soit en puissance par unité de longueur et par degré soit en énergie par unité de temps, de longueur et par degré : W/m.°C ou Kcal/h.m.°C.

Quelques exemples de conductivité thermique des matériaux les plus usuels de la technologie nucléaire [17] :

- U métal à 500°C k=30 w/m.°C.
- UO_2 k=3.5 w/m.°C.
- Mg k=140 w/m.°C.
- Acier Inox ou Zircaloy k=60 w/m.°C.
- Graphite k=100 w/m.°C.

I.6.2- EQUATION DE LA CHALEUR

Le problème fondamental de la conduction est de trouver la température en tout point du corps à refroidir ou à chauffer et la puissance thermique échangée à travers sa surface. La formule de base est celle de Fourrier $\vec{\varphi} = -\lambda . S . \overrightarrow{grad}(T)$ qui permet une généralisation, de telle sort que la chaleur circule dans toutes les directions en fonction du temps [16].

Pour dériver l'équation de la chaleur, on a besoin d'établir le bilan dans un élément du milieu au sein duquel le phénomène de conduction de la chaleur ait lieu. Soit le dièdre direct en coordonnées cartésiennes x, y, z et pour un bilan 3D, considérant l'élément infinitésimal dxdydz, comme illustré sur la Figure I-14 [18].

Le bilan énergétique sur le système : $q_x + \varphi_g = \varphi_{st} + q_{x+dx}$

Avec :

- $q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$ Et $q_x = -\lambda . dy . dz . \frac{\partial T}{\partial x}$
- $q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy$ Et $q_y = -\lambda . dx . dz . \frac{\partial T}{\partial y}$
- $q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz$ Et $q_z = -\lambda . dx . dy . \frac{\partial T}{\partial z}$
- $\varphi_g = \dot{q} . dxdydz$ Et $\varphi_{st} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz$

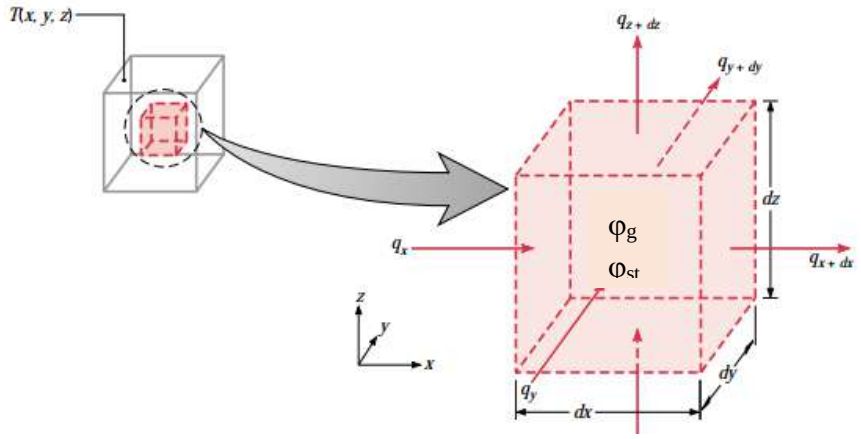


Figure I-14 : Volume de control dx dy dz, conduction en coordonnées cartésienne [18].

Nous obtenons alors l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-11)}$$

Cette équation peut être simplifiée dans un certain nombre de cas [16]:

a) Si le milieu est isotrope $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$.

b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\dot{q} = 0$.

c) Si le milieu est homogène, λ ne dépend que de température.

Les hypothèses a, b et c permettent d'écrire :

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{d\lambda}{dT}\left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right]=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-12)}$$

d) Si de plus λ est constant, nous obtenons l'équation de Poisson [16] :

$$\alpha\nabla^2 T=\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-13)}$$

Avec $\alpha=\frac{\lambda}{\rho C_p}$ est appelée : diffusivité thermique du matériau ($m^2.s^{-1}$). Plus la diffusivité thermique du matériau est grande plus la chaleur est rapidement diffusée à travers le matériau et vice versa.

e) En régime permanent, on trouve l'équation de Laplace :

$$\Delta T=0 \qquad \text{(I-14)}$$

Par ailleurs, les hypothèses a, c et d permettent d'écrire :

- Équation de la chaleur en coordonnées cylindriques *(r,θ,z)* s'écrit [16]:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial^2\theta}+\frac{\partial^2 T}{\partial^2 z}+\frac{\dot{q}}{\lambda}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-15)}$$

- Équation de chaleur en coordonnées sphériques *(r,ϕ,θ)* [18]:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial\emptyset}\left(\frac{\partial T}{\partial\emptyset}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T}{\partial\theta}\right)+\frac{\dot{q}}{\lambda}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(I-16)}$$

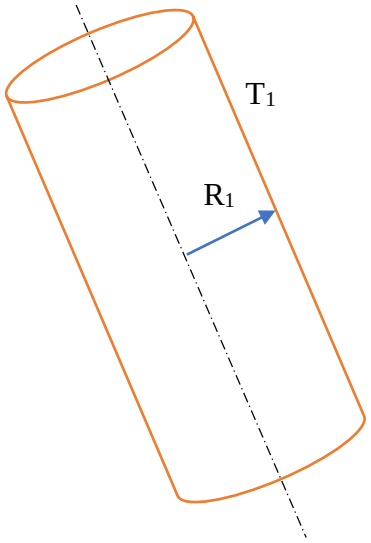
I.6.3- DISTRIBUTION DE TEMPÉRATURE DANS UN ÉLÉMENT COMBUSTIBLE

Pour résoudre l'équation de la chaleur dans le combustible et à travers la gaine, on pose les hypothèses suivantes, avec un élément combustible de type cylindrique [5]:

- Régime permanent : $\partial/\partial t = 0$.
- Génération de puissance uniforme : $\dot{q} = Cst$.
- Conductivité thermique constante : λ =*Cst.*
- Problème axisymétrique : $\partial/\partial\theta = 0$.
- L'élément est infiniment long : $\partial/\partial z = 0$.

Donc l'équation de la conduction s'écrit comme suite :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = -\frac{\dot{q}}{\lambda}$$



L'intégration double de cette équation nous donne :

$$T(r) = -\frac{\dot{q}}{4\lambda}r^2 + C_1 ln(r) + C_2$$

Les conditions aux limites :

- $r \to 0 \implies \partial T/\partial r|_{r=0} = 0 \implies C_1 = 0$
- $r = R_1 \implies T(R_1) = T_1 \implies C_2 = \dot{q}R_1^2/4\lambda + T_1$

Après les simplifications on trouve la solution finale :

$$T(r) = T_1 + \frac{\dot{q}}{4\lambda}(R_1^2 - r^2) \qquad \text{(I-17)}$$

Cette équation représente la distribution radiale de la température dans un élément combustible de type cylindrique plein.

L'écart maximum de température est obtenu pour r=0 :

$$\Delta T = T_M - T_1 = \frac{\dot{q}R_1^2}{4\lambda}$$

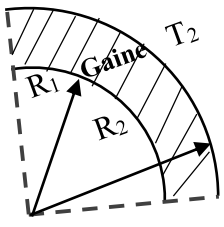
Avec T_M la température maximale au centre de combustible.

I.6.4- DISTRIBUTION DE TEMPÉRATURE DANS UNE GAINE DE COMBUSTIBLE

Dans ce cas on prend les mêmes hypothèses comme le cas précédant, sauf on n'a pas une génération de puissance, ce que nous conduira à l'équation suivante :

$$T(r) = C_1 ln(r) + C_2$$

Avec les conditions aux limites suivantes :



- $r = R_1 \implies -\lambda\left(\frac{dT}{dr}\right)\Big|_{r=R_1} = \varphi \implies C_1 = -\varphi R_1/\lambda$

  Avec φ le flux de chaleur provenant du combustible.
- $r = R_2 \implies T = T_2 \implies C_2 = T_2 + \varphi R_1 ln(R_2)/\lambda$

L'équation de la chaleur s'écrit :

$$T(r) = \frac{\varphi R_1}{\lambda} ln\left(\frac{R_2}{r}\right) + T_2 \qquad \text{(I-18)}$$

- L'écart maximum de température est obtenu pour r=R_1 :

$$T(R_1) = T_1 \Longrightarrow \Delta T = T_1 - T_2 = \frac{\varphi R_1}{\lambda} ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

- Si la gaine est mince R_2 - R_1 = e, on trouve :

$$ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = ln\left(\frac{R_1 + e}{R_1}\right) = ln\left(1 + \frac{e}{R_1}\right) \approx \frac{e}{R_1} \Longrightarrow \Delta T \approx \frac{\varphi e}{\lambda}$$

Ces différents calculs effectués jusqu'ici sont des cas idéaux, à savoir : conductivité thermique constante et répartition uniforme de la puissance au sien du combustible.

Il est souvent nécessaire d'améliorer la précision des calculs afin de tenir compte de ces différents effets : conductivité thermique variable en fonction de la température.

I.6.5- INTÉGRATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Lorsque l'écart de la température ΔT est faible c.-à-d. (<100°C), la résolution de l'équation de chaleur dans le cas de conductivité thermique constante ou dépend peu de la température est admissible. En dehors de ces deux cas, il est nécessaire de résoudre l'équation :

$div\left(\lambda(T).\overrightarrow{grad}(T)\right) + \dot{q} = 0 \longrightarrow (1)$ Avec λ en fonction de température.

Et avec les hypothèses suivantes :

- Régime permanent : $\partial/\partial t = 0$.
- Génération de puissance uniforme : $\dot{q} = Cst$.
- Problème axisymétrique : $\partial/\partial\theta = 0$.
- L'élément est infiniment long : $\partial/\partial z = 0$.

On peut donc écrire l'équation (1) sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r.\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) = -\dot{q}.r \xrightarrow{Aprés\ l'intégration} \lambda(T).dT = -\frac{\dot{q}r}{2}dr$$

Cette équation s'intègre entre la surface du barreau et le centre.

$$\int_{T_1}^{T_M} \lambda(T).dT = -\frac{\dot{q}}{2}\int_{r=R1}^{r=0} rdr \Longrightarrow \int_{T_1}^{T_M} \lambda(T).dT = \frac{\dot{q}R_1^2}{4} \xrightarrow{\times\frac{\pi}{\pi}} \int_{T_1}^{T_M} \lambda(T).dT = \frac{\dot{q}R_1^2\pi}{4\pi}$$

On pose : $\phi_l = \dot{q}R_1^2\pi$: flux générer par unité de longueur.

$$\int_{T_1}^{T_M} \lambda(T).dT = \frac{\phi_l}{4\pi} \qquad \text{(I-19)}$$

C'est l'expression de l'intégrale de la conductivité thermique dans laquelle T_1, T_M sont respectivement les températures de combustible à la surface et au centre du barreau.

L'intégrale de la conductivité thermique du UO_2 à 95% de densité est donnée par Lyon et Al, Mac Donald et Thompson dans l'intervalle de température [0°C, 1650°C] par la formule empiriques suivantes [5]:

$$\int_0^T \lambda(T).dT = 40{,}4.ln(464+T) + 0{,}027366.exp(2{,}14.10^{-3}.T) - 248{,}02.$$

Pour l'intervalle de température de 1650°C jusqu'à la fusion du UO_2 (2800°C) l'intégrale est donnée par la formule suivante :

$$\int_{1650}^T \lambda(T).dT = 0{,}02(T-1650) + 0{,}027366.exp(2{,}14.10^{-3}.T) - 0{,}93477.$$

La conductivité thermique du UO_2 à 95% de densité théorique est donnée par l'équation empirique suivante :

$$\lambda(T) = \frac{1}{(0{,}0285.T + 3{,}77)} + 1{,}1.10^{-13}.T^3 exp(7{,}2.10^{-4}T) \qquad \text{(I-20)}$$

La conductivité thermique du UO_2 95% de densité théorique et la conductivité thermique du Zircaloy sont données dans les tableaux suivants [5]:

Température (°C)	**λ (W/m.°C)**	**Température (°C)**	**λ (W/m.°C)**	**Température (°C)**	**λ (W/m.°C)**
0	3.341	**1400**	1.940	**2300**	1.457
260	5.703271	**1426.66**	2.392242	**2450**	1.415
650	2.971	**1550**	1.823	**3100**	1.323
800	2.677	**1700**	1.724	**3600**	1.333
950	2.439	**1850**	1.639	**4100**	1.406
1100	2.242	**2000**	1.568	**4600**	1.538
1250	2.078	**2150**	1.507	**5100**	1.730

Tableau I-2: Conductivité thermique du UO_2 à 95% de densité théorique

Température (°C)	λ (W/m.°C)	Température (°C)	λ (W/m.°C)	Température (°C)	λ (W/m.°C)
0	13.5225	**600**	19.5049	**1200**	30.784
100	13.8341	**700**	21.6256	**1300**	34.0245
200	14.2080	**800**	22.8076	**1400**	37.70118
300	15.2051	**900**	24.1786	**1500**	41.6270
400	16.5137	**1000**	25.6118	**1700**	50.0397
500	18.0093	**1100**	27.9175	**1848.88**	57.3307

Tableau I-3: Conductivité thermique du Zircaloy.

I.7- TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION

I.7.1- INTRODUCTION

Le transfert de chaleur par convection est un mode de transfert qui se produit au sein des milieux fluides. Il intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement.

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue deux formes de convection : convection naturelle et convection forcée. Lorsque Le mouvement du fluide est provoqué par le seul effet des différences de masse volumique due aux différences de températures on parle alors de libre ou naturelle, et si le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...) on parle alors de convection forcée [5].

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est utile de faire intervenir le régime d'écoulement, pour cela on distingue deux régimes : le régime laminaire et le régime turbulent. En régime laminaire l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes, l'échange de chaleur s'effectue par convection et conduction (négligeable).



Figure I-15 : Écoulement laminaire dans une conduite.

En régime turbulent l'écoulement n'est plus permanent et unidirectionnel. L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction moléculaire est généralement négligeable par rapport à la convection en dehors de la sous-couche laminaire [16].

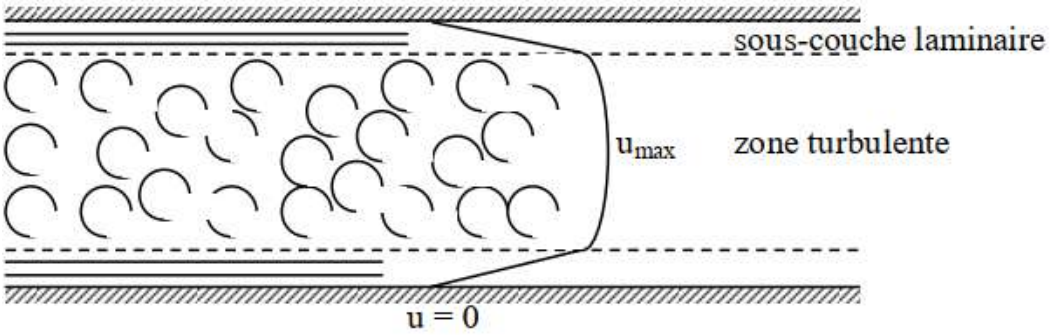


Figure I-16 : Écoulement turbulent dans une conduite.

Quelle que soit le type de convection libre ou forcée et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide laminaire ou turbulent, le flux de chaleur φ est donné par la relation dite loi de Newton :

$$\varphi = h.s.\Delta T$$

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection h qui dépend d'un nombre important de paramètres caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange...

Le tableau I-4 représente l'ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h pour différentes configurations.

Configuration		h (Wm^{-2} $°C^{-1}$)
Convection naturelle	Dans l'air Dans l'eau	5-30 500-1000
Convection forcée	Dans l'air Dans l'eau	100-500 100-1500

Tableau I-4: Ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection [19].

I.7.2- COUCHES LIMITES

Le concept de la couche limite a été introduit en 1904 par Ludwig Prandtl [20]. La paroi développe des couches limites thermiques et hydrodynamiques dans lesquelles les variations de la vitesse et de la température s'observent.

I.7.2.i- COUCHE LIMITE HYDRODYNAMIQUE :

La couche limite hydrodynamique est caractérisée par la présence des gradients des vitesses et des contraintes de cisaillement. Son paramètre clé est le coefficient de frottement.

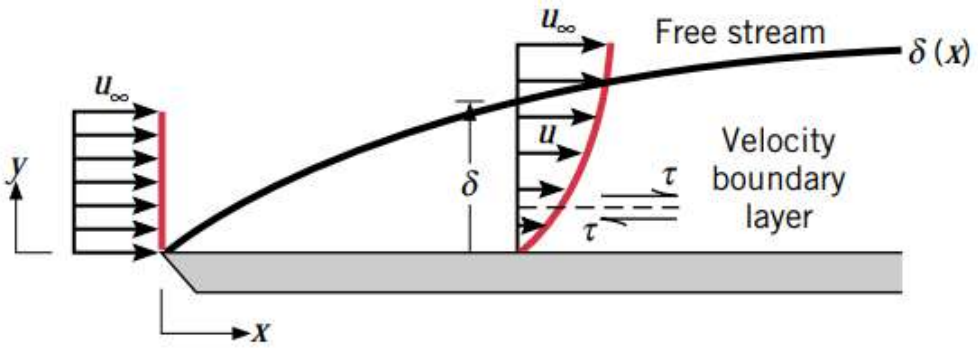


Figure I-17 : Schématisation du développement d'une couche limite dynamique sur une plaque plane [18].

I.7.2.ii- COUCHE LIMITE THERMIQUE

La couche limite thermique est caractérisée par la présence des gradients des températures. Son paramètre clé est le coefficient d'échange thermique par convection.

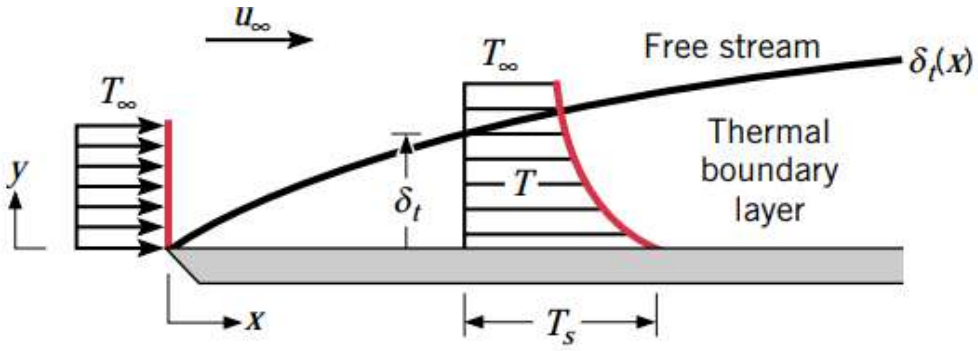


Figure I-18 : Schématisation de la couche limite thermique sur une plaque plane [18].

I.7.3- ANALYSE DIMENSIONNELLE

La méthode d'analyse dimensionnelle, qui repose sur le principe de l'homogénéité dimensionnelle des termes d'une équation, est connue sous le nom de théorème de Vaschy-Buckingam ou théorème des groupements π [16]. Ils concernent essentiellement la représentation, la comparaison et la recherche des résultats expérimentaux :

- La représentation des résultats expérimentaux est simplifiée on pourra avoir une courbe reliant 2 variables ou un abaque reliant 3 variables réduites.

- La comparaison des résultats expérimentaux est aussi très rapide et aisée, quel que soit le chercheur, même si le système d'unité utilisé est différent puisque les grandeurs réduites sont sans dimension.
- La recherche des résultats expérimentaux est facilitée et ordonnée : s'il suffit de tracer une courbe entre deux variables réduites, c'est qu'il suffit d'effectuer une seule série d'expériences.

I.7.3.i- Nombre de Reynolds

C'est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité, il caractérise le régime de l'écoulement pour la convection forcée.

$$Re = \frac{\rho . U . Lc}{\mu} \qquad (I\text{-}21)$$

Avec : - ρ : Masse volumique du fluide. [$Kg.m^{-3}$]

- U: Vitesse moyenne du fluide. [$m.s^{-1}$]
- μ : Viscosité dynamique du fluide. [Pa.s]

Lc [m] : est la dimension caractéristique de la géométrie considérée qui sera par exemple le diamètre hydraulique $Dh = \frac{4xSection\ de\ passage}{Périmètre}$ pour un écoulement dans un conduit. Ou la longueur pour un écoulement à surface libre sur une plaque…

Convection interne : - Si Re<2300 → Régime laminaire.

- Si Re>2300 → Régime turbulent.

Convection externe : - Si Re<5.10^5 → Régime laminaire.

- Si Re>5.10^5 → Régime turbulent.

I.7.3.ii- Nombre de Nusselt

Représente le rapport de la résistance thermique de conduction par la résistance thermique de convection, il caractérise le type de transfert de chaleur :

$$Nu = \frac{h . Lc}{\lambda} \qquad (I\text{-}22)$$

Avec : - h : Coefficient d'échange convectif. [$W.m^{-2}.°K$]

- λ : Conductivité thermique du fluide. [$W.m^{-1}.°K$]

Si Nu est élevé on dit que la convection est prédominante sur la conduction.

I.7.3.iii- Nombre de Prandtl

Il caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution des températures, c'est une caractéristique du fluide :

$$Pr = \frac{\mu . C_p}{\lambda} \qquad \text{(I-23)}$$

Avec : C_p : Capacité thermique massique du fluide. [$J.Kg^{-1}.°K^{-1}$]

I.7.3.iv- Nombre de Grashof

Très important pour les écoulements de convection naturelle, est l'équivalent du nombre de Reynolds pour la convection forcée. Il compare les forces de la poussée d'Archimède et les forces visqueuses.

$$Gr = \frac{g . \beta . \Delta T . Lc^3}{\nu^2} \qquad \text{(I-24)}$$

Avec : - β : Coefficient d'expansion volumique. [$°K^{-1}$]

- g : Gravité [$m.s^{-2}$]

- ν : Viscosité cinématique [$m^2.s^{-1}$]

I.7.3.v- Nombre de Rayleigh

Ce nombre est définit selon plusieurs configurations (rapport de forme, inclinaison) et des conditions aux limites (flux ou température imposée, chauffage total ou partiel) [20]. Si l'on distingue les définitions en fonction du type de condition aux limites thermique, le nombre de Rayleigh peut s'écrira :

- température imposée :

$$Ra_T = \frac{g . \beta . \varphi . \Delta T . Lc^3}{\nu . \alpha} \qquad \text{(I-25)}$$

- flux imposé :

$$Ra_\varphi = \frac{g . \beta . \varphi . Lc^4}{\varphi . \alpha . \lambda} \qquad \text{(I-26)}$$

Avec : - α : Diffusivité thermique. [$m^2.s^{-1}$]

I.7.4- CONVECTION FORCÉE

Ce mode de transfert thermique nous permet de déterminer les échanges de chaleur ayant lieu entre une paroi et un fluide au contact de celle-ci.

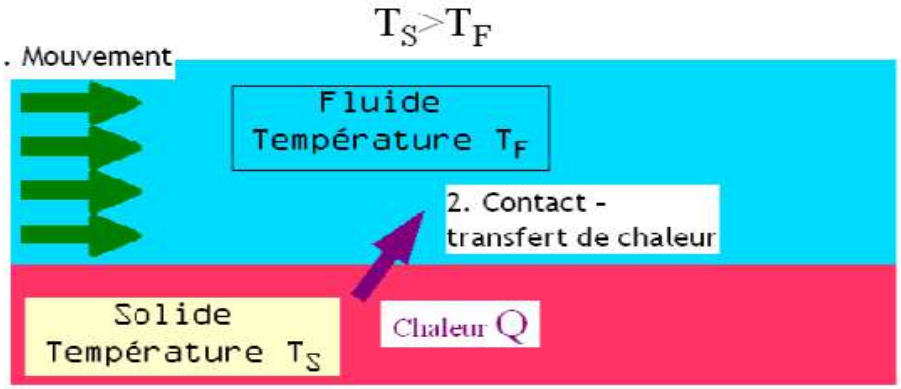


Figure I-19 : Représentation schématique de la convection forcée.

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels [16] :

$$Nu = f(Re, Pr) \qquad \text{(I-27)}$$

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante:

1- Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.
2- Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation.
3- Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4- Calcul de $h = \lambda . Nu/Lc$ → calcul de φ.

Pour la convection forcée, les principales corrélations sont données en annexe A-I-1.

I.7.5- CONVECTION NATURELLE

La convection naturelle est la forme d'échange thermique existant entre un corps chaud et un fluide au repos. Le contact direct du corps chaud et l'air, entraine l'augmentation de la température de l'air par la suite la décroissance de sa masse volumique. La masse de l'air s'élève en enlevant de la chaleur au corps, elle est remplacée par une masse d'air froid qui est au contact du corps qui s'échauffe à son tour et ainsi de suite. Les échanges thermiques dans ce cas sont moins intenses que pour la convection forcée [5].

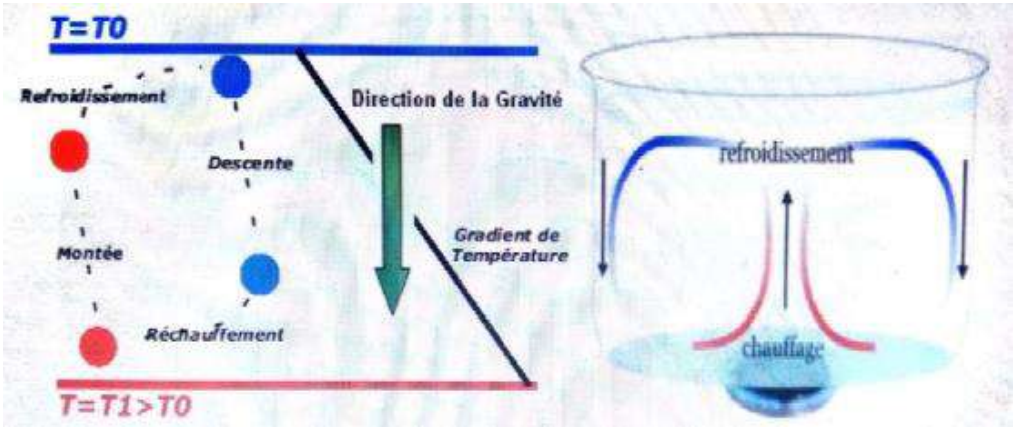


Figure I-20: ***Principe physique de la convection naturelle.***

Le mouvement du fluide est dû simplement à un gradient de température qui existe dans le milieu et d'un champ de forces massiques. Pour l'étude de ce type d'échange thermique, on utilise des corrélations, qui sont en général de la forme :

$$Nu = f(Gr, Pr) \qquad \text{(I-28)}$$

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante :

1- Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl.
2- Suivant la valeur de Gr et configuration → choix de la corrélation.
3- Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4- Calcul de $h = \lambda . Nu/Lc$ → calcul de φ.

Pour la convection naturelle, les principales corrélations sont données en annexe A-I-2.

I.8- PERTE DE CHARGE

La formule de Bernoulli établie pour un écoulement permanent de fluide parfait, quand on suit une particule sur sa trajectoire est donnée de la façon suivante :

$$p1 + \rho g h1 + \rho \frac{V_1^2}{2} = p2 + \rho g h2 + \rho \frac{V_2^2}{2} \qquad \text{(I-29)}$$

Cette relation traduit la conservation de l'énergie mécanique totale de la particule entre les points 1 et 2.

La somme $p + \rho g h + \rho \frac{V^2}{2}$ est la pression totale Pt du fluide, elle représente, en unités de pression, l'énergie mécanique totale de l'unité de volume de fluide [21].

Si l'écoulement, toujours incompressible et permanent, concerne un fluide visqueux, on peut établir la relation suivante :

$$\frac{p2 - p1}{\rho} + g(h2 - h1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{\Delta P_t}{\rho} \qquad \text{(I-30)}$$

On définit la perte de charge entre les points (1) et (2) par $J_{12} = \frac{\Delta P_t}{\rho}$ qui est la perte d'énergie par frottement visqueux par unité de volume de fluide qui passe [22].

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \frac{p2 - p1}{\rho} + g(h2 - h1) = J_{12} \qquad \text{(I-31)}$$

L' unité de chaque terme de la relation (I-31) est le joule par kilogramme (J/kg)

La perte de charge J_{12} peut être due à une perte de charge linéaire et une perte de charge singulière : $J_{12} = J_s + J_l$

I.8.1- PERTES DE CHARGE SINGULIERES [22]

Quand la conduite subit de brusques variations de section ou de direction, il se produit des pertes de charges dites singulières, elles sont généralement mesurable et font partie des caractéristiques de l'installation. On les exprime par :

$$J_s = -K_s . \frac{V^2}{2} \qquad \text{(I-32)}$$

K_s : Coefficient (sans unité) de pertes de charge. Il dépend de la nature et de la géométrie de l'accident de forme. Les valeurs de K_s sont données par les constructeurs dans leurs catalogues.

I.8.2- PERTES DE CHARGES LINEAIRES [22]

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent, les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps.

Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles à la longueur L de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre d, proportionnelle au carré de la vitesse débitante V du fluide.

$$J_l = -K_l . \frac{V^2}{2}\left(\frac{L}{d}\right) \qquad \text{(I-33)}$$

Où :

- V : vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite (m/s).
- L : longueur de la conduite (m).
- d : diamètre de la conduite (m).
- K_l : coefficient de perte de charge linéaire. Il dépend du régime d'écoulement et notamment du nombre de Reynolds R_e.

I.9- CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps une généralité sur l'énergie nucléaire et les différents réacteurs qui existé dans le monde en se basant sur la filière des réacteurs à eau sous-pressurisé. Puis nous avons présenté les différents modes du transfert de chaleur en se basant sur celui de la conduction et à la convection thermique forcée. Voire son importance dans les différents domaines du milieu industriel et même dans la vie courante (chauffage, climatisation…etc.).

CHAPITRE II : DÉSCRIPTION DE LA BOUCLE D'ESSAI CALLISTO

II.1- INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques informations jugées utiles de la boucle Callisto sujet d'étude pour ce mémoire. Une modélisation et simulation par le code RELAP5 est effectué pour le besoin du calcul thermohydraulique du code ANSYS.

II.2- DESCRIPTION DE LA BOUCLE D'ESSAI CALLISTO

II.2.1- GÉNÉRALITES

La boucle d'essais en pile, CALLISTO (CApabiLity of Lwr Irradiation in Steady and Transient Operations) [1], à eau pressurisée, est destinée principalement aux tests d'irradiation des crayons combustibles dans les canaux du réacteur de recherche BR2, voir Figures II-1 et II-2, et la réalisation d'expériences des transitoires de puissance et des essais de sûreté [2]. Cette boucle est constituée d'un circuit hors-pile et trois sections d'essais en pile permettant chacune l'irradiation de 9 crayons combustibles dans des conditions représentatives d'un réacteur PWR 'Pressurized water Reactor' [23], [24].

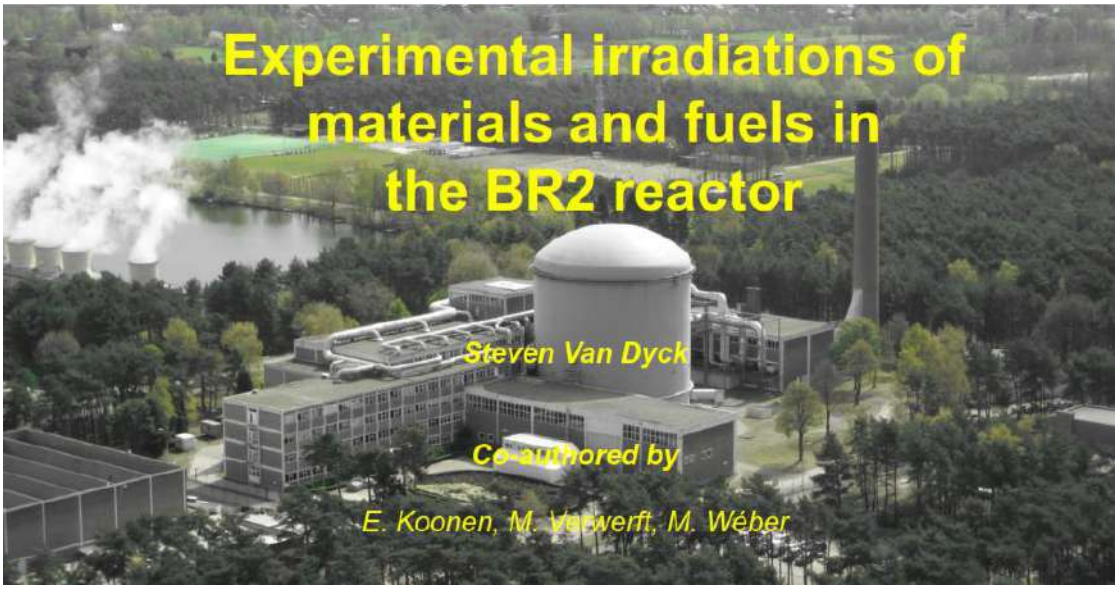


Figure II-1 : Photo aérienne du parc du réacteur de recherche BR2.

La boucle CALLISTO comme illustré sur les Figures II-2 et II-3 comprend trois parties principales suivantes [25]:

1- Trois sections en pile 'IPS'.

2- Panier d'irradiation des crayons combustibles dans l'IPS.

3- Équipement hors pile y compris le circuit de refroidissement et les systèmes auxiliaires.

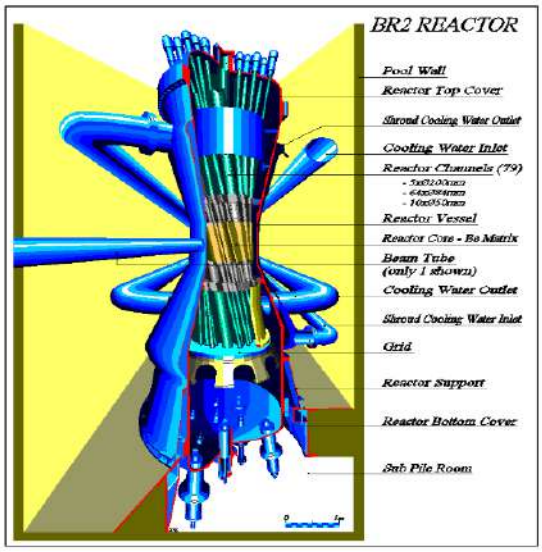


Figure II-2 : Schéma synoptique des canaux du réacteur BR2

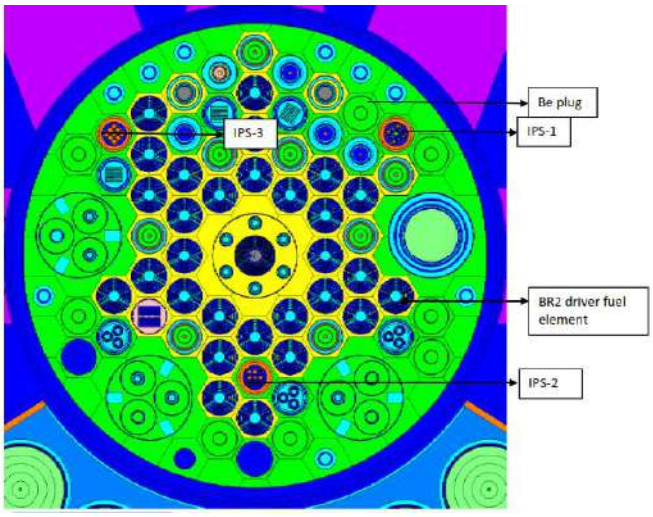


Figure II-3 : Schéma descriptif du cœur du réacteur BR2.

Les divers canaux du réacteur BR2 sont disposés suivant une géométrie d'un hyperboloïde de révolution voir Figure II-4, ce qui rend l'accès au réacteur aisé tout en donnant des flux neutroniques thermiques et rapides élevés de l'ordre de 10^{15} n/(cm^2 sec). Deux types de canaux sont utilisés :

- canaux de 200 mm de diamètre destinés à l'irradiation des assemblages contenant 36 crayons combustibles
- canaux de 84 mm de diamètre destinés à l'irradiation des assemblages contenant 9 crayons combustibles.

Les trois sections en pile sont localisées dans des canaux de 84 mm de diamètre et connectées au circuit de refroidissement hors-pile, au circuit d'injection de secoure. Par ailleurs, la boucle CALLISTO est dotée d'autres systèmes auxiliaires et d'instrumentation de mesures, qui sont situées à un niveau plus bas que les I.P.S. L'enveloppe pressurisée de chaque l'IPS peut être introduite dans un canal réflecteur du réacteur BR2 selon le flux d'irradiation désiré et peut être utilisée pour différents types de combustible.

II.3- DESCRIPTION DE LA SECTION EN PILE :

Une section en pile est présentée sur les Figures II-4 et II-5. Chaque section en pile présente deux parties principales [25]:

1- Une enveloppe pressurisée à double paroi localisée dans un canal réflecteur du réacteur BR2.

2- Un panier d'irradiation avec les crayons combustibles.

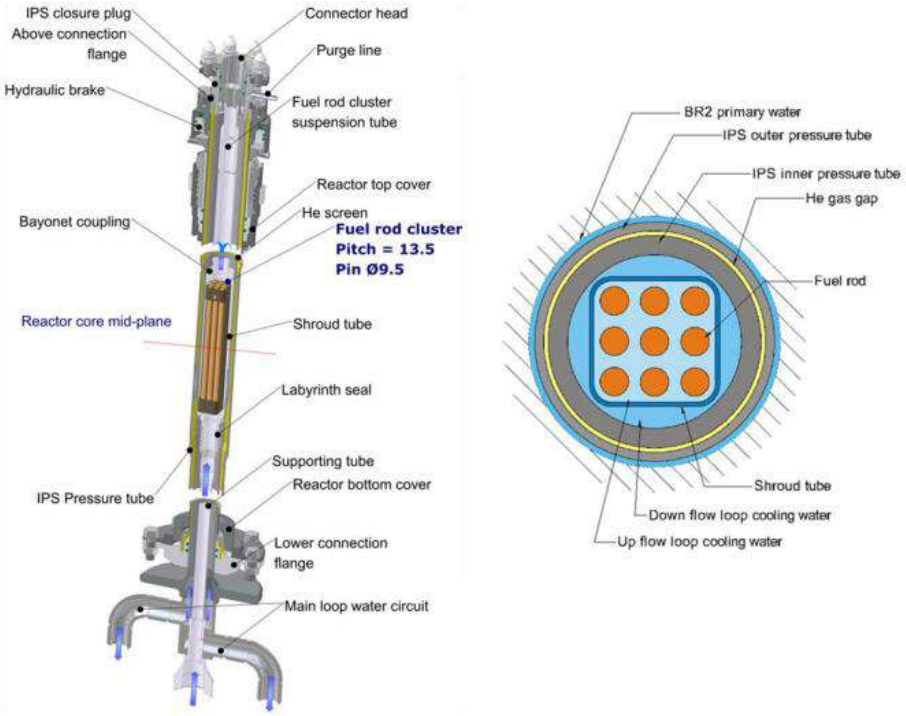


Figure II-4 : Schéma descriptif de la boucle CALLISTO.

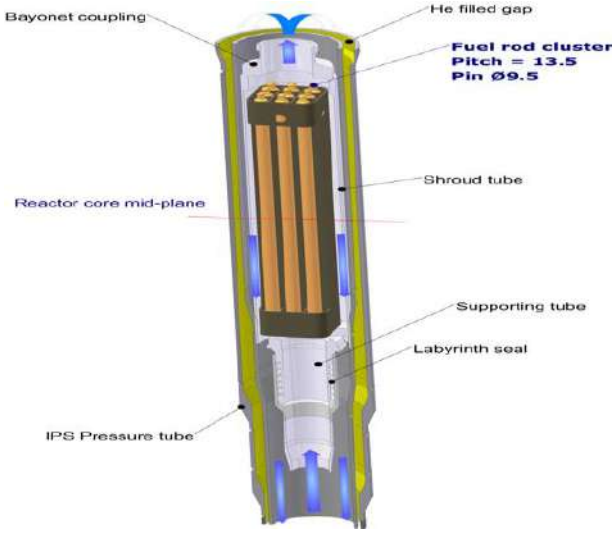


Figure II-5 : Schéma descriptif du panier d'irradiation des crayons combustibles.

II.3.1- DESCRIPTION DES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UNE I.P.S

II.3.1.i- Enveloppe pressurisée à double parois

L'enveloppe pressurisée, refroidie de l'extérieur par l'eau du circuit primaire du BR2, est constituée de deux tubes de pression séparés par une couche d'hélium sous une pression intermédiaire de 25 bars. La couche d'hélium sert au contrôle continu de l'étanchéité des deux circuits en contact et à l'isolation thermique des sections en pile, elle sert aussi à réduire les contraintes thermiques du tube interne.

II.3.1.ii- Assemblage des crayons combustibles

Chaque I.P.S contient un assemblage combustible constitué de 3×3 crayons combustibles de 9,5 mm de diamètre et de 1136 mm de longueur, disposés dans un tube carré en acier inoxydable.

II.3.1.iii- Structures internes ; tube support & tube de suspension

L'extrémité inférieure du tube carré est connectée au tube support qui constitue le conduit d'entrée du réfrigérant fixé au bas de l'IPS. Le tube de suspension fixé à l'extrémité supérieure de l'IPS c'est-à-dire au bouchon de fermeture est connecté au sommet du tube carré.

Le circuit de l'écoulement dans une I.P.S est constitué des quatre zones suivantes :

- Le tube support.
- Le tube carré.
- Le passage annulaire délimité par le tube carré et le tube de pression interne.
- Le passage annulaire engendré par le tube support et le tube de pression interne.

Les connections au circuit primaire de la boucle sont situées à la partie inférieure de chaque section en pile, l'eau de refroidissement entre par la partie centrale, à l'intérieur du tube support, remonte le long du tube, et à travers l'assemblage combustible pour être ensuite renversée de 180° à la sortie de la zone active et redescend alors par l'espace annulaire limité par le tube support et le tube interne de pression.

II.4- MODELE RELAP5 DE LA BOUCLE CALLISTO ET SIMULATION A L'ETAT STATIONNAIRE

II.4.1- INTRODUCTION

L'utilisation du code système RELAP5/MOD3.2 pour la simulation d'un système hydrodynamique nécessite un découpage judicieux du système en volumes de contrôles, et aux chois

adéquat des conditions initiales et aux limites. Il est particulièrement indispensable de veiller à la considération exacte de toutes les élévations de sorte que leur somme totale dans un circuit fermé doit être nulle.

Comme illustré sur la Figures II-6 La modélisation entière du circuit primaire de la boucle CALLISTO est réalisée par l'utilisation de 144 volumes de contrôles connectés par 147 jonctions. Le nombre de structures de chaleur introduites est de à 134 structures.

II.4.2- PROCEDES DE MODELISATION

Une des caractéristiques du code RELAP5/MOD3.2, est la possibilité de simuler un système par portion pour lui fixer les conditions initiales adéquates. Ceci nous a permis de simuler certains composants sensibles comme le pressuriseur, l'échangeur de chaleur, la pompe et les différentes vannes en dehors de la boucle.

Une combinaison de conduites, de volumes simples, de jonctions simples, de branches, a été utilisée pour la modélisation des branches chaudes et froides de la section hors pile, des sections en pile et enfin d'annulus pour les écoulements annulaires dans les I.P.Ss.

Les conduites uniformes ont été modélisées en composants PIPE, la division en volume de chaque composant pipe est basée sur l'optimisation du temps machine et prise en considération convenable des phénomènes physique.

La connection des composants est assurée par une jonction simple ou multiple, une vanne quelconque ou un composant BRANCH. Des options sont introduites dans le code permettant de tenir compte des effets de pertes de charge : singulière et régulière.

Le composant BRANCH est utilisé pour modéliser les différentes connections de volumes, notamment le premier volume du pressuriseur, les connections des conduites d'entrée des trois sections en pile, composant 120, des conduites de sortie des trois sections en pile, composant 220, l'entrée du pressuriseur, composant 223, l'entrée et sortie de l'échangeur de chaleur, composants 235 et 105, les entrées des trois sections en pile, composants 125, 130 et 135.

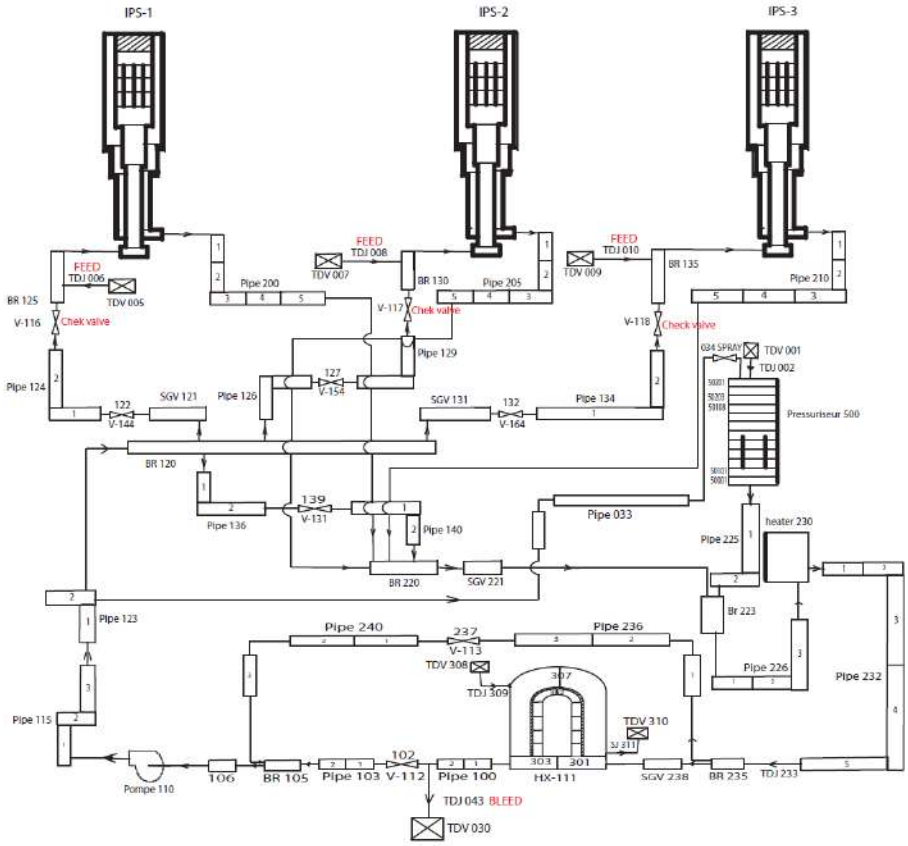


Figure II-6 : Modèle RELAP5 de la boucle CALLISTO.

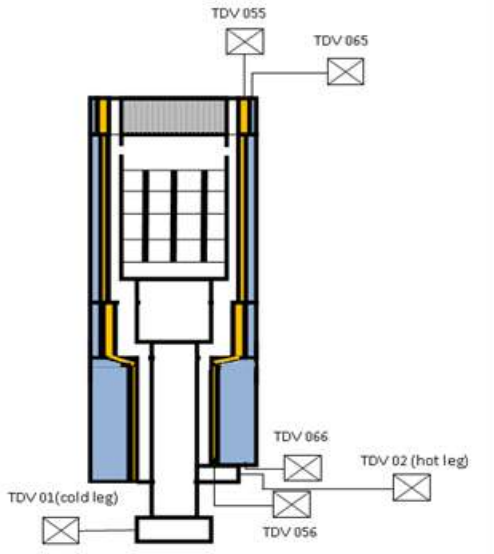


Figure II-7 : Modèle RELAP5 de la section d'essai on pile (IPS).

II.4.1- MODELISATION DES STRUCTURES DE CHALEUR DES TROIS I.P.SS.

Le code permet une modélisation complète des structures de chaleur, inclue les éléments combustibles, les plaques à échauffement électrique et le transfert à travers les parois des conduites vers l'atmosphère. Certaines propriétés thermiques de certains matériaux, comme l'UO_2, l'acier inoxydable, le Zircaloy sont introduites dans le code sous forme de tableaux en fonction des températures. Parmi ces propriétés on trouve les conductivités thermiques, les capacités volumétriques de chaleur. Les différents tableaux, donnant les capacités de chaleur et les conductivités thermiques, introduits pour les cinq structures suivantes : l'UO_2, l'acier inoxydable, la couche d'hélium, le fiberfrax, le Zircaloy [25].

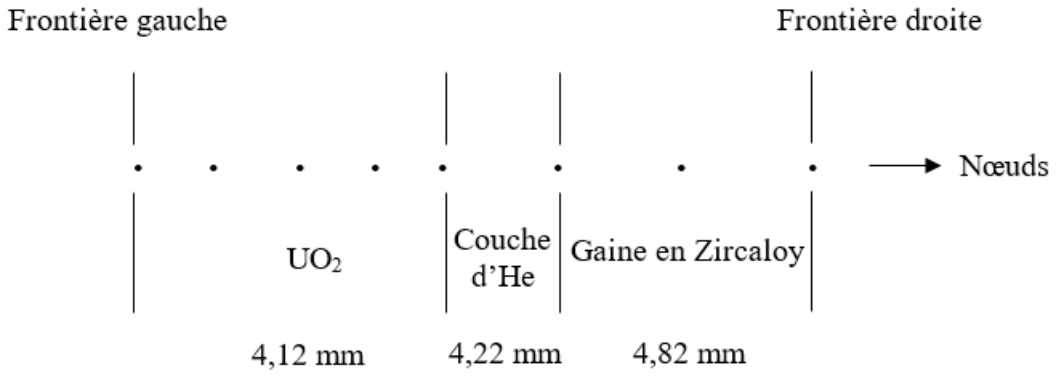


Figure II-8 : Discrétisation géométrique de l'élément combustible.

La puissance générée par chaque assemblage d'éléments combustibles est simulée par une série de valeurs tabulées en fonction du temps et d'un signal logique pour la simulation du SCRAM. La puissance maximale qui est égale à 185 kw correspond à la puissance générée dans l'I.P.S-1 avant le déclenchement du SCRAM.

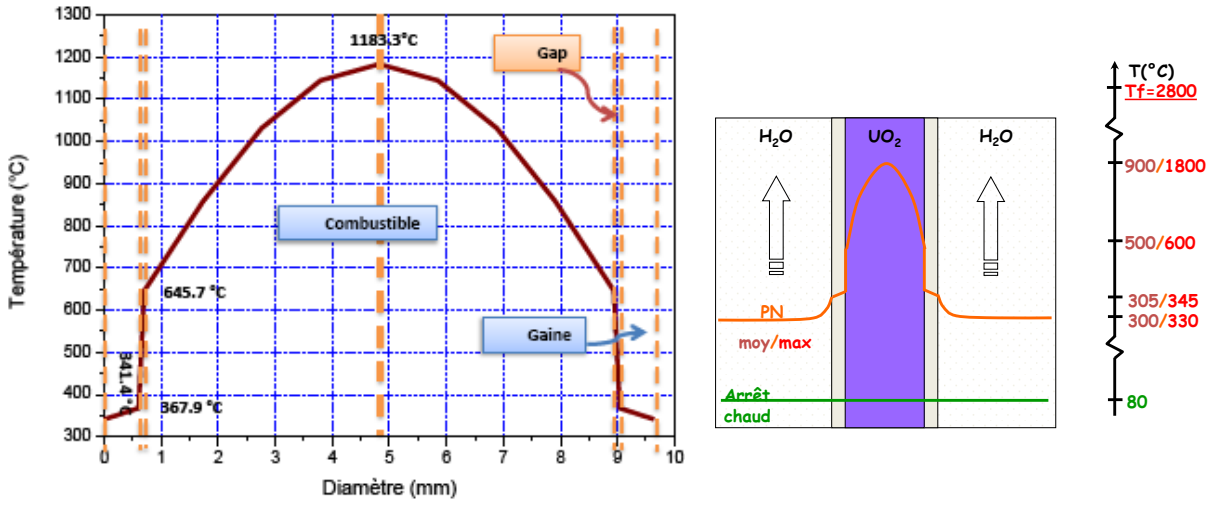


Figure II-9 : Profile radiale de température dans l'élément combustible.

II.5- CONCLUSION :

Ce chapitre s'intéresse à la description géométrique de la boucle CALLISTO et sa modélisation par le code système RELAP5. Une simulation à l'état stationnaire est réalisée et des résultats sont obtenus comme le profil radial de la température dans le crayon combustible.

CHAPITRE III : MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUES

III.1- INTRODUCTION

Grâce aux progrès informatique, il est maintenant possible de faire des calculs numériques précis sur les écoulements tridimensionnels, internes ou externes, compressibles ou incompressibles, visqueux ou potentiels dans les systèmes mécaniques. Dans le cas des turbomachines, la modélisation des équations qui régissent les écoulements est complexe et fait intervenir des interactions entre des structures de formes variées et le fluide [26].

Cette interaction modifie l'écoulement moyen de fluide et la turbulence. Toutefois, cette dernière décennie, on constate des avancées considérables en ce qui concerne la résolution des problèmes d'écoulements et d'interactions fluide-structure, autant pour les turbomachines que pour les réacteurs nucléaires. À cet effet, plusieurs types d'algorithmes et de méthodes numériques sont disponibles dans la littérature, et, généralement, les plus performants sont utilisés par des Logiciels commerciaux tels que : CFX, Fluent, StarCCM-, Open Foam…..etc.

La modélisation analytique des équations différentielles, régissant les écoulements en mécanique des fluides, n'est possible que pour des cas académiques simples. Pour la majorité des problèmes réels, tels que les écoulements dans les turbines, les réacteurs nucléaires, les solutions analytiques sont quasi-impossibles à cause des géométries et des écoulements complexes qui interviennent dans ces milieux fermés. Pour remédier à cette situation, il y a le recours à la modélisation numérique via les codes commerciales [26]. Une fois les équations différentielles sont établies pour un problème d'écoulement donné (modèle mathématique), il est possible de résoudre numériquement l'ensemble des équations qui interviennent dans le modèle mathématique. La modélisation numérique, généralement exprimée sous forme d'un système algébrique, suivie d'une résolution itérative, permet l'accès aux variables physiques du problème étudié. Toutefois, l'accès à la formulation algébrique nécessite, d'une part, la discrétisation du système étudié, et, d'autre part, l'utilisation des schémas de discrétisation des variables qui interviennent dans ce modèle mathématique (vitesse, accélération, pression, température, etc.). Autrement dit, la discrétisation des équations aux dérivées partielles, qui régit un problème d'écoulement donné, a pour but de transformer le problème continu en un problème discret. Parmi les méthodes numériques les plus populaires rencontrés en mécanique des fluides on trouve : la méthode de différences finis, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. La méthode des volumes finis sera abordée dans ce

chapitre par son utilisation dans l'outil CFX de ANSYS pour la modélisation de l'écoulement dans le canal de réfrigération [26].

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation des écoulements dans un canal de réfrigération d'une installation nucléaire type PWR. Pour cela, dans un premier temps, nous souhaitons présenter notre travail de simulation effectué grâce au logiciel ANSYS-ICEM-CFX.

Dans la première partie de ce qui suit, on présente la méthode des volumes finis permettant la résolution des équations moyennées ainsi qu'une description du code de calcul numérique ANSYS-ICEM-CFX.

Dans la deuxième partie, nous exposons la géométrie, le maillage et les conditions aux limites de notre modèle choisi.

III.2- MODELISATION DE L'ECOULEMENT DES FLUIDES :

L'écoulement des fluides est décrit par des équations aux dérivées partielles qui traduisent des principes physiques tels que les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie [27]**.**

III.2.1- EQUATION DE CONTINUITE

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho U) = 0 \qquad \text{(III-1)}$$

Où : ρ est la masse volumique et *U* est la vecteur vitesse.

Le régime d'écoulement soit permanant $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ et le fluide est incompressible d'où l'équation (III-1) devient [28]:

$$div(\rho U) = 0 \implies \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \qquad \text{(III-2)}$$

III.2.2- EQUATIONS DE QUANTITE DE MOUVEMENT

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux

continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, le mouvement d'air dans les locaux et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes [29].

$$\rho\left[\frac{\partial\vec{U}}{\partial t}+\left(\vec{\nabla}\vec{U}\right).\vec{U}\right]=-\vec{\nabla}p+\rho g+\mu\nabla^2\vec{U} \qquad \text{(III-3)}$$

III.2.3- ÉQUATION DE L'ENERGIE

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par la relation :

$$\frac{D}{Dt}\left(\rho C_pT\right)=\Delta(\lambda T)+q+\beta T\frac{Dp}{Dt}+\mu\phi \qquad \text{(III-4)}$$

Avec:

- $\frac{D}{Dt}\left(\rho C_pT\right)$: la variation totale d'énergie.
- $\Delta(\lambda T)$: la variation d'énergie par conduction.
- q : Puissance volumique dissipée.
- $\beta T\frac{Dp}{Dt}$: la variation d'énergie due à la compressibilité.
- $\beta T\frac{Dp}{Dt}=0$: pour un fluide incompressible.
- $\mu\phi$: la dissipation irréversible due aux frottements visqueux.

Les coefficients $C_p,\lambda\,et\,\beta$ sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide [28].

III.2.4- MODELE DE TURBULENCE

Les modèles de turbulence se présentent, en général, sous la forme d'un ensemble d'équations dans lesquelles apparaissent les contraintes turbulentes. Cet ensemble d'équations complète les équations dynamiques moyennes et doit permettre la résolution simultanée de toutes les équations du mouvement. Nous nous limitons ici à des modèles de fermeture plus simples et plus usuels, qui tendent à remplacer les termes supplémentaires par des termes de diffusion [30].

On pratique le code de calcul CFX utilise principalement l'un de ces modèles : $k-\varepsilon$, k -ω, et SST,

Où : - k : l'énergie cinétique turbulente.

- $\varepsilon\ et \omega$ sont respectivement le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation spécifique.
- $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ qui représente le taux de dissipation par unité d'énergie cinétique turbulente.

Notons que parmi tous ces modèles, on a utilisé le modèle SST, ce dernier sera donc notre modèle de turbulence, pour la simulation.

III.2.4.i- MODELE DE FERMETURE ($k-\varepsilon$) [31]

Le modèle de fermeture ($k-\varepsilon$) est l'un des plus utilisé dans le monde industriel. La viscosité turbulente est donnée par l'expression :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{(III-5)}$$

Et est donc écrite par combinaison de 1'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation, ces deux paramètres sont estimés par les équations de transport ci-dessous. C'est un modèle numériquement stable et robuste, il est meilleur pour les écoulements éloignés des parois. Il est pour cela souvent associé à une loi de paroi qui permet d'éviter la résolution lourde des équations de bilan jusqu'à cette paroi.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \overline{u_j}\dfrac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \dfrac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon \\ \dfrac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \dfrac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \dfrac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \dfrac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\right] + \dfrac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}P_k - C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon) \end{cases} \qquad \text{(III-6)}$$

Où :

- $\sigma_k\ et\ \sigma_\varepsilon$ Sont appelées nombres de Prandtl ;
- P_k Caractérise la génération d'énergie cinétique turbulente issue de gradient de vitesse moyenne, et des effets de la pesanteur.
- $C_{1\varepsilon}\ et\ C_{2\varepsilon}$ Sont des constantes.

Les constantes impliquées dans ce modèle, que l'on souhaite les plus universelles possibles :

- $C_\mu = 0.09$: Loi logarithmique en paroi. - $\sigma_k = 1.$
- $C_{1\varepsilon} = 1.44$: déformation ou cisaillement uniforme. - $\sigma_\varepsilon = 1.3.$
- $C_{2\varepsilon} = 1.92$: décroissance turbulente isotrope.

III.2.4.ii- MODELE DE FERMETURE $(\boldsymbol{k-\omega})$ DE WILCOX [31]

Ce modèle repose sur l'utilisation d'une échelle caractéristique des gros tourbillons, et sur la même linéarité entre la viscosité turbulente et le cisaillement du champ moyen. La viscosité turbulente est donnée dans ce cas par la relation suivante :

$$\mu_T = \alpha \frac{\rho k}{\omega} \tag{III-7}$$

Où α est un coefficient permettant de diminuer l'influence de la viscosité turbulente en effectuant une correction « bas-Reynolds ». Les équations de transport pour $(k\ et\ \omega)$ sont :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \dfrac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k \\ \dfrac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \dfrac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k \end{cases} \tag{III-8}$$

Dans ces deux équations de transport :

- G : Représente la génération d'énergie cinétique turbulente ou de la dissipation effective.
- $\Gamma_k\ et\ \Gamma_\omega$: Représentent la diffusivité effective de$(\boldsymbol{k}\ et\ \boldsymbol{\omega})$, respectivement.
- $Y_k\ et\ Y_\omega$: Représentent la dissipation de $(\boldsymbol{k}\ et\ \boldsymbol{\omega})$ par la turbulence.

L'intérêt principal de ce modèle est intégrable jusqu'à la paroi.

III.2.4.iii- LE MODELE DU TRANSPORT SHEAR-STRESS TRANSPORT (SST)

Il combine le modèle $\boldsymbol{k-\omega}$ de Wilcox original qui est efficace près des murs et le modèle $k-\varepsilon$ de Launder à l'écart des murs en utilisant une fonction de mélange [32].

L'idée derrière le SST et de combiner le modèle $K-\omega$ et le modèle $K-\varepsilon$ à l'aide d'un coefficient d'amortissent F1, F1égale a '1' près de la paroi et '0' loin de cette dernière.il active le modèle de Wilcox ($K-\omega$) pour le reste de l'écoulement, par cette approche, l'exécution du modèle Wilcox peut être utilisé sans erreurs potentielles [33].

Les équations pour ce modèle peuvent être écrites comme

$$\begin{cases} \rho\dfrac{Dk}{Dt} = \tau_{ij}\dfrac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k\rho\omega + \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right] \\ \rho\dfrac{D\omega}{Dt} = \dfrac{\gamma}{\nu_t}\tau_{ij}\dfrac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta\rho\omega^2 + \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \dfrac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\dfrac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega^2}\dfrac{1}{\omega}\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\dfrac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{cases} \quad \text{(III-9)}$$

III.3- MODELESATION NUMERIQUE

Les équations décrites au modèle mathématique sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

• Méthodes des différences finies (MDF).

• Méthodes des éléments finis (MEF).

• Méthodes des volumes finis (MVF).

Dans ce chapitre, en se basant sur la méthode des volumes finis pour l'étude de l'écoulement du fluide. Cette dernière sera appliquée à la résolution de notre problème thermohydraulique par notre simulateur ANSYS-CFX. Un maillage régulier et structuré en chaque région du canal de réfrigération à l'aide ANSYS-ICEM, et un nombre total des nœuds pour chaque configuration du canal ont été employé pour modéliser l'écoulement du fluide dans ce problème selon les directions axiales et radiales respectivement.

III.3.1- METHODES DE DISCRETISATION DES EDP :

Pour passer d'un problème exact continu régit par EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes [34].

- Méthode différances finis.

- Méthode volumes finis.

- Méthode éléments finis.

La principale différence entre les trois méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisations [35].

III.3.1.i- METHODE DES DIFFERENCES FINIES :

La méthode des différences finies (MDF) a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelques codes spécialisés [20].

III.3.1.ii- METHODE DES VOLUMES FINIS :

La méthode des volumes finis (MVF) est une approche commune utilisée dans les codes MFN (mécanique des fluides numérique). Les équations qui régissent le fluide sont résolues sur des volumes de contrôle discret [20].

III.3.1.iii- METHODE DES ELEMENTS FINIS :

La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée dans l'analyse structurale des solides, mais est également applicable aux fluides. Cependant, la formulation à éléments finis nécessite des soins particuliers pour assurer une solution conservative [20].

III.3.2- PRINCIPE DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS :

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul sans chevauchement, de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul. L'avantage déterminant de cette méthode par rapport aux autres méthodes est qu'ils sont conservatifs ; en bref, tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre [28].

Dans la méthode des volumes finis les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sous une forme intégrale. La pierre angulaire de cette méthode réside dans le théorème de Gauss (appelé aussi le théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski) et qui permet de transformer une intégrale de volume en une intégrale de surface [28].

- **Avantage :** [35]
  - Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle, valable pour n'importe quelle finesse du maillage.
  - Mise en œuvre relativement facile.
  - Applicable aux geometries complexes.
  - Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande).
- **Inconvénients :** [35]
  - Moins précis que les méthodes spectrales.
  - On dispose de peu de résultats de convergence.

III.3.3- FORME GENERALE DES EQUATIONS DU SYSTEME [36]

Les équations du système résolues sont écrites sous la forme conservative d'équation de transport généralisée suivante:

$$\int_D \left(\frac{\partial}{\partial t}\rho\varphi\right).dV + \oint_{\partial D} \rho\varphi\vec{v}.dS = -\oint_{\partial D} J_\varphi.dS + \int_D S_\varphi.dV \qquad \text{(III-10)}$$

Avec:

- $\int_D \left(\frac{\partial}{\partial t}\rho\varphi\right).dV$: Terme instationnaire.
- $\oint_{\partial D} \rho\varphi\vec{v}.dS$: Terme advectif.
- $\oint_{\partial D} J_\varphi.dS$: Terme diffusif.
- $\int_D S_\varphi.dV$: Terme source.

	φ: Quantité conservée	J_φ: Flux associé	S_φ: Sources volumiques
Bilan de masse	*1*	*0*	*0*
Bilan de quantité de mvt	$\vec{V}$	$-\bar{\bar{\sigma}}$	$\vec{f}$
Bilan énergétique	$e+\frac{1}{2}V^2$	$\vec{q} - \bar{\bar{\sigma}}.\vec{V}$	$\vec{f}.\vec{V}+r$

Tableau III-1 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables

III.4- ENVIRONNEMENTS LOGICIELS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique leader de son marché utilisé dans le développement de produit industriel. Il couvre toutes les étapes nécessaires de simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique, appelé WORKBENCH, intégrant la mécanique de fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de système et de circuit [37].

Pour réaliser une simulation numérique il faut passer par trois étapes principales, à savoir : la préparation, la solution et le traitement des résultats.

III.4.1- PRE PROCESSING

Préparation des données du problème pour la géométrie du domaine de calcul on utilise le module Design Modeler, pour la génération du maillage de discrétisation on utilise le module ICEM-CFD ou le mailleur du CFX, et pour la définition des phénomènes physiques et thermo-hydrauliques, détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites on utilise le module CFX.

III.4.2- LA RESOLUTION

C'est la solution du problème par une méthode numérique. Dans cette étape on utilise le code ANSYS-CFX.

III.4.3- POST PROCESSING

Visualisation du domaine de calcul et du maillage, tracé des vecteurs de vitesse et des lignes de courant, contours, extractions de surfaces bien définis, manipulation des graphes (translation, rotation, et redimensionnement), exportation des figures sous format Windows Meta Files (*.wmf) et pst script (*.ps).

III.5- STRUCTURE DU CODE ANSYS-CFX

CFX est un code de dynamique des fluides, qui utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations moyennées de Navier-Stokes (RANS) en 3D, ainsi que de conservation de la masse et d'énergie. CFX est reconnu pour sa précision, sa robustesse et sa rapidité exceptionnelle pour les machines tournantes (pompes, ventilateur, compresseurs, turbine à gaz et hydrauliques). L'un des avantages de CFX est qu'il résout les équations en trois dimensions spatiales, permettant ainsi de simuler des problèmes près de la réalité des géométries industrielles et qu'il fonctionne strictement en trois dimensions, nécessitant des maillages avec beaucoup plus d'éléments qu'un calcul en deux dimensions spatiales, pour obtenir une précision similaire. Lors de cette étude, la version 19.2 du logiciel CFX a été utilisée. [38].

ANSYS CFX se compose de trois modules qui communiquent entre eux comme montré sur la Figure III-1. Un logiciel qui permet la réalisation de la géométrie et du maillage est nécessaire pour exécuter une analyse de CFD.

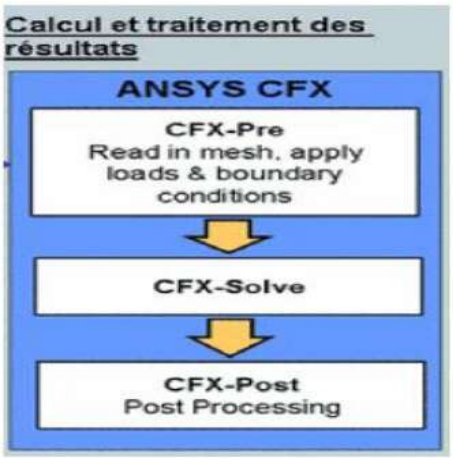


Figure III-1 : Structure du code ANSYS CFX [42]

III.5.1- CFX-PRE

CFX-Pré Offre une interface puissante pour la définition du problème (modèle choisi, condition Initiale, condition aux limites, propriété de fluide d'écoulement…etc.), voir la Figure III-2. Le domaine de calcul est défini à l'aide du module CFX-Pré du code de calcul ANSYS. Tout d'abord on définit le fluide qui est un fluide incompressible (eau) ; le régime est stationnaire, le modèle de turbulence est celui de limites à chaque section entourant le domaine de calcul.

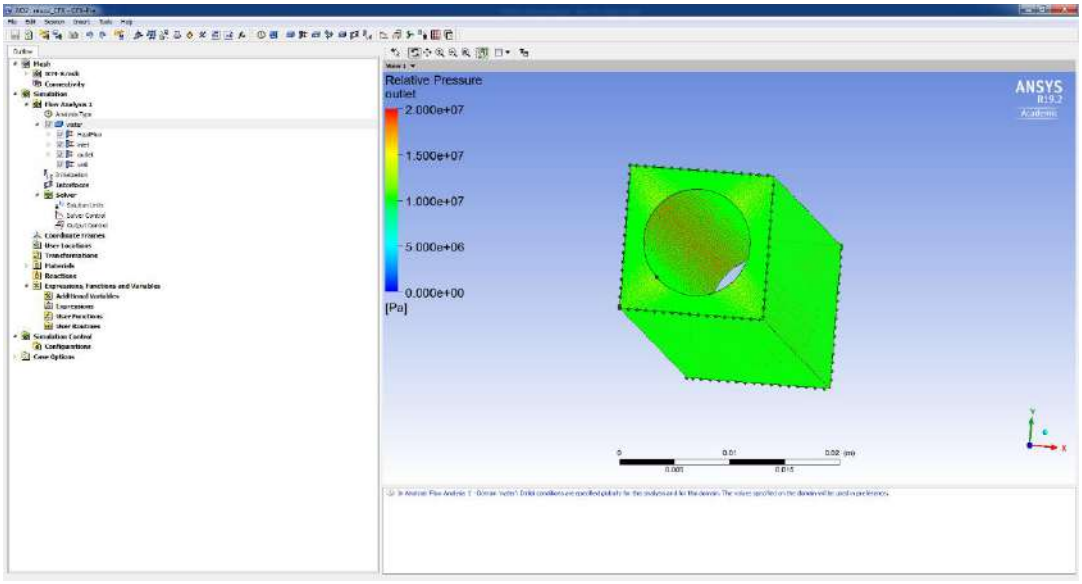


Figure III-2 : Surfaces limitant la géométrie du domaine de calcul par ANSYS CFX-PRE.

III.5.2- CFX-SOLVER

Le code de calcul CFX, utilise une méthode couplée où les équations hydrodynamiques (u, v, w et p) sont résolues en même temps comme une équation unique. Cette approche utilise une méthode entièrement implicite pour chaque pas de temps. Dans le cas d'un écoulement stationnaire, le pas de temps se comporte comme un paramètre d'accélération pour rendre la solution une solution stationnaire convergente et plus au moins réelle [28]. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour une erreur bien définie ou un nombre d'itération maximal. Tous les résultats sont stockés dans un fichier (*.res).

III.5.3- CFX-POST

Il est conçu pour permettre la visualisation facile et le traitement quantitatif des résultats de simulations. Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse des résultats en forme de:

• Lignes de courant, Champ de vitesse…
• Visu de différents paramètres définis par l'utilisateur
• Nouveaux variables de calcul

De même, il permet d'exporter les résultats en différents formats afin de les traiter sur d'autres logiciels de graphisme [39].

III.6- ANSYS-ICEM-CFD

Ce module permet de préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez conviviale. Dans le cas de notre travail on a fait recours à l'ICEM CFD pour générer uniquement le maillage. Un des avantages de ce logiciel, réside dans sa simplicité et sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. Pour le maillage, ICEM CFD utilise des structures mono ou multi-blocs en fonction de la géométrie, il permet de générer deux types de maillages, le maillage tétraédrique et hexaédrique [36]. Pour chaque configuration (géométrie – maillage) un fichier de données (*.cfx5) (* : nom de fichier) doit être exporté vers CFX. L'interface graphique de l'ANSYS ICEM CFD est montrée sur la Figure III-3 et comporte les éléments suivants :

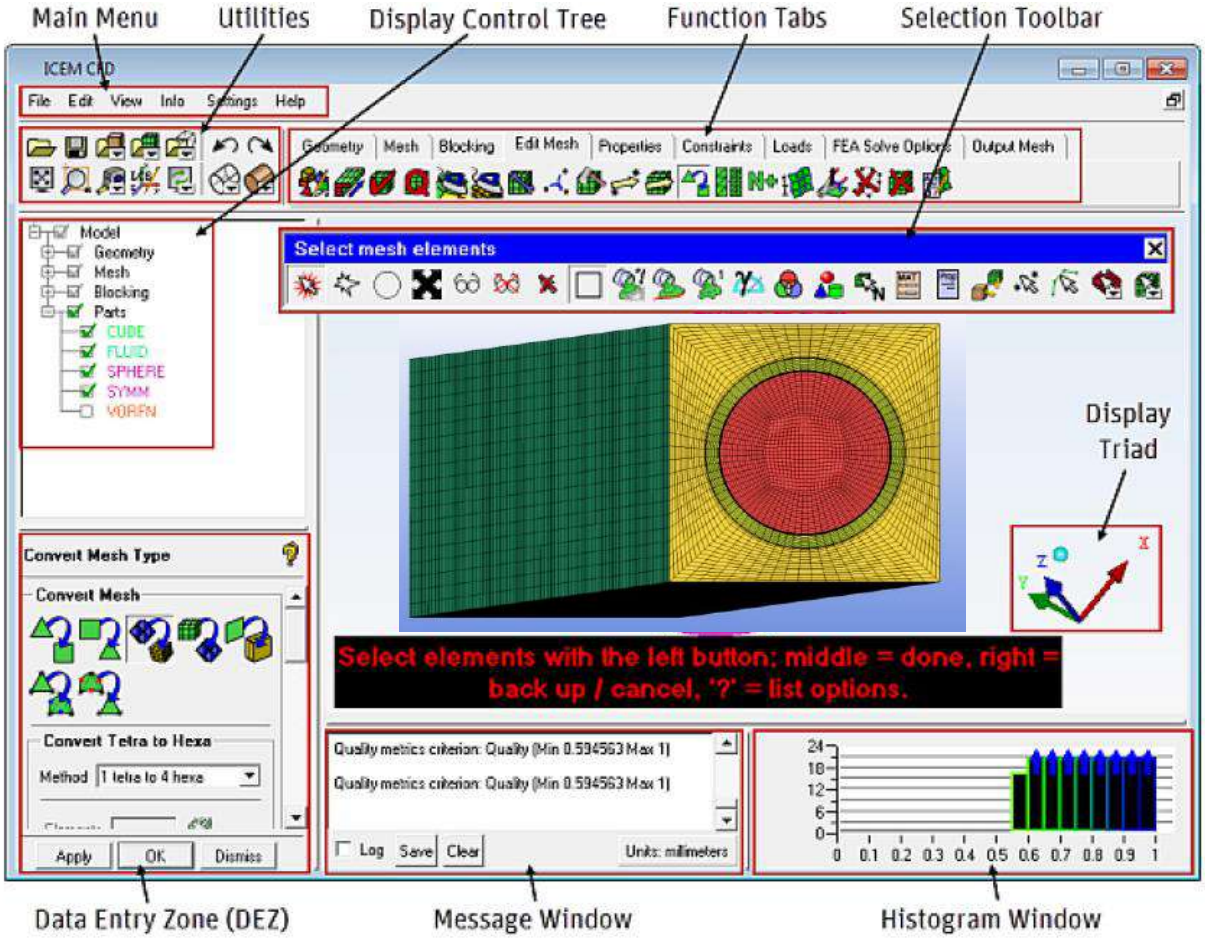


Figure III-3 : Interface graphique de l'ANSYS ICEM CFD [43].

III.7- MISE EN ŒUVRE NUMERIQUE : METHODOLOGIE

III.7.1- REPRESENTATION GEOMETRIQUE DU DOMAINE

Nous avons utilisé les ressources informatiques disponibles pour réaliser la modélisation et la simulation d'un canal de réfrigération le long d'un assemblage combustible dont nous disposions de certaines informations de base, ces dernières nous on permit de dimensionner et de dessiner numériquement les différents éléments qui constituent cette canal.

III.7.1.i- Préparation de la géométrie par Design Modeler d'un canal de réfrigération

Dans le cœur d'un réacteur à eau sous pression REP ou PWR typique au fonctionnement de la boucle CALLISTO, sujet d'étude dans ce mémoire, en fonctionnement nominal, la vitesse du fluide réfrigérant est à la direction privilégié verticale ascendante le long de l'assemblage combustible. L'assemblage de combustible est constitué de barreaux cylindriques à section circulaire. Usuellement,

on définit une surface caractéristique, dénommée sous-canal, qui soit suffisamment petite pour représenter la physique mais compatible avec les capacités de modélisation. Cette section sous-canal représente la surface dans les cas de figures suivant qui sont schématisés ci-dessous :

- La surface qui entoure un seul élément combustible ;
- La surface comprise entre 02, 04 et 09 éléments combustibles.

III.7.1.i.a- Cas d'un élément combustible :

Le schéma ci-dessous représente un canal de réfrigération composé d'un élément combustible d'une longueur d'un mètre et d'un diamètre de 9,64 mm. Cet élément est entouré par un caloporteur de type eau d'une arrête de 13 mm et de longueur de un mètre.

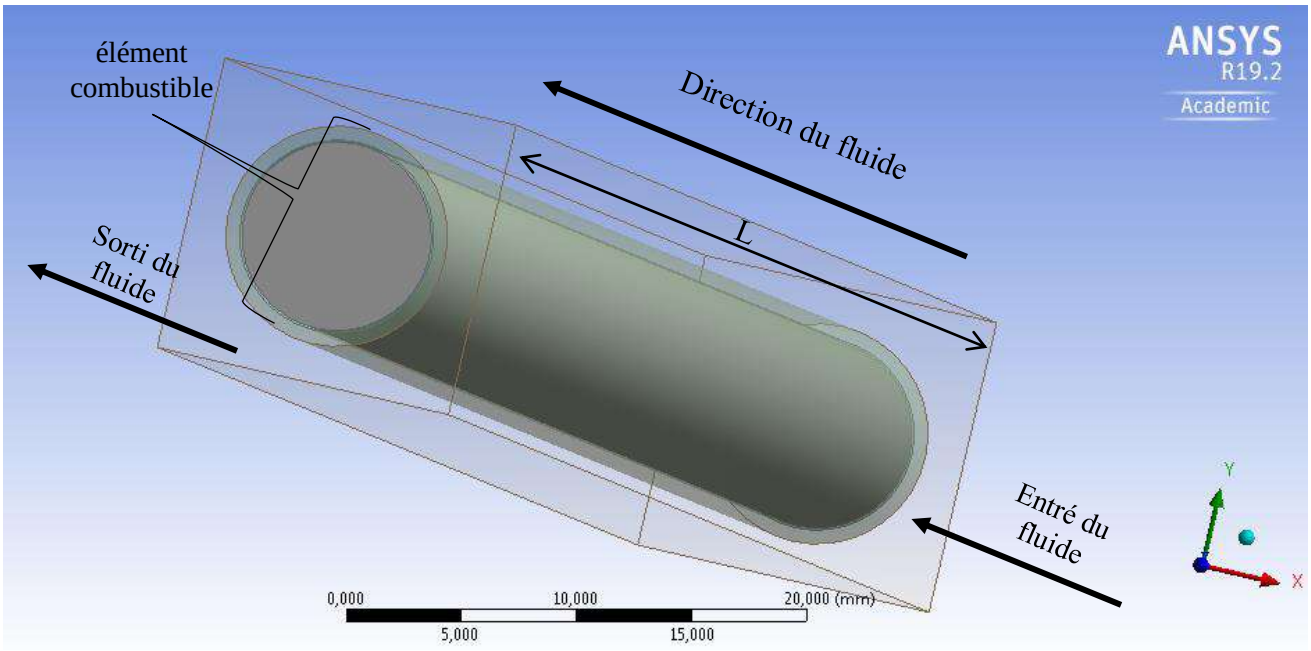


Figure III-4 : Représentation tridimensionnelle de la géométrie du canal de réfrigération.

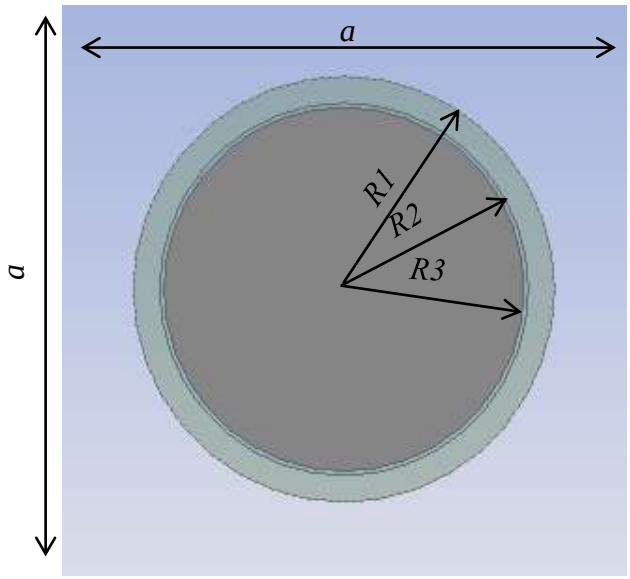


Figure III-5 : Représentation de la géométrie en 2D avec le dimensionnement du domaine.

La composition du canal de réfrigération de la boucle CALLISTO est représentée dans la Figure ci-dessous. Au centre se trouve le combustible comme matière fissile, ensuite un jeu rempli d'hélium, sert à empêcher les produits de fission de s'échapper, puis un matériau de gainage en alliage de zirconium qui est en contact direct avec l'eau caloporteur.

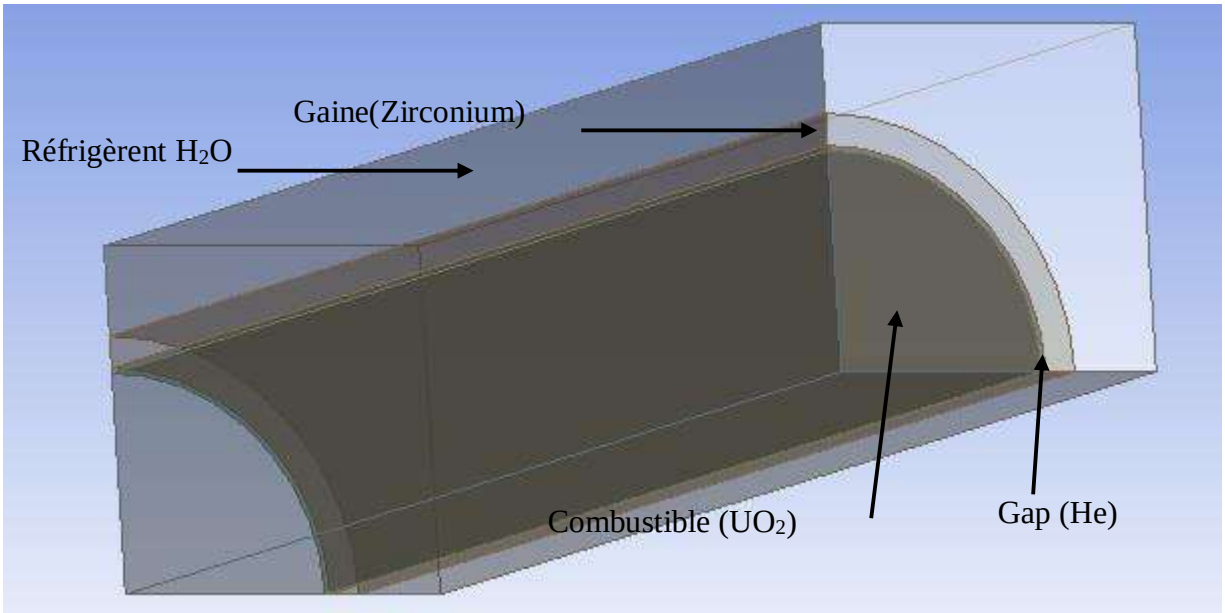


Figure III-6 : Différents composants du domaine.

Les Données Géométriques du domaine Etudié sont récapitulé sur le tableau ci-dessous :

Données Géométriques	Les valeurs (m)
L	1
A	$13*10^{-3}$
R1	$4.82*10^{-3}$
R2	$4.22*10^{-3}$
R3	$4.12*10^{-3}$

Tableau III-2 : Données Géométriques du domaine Etudié

- L : La longueur du canal (m).
- *a*: La hauteur et la largeur du canal (m).
- R1 : Le rayon de la gaine (Zirconium) (m).
- R2 : Le rayon du Gap (He) (m).
- R3 : Le rayon du combustible (UO2) (m).

III.7.1.i.b- Cas de deux éléments combustibles :

Dans ce cas le fluide s'écoule à travers deux éléments combustibles comme il est illustré sur la Figure III-7:

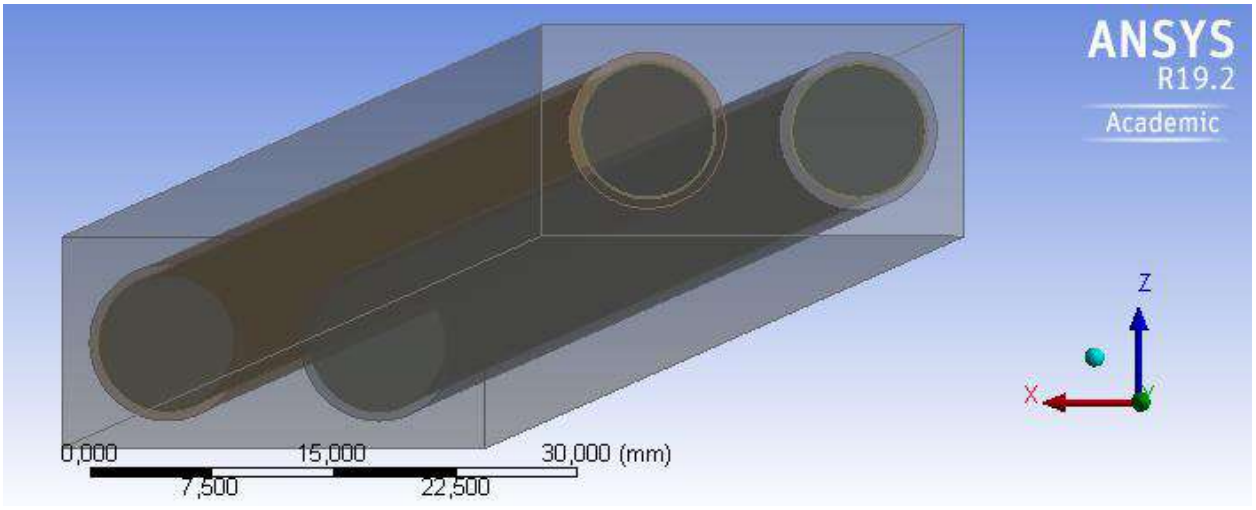


Figure III-7 : Canal de réfrigération comportant deux éléments combustibles.

III.7.1.i.c- Cas de quatre éléments combustibles :

Dans ce cas le fluide s'écoule à travers quatre éléments combustibles comme il est illustré sur la Figure III-8:

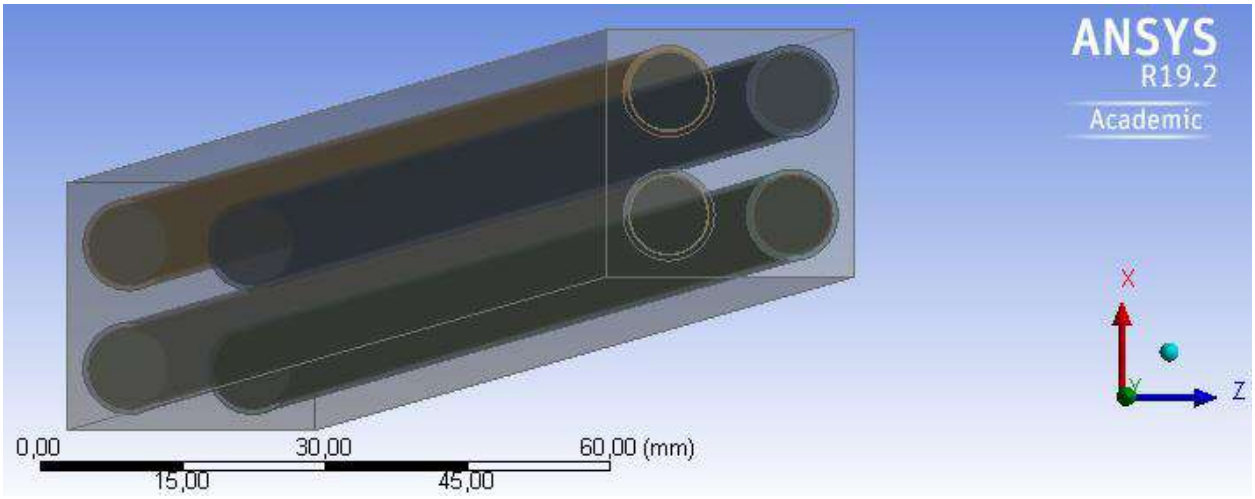


Figure III-8 : Canal de réfrigération comportant quatre éléments combustibles.

III.7.1.i.d- Cas de neuf éléments combustibles :

Dans ce cas le fluide s'écoule à travers neuf éléments combustibles comme il est illustré sur la Figure III-9 représentant la totalité du canal de réfrigération de la section d'essai de la boucle CALLISTO.:

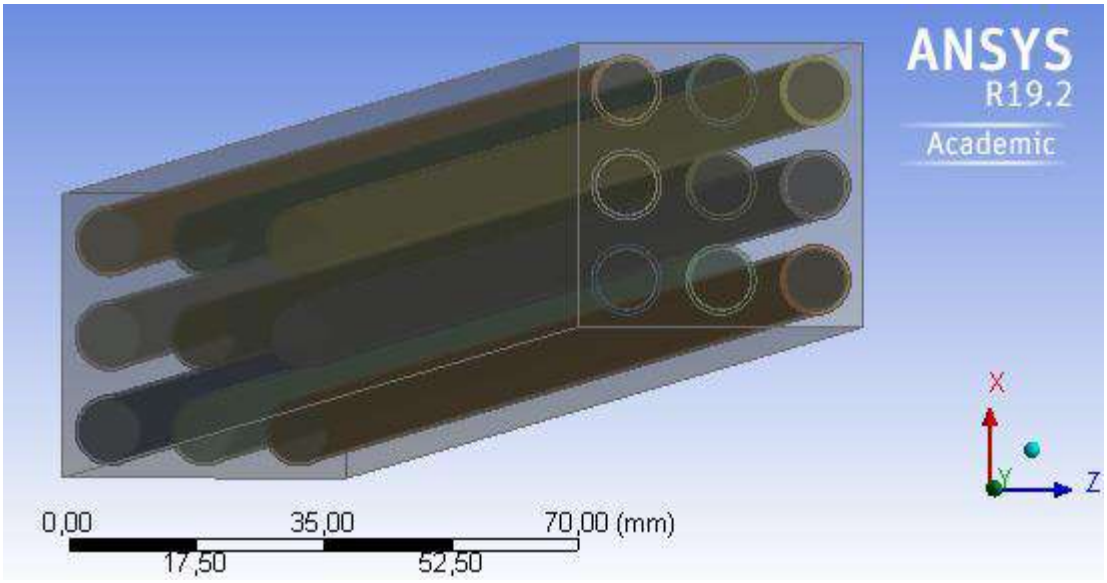


Figure III-9 : Canal de réfrigération comportant neuf éléments combustibles.

III.7.2- REPRESENTATION DU MAILLAGE DU DOMAINE

Comme le calcul s'effectue sur deux modules d'ANSYS, il s'agit du CFX et Thermique Stationnaire, il est souhaitable de mailler la partie solide (Crayon combustible) et la partie fluide (eau) séparément. Pour cela, on va représenter ci-dessous le maillage des deux parties en utilisant le mailleur ICEM-CFD pour quarte cas de figures : Canal contient un crayon combustible, deux crayons combustibles, quarte crayons combustibles et neuf crayons combustibles.

III.7.2.i- Préparation de maillage par ICEM CFD de l'élément combustible

Le maillage de l'élément combustible est réalisé grâce à ICEM-CFD pour un totale de 310368 nœuds et 260337 éléments.

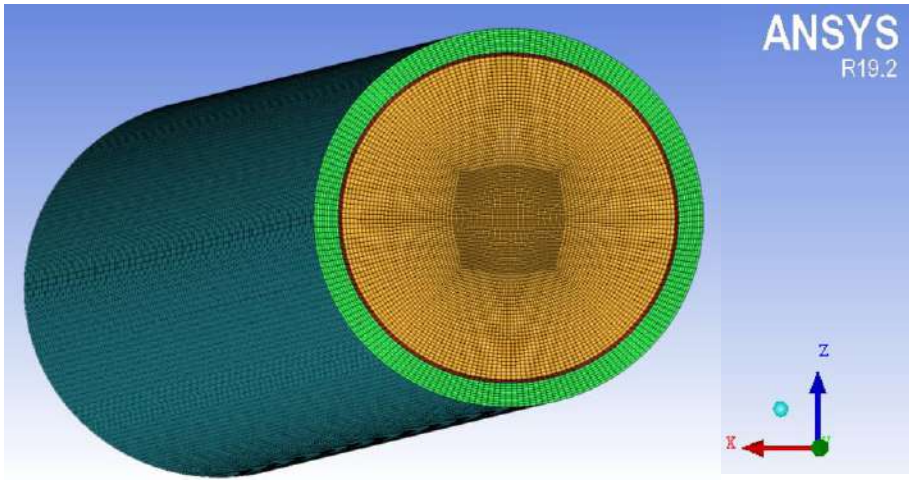


Figure III-10 : Maillage d'un élément combustible.

III.7.2.ii- Préparation de maillage par ICEM CFD d'un canal de réfrigération

Le maillage considéré ne concerne que le domaine fluide de chaque configuration de canal de réfrigération

Les résultats des différents maillages utilisés pour la simulation sont récapitulés ci-dessous :

III.7.2.ii.a- Cas d'un élément combustible :

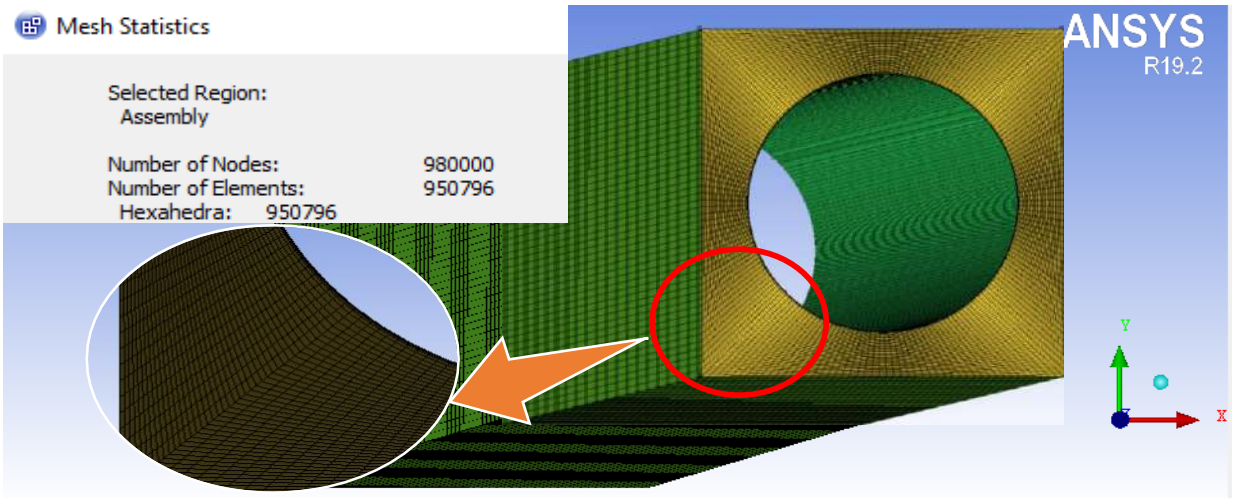


Figure III-11 : Maillage d'un canal de réfrigération pour un élément.

III.7.2.ii.b- Cas de deux éléments combustibles :

Pour des reason de capacité de calcule on prend juste une partie du domaine avec une certaine symétrie comme illustré sur la Figure III-12.

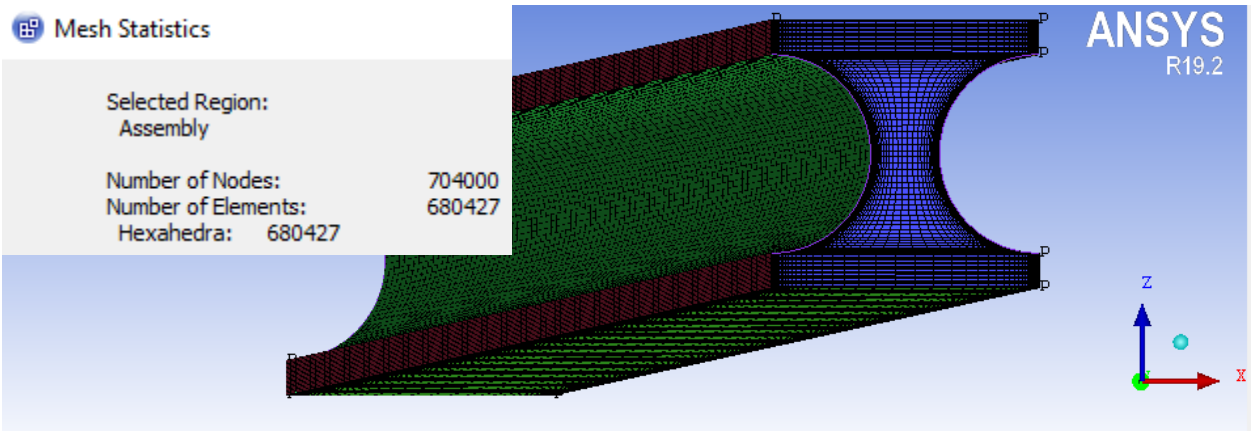


Figure III-12 : Maillage d'un canal de réfrigération pour deux éléments combustibles.

III.7.2.ii.c- Cas de quatre éléments combustibles :

Toujours pour des raisons de capacité de calcul on prend juste une partie du domaine avec une symétrie comme illustré sur la Figure III-13

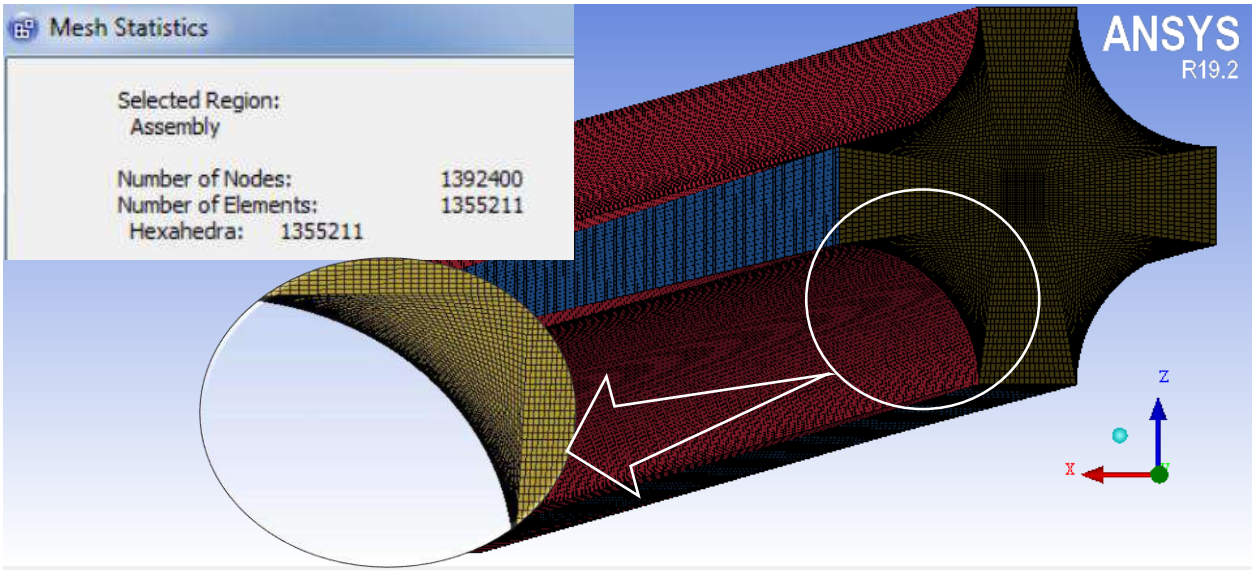


Figure III-13 : Maillage d'un canal de réfrigération pour quatre éléments.

III.7.2.ii.d- Cas de neuf éléments combustibles :

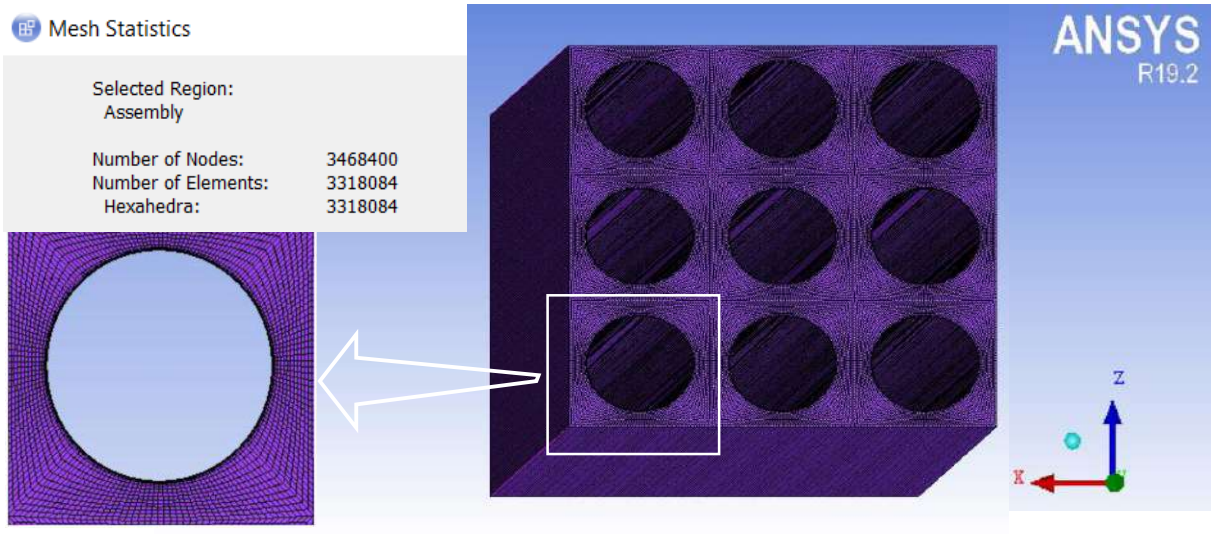


Figure III-14 : Maillage d'un canal de réfrigération pour neuf.

III.8- SIMULATION NUMERIQUE

III.8.1- INTRODUCTION

La simulation du transfert de chaleur dans le crayon combustible est effectué grâce au module de ANSYS-Thermique Stationnaire représenté par la Figure III-15.

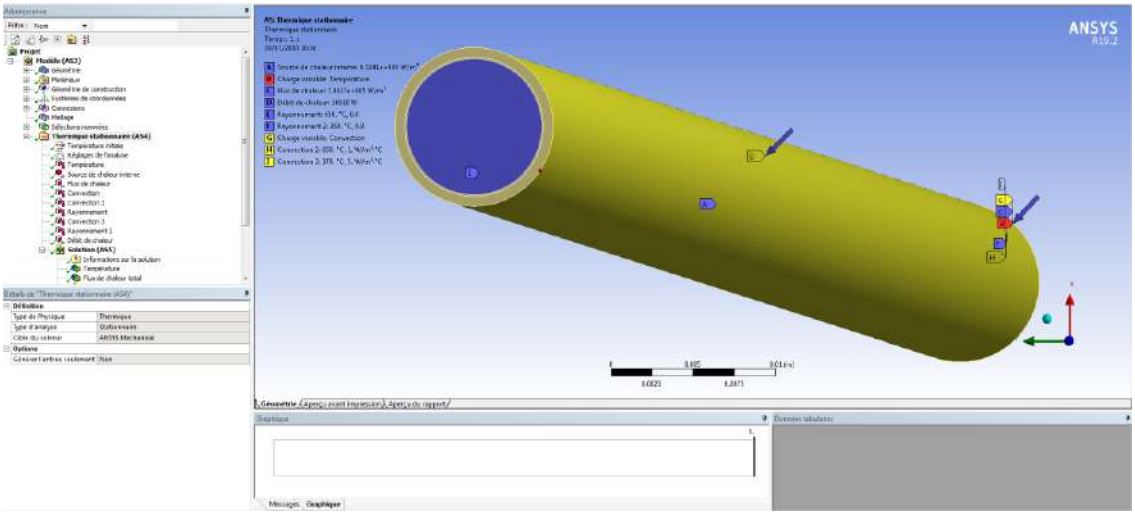


Figure III-15 : Module de l'ANSYS-Thermique Stationnaire pour la simulation du transfert de chaleur au sein du crayon combustible.

III.8.2- CONDITIONS AUX LIMITES

III.8.2.i- Cas de l'analyse thermique

Dans cette étude numérique nous sommes intéressés à la chaleur dégagée par l'élément combustible. Les propriétés des matériaux constituant cet élément combustible et ses caractéristiques sont fonction de la température allant de la température de fonctionnement jusqu'à la température de fusion de chaque matériaux. Dans le tableau ci-dessous, on donne quelques informations jugées utiles pour chaque matériau. .

	T de fusion (°C)	K (W/m.°k)
Combustible UO2	2800	(9.5-2.1) pour T (100 °C-2900 °C)
Gap (He)	-	0.152
gaine (alliage de Zirconium)	1855	(22-34) pour T (100 °C-1700 °C)

Tableau III-3 : Diférentes caractéristique de chaque matériau.

Pour entamer ce calcul, on a imposé une source de puissance volumique interne de 6,3241 10^8 W/m^3 dans le combustible lui-même (UO2).

III.8.2.ii- Cas de l'analyse CFX

Le réfrigérant utilisé dans cette étude est l'eau légère H_2O à haute pression et à haute température.

L'analyse thermohydraulique s'effectue par le biais du module d'ANSYS-CFX représenté par la Figure III-16.

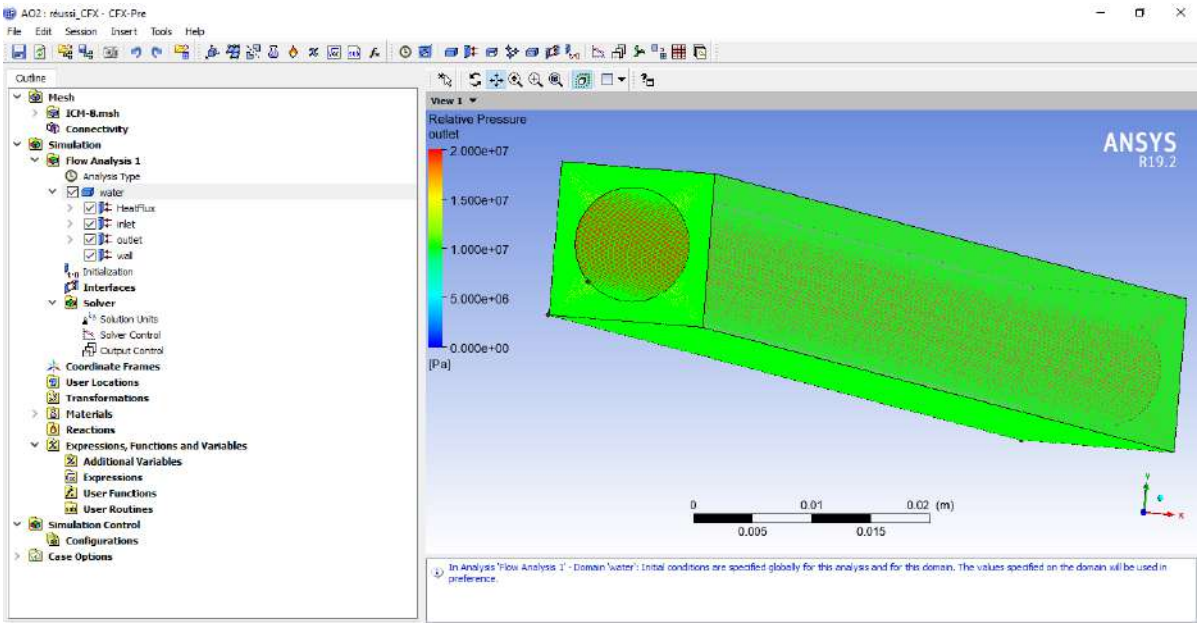


Figure III-16 : Modèle CFX du calcul thermohydraulique du canal de réfrigération

Les résultats obtenus par ANSYS Thermique Stationnaire du transfert de chaleur au sein de l'élément combustible sont utilisés comme conditions initiale pour le calcul CFX pour la simulation numérique de l'écoulement du fluide caloporteur. Le flux de chaleur à la surface de la gaine est pris comme condition initiale pour le cas du fluide.

Le tableau ci-dessous récapitule les conditions aux limites et initiales imposées au domaine pour démarrer la simulation.

Domain	Boundaries	
water	**Boundary - inlet**	
	Type	INLET
	Location	INLET
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Heat Transfer	Static Temperature
	Static Temperature	2.9000e+02 [C]
	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	3.0000e+00 [m s^-1]
	Turbulence	Default Intensity and Autocompute Length Scale
	Boundary - outlet	
	Type	OUTLET
	Location	OUTLET
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Static Pressure
	Relative Pressure	1.5447e+02 [bar]
	Boundary - HeatFlux	
	Type	WALL
	Location	INTERFACE WATER CLAD
	Settings	
	Heat Transfer	Heat Flux
	Heat Flux in	6.8072e+05 [W m^-2]
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall
	Boundary - wall	
	Type	WALL
	Location	WALL WATER OUTSIDE
	Settings	
	Heat Transfer	Fixed Temperature
	Fixed Temperature	3.0000e+02 [C]
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall

Domain - water	
Type	Fluid
Location	SOLID
Materials	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.5500e+02 [bar]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Include Viscous Dissipation Term	Off
Turbulence Model	SST
Turbulent Wall Functions	Automatic

Tableau III-4 : récapitulaltion des conditions aux limites et initiales imposées au domaine.

III.8.3- CRITERES DE CONVERGENCE

En ingénierie le critère de convergence admit pour une solution acceptable est basée sur la valeur du résidu, qui se situe généralement entre 10^{-4} et 10^{-6} [40].

La méthode itérative est utilisée pour résoudre le système d'équations algébrique, et dans ce travail, nous avons choisi la borne inférieure avec la méthode RMS et un maximum de 100 itérations. Les simulations les plus longues ont durées 20 mn sur un ordinateur dont les caractéristiques fonctionnelles sont : 32Go RAM, 2.20 GHz Intel® Xeon ® CPU E5-2698 V4, OS 64Bits.

III.9- CONCLUSION

Dans cette partie, on a présenté l'ensemble des équations qui représente le socle théorique de tous les logiciels commerciaux de calcul des écoulements, il est essentiel d'en comprendre la logique de sorte à pouvoir paramétrer de manière efficace le solveur qu'on aura choisi. Celui auquel nous avons eu recours est ANSYS-CFX.vl9.2.

Nous avons présenté aussi d'une manière sommaire les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations de comportement d'un système physique : notamment les méthodes des différences finies, méthodes des éléments finies et méthodes des volumes finies quant à elle est présentée plus en profondeur puisque c'est la plus adaptée à l'analyse des écoulements de fluides et elle est également la méthode la plus utilisée dans les logiciels commerciaux comme c'est le cas pour le module ANSYS-CFX sur lequel on s'est appuyé pour réaliser la simulation de notre étude.

La mise en œuvre numérique de la modélisation et la simulation de transfert thermique au sein d'un élément combustible, et la simulation du canal de réfrigération qui est la principale articulation de ce travail, faisait l'objet de ce chapitre. On y a décrit très clairement les différentes étapes qui nous ont permis de mener à bien notre étude. Il s'agissait dans un premier temps, de dimensionner et calculer chaque élément de notre simulation par les informations de la boucle Callisto. Ces dimensions nous ont ensuite permis de réaliser la représentation numérique de chaque configuration du canal. Les modèles ont enfin été transférés dans le solveur ANSYS-CFX v 19.2, pour mener les simulations dont les paramètres ont été définit pour l'opérateur. Les résultats qui en découlent sont présentés dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE IV : DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1- INTRODUCTION

Ce chapitre résume les résultats les plus pertinents obtenus lors de nos différentes simulations. En effet plusieurs simulations ont été effectuées, que ce soit à l'étape du maillage qu'à celle de la résolution des différents modèles. Le point le plus important dans ce travail est l'étude du transfert de chaleur au sein de l'élément combustible réalisé par le module de thermique stationnaire de ANSYS et la configuration d'écoulement dans le réfrigérant par le module de CFX. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de contour de température, de vitesse et de pression ainsi que les différents profils de température radiale et axiale dans l'élément combustible et dans le réfrigérant.

Les résultats du modèle réalisé par CFD ANSYS sont confronté aux résultats obtenus par le code système RELAP5 et les mesures expérimentales. La comparaison touche les paramètres suivants : le profil de température radiale au sein de l'élément combustible, le profil de température axiale de la gaine en Zircaloy, et la dépression au sein du canal de réfrigération.

La Figure IV-1 illustre l'approche utilisée pour simuler le transfert de chaleur dans l'élément combustible (module de Thermique Stationnaire) et la configuration d'écoulement du réfrigérant (ANNSYS-CFX) le long du canal de réfrigération.

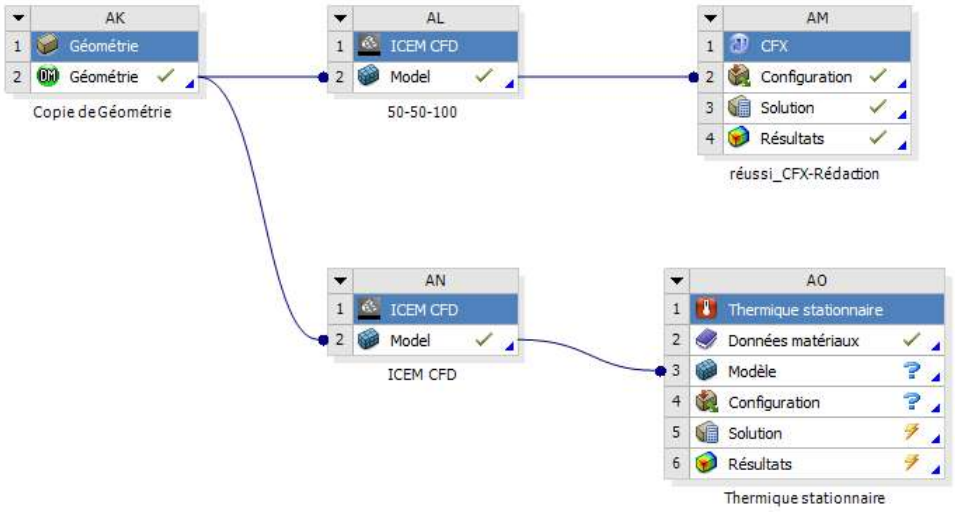


Figure IV-1: Modèle de calcul sous ANSYS-WORKBENCH-CFX-Thermique Stationnaire

IV.2- RÉSULTATS

IV.2.1- PROFIL DE TEMPÉRATURE DANS L'ELEMENT COMBUSTIBLE

La Figure IV-2 représente le profil radial de la température au sien de l'élément combustible obtenu par le code ANSYS-Thermique Stationnaire. La variation de la température au sein de l'élément combustible est caractérisée par un maximum au centre du combustible lui-même (UO2) et un minimum à la surface de la gaine en Zircaloy en passant par une température intermédiaire dans le gap d'hélium pour différents plan axial.

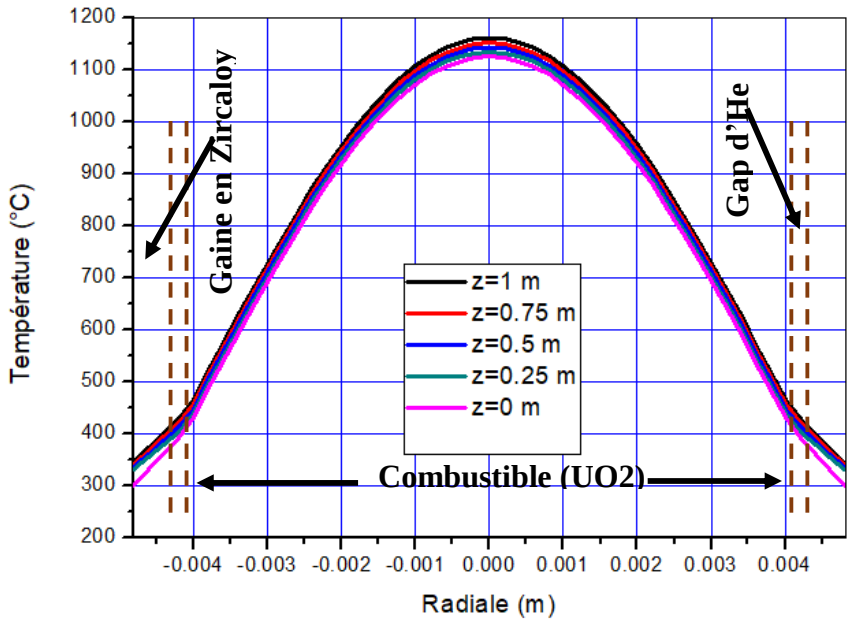


Figure IV-2: Profil radial de la température dans l'élément combustible obtenu par le code ANSYS-Thermique Stationnaire pour différentes zones selon l'axe Z : z=0m, z=0.25m z=0.5m z=0.75m et z=1m.

IV.2.2- RÉSULTATS DE L'ECOULEMENT DU FLUIDE

IV.2.2.i- Contour et profil axial de la température dans le réfrigérant

La Figure IV-3 représente le contour de température le long du canal de réfrigération contenant un seul élément combustible.

Comme indiqué dans les différents plans selon l'axe Z, il y a un transfert de chaleur depuis la surface de la gaine jusqu'à le réfrigérant en écoulement. Le profil axial de la température du réfrigérant selon plusieurs zones radiale est indiqué dans la Figure IV-4 en allant de la surface de la gaine avec

une température importante jusqu'à la limite du canal représentée par Wall avec une température proche de la température imposée au Wall.

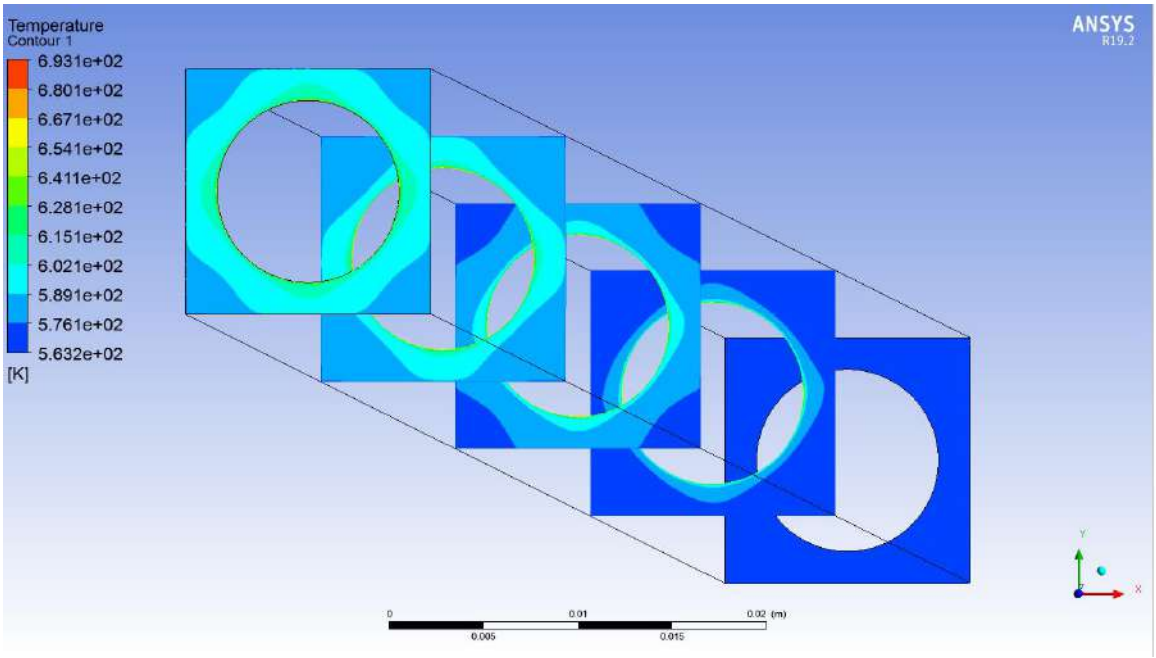


Figure IV-3: Contour de température dans le réfrigérant.

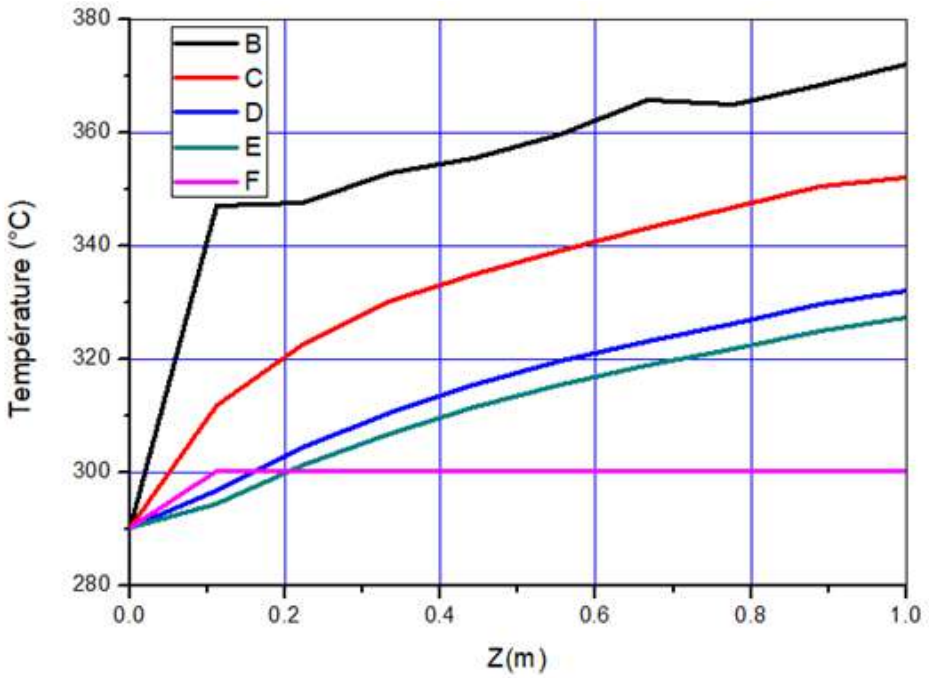


Figure IV-4: Variation axiale de la température du réfrigérant selon plusieurs zones radiale.

IV.2.2.ii- Profil radial de la température dans le réfrigérant

La Figure IV-5 représente le profil radial de la température dans le canal de réfrigération pour différentes zones selon l'axe Z comme indiqué dans la figure ci-dessous. Pour z=0 m, la température est proche à la température imposée à l'entrée du canal et au fur et à mesure que l'écoulement s'avance la température du réfrigérant augmente suite au transfert de chaleur depuis la surface de la gaine, avec un flux de chaleur imposé, jusqu'à le réfrigérant. A la sortie du canal, la température est maximale allant de 345 °C proche de la paroi jusqu'à 300 °C à la frontière du canal, température imposé comme condition initiale.

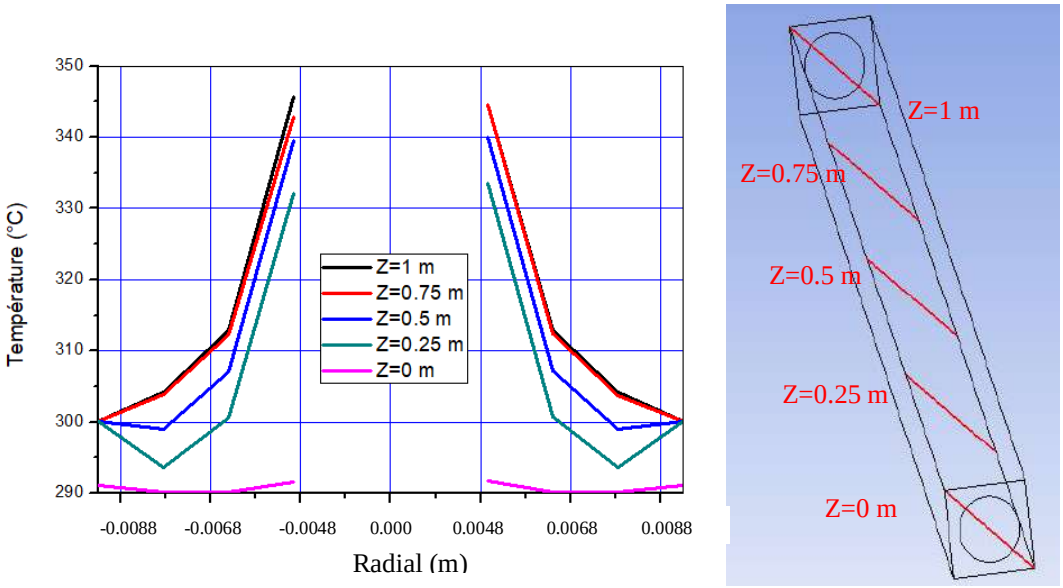


Figure IV-5: Profil radial de la température dans le réfrigérant pour différentes zones selon l'axe Z : z=0m, z=0.25m z=0.5m z=0.75m et z=1m.

IV.2.2.iii- Contour et profil axial de la vitesse dans le réfrigérant

La Figure IV-6 représente le contour de vitesse le long du canal de réfrigération contenant un élément combustible. La vitesse est initiée avec 3 m/s et se retrouve dans des zones onglées avec des vitesses un peux élever de la vitesse d'entrée de l'ordre de 3.7 m/s représentée par des contours de couleur rouge selon la légende de la vitesse.

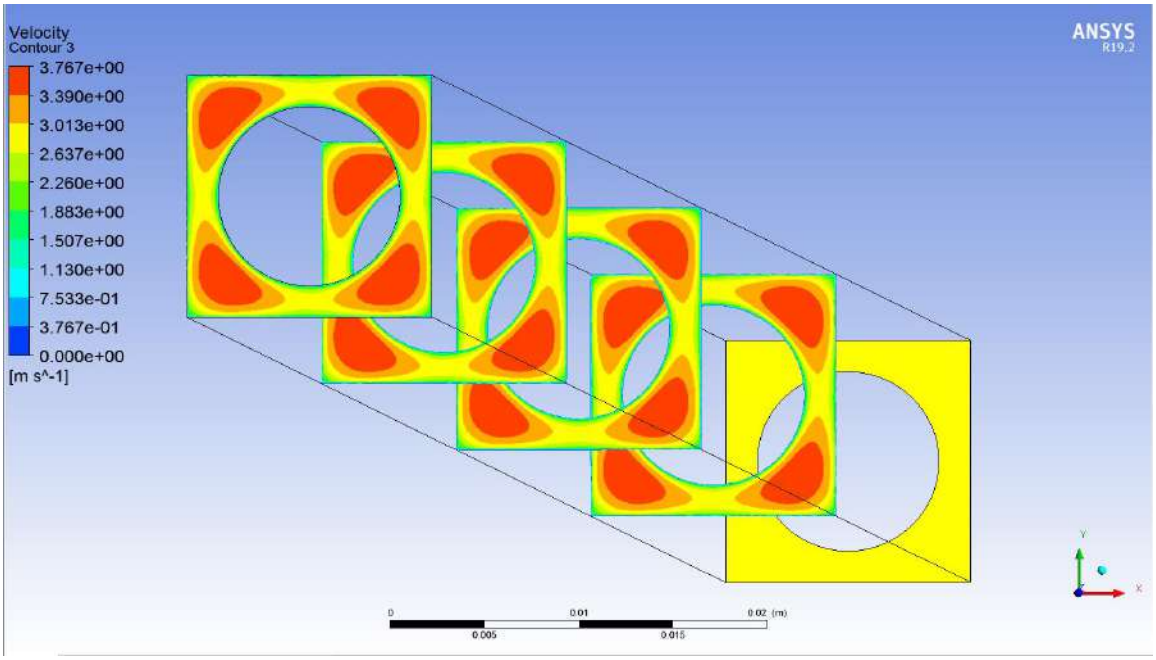
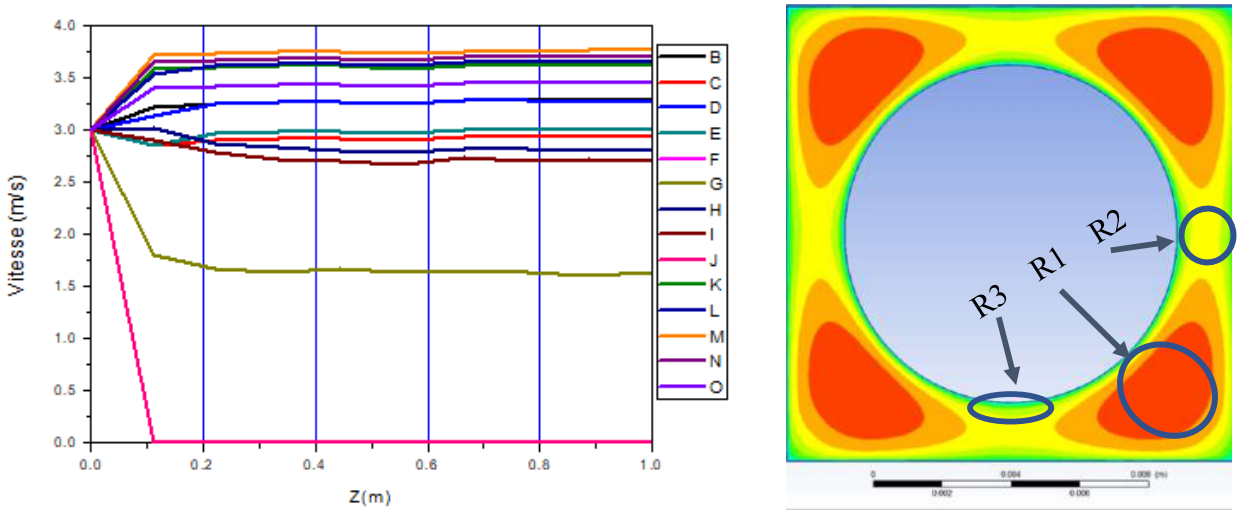


Figure IV-6: Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

La figure ci-dessous montre et traduit le contour de vitesse par des profils axiaux de la vitesse dans différentes régions dans le plan.



(a) (b)

Figure IV-7: (a)-Variation axiale de la vitesse D'écoulement sur des lignes radiales. (b)- Contour de vitesse dans le plan z=1 m.

Les trois régions sont représentées comme suit :

1- La région en rouge (R1) se trouvant dans le contour de vitesse est représentée par les profils de vitesses axiaux le long du canal qui ont été montrés dans la Figure IV-7.a par les lignes (B, D, F, G, L, M et O). Cette région onglée présente un maximum de vitesse de 3.7 m/s en comparaison avec la vitesse d'entrée de 3 m/s.
2- La région (R2) en jaune est représentée par les profils de vitesses axiaux le long du canal qui ont été montrés dans la Figure IV-7.a par les lignes (C, H, I, E et N). La vitesse dans cette région est relativement faible par rapport à la région R1 et se rapproche à la vitesse d'entrée de 3 m/s.
3- La région R3 en vert et en bleu est représentée par les profils de vitesses axiaux le long du canal qui ont été montrés dans la Figure IV-7.a par les lignes (K et J). La vitesse sur la ligne J est pratiquement nulle à cause des frottements à la paroi et croît progressivement quand on s'éloigne de la paroi comme indiquée dans la ligne K avec une vitesse de 1.75 m/s.

IV.2.2.iv- Contour et profil axial de la pression

Les Figures IV-8 et IV-9 représentent le contour de pression le long du canal de réfrigération à travers l'élément combustible et sa traduction en profil depuis l'entrée du canal jusqu'à la sortie. On observe une perte de charge de l'ordre de 0.53 bar le long du canal. Cette dernière est due au frottement et au modèle de turbulence appliqué dans la simulation en comparaison avec les mesures expérimentales.

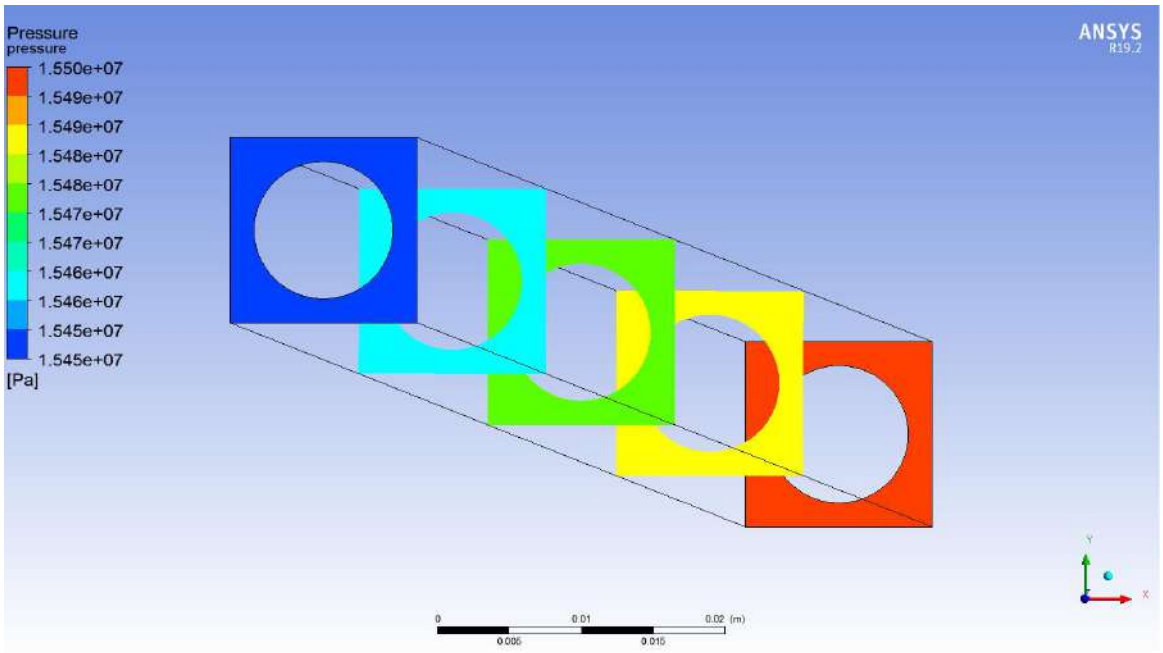


Figure IV-8: Contour de pression en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

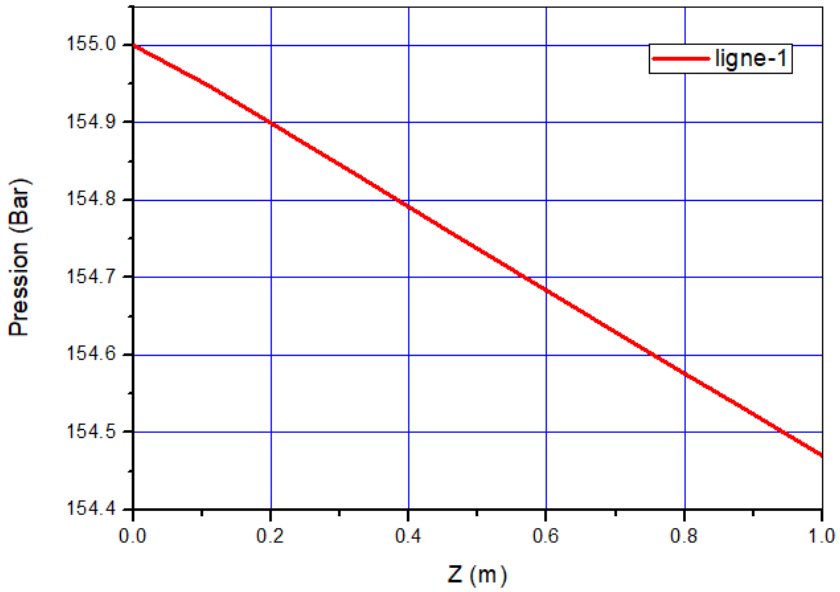


Figure IV-9: Variation axiale de la pression du réfrigérant.

IV.2.3- PROFIL RADIALE GLOBALE DE LA TEMPERATURE DANS LE CANAL DE REFRIGERATION

La Figure IV-10 représente le profil radial de température pour le canal de réfrigération (combustible + réfrigérant). Cette figure montre clairement la décroissance de la température depuis le centre du combustible jusqu'à le réfrigérant avec un écart de 850 °C en passant par le jeu rempli d'hélium et la gaine. La température centrale atteint une valeur maximale de 1160 °C et une valeur à la surface de la gaine d'environ 345 °C pour atteindre une valeur moyenne dans le réfrigérant de 305 °C. La chute de température dans le gap d'hélium est de l'ordre de 300 °C, alors que dans celle de la gaine est de 15 °C. Cette énergie doit être transporté par le réfrigérant caloporteur en dehors du canal pour être céder à un autre réfrigérant secondaire via l'échangeur de chaleur.

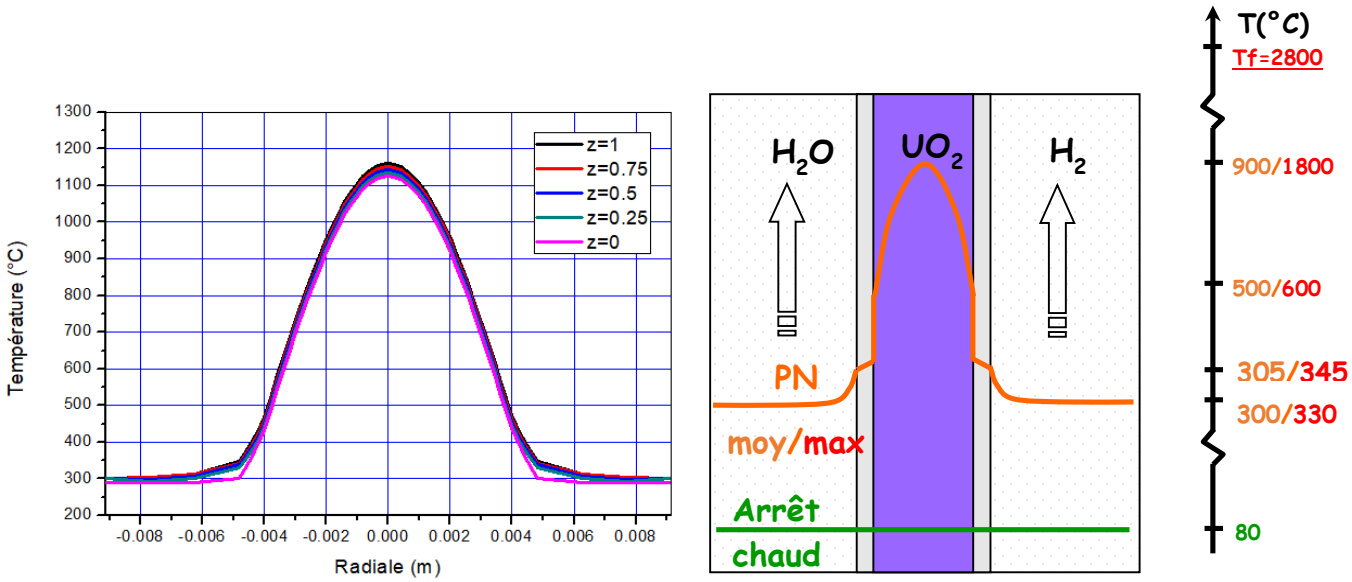


Figure IV-10: Profil radial de température global dans le canal de réfrigération (Combustible + réfrigérant)

IV.3- COMPARAISON DES RESULTATS

Pour valider nos résultats de simulation, une comparaison, présentée ci-dessous, est faite avec les résultats numériques et expérimentaux obtenus par le code système RELAP5 pour le cas du canal de réfrigération contenant un élément combustible pour la boucle Callisto.

IV.3.1- PROFIL RADIAL DE LA TEMPERATURE OBTENU PAR LE CODE RELAP 5

La Figure IV-11 représente le profil radial de la température obtenu par le code système RELAP5 pour différentes sections suivant la longueur du crayon combustible

Le profil radial de température dans le crayon combustible comporte trois parties :

- Pastille en UO2 qui présente une forte élévation de la température suite à la forte densité de puissance et faible conductivité thermique.
- Gap en hélium qui représente une discontinuité très variable de la température d'un écart d'environ 300 °C.
- Gaine en Zircaloy qui présente un très faible écart de température d'environ 13 °C.

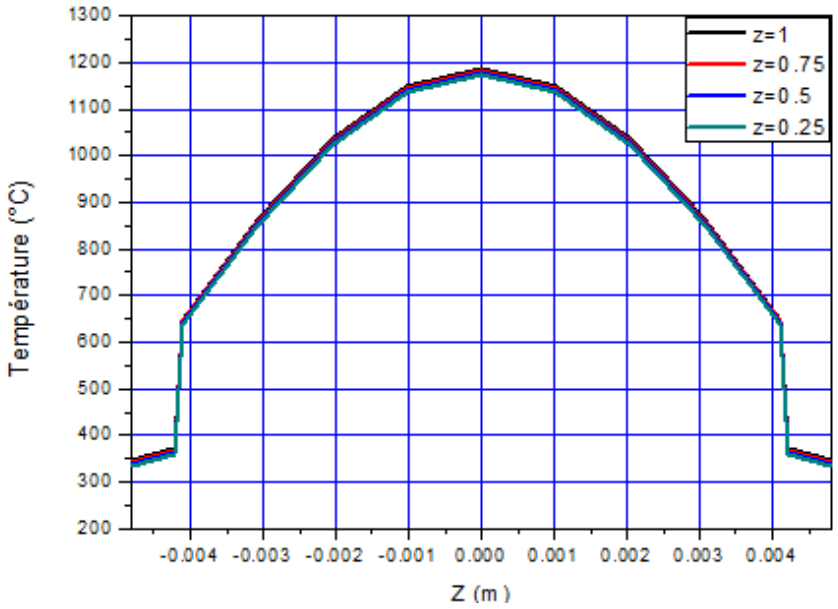


Figure IV-11: Profil radiale de la température dans le crayon combustible obtenu par le code RELAP5.

IV.3.2- COMPARAISON DU PROFIL RADIAL DE LA TEMPERATURE

A la Figure IV-12, on compare le calcul numérique via les deux codes RELAP5 et ANSYS-Thermique Stationnaire de la distribution radiale de la température dans le crayon combustible. La partie de la zone 1 présente la distribution de la température dans le crayon de combustible en UO2. La partie de la zone 3 présente la distribution de la température dans la gaine et la partie de la zone 2 représente la variation de la température entre la surface extérieure du crayon combustible et la surface interne de la gaine (dans le gap d'hélium).

Sur la figure, on observe un accord global entre les deux calculs numériques. L'écart moyen obtenu entre les deux calculs est de l'ordre de 2.61 % pour la température du combustible représenté par la zone 1 sauf à la surface du crayon combustible, l'écart est de l'ordre de 28 %. Pour le calcul de la température de la gaine, l'écart moyen est de l'ordre de 2.2 %. L'écart moyen dans le calcul de la température dans le gap d'hélium est de l'ordre de 13 %. Les écarts moyens entre les deux simulations sont à l'origine des modèles thermiques utilisés par chaque code. Sachant que le RELAP5 est destiné principalement aux analyses de sureté des réacteurs nucléaires et ses modèles sont basés principalement à des expériences à échelles réduite tout en tenant compte des paramètres de fonctionnement d'un réacteur nucléaire réel.

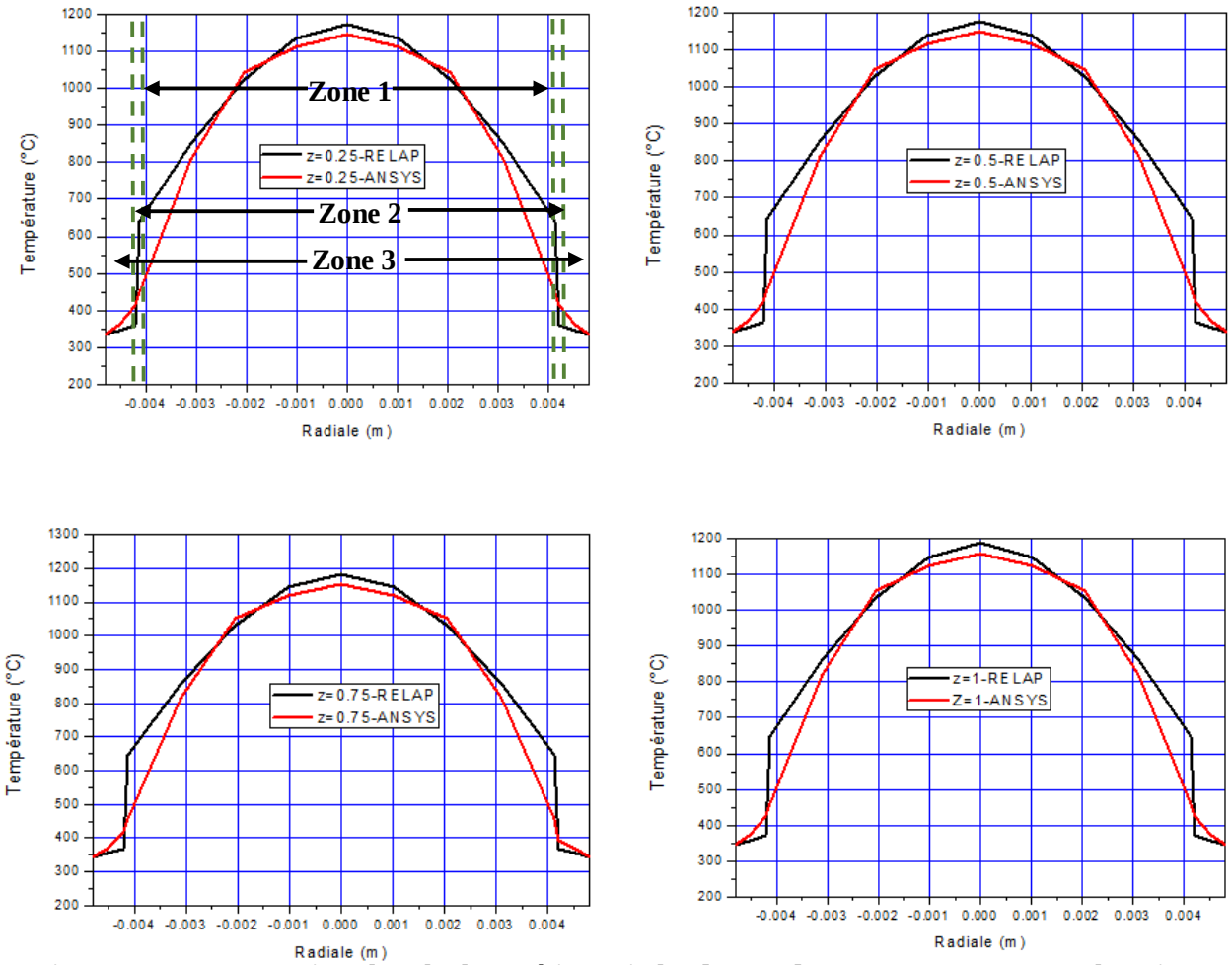


Figure IV-12: comparaison le calcul numérique via les deux codes RELAP5 et ANSYS-Thermique Stationnaire de la distribution radiale de la température dans le crayon combustible

IV.3.3- COMPARAISON DU PROFIL AXIAL DE LA TEMPERATURE

La Figure IV-13 représente une comparaison du profil axial de température, à la surface de la gaine, entre les résultats obtenu par la simulation numérique avec ANSYS-Thermique Stationnaire et celle obtenu par le code système RELAP 5. L'écart moyen entre les deux simulations est de l'ordre de 1 % qui est acceptable de point de vue de sureté nucléaire.

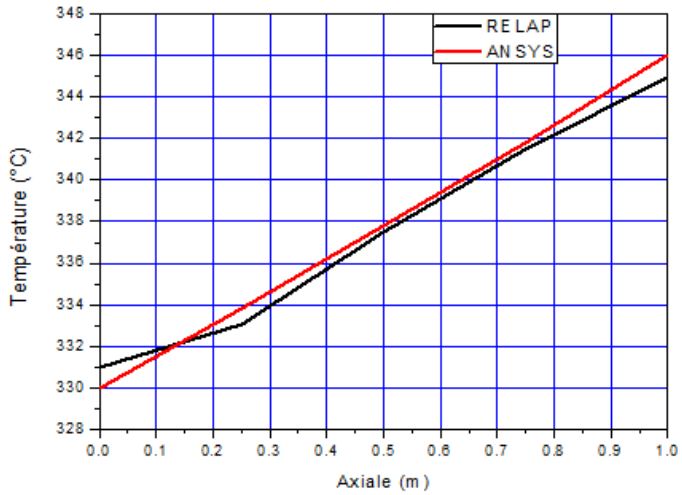


Figure IV-13: Variation axiale de la température de la gaine en comparaison avec le résultat du code RELAP5.

IV.3.4- COMPARAISON DU PROFIL AXIAL DE LA PRESSION

La Figure IV-14 représente une comparaison du profil de pression axial entre les résultats obtenu par la simulation numérique avec ANSYS-CFX et celle obtenu expérimentalement. L'écart entre les deux résultats est pratiquement nul.

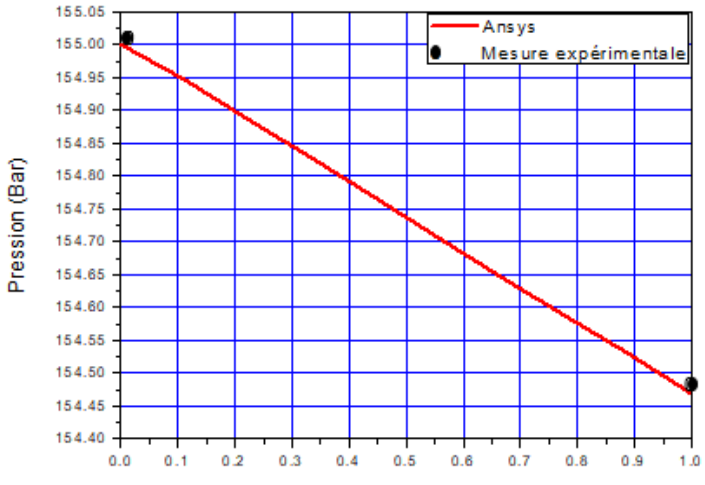


Figure IV-14: Variation axiale de la pression en comparaison avec les données expérimentales

IV.4- RESULTATS DES DIFFERENT CANAUX

Dans ce qui suit, on va présenter les différents résultats de simulation par ANSYS-CFX de différentes configurations des canaux de réfrigérations. Il s'agit d'un canal de deux éléments combustibles, un canal de quatre éléments combustibles et un canal contenant la totalité des éléments combustible, il s'agit de neuf crayons combustibles. Les résultats sont représentés sous forme de contour de température, de vitesse et vecteur de vitesse du réfrigérant depuis l'entrée jusqu'à la sortie du canal.

IV.4.1- CANAL COMPOSE DE DEUX ELEMENTS COMBUSTIBLES

Ces deux figures représentent l'évolution de la température et de la vitesse du réfrigérant depuis l'entrés jusqu'à la sortie du canal. Comme il est illustré sur la Figure IV-15 La chaleur dissipée par les deux crayons combustibles se concentre au milieu du canal avec une température plus élevée par rapport à celle d'entrée.

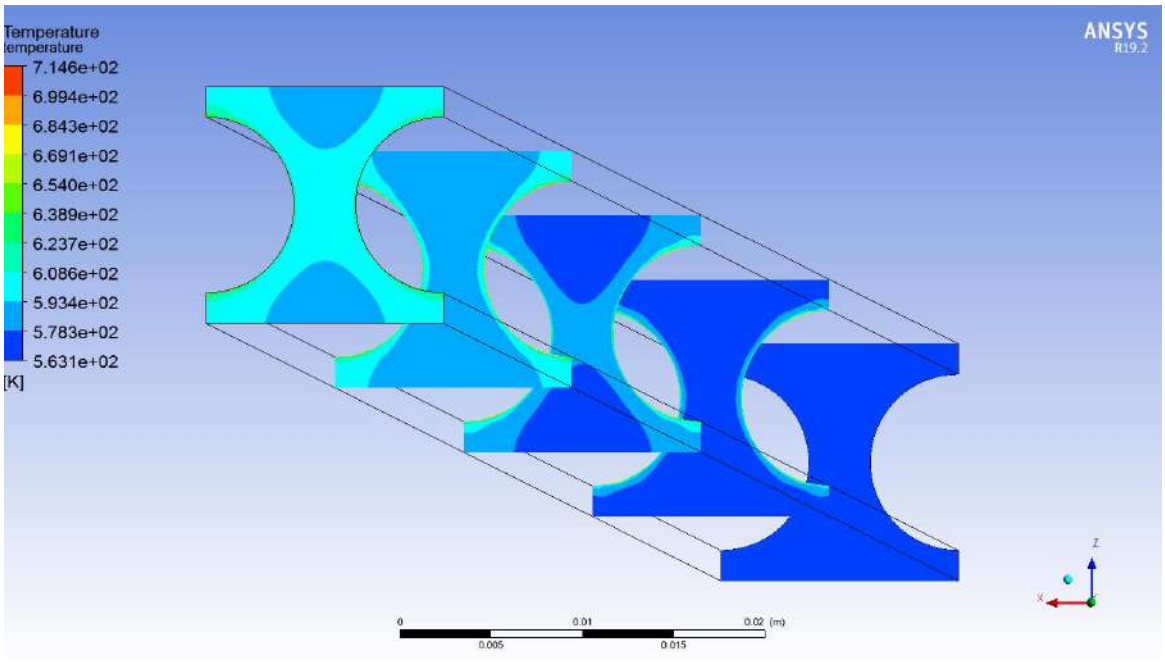


Figure IV-15: Contour de température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

La Figure IV-16 montre une légère augmentation de la vitesse d'écoulement à la sortie du canal. Cette variation est dû changement de la pression depuis l'entrée jusqu'à la sortie du canal.

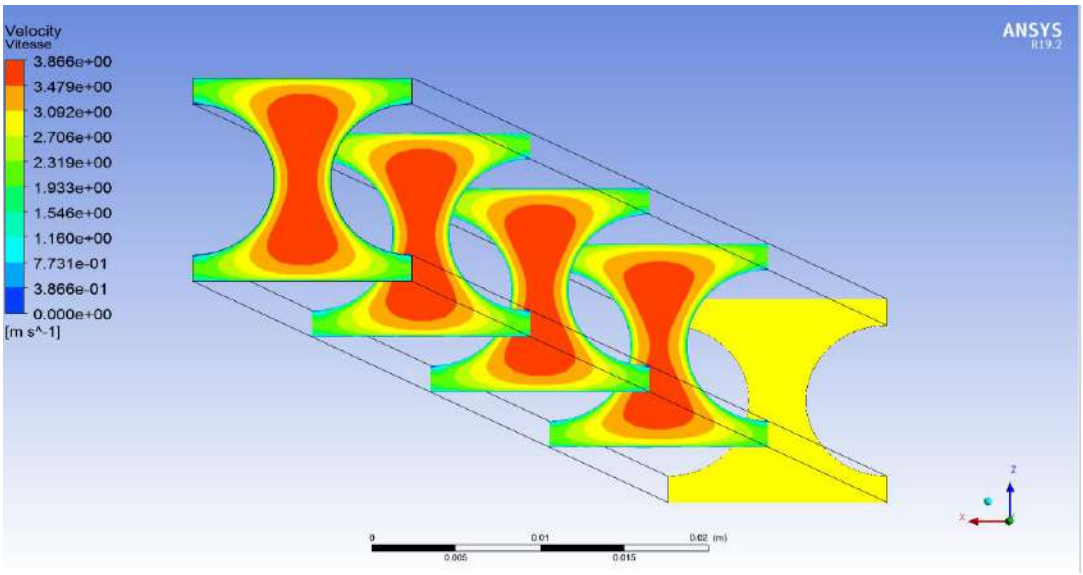


Figure IV-16: Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

IV.4.2- CANAL COMPOSE DE QUATR ELEMENTS COMBUSTIBLES

Ces trois figures ci-dessous montrent les contours de température et de vitesse et le vecteur de vitesse dans le canal de réfrigération composé de quatre crayons combustibles. Les Figure IV-17 et IV-18 représentent l'évolution de la température et de la vitesse suit la même interprétation pour le cas du canal composé de deux crayons combustibles. La Figure IV-19 représente les vecteurs de vitesse qui montrent clairement la présence d'une amplitude maximale au centre du canal et faible au contact avec les crayons combustibles.

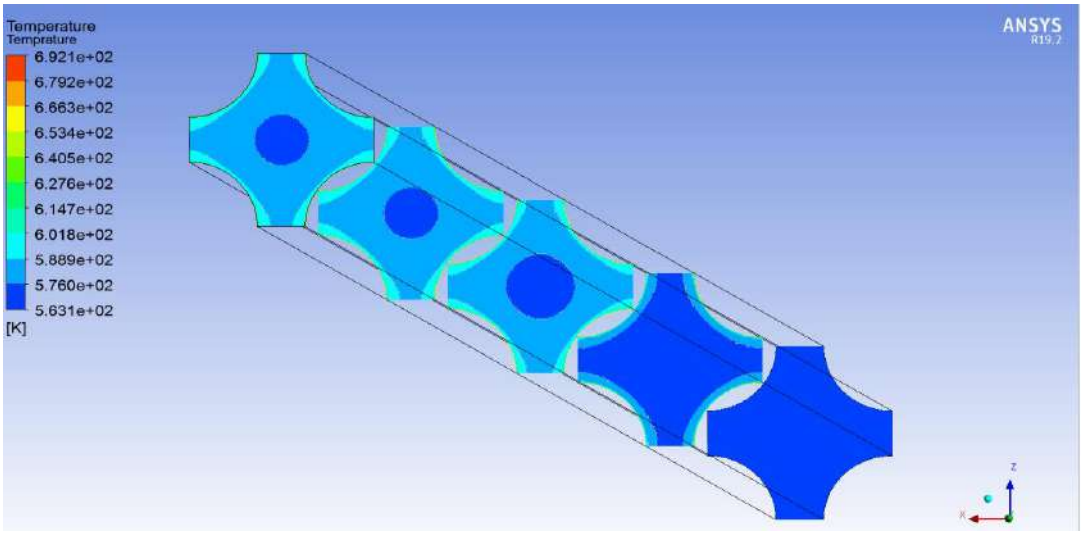


Figure IV-17: Contour de température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

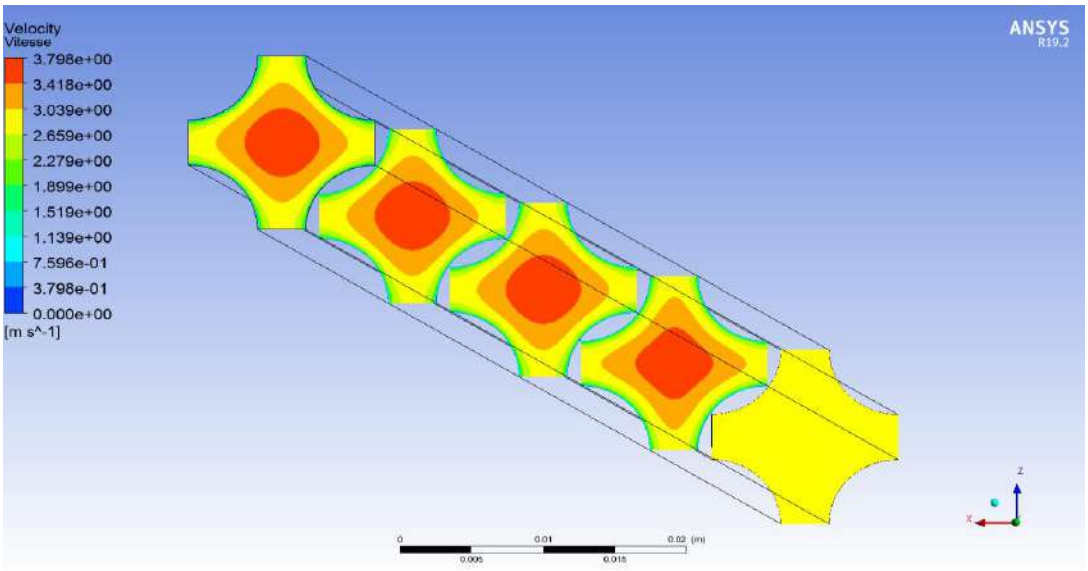


Figure IV-18 : Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

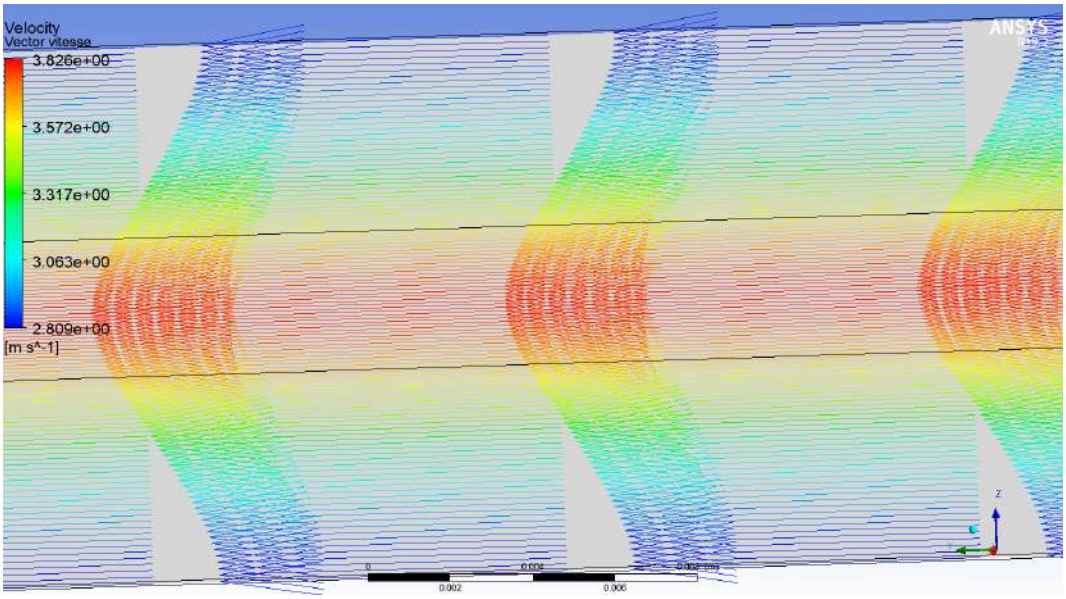


Figure IV-19 : Vecteurs de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

IV.4.3- CANAL COMPOSE DE NEUF ELEMENTS COMBUSTIBLES

C'est le cas le plus réel de la section d'essai de la boucle CALLISTO, il s'agit d'un canal composé de neuf crayons combustibles irradié par un flux neutronique du réacteur BR2 dans des conditions de fonctionnement d'un réacteur de puissance de type PWR. Les deux figures ci-dessous montrent l'évolution de la température et de la vitesse le long du canal depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

Dans les deux figures, on observe une augmentation de la température et de la vitesse du réfrigérant. L'élévation de la température du réfrigérante est dû au transfert de chaleur depuis les crayons combustible jusqu'à le réfrigérant.

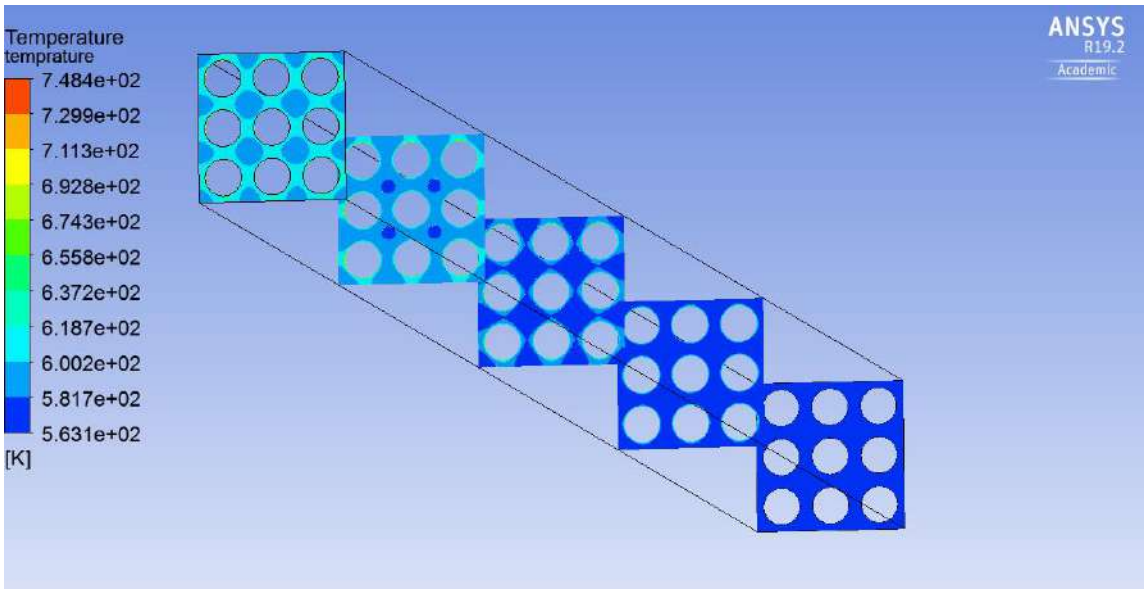


Figure IV-20 : Contour de Température en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

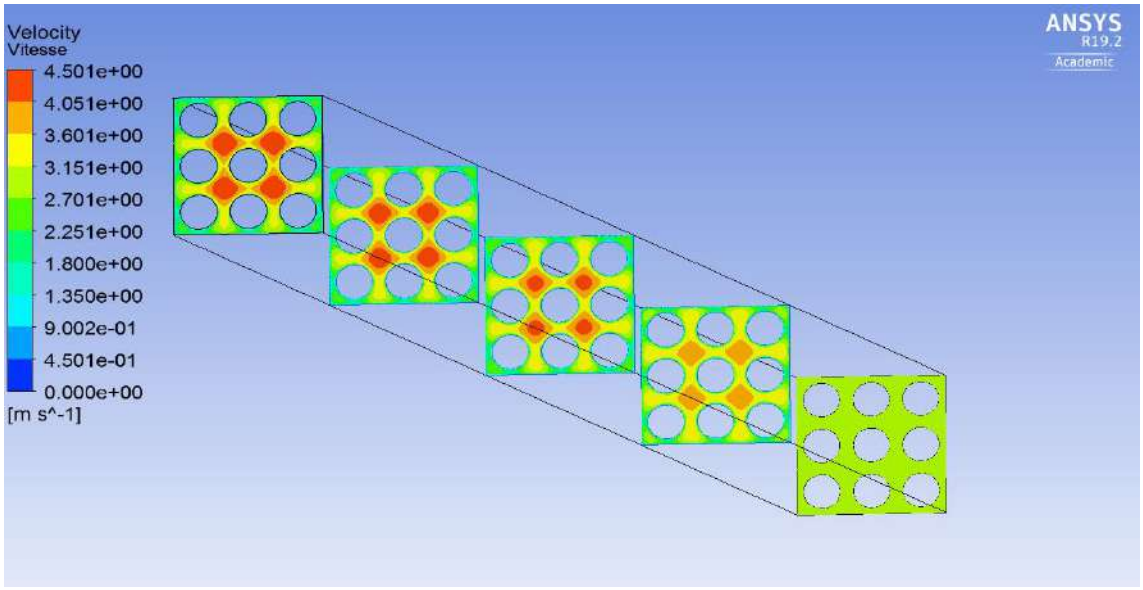


Figure IV-21 : Contour de vitesse en cinq plans : z=0, z=0.25, z=0.5, z=0.75 et z=1m.

IV.5- CONCLUSION

Ce chapitre s'intéresse à l'interprétation des différents résultats de simulation obtenus via les codes ANSYS-CFX, ANSYS-Thermique Stationnaire et RELAP5. Les résultats sont présentés sous formes de contour et de profil de température, de vitesse et de pression. Une comparaison a été faites entre les résultats du codes ANSYS et ceux obtenu via le code système RELAP5 et mesure expérimentale. On observe une certaine concordance dans les résultats sauf quelques écarts dans le profil radial de la température dans le crayon combustible. Cet écart est dû aux modèles de conduction et de convection utilisé par les deux codes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail consiste en la modélisation et à la simulation tridimensionnelle de l'écoulement et du transfert de chaleur à travers un assemblage d'éléments combustibles d'une boucle d'irradiation dénommée Callisto de type PWR. On a commencé l'étude pour un canal de réfrigération composé d'un seul crayon combustible entouré d'un fluide caloporteur en eau pressurisée. Le crayon combustible est composé de la matière fissile du dioxyde d'uranium UO2 et une gaine en alliage du zirconium et un jeu entre les deux remplis du gaz d'hélium. Ensuite, on a étalé l'étude pour un canal composé de deux crayons combustibles, quatre crayons combustibles et enfin neuf crayons combustibles constituant l'ensemble de la section d'essai de la boucle Callisto. L'étude a été réalisée par ANSYS-Thermique Stationnaire pour le transfert de chaleur dans le crayon combustible et ANSYS-CFX pour l'écoulement du fluide caloporteur.

Les résultats obtenus sont présentés sous formes de contour de température, de vitesse et de pression ainsi que les différents profils de température radiale et axiale dans l'élément combustible et dans le réfrigérant. Une comparaison a été faites entre les résultats du codes ANSYS et ceux obtenu via le code système RELAP5 et mesure expérimentale. La comparaison s'étale sur les paramètres suivants jugés important qui sont: le profil de température radiale au sein de l'élément combustible, le profil de température axiale de la gaine en Zircaloy, et la dépression au sein du canal de réfrigération. On a observé une certaine concordance dans les résultats sauf quelques écarts dans le profil radial de la température dans le crayon combustible. Cet écart est dû aux modèles de conduction et de convection utilisé par les deux codes.

En perspective, nous souhaitons réaliser un couplage bidirectionnel entre le module d'ANSYS-Thermique Stationnaire et ANSYS-CFX à travers la plateforme Workbench, comme illustré dans la Figure ci-dessous. Ce couplage permettra d'échanger les informations, au cours du calcul, pour chaque nœud des deux domaines de calcul et les résultats seront plus réel et reflètent l'interaction entre la structure du crayon combustible et le caloporteur afin de transporter la chaleur produite par fission.

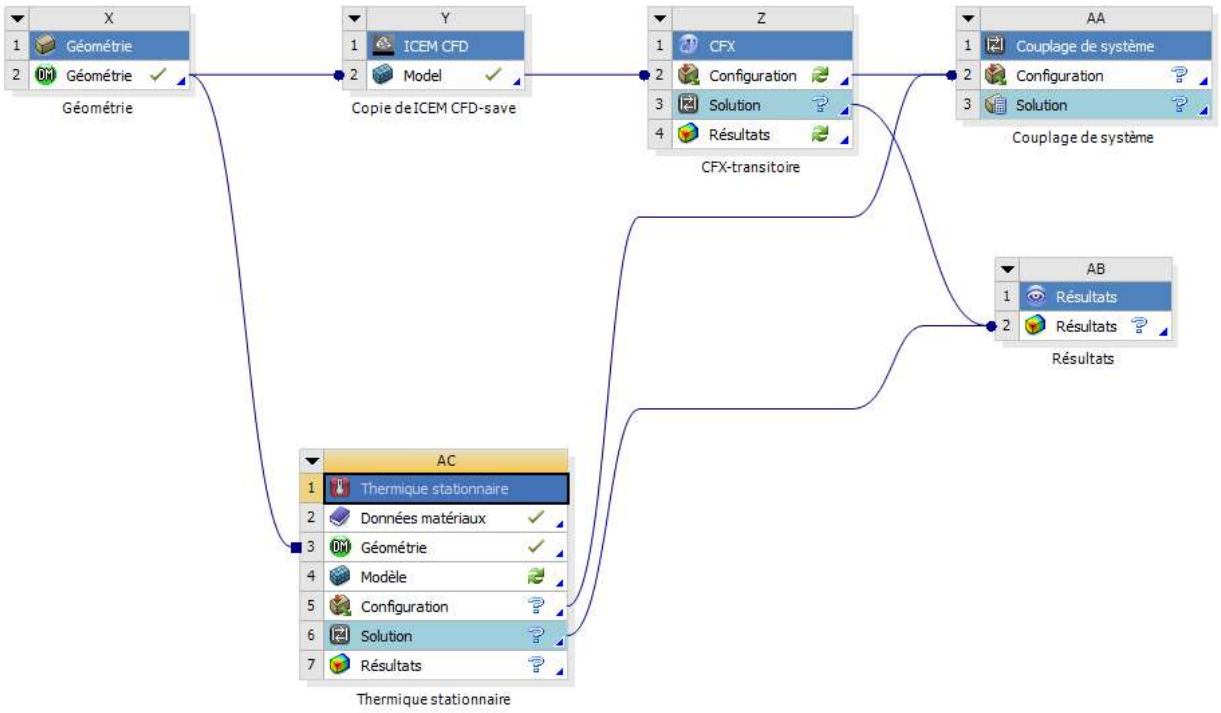


Figure : Schéma de couplage entre Thermique Stationnaire et CFX à travers la plateforme Workbench.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. BENOIT et ET AL, «"CALLISTO : A PWR in BR2. Design, Construction and Licensing",» chez *Proceedings of the International Conference on Irradiation Technology*, Saclay, France, May 20-22, 1992.

[2] A.Ballesteros, «Conversion Table of Material Damage Indexation for All Different European Reactor Types,» Project MADAM - Final Report, European Commission, Institute for Advanced Materials, AGE-MADAM(98)-D5, 17 November 1998.

[3] «iaea,» TECDOC-1539, 2007. [En ligne]. Available: https://www.iaea.org/publications/7665/use-and-development-of-coupled-computer-codes-for-the-analysis-of-accidents-at-nuclear-power-plants.

[4] H. Tewfik, «CONTRIBUTION AUX ANALYSES DE SÛRETÉ DES REACTEURS DE RECHERCHE A ELEMENTS COMBUSTIBLES PLAQUES : DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE SIMULATION 3D,» THESE de DOCTORAT, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, Alger, 20 Mai 2010.

[5] H. Ahmed, «Elaboration d'un programme de calcul et d'analyse thermohydraulique d'un canal de réacteur basé sur des modèles simples,» Rapport Finale, Centre de recherche nucléaire de Birine, Birine, 2000.

[6] «connaissancedesenergies,» 10 03 2020. [En ligne]. Available: https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/uranium-naturel.

[7] M. TEYEB, «Modélisation de la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère pour des rejets continus et accidentels,» Mémoire de Master, Institut National des Sciences, Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires, 10 Mai 2011.

[8] P. Baeten, Physique des Réacteurs Nucléaires, Boeretang 200, B-2400 Mol: SCK-CEN,Centre d'Etudes de l'Energie Nucléaire.

[9] «wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_nucl%C3%A9aire.

[10] S. Ilyas, «Prédiction des Pertes par evaporation dans une tour de refroidissement d'une centrale thermique,» Mémoire de Master, Université Amar Thelidji, Laghouat, 2013.

[11] «iaea,» [En ligne]. Available: https://www.iaea.org/fr/themes/les-applications-des-reacteurs-de-recherche.

[12] [En ligne]. Available: http://fr.wikipedia.org/wiki/Réacteur_à_eau_pressurisée.

[13] J.-M. Delaye, Thermodynamique des reacteurs, EDP SCIENCES, 2008.

[14] [En ligne]. Available: https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/1-reacteurs-nucleaires-France-Fonctionnement.aspx?dId=82471a77-677a-40cf-8010-5c30f29507df&dwId=231c8e52-c3bd-4187-990e-01a6e97b5418#..

[15] j. sauteron, les combustibles nucléaires, hermann, 1965.

[16] Y. JANNOT, transferts thermiques, ecole de mines, 2011.

[17] J.C.ROUSSEAU, Cours thermohydraulique appliquée aux réacteurs, 1973.

[18] P. I. FRANK et P. D. DAVID , Fundamentals of heat and mass transfer, 2007.

[19] Technique de l'ingénieur Définitions et architecture générale B2 340, 2011.

[20] H. AISSOU et H. LARBES , «Etude numérique de comportement thermique et hydraulique de convection forcée sur le fonctionnement des échangeurs de chaleur munie de chicanes inclinées,» UNIVERSITE YAHIA FARES, MEDEA, 2019.

[21] r.comolet, mécanique expérimentale des fluides tome ii-2e, Edition 1976.

[22] R. B. HAMOUDA, notions mecanique des fluides, Centre de Publication Universitaire,Tunis, Octobre 2008.

[23] www.sckcen.be, «BR2 Multipurpose Materials Testing Reactor,» Op Operational Office: Boeretang 200, B-2400 Mol – Thematic Leaflet, 2006.

[24] M. W. E. K. V. KUZMINOV, «Determination of the Linear Power in MOX Fuel Rods Irradiated at the BR2 Reactor,» The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, PHYSOR-2004.

[25] B. ABDERRAHIM, «Modélisation d'une Boucle Simulant un Accident de Perte de Réfrigérant à l'Aide du Code Relap5/Mod1,» Thèse de Magister en Génie Nucléaire, 1991.

[26] J. Z. Maurency, «Modélisation et simulation des écoulements dans les centrales hydroélectriques,» université du québec en Abitibi Témiscaminque, May 2018.

[27] a. a. V. Deplano, Flow behaviour in an asymmetric compliant experimental, J. Biomech, 2007.

[28] B. AISSA, «Caractéristiques et modèles de dispersions des sources ponctuelles de la pollution industrielle «Application aux émissions d'origine automobiles»,» THESE DE MAGISTER, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI, CHLEF, 2009.

[29] B. M. TOUMI Aboubaker, «L'effet de la surface intermétalliquen de SnAgCu sur la fiabilité d'un ensemble de relie semi-conducteur de puissance,» diplômen d'ingénieure ; Université de Yahia Fers de Médéa, 2009.

[30] A. Kolmogorov, Equation of turbulent motion of an incompressible Turbulent fluid, Izv.Ser. Phys. VI, n° 1-2, 56, 1942.

[31] Y. Marchesse, Mécanique desfluides, Modélisation de la turbulence -Application à la, Lyon France, 2010.

[32] M. K. R. L. F.R. Menter, Ten years of Industrial Experience with the SST turbulence Model, Turbulence Heat and Mass Transfer4, 2000.

[33] T. a. e. B. fatima, «etude simulation numérique d'un écoulement autoure d'une aube de la turbine à gaze,» Mémoire de master,Université Telmcen, 2018.

[34] «enscbp,» [En ligne]. Available: http://thetis.enscbp.fr/sites/default/files/theses/these_j_breil.pdf.; 2012.

[35] H. OUDIN, Méthode de éléments finis, centrale Nantes, 2008.

[36] M. CHOUAK, «Modélisation CFD des inversions de débit dans les chenaux expérimentaux du réacteur BR2 sous ANSYS – CFX,» INTERNAL REPORT SCK•CEN-I-257 , Belgium, October, 2011.

[37] «cadfem,» [En ligne]. Available: https://www.cadfem-an.com/produits/ansys.html.

[38] D. Martial, «etude dévloppement d'une méthode de simulation de pompage au sein d'un compresseur multi-étage,» Mémoire,université de Montéral, 2013.

[39] F. MOUMEN, «Etude des effets turbulents de l'écoulement sanguin dans la crosse aortique. Théorie et simulation,» Thèse de MAGISTER, UNIVERSITE D'ORAN, 30 juin 2010.

[40] P. Roache, Verification and validation in computational science and engineering. Vol.895, Hermosa Albuquerque, NM, 1998.

[41] «ametragroup,» [En ligne]. Available: http://blog.ametragroup.com/rjh-reacteur-jules-horowitz/.

[42] B. Safi, «etude Influence de la charge de l'aube sur les performances d'une turbine semi-axiale,» Mémoire de Master,Université des sciences et de la technologie d'Oran Med Boudiaf, 2012.

[43] ANSYS ICEM CFD User's Manual Release 19.2, August 2018.

ANNEXE

A-I-1. Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée [16].

Caractéristiques du fluide calculées à $\theta_f = \dfrac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

<table>
<tr><th>Géométrie</th><th>Corrélation</th></tr>
<tr><td>Ecoulement sur un plan</td><td>
$Nu(x)$: Nu à la distance x du bord du plan
$\overline{Nu}_L$: Nu moyen sur la longueur L du plan

<u>Ecoulement turbulent</u> :
$Nu(x) = 0{,}0288\, Re(x)^{0,8}\, Pr^{1/3}$
$\overline{Nu}_L = 0{,}035\, Re_L^{\,0,8}\, Pr^{1/3}$ $\quad Re > 5.10^5$ et $Pr \geq 0{,}5$

<u>Ecoulement laminaire</u> :
$Nu(x) = 0{,}324\, Re(x)^{0,5}\, Pr^{1/3}$
$\overline{Nu}_L = 0{,}628\, Re_L^{\,0,5}\, Pr^{1/3}$ $\quad Re < 5.10^5$ et $10 \geq Pr \geq 0{,}5$
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement dans un tube</td><td>
<u>Ecoulement turbulent</u> : $Nu = 0{,}023\, Re^{0,8}\, Pr^n$
$n = 0{,}3$ si $\theta_{fluide} > \theta_{paroi}$
$n = 0{,}4$ si $\theta_{fluide} < \theta_{paroi}$ $\quad Re > 5000$ et $0{,}6 < Pr < 100$
Re calculé pour $D_H = 4S / P$ où : S = section de passage du fluide
P = périmètre de contact fluide/paroi
<u>Ecoulement laminaire</u> : $Nu = 1{,}86\,(Re\,Pr)^{1/3}\left(\dfrac{D}{L}\right)^{1/3}\left(\dfrac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14}$

Valable pour $Re\ Pr\ \dfrac{D}{L} \geq 10$, μ_p calculé à θ_p
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement perpendiculaire à un cylindre circulaire</td><td>
$Nu = C\, Re^n\, Pr^{1/3}$, vitesse u_∞ calculée en amont du tube
<table>
<tr><th>Re</th><th>C</th><th>n</th></tr>
<tr><td>0,4 – 4</td><td>0,989</td><td>0,330</td></tr>
<tr><td>4 – 40</td><td>0,911</td><td>0,385</td></tr>
<tr><td>40 – 4000</td><td>0,683</td><td>0,466</td></tr>
<tr><td>4000 – 40000</td><td>0,193</td><td>0,618</td></tr>
<tr><td>40000 - 250000</td><td>0,0266</td><td>0,805</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Ecoulement perpendiculaire à un cylindre non circulaire</td><td>
<table>
<tr><th>Géométrie</th><th>Re</th><th>C</th><th>n</th></tr>
<tr><td>u_∞ → ▭ d</td><td>$5\,10^3$ - 10^5</td><td>0,102</td><td>0,675</td></tr>
<tr><td>u_∞ → ▯ d</td><td>$4\,10^3$ – $1{,}5\,10^4$</td><td>0,228</td><td>0,731</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

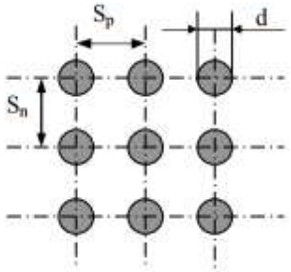
A-I-1. Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée [16].

Caractéristiques du fluide calculées à $\theta_f = \frac{\theta_p + \theta_\infty}{2}$

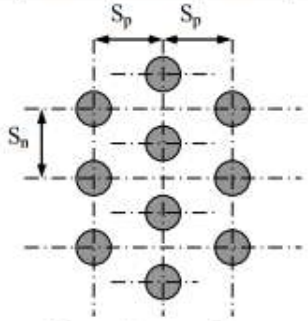
Géométrie : Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de 10 tubes

Corrélation : $Nu = C\,Re^n\,Pr^{1/3}$, vitesse u_∞ calculée en amont du tube

$\frac{S_p}{d}$	$\frac{S_n}{d}$ = 1,25		1,5		2,0		3,0	
	C	n	C	n	C	n	C	n
	Disposition en ligne							
1,25	0,386	0,592	0,305	0,608	0,111	0,704	0,070	0,752
1,5	0,407	0,586	0,278	0,620	0,112	0,702	0,075	0,744
2,0	0,464	0,570	0,332	0,602	0,254	0,632	0,220	0,648
3,0	0,322	0,601	0,396	0,584	0,415	0,581	0,317	0,608
	Disposition en quinconce							
0,16	-	-	-	-	-	-	0,236	0,636
0,9	-	-	-	-	0,495	0,571	0,445	0,581
1,0	-	-	0,552	0,558	-	-	-	-
1,125	-	-	-	-	0,531	0,565	0,575	0,560
1,25	0,575	0,556	0,561	0,554	0,576	0,556	0,579	0,562
1,5	0,501	0,568	0,511	0,562	0,502	0,568	0,542	0,568
2,0	0,448	0,572	0,462	0,568	0,535	0,556	0,498	0,570
3,0	0,344	0,592	0,395	0,580	0,488	0,562	0,467	0,574



Disposition en ligne



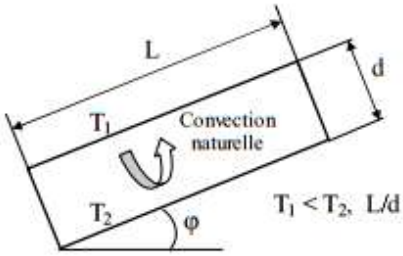
Disposition en quinconce

Géométrie : Ecoulement perpendiculaire à un faisceau de n rangées de tubes ($n \leq 10$)

$$N = \frac{h_n}{h_{10}}$$

Nombre rangées	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N en ligne	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1,0
N en quinconce	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1,0

A-I-2. Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle [16].

Corrélations valables pour tous fluides : Nu = C (Gr Pr)^m			
Géométrie	**Gr Pr**	**C**	**m**
Plaques et cylindres verticaux	10^4 - 10^9 10^9 - 10^{13}	0,59 0,021	1/4 2/5
Cylindres horizontaux	10^{-10} - 10^{-2} 10^{-2} - 10^2 10^2 - 10^4 10^4 - 10^7 10^7 - 10^{12}	0,675 1,02 0,850 0,480 0,125	0,058 0,148 0,188 0,25 0,33
Face supérieure d'une plaque chaude ou face inférieure d'une plaque froide	2.10^4 - 8.10^6 8.10^6 - 10^{11}	0,54 0,15	0,25 0,33
Face inférieure d'une plaque chaude ou face supérieure d'une plaque froide	10^5 - 10^{11}	0,27	0,25
Cellule fermée rectangulaire inclinée  	$Nu = 1 + 1{,}44\left(1 - \frac{1708}{Gr\,Pr\cos\varphi}\right)^{*}\left[1 - \frac{1708\left(\sin(1{,}8\varphi)^{1{,}6}\right)}{Gr\,Pr\cos\varphi}\right] + \left[\left(\frac{Gr\,Pr\cos\varphi}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^{*}$ si $0 < \varphi < \tan^{-1}(4800Pr)$ Les grandeurs * sont prises égales à 0 si le résultat de leur calcul conduit à un nombre négatif (Hollands et al, 1976)		
Relations simplifiées pour de l'air à pression atmosphérique			
Géométrie	Laminaire $10^4 < Gr\,Pr > 10^9$	Turbulent $Gr\,Pr > 10^9$	
Plaque ou cylindre vertical	$h = 1{,}42\left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{1/4}$	$h = 1{,}31(\Delta\theta)^{1/3}$	
Cylindre horizontal	$h = 1{,}32\left(\frac{\Delta\theta}{D}\right)^{1/4}$	$h = 1{,}24(\Delta\theta)^{1/3}$	
Face supérieure d'une plaque horizontale chaude ou face inférieure d'une plaque froide	$h = 1{,}32\left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{1/4}$	$h = 1{,}52(\Delta\theta)^{1/3}$	
Face inférieure d'une plaque chaude ou face supérieure d'une plaque froide	$h = 0{,}59\left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{1/4}$	$h = 0{,}59\left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{1/4}$	