



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : (Génie Mécanique)

Spécialité : (Génie Des Matériaux)

Par : (Djeddi Dzair)

Sujet

Comportement rhéologique et évolutions
Microstructurale des matériaux de gainage
Du combustible nucléaire

Présenté et soutenu publiquement, le 22/6 /2021, devant le jury composé de :

Dr. TORCHANE Lazhar	M.C.A	Université Larbi Tébessi- Tébessa	President
Dr. KHELIFA Hocine	M.A.A	Université Larbi Tébessi- Tébessa	Rapporteur
Dr. LAOUADI Bouzide	M.C.B	Université Larbi Tébessi- Tébessa	Examineur 1

Promotion : 2020/2021

Dédicace :

Je dédie ce travaille modeste :

Plus respectivement à mes chers parents

Mon père, que Dieu lui fasse miséricorde, et ma mère qui est m'a donné la vie,

Le symbole de tendresse, pour leur soutienne,

Je leur souhaite une bonne santé, que dieu me la garde.

A mes sœurs : Samia, Randa, Maroua et Oumaima

A mes frères : Aimen et Mohamed,

Je vous souhaite un avenir plein de joie et de tout le bonheur.

A toutes ma famille élargie et mes amis, merci pour votre soutien continu

A la promotion de génie mécanique 2020-2021.

A tous les enseignants de génie mécanique

Et a toutes les personnes qui m'ont aidé de proche ou de loin.

Dzair



Remerciement :

*Tout d'abord, je tiens de remercier mon dieu le miséricordieux,
De m'avoir donné la santé, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.*

*Je remercie **Mr. KHELIFA Hocine** de m'encadrer, conseiller et suivre,*

Que dieu lui donne la santé

*Je remercie les membres du jury : le président **Mr. TORCHANE Lazhar**
Et l'examineur **Mr. ELAOUDI Bouzide**, d'avoir accepté d'évaluer mon travail,*

*Un remerciement spécial pour **ma famille**,*

Sans oublier l'ensemble de nos enseignants qui nous enseignés tout

Au long de notre parcours universitaire.

Je remercie les personnes qui ont contribué à réaliser ce mémoire de proche ou de loin.

La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans votre soutien.

Dzair

Sommaire

Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	II
Sommaire	III
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	VII
Liste des abréviations et symboles	IX
Résumé	XII
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Les réacteurs nucléaires comme source d'énergie, Matériaux, propriété et comportement in situ

I.1. Introduction	3
I.2. Généralité sur l'électricité nucléaire	3
I.3. Types et fonctionnement d'un réacteur.....	4
I.4. Réacteur à eau pressurisée (REP) (PWR en anglais)	5
I.4.1. Description d'ensemble	8
I.4.2. Circuit primaire	8
I.4.3. Circuit secondaire	9
I.4.5. Le circuit de refroidissement	9
I.5. Conversion d'énergie	10
I.6. L'énergie libérée par la fission	11
I.7. Matériaux et crayon combustibles	12
I.7.1. Les matériaux utilisés dans les REP	12
I.7.2. L'assemblage combustible	14
I.7.3. Le crayon combustible	15
I.7.4. La gaine	16
I.7.5. La pastille combustible	16
I.7.6. Le combustible nucléaire	17
I.8. Propriétés d'exigence et types des matériaux	18
I.8.1. Propriétés d'exigence	18
I.8.2. Types des matériaux	19

Sommaire

I.8.2.1 Les alliages de Zr comme matériaux de gainage	19
I.8.3. Caractéristiques de zirconium	20
I.8.3.1 Caractéristiques physiques	20
I.8.3.2 Caractéristiques chimiques	21
I.8.3.3. Caractéristiques mécaniques	22
I.8.3.4 Caractéristiques thermiques	23
I.9. Les alliages de Zirconium	23
I.9.1. Généralités	23
I.9.2. Le zirconium	24
I.9.3. Classification des alliages de zirconium	25
I.10. L'utilisation industrielle du zirconium	25
I.10.1. Application dans le domaine nucléaire	25
I.11. Comportement du matériau de tube de gainage D'un REP	27
I.11.1. La résistance à la corrosion	27
I.11.2. Comportement mécanique	27
I.12. Evolution physico-chimique de la gaine	28
I.13. Conclusion	30

Chapitre II : Etude numérique et choix du modèle éléments finis pour la modélisation des tubes de gainage REP

II.1. Introduction.....	31
II.2. Principe de base de MEF	31
II.2.1. Démarche éléments finis	32
II.2.2. Principe de la méthode des éléments finis	33
II.2.3. Choix du type d'élément et discrétisation	34
II.2.3.1. Type d'élément	34
II.2.4. Formes classique des éléments	36
II.2.5. Utilisation d'un logiciel éléments finis	37
II.3. Présentation générale de Cast3M.....	38
II.3.1. Mise en œuvre.....	39
II.4. Conclusion	40

Sommaire

Chapitre III : Modélisation du comportement du matériau de gainage du combustible dans un réacteur REP (Réacteur à eau sous pression)

III.1. Introduction	42
III.2. Modèle proposé	42
III.3. Analyse des résultats	46
III.3.1. Loi de comportement élastique	46
III.3.2. Résultats obtenus et interprétation.....	46
III.4. Conclusion	55
Conclusion générale.....	56
Références Bibliographique	58
Annexe	62

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau I.1 : comparaison entre les deux circuits REP.....	9
Tableau I.2 : caractéristiques physiques du Zr.....	20
Tableau I.3 : caractéristiques chimiques du Zr	21
Tableau I.4 : caractéristiques mécaniques du Zr.....	22
Tableau I.5 : caractéristiques thermiques du Zr	23

Chapitre III

Tableau III.1 : caractéristiques mécaniques et thermiques du matériau utilisé (Zircaloy 4) et leur oxyde	46
--	----

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I.1 : Centrale nucléaire.....	4
Figure I.2 : Fonctionnement d'une centrale nucléaire à eau sous pression (source ASN)....	6
Figure I.3 : « Trois barrières » de confinement	7
Figure I.4 : Circuit primaire REP.....	9
Figure I.5 : Schéma de fonctionnement d'une tranche nucléaire de type REP.....	10
Figure I.6 : fission d'un atome d'uranium 235	11
Figure I.7 : Ténacité de l'acier de cuve des réacteurs à eau sous pression, en fonction de la température avant (en bleu) et après irradiation (en vert). Après irradiation, la courbe se décale vers les températures plus élevées.....	13
Figure I.8 : (a Détail d'un crayon de combustible et b) d'un assemblage de combustible	15
Figure I.9 : Détail d'un crayon de combustible nucléaire.....	16
Figure I.10 : Dimensions caractéristiques des pastilles combustibles utilisées dans les REP.....	17
Figure I.11 : Des pastilles d'uranium - Source : Le Nucléaire TPE	18
Figure I.12 : Tableau périodique des éléments chimique.....	24
Figure I.13 : Coupe schématique d'un crayon combustible dans le réacteur. PF et An représentent respectivement l'implantation des produits de fission et des actinides	29

Chapitre II

Figure II.1 : Processus d'analyse utilisant un modèle numérique.....	32
Figure II.2 : Formes classique des éléments	36

Chapitre III

Figure III.1 : Modèle réel étudié	43
Figure III.2 : Modèle proposé 3D et maillage de la structure.....	44
Figure III.3 : Sollicitations imposées et maillage de la structure.....	45
Figure III.4 Caractéristiques géométriques du modèle proposé (EF)	47
Figure III.5 : Cartographie des températures	48
Figure III.6 : distribution de la température ($^{\circ}\text{C}$) au niveau de l'épaisseur (μm)	49

Liste des figures

Figure III.7: distribution de la température ($^{\circ}\text{C}$) au niveau de l'épaisseur (μm) Obtenue par S. ZOGHLAMI	49
Figure III.8 : Effet de la pression d'eau sur la structure (déformée). (En bleu : structure initiale, en rouge : structure déformée).....	50
Figure III.9 : Iso-valeurs de la distribution des contraintes totales (VON MISES).....	51
Figure III.10 : Evolution des contraintes (GPa) au niveau de l'épaisseur (μm).	52
Figure III.11 : Evolution des contraintes (GPa) au niveau de l'épaisseur (μm) obtenue par Y. D.KWON	52
Figure III.12 : Evolution des contraintes (GPa) en fonction de la température ($^{\circ}\text{C}$)	53
Figure III.13 : Evolution des contraintes (GPa) en fonction de la température ($^{\circ}\text{C}$) de T. obtenue par T. MATSUOKA)	54

Liste des abréviations et symboles

Liste des abréviations et symboles

Abréviations :

REP	réacteur à eau pressurisée
PWR	pressurized water reactor
Magnox et UNGG	Réacteur à uranium naturel modéré par du graphite
CANDU	filière canadienne ; Réacteur utilisant de l'uranium naturel modéré par de l'eau lourde
WWER	le réacteur de puissance à caloporteur et modérateur eau.
REB	réacteur à eau bouillante.
BWR	boiling water reactor
AGR	Réacteur avancé refroidi au gaz
RNR	Réacteur à neutrons rapides
Le BN-600	nom d'un prototype de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium liquide
RSF	Réacteur nucléaire à sels fondus
RBMK	Réacteur de grande puissance à tubes de force
GV	générateurs de vapeur
MET	Microscopie Électronique en Transmission
IASCC	irradiation assisted stress corrosion cracking
AREVA	une multinationale française spécialisée dans les métiers du combustible nucléaire.
EDF	électricité de France.
ZIRLO	alliage de zirconium avec du niobium (Westinghouse, États-Unis)
M5	alliage de zirconium avec du niobium (Areva NP, France).
USS Nautilus	sous-marin de classe Narwhal de l'United states navy
UO ₂	oxyde d'uranium.
ZrO ₂	oxyde de zirconium
pH	Potentiel hydrogène

Liste des abréviations et symboles

16MND5	acier utilisé pour la fabrication par forgeage des cuves de réacteurs nucléaires à eau sous pression.
Zr	zirconium
Cr	chrome
Nb	niobium
Fe	fer
Zy-2	le Zircaloy-2
Zy-4	le Zircaloy-4
Sn	l'étain
Ni	nickel
Zr4Sn	alliage de zirconium et étain de 0.04% d'étain
Zr3Sn	alliage de zirconium et étain de 0.03% d'étain
Zr3Fe	alliage de zirconium et de fer 0.03 de fer
CC	cubique centrée
HC	hexagonale compacte
ZrSiO ₄	la forme minéralogique ZrSiO ₄ (zircon)
Tf	température de la fusion
MEF	Méthode des éléments finis.
EF	éléments finis.

Liste des abréviations et symboles

Liste des symboles :

nm	nano mètres.
MPa	méga pascale
MWe	méga watt électrique.
μm	micro mètre
t	temps
s	seconde
$^{\circ}\text{C}$	degré Celsius
Dpa	déca pascale
Ppm	partie par million
$\mu\Omega$	micro ohm
Cm	centimètre
Barns	barns
Bars	bars
g	gramme
Cm^3	Centimètre cube.
kJ	kilo joule
mol	mole
V	volt
GPa	giga Pascale
W	watt
m	mètre
K	kelvin
J	joule
g	gramme
Kg	kilo gramme

الملخص:

يعتبر إنتاج الطاقة من أهم المصالح الاقتصادية والبيئية في التنمية العالمية. الطاقة النووية هي مصدر رئيسي للطاقة. من بين المفاعلات التي تنتج الطاقة النووية مفاعلات الماء المضغوط (REP) يعتمد تشغيل REP على تحويل الطاقة الحرارية، المنبعثة من تفاعل نووي، إلى طاقة كهربائية، وتستخدم سبائك الزركونيوم على نطاق واسع كأنايبب تكسية للوقود ومكونات داخلية أخرى للقلب. بسبب خصائصها المفضلة.

يهدف هذا العمل إلى التعرف على السلوك المرن الحراري الميكانيكي لهيكل أنبوب التغليف، ويعتمد هذا التحديد على حسابات المتغيرات الحرارية الميكانيكية (درجة الحرارة، الإجهاد، الإزاحة، التشوه)، وتلك التي تستخدم النمذجة العددية بطريقة العناصر المحدودة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة النووية، مفاعلات الماء المضغوط (REP)، أنايبب تكسية الوقود، الزركلوي 4، السلوك الحراري الميكانيكي، طريقة العناصر المحدودة.

Résumé :

La production de l'énergie est un enjeu économique et écologique majeur du développement mondial. L'énergie nucléaire est une source majeure d'énergie. Parmi les réacteurs producteurs de l'énergie nucléaire nous trouvons les réacteurs à eau sous pression (REP). Le fonctionnement d'un REP est basé sur la conversion de l'énergie thermique, dégagée par une réaction nucléaire, en énergie électrique, les alliages de zirconium sont largement utilisés comme tubes de gainage de combustible et autres composants internes du cœur. A cause des leurs propriétés favorables.

Ce travail et pour objectif d'identifier le comportement élastique thermomécanique de la structure de tube de gainage, cette identification est basée sur les calculs des variables thermomécanique (température, contrainte, déplacements, déformation), et ceux en utilisons la modélisation numérique par la méthode des éléments finis.

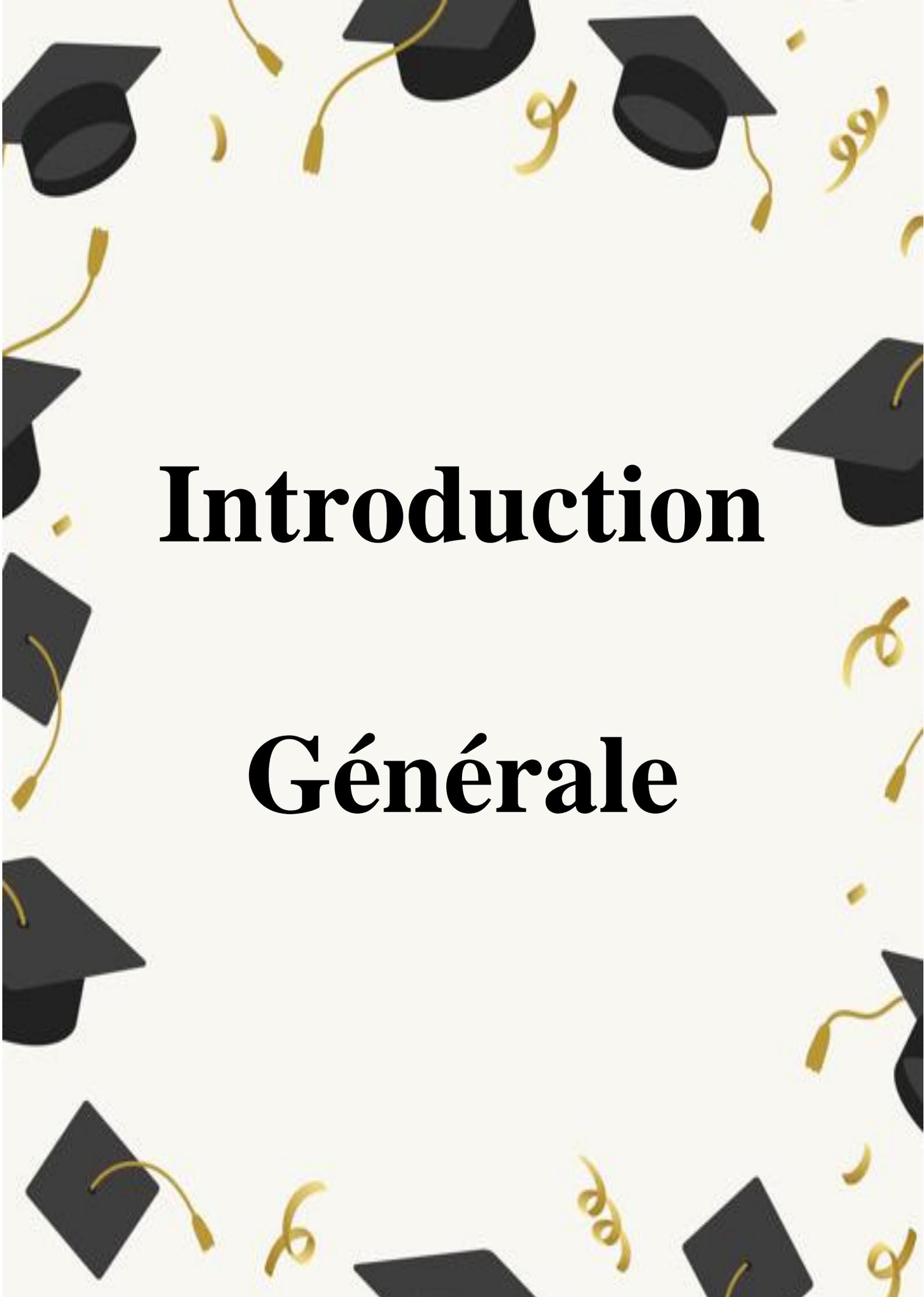
Mots clés : énergie nucléaire, les réacteurs à eau sous pression (REP), tubes de gainage de combustible, zircaloy-4, comportement thermomécanique, méthode des élément finis.

Abstract:

The production of energy is a major economic and ecological stake in world development. Nuclear power is a major source of energy. Among the reactors that produce nuclear energy are pressurized water reactors (PWRs). The operation of a PWR is based on the conversion of thermal energy, given off by a nuclear reaction, into electrical energy, zirconium alloys are widely used as fuel cladding tubes and other internal components of the core. Because of their favorable properties.

This work aims to identify the thermomechanical elastic behavior of the sheathing tube structure, this identification is based on the calculations of thermomechanical variables (temperature, stress, displacements, deformation), and those using numerical modeling by the method finite elements.

Keywords: nuclear energy, pressurized water reactors (PWRs), fuel cladding tubes, zircaloy-4, thermomechanical behavior, finite element method.

The background is white and decorated with several black graduation caps (mortarboards) and gold streamers scattered across the page. The caps are positioned at various angles, and the streamers are in various shapes, some curled and some straight.

Introduction

Générale

Introduction Générale

Introduction Générale :

Les conditions sévères de fonctionnement des centrales nucléaires thermiques productrices d'électricité, et surtout à eau pressurisée, liées à la température et à la pression ainsi que les risques importants de pollution justifient que les l'étude du comportement en service des matériaux liés à ce secteur soient un grand souci primordial pour l'exploitant.

Les matériaux soumis aux plus hautes contraintes en termes de températures, pression et rayonnement sont bien évidemment les matériaux de gainage du combustible qui sont en zircaloy.

Les conditions de fonctionnement telles qu'éclairci précédemment sont très largement suffisantes pour qu'un endommagement permanent (rupture, corrosion, déformation, fissures assistée par l'irradiation ...etc.) soit produite.

Lorsqu'il s'agit de nucléaire et que celui-ci participe à hauteur de 75% de la production, on comprend que les dégradations du matériel par corrosion qui entraînent des indisponibilités coûteuses ou qui risquent de détériorer la sûreté, doivent être limitées le plus possible. Or, et ceci se vérifie sur les centrales qui atteignent ou dépassent les 10 années de fonctionnement, alors qu'il est envisagé de les faire fonctionner 40 ans,

la corrosion est probablement un des facteurs les plus notables de ce que l'on peut appeler le vieillissement des centrales. Le manuscrit débutera par le rappel du contexte industriel.

la fissuration de la gaine de combustible sous contraintes hybrides est probablement un des facteurs les plus notables de ce que l'on peut appeler le vieillissement des centrales.

Le premier chapitre, consacré à l'étude bibliographique, présente tout d'abord la fonctionnalité d'une centrale nucléaire, toute en présentant les différents éléments essentiels ainsi qu'un aperçu général sur les matériaux constituent les tubes de gainages des combustibles nucléaires, et les différents matériaux utilisés pour les tubes des gainages de combustibles ainsi que leurs propriétés et leurs comportement in situ.

Introduction Générale

Le second chapitre est consacré à la présentation d'une méthode très reconnue dans la modélisation des structures nommée par la méthode des éléments finis (MEF) ainsi que le logiciel d'étude (CAST3M) utilisé pour identifier le comportement thermomécanique de la structure de la gaine.

Le troisième chapitre est présente Des résultats extraits de la modélisation sont exploités.

The background of the slide is white and decorated with several dark grey graduation caps (mortarboards) scattered across the surface. Interspersed among the caps are numerous small, golden-yellow streamers or confetti pieces, some of which are curled into loops. The overall theme is celebratory and academic.

Chapitre I

**Les réacteurs nucléaires comme
source d'énergie**

**Matériaux, propriété et
comportement in situ.**

Chapitre I

Les réacteurs nucléaires comme source d'énergie Matériaux, propriétés et comportement in situ

I.1. Introduction :

Les matériaux impliqués dans tout process industriel doivent apporter des propriétés de résistance à la température, à la pression, à la fatigue, à la chaleur et à la corrosion. D'une manière générale, dans le domaine nucléaire, ces matériaux peuvent être maintenues sous les effets de l'irradiation, imputables en particulier au flux de neutrons.

Dans le cadre de l'étude du comportement des matériaux hétérogènes soumis à des différentes sollicitations mécaniques, thermiques et radioactives, les matériaux pour les tubes gainage des combustibles nucléaires ont été choisis comme notre cible de recherche. Nous introduisons dans ce chapitre quelques notions générales sur les réacteurs nucléaires et précisons les réacteurs à eau sous pression, leur types et fonctionnement, l'énergie libérée par la fission ainsi que les matériaux pour les crayons combustibles.

I.2. Généralité sur l'électricité nucléaire :

La production d'électricité est réalisée depuis la fin du XIXe siècle dans des centrales électriques. Les centrales transforment des énergies primaires, généralement grâce à des générateurs électriques entraînés soit par une machine thermique alimentée en combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole), en combustible organique (biomasse, déchets) ou en fission nucléaire, soit directement par l'énergie mécanique hydroélectrique ou éolienne. L'énergie solaire et la géothermie sont d'autres sources d'énergie électrique également exploitées. [1]

La production d'électricité d'origine nucléaire est l'une des méthodes les plus utilisées dans le monde, elle est développée plus largement à partir de 1974, au lendemain du 1er choc pétrolier, révélateur de la dépendance énergétique du pays vis-à-vis des hydrocarbures. L'énergie nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre. Elle est utilisable en grandes quantités grâce aux puissances qu'elle génère et elle est très compétitive.

La production d'électricité provient d'une source de chaleur. Comme les centrales thermiques fossiles (gaz, charbon, pétrole) ou renouvelables (biogaz, biomasse, solaire à

concentration), une centrale nucléaire utilise de la chaleur pour chauffer de l'eau et générer de la vapeur, laquelle actionne une turbine qui, couplée à un alternateur, génère de l'électricité. Toutefois, contrairement aux autres centrales thermiques, la chaleur nécessaire pour générer de la vapeur n'est pas obtenue par la combustion chimique ou par la concentration de rayonnements solaires mais par la fission nucléaire [2].



Figure I. 1 : Centrale nucléaire. [1]

I.3. Types et fonctionnement d'un réacteur :

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité et dont la chaudière est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires ayant pour source d'énergie un combustible nucléaire. La puissance électrique d'une centrale varie de quelques mégawatts à plusieurs milliers de mégawatts en fonction du nombre et du type de réacteur en service sur le site [3].

L'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission de noyaux d'atomes lourds. Celle-ci dégage de la chaleur, qui sert dans un premier temps à vaporiser de l'eau, comme dans toute centrale électrique thermique conventionnelle, puis la vapeur d'eau produite entraîne en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil [3][4].

Il existe différentes technologies de réacteurs nucléaires civils, regroupés en « filières » :

- **Réacteur à uranium naturel modéré par du graphite (Magnox et UNGG) :**

Refroidi par du dioxyde de carbone ; filière française UNGG dont le premier réacteur à usage civil. Cette filière fut abandonnée pour la filière REP pour des raisons économiques.

- **Réacteur utilisant de l'uranium naturel modéré par de l'eau lourde :**

Filière canadienne CANDU.

- **Réacteur à eau pressurisée (REP) (PWR en anglais) :**

Type de réacteur utilisant de l'oxyde d'uranium enrichi comme combustible, et est modéré et refroidi par de l'eau ordinaire sous pression. Les REP constituent l'essentiel du parc actuel : 60 % dans le monde et 80 % en Europe. Une variante en est le réacteur à eau pressurisée de conception soviétique (WWER).

- **Réacteur à eau bouillante (REB) (BWR en anglais) :**

Type de réacteur est assez semblable à un réacteur à eau pressurisée, à la différence importante que l'eau primaire se vaporise dans le cœur du réacteur et alimente directement la turbine, ceci en fonctionnement normal ;

- **Réacteur à eau lourde pressurisée ;**

- **Réacteur avancé refroidi au gaz ou AGR ;**

- **Réacteur à neutrons rapides (RNR)**

- **Réacteur nucléaire à neutrons rapides et à caloporteur sodium :**

Comme le Superphénix européen ou le BN-600 russe.

- **Réacteur nucléaire à sels fondus (RSF) où l'on pourrait utiliser du thorium.**

- **Réacteur de grande puissance à tubes de force (RBMK) ;**

- **Réacteur à eau bouillante modéré au graphite :** de conception soviétique.

I.4. Réacteur à eau pressurisée (REP) (PWR en anglais) :

Un REP (Réacteur à eau pressurisée) est composé de trois circuits d'eau indépendants (Figure I.2). Le circuit primaire est le seul entièrement confiné dans le bâtiment réacteur, le circuit secondaire récupère la chaleur du circuit primaire sous forme de vapeur pour faire tourner la turbine se situant à l'extérieur du bâtiment réacteur. Enfin, le circuit tertiaire est relié à la source froide (fleuve, mer, tour aéroréfrigérante etc.), il fait le lien entre le condenseur et l'environnement extérieur. Le bâtiment réacteur contient principalement le réacteur nucléaire, les générateurs de vapeur et le pressuriseur. Dans la salle des machines se trouvent la turbine, l'alternateur et le condenseur.

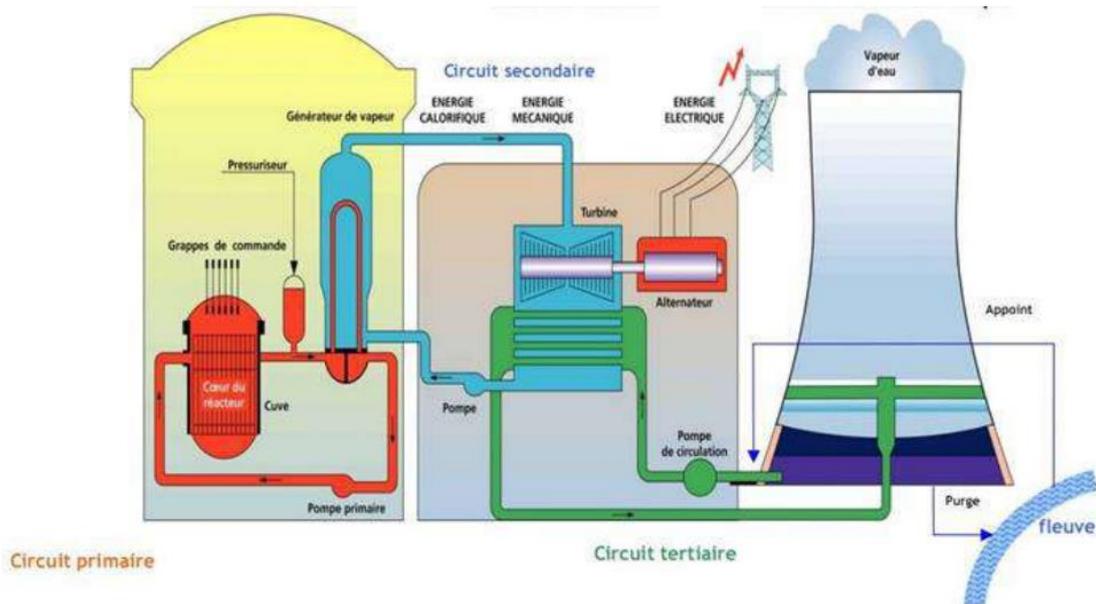


Figure I.2 : Fonctionnement d'une centrale nucléaire à eau sous pression (source ASN). [5]

Le fonctionnement d'un REP est basé sur la conversion de l'énergie thermique, dégagée par une réaction nucléaire, en énergie électrique. L'énergie de fission (fission d'un atome d'uranium 235 sous l'impact d'un neutron) est ainsi convertie en énergie thermique, ce qui permet de chauffer l'eau de 280°C à 320°C lors de son passage dans la cuve du réacteur où se trouvent les assemblages combustibles. Le pressuriser permet de maintenir une pression de 155 bars dans le circuit primaire et ainsi conserver l'état liquide du fluide caloporteur.

Le circuit primaire chauffe le circuit secondaire par échange thermique au niveau du générateur de vapeur. Côté secondaire, la pression est moins importante, de l'ordre de 60-80 bars. Grâce à ce transfert thermique, l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur qui va être détendue au passage d'une turbine permettant la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. Couplée à un alternateur, la turbine produit de l'électricité transformant ainsi l'énergie mécanique en énergie électrique.

La vapeur est ensuite refroidie grâce à un condenseur connecté au circuit tertiaire. L'eau revenue à l'état liquide est à nouveau réinjectée dans le générateur de vapeur. Le circuit tertiaire est un circuit ouvert dans le cas d'une alimentation en eau extérieur (mer, fleuve etc.) ou fermé dans le cas d'un aéroréfrigérant.

Les installations nucléaires sont conçues en respectant des principes de sûreté élevés. La sûreté nucléaire regroupe l'ensemble des dispositions techniques, organisationnelles et humaines qui sont destinées à préserver l'homme et son environnement de toute dissémination de produits radioactifs.

Ces dispositions sont mises en œuvre tout au long de la vie d'une centrale nucléaire, de la conception à l'exploitation et jusqu'à la déconstruction. La sûreté nucléaire repose en particulier sur le principe des « trois barrières » entre les substances radioactives et l'environnement (Figure I.3).

La première barrière est la gaine des crayons combustibles qui sont constamment refroidis par l'eau primaire qui circule en circuit fermé entre le cœur et les générateurs de vapeur (GV).

Le circuit primaire constitue une deuxième enveloppe capable de retenir la dispersion des produits radioactifs. Pour finir, l'enceinte de confinement est la troisième barrière, elle est constituée par le bâtiment réacteur en béton qui abrite le circuit primaire. [6]

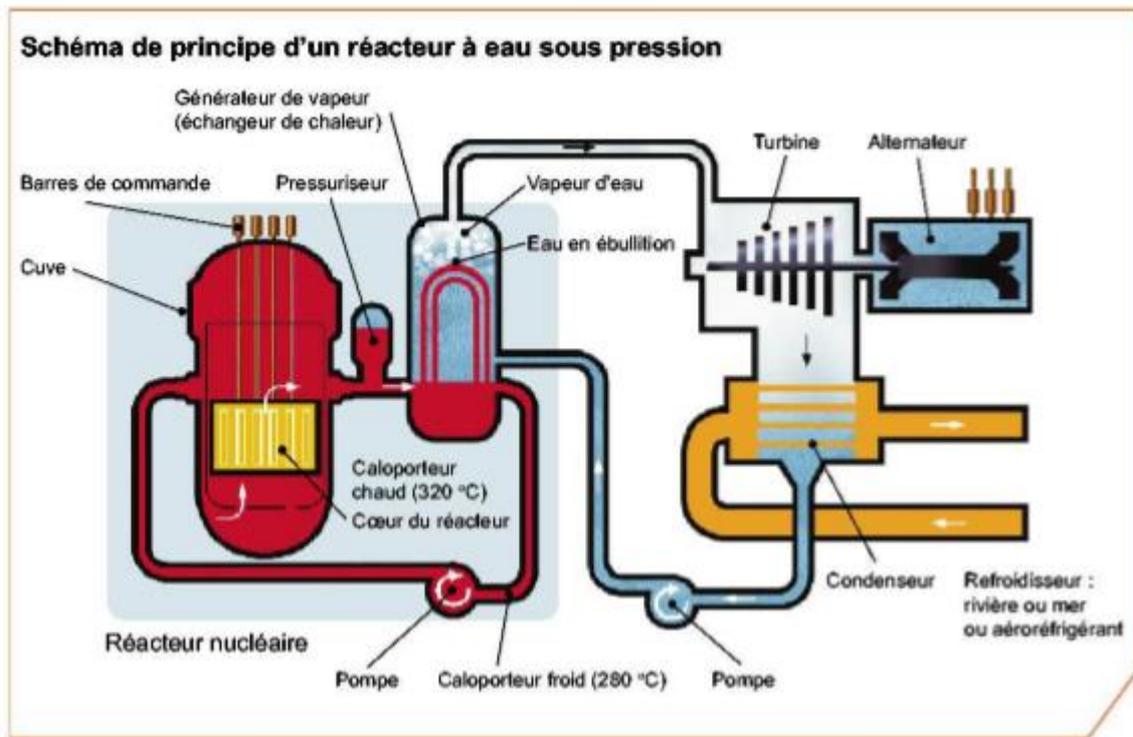


Figure I.3 : « Trois barrières » de confinement. [6]

I.4.1. Description d'ensemble :

Le Réacteur à Eau sous Pression (REP) est caractérisé par :

- Cycle indirect deux circuits séparés pour réfrigérer le cœur et pour alimenter les turbines,
 - ✓ Primaire haute pression (15.5 MPa), monophasique liquide,
 - ✓ Secondaire moyenne pression (7-8 MPa), diphasique liquide-vapeur,
- GV échangeur thermique entre les deux circuits (3 ou 4 GV par réacteur),
- Tertiaire basse pression et température, circuit ouvert sur la source froide,
- Trois barrières de confinement de la radioactivité (gaine du combustible, circuit primaire, enceinte). [7]

I.4.2. Circuit primaire :

Le circuit primaire est composé de plusieurs boucles (trois pour un réacteur de 900 MWe, quatre pour un réacteur de 1300 MWe). La Figure I.4 présente le schéma du circuit primaire d'un réacteur 1300 MWe (Thomas et Cauquelin, 2002). Le fluide primaire, réchauffé dans le cœur du réacteur, est mis en circulation par les pompes primaires et entre dans le générateur de vapeur puis retourne dans le cœur. On compte un générateur de vapeur et une pompe primaire par boucle. La température du fluide primaire évolue entre 290 °C et 325 °C. La pression dans le circuit, réglée par le pressuriseur, est d'environ 155 bars ce qui correspond à une température de saturation de 345 °C. [8]

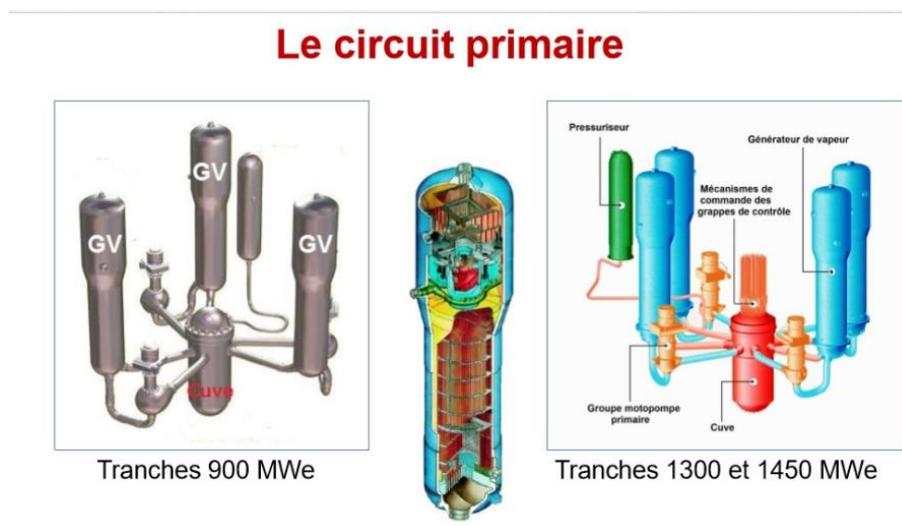


Figure I.4 : Circuit primaire REP [9].

I.4.3. Circuit secondaire :

Le générateur de vapeur est le point commun entre le circuit primaire et le circuit secondaire. La vapeur qui se dégage au-dessus du faisceau tubulaire est débarrassée de ses gouttelettes d'eau en passant à travers des séparateurs et des sécheurs avant de quitter le sommet du générateur de vapeur par une tuyauterie vapeur qui la conduit en salle des machines à l'entrée du corps de turbine à haute pression. La part d'eau secondaire qui reste en phase liquide est recirculée dans un espace annulaire ménagé contre l'enveloppe externe du générateur.

Après s'être détendue dans les corps de turbine et condensée dans le condenseur, l'eau secondaire est renvoyée par des pompes secondaires pour alimenter les générateurs de vapeurs. Il y a ainsi autant de boucles secondaires que de boucles primaires, et le circuit secondaire est, lui aussi, étanche et fermé sur lui-même.

Outre les circuits primaire et secondaire, et le ou les circuits de refroidissement, l'îlot nucléaire d'un REP comporte d'autres circuits auxiliaires. [10]

Tableau I. 1 : comparaison entre les deux circuits REP [7]

Circuit primaire		Circuit secondaire	
Pression	15.5 MPa	Pression vapeur	7.3 MPa
Temp. Saturation	345 °C	Temp.entrée GV	229 °C
Temp. Entrée cœur	293 °C	Temp. Sortie GV	286 °C
Temp. Sortie cœur	328 °C	Temp. Condenseur	30 °C
Débit	18.8 t/s	Débit	2.14 t/s
Puissance thermique	3817 MW		

I.4.5. Le circuit de refroidissement :

Les circuits de refroidissement ont pour fonction de condenser la vapeur sortant de la turbine du circuit secondaire. Ils comportent pour cela un condenseur, échangeur thermique composé de milliers de tubes dans lesquels circule l'eau froide provenant du milieu extérieur (mer ou rivière) ou d'un circuit de réfrigération atmosphérique. Au contact de ces tubes, la

vapeur se condense et peut être renvoyée sous forme liquide vers les générateurs de vapeur. L'eau du circuit de refroidissement échauffée dans le condenseur est ensuite soit rejetée dans le milieu (circuit ouvert), soit, lorsque le débit de la rivière est trop faible ou l'échauffement trop important par rapport à la sensibilité du milieu, refroidie par une tour aéroréfrigérante (circuit fermé ou semi-fermé).

Les circuits de refroidissement sont des milieux favorables au développement de micro-organismes pathogènes. L'emploi de titane ou d'acier inoxydable comme matériau de construction des condenseurs des réacteurs en bord de rivière, en remplacement du laiton qui a naturellement un effet limitant la prolifération des micro-organismes, impose la mise en œuvre de traitements biocides ou d'autres moyens de désinfection, par exemple les rayons ultraviolets pour prévenir la prolifération d'amibes. Les tours aéroréfrigérantes contribuent à la dispersion atmosphérique de légionelles dont la prolifération peut être prévenue par un entretien renforcé des ouvrages (détartrage, mise en place d'un traitement biocide...). [11]

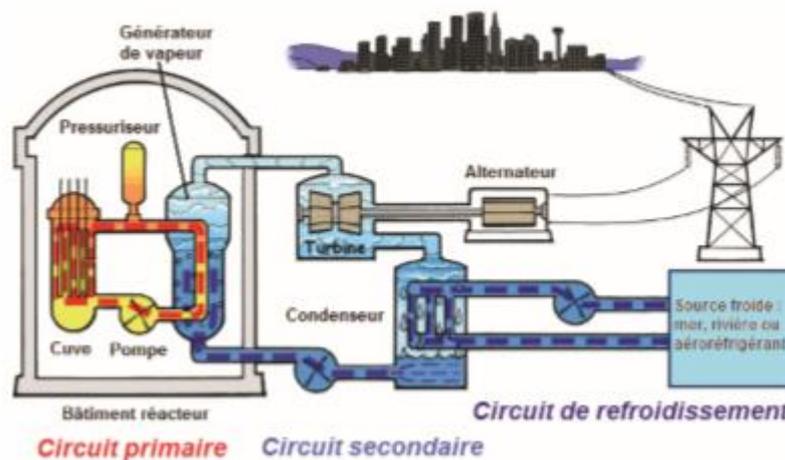


Figure 1.5 : Schéma de fonctionnement d'une tranche nucléaire de type REP. [12]

I.5. Conversion d'énergie :

La conversion de l'énergie nucléaire, déposée sous forme thermique dans le combustible, en énergie électrique est basée sur le cycle de Rankine (machine à vapeur) :

Générateur de Vapeur échangeur thermique primaire-secondaire qui vaporise l'eau du circuit secondaire,

Turbine détente de la vapeur qui entraîne l'arbre turbine-alternateur,

Condenseur condensation de la vapeur avant son pompage vers les GV. [7]

I.6. L'énergie libérée par la fission :

Une centrale électrique nucléaire est d'abord une machine thermique qui transforme de l'énergie thermique en énergie mécanique puis en énergie électrique.

Dans une centrale nucléaire, l'énergie thermique est libérée dans le cœur du réacteur, par la fission d'atomes d'uranium 235 (Figure I.6). [13]

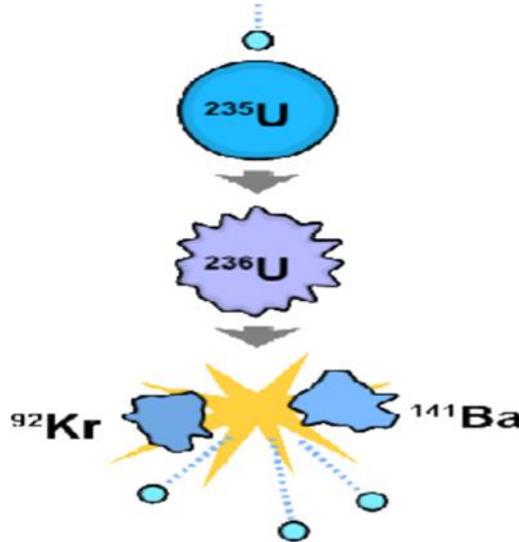


Figure I.6 : fission d'un atome d'uranium 235. [13]

Parmi les atomes présents dans la nature, l'atome d'Uranium-235 possède une propriété particulière : son noyau peut se briser en deux fragments sous l'impact d'un neutron lent, appelé neutron thermique. On dit qu'il subit une fission.

L'énergie de liaison, qui assure la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau, se trouve ainsi libérée. La libération de cette énergie nucléaire se traduit par un dégagement de chaleur. En se brisant, le noyau de l'atome d'Uranium-235 expulse deux ou trois neutrons à haute énergie, appelé neutrons rapides. Ceux-ci, s'ils sont ralentis, pourront à leur tour aller briser d'autres noyaux qui expulseront d'autres neutrons et ainsi de suite, dans une réaction en chaîne capable de dégager de grandes quantités d'énergie et de chaleur. C'est grâce à la chaleur ainsi produite que les centrales nucléaires génèrent de l'électricité. [14].

L'énergie libérée par les fissions et par les produits de fission doit être évacuée en permanence pour éviter une montée en température excessive du réacteur. Dans les réacteurs à eau sous pression, lors du fonctionnement normal en puissance, l'évacuation de l'énergie est réalisée grâce à trois circuits successifs, en vue notamment d'éviter le rejet d'eau radioactive provenant du cœur à l'extérieur de la centrale :

- le circuit primaire qui permet de refroidir le cœur par une circulation d'eau à une température moyenne d'environ 300 °C et à une pression de 155 bars ;
- le circuit secondaire qui évacue l'énergie du circuit primaire par l'intermédiaire de générateurs de vapeur qui alimentent en vapeur le groupe turboalternateur produisant l'électricité ;
- le circuit tertiaire qui comporte un condenseur et évacue l'énergie restante vers une rivière, un fleuve ou la mer ou dans l'atmosphère par des tours de réfrigération.

Cette brève description du fonctionnement d'un réacteur nucléaire identifie les fonctions fondamentales de sûreté qui doivent être assurées en permanence :

- la maîtrise de la réactivité.
- l'évacuation de la puissance.
- le confinement des produits de fission et plus généralement de la radioactivité (certains produits d'activation présents dans le circuit primaire sont également radioactifs). [15]

I.7. Matériaux et crayon combustibles :

I.7.1. Les matériaux utilisés dans les REP :

Les aciers utilisés sont des aciers standards qui ont été sélectionnés sur la base de propriétés assurant à l'état initial une bonne compatibilité physico-chimique et mécanique avec le cahier des charges connu à la fin des années 60 :

- L'acier de cuve est un acier faiblement allié, 16MND5, de structure cristalline cubique centrée, qui, à l'état bainitique revenu, offre un bon compromis entre résistance mécanique et ténacité. Un revêtement inoxydable interne pallie sa mauvaise tenue à la corrosion aqueuse. Sous l'effet de l'irradiation des neutrons, la courbe de ténacité se décale vers des températures plus élevées (voir figure.I.7). À température donnée, la ténacité baisse donc avec l'irradiation : l'acier se fragilise. La cuve est la deuxième barrière de sûreté du réacteur dont l'exploitant doit démontrer l'intégrité tout au long de la vie du réacteur. Pour cela, la ténacité de l'acier doit rester suffisante pour garantir la stabilité de tout défaut, réel ou postulé, soumis aux divers chargements pris en compte dans les codes de dimensionnement. La cuve est, de plus, un composant non remplaçable : son inaptitude au service signifie la fin de vie du réacteur ;

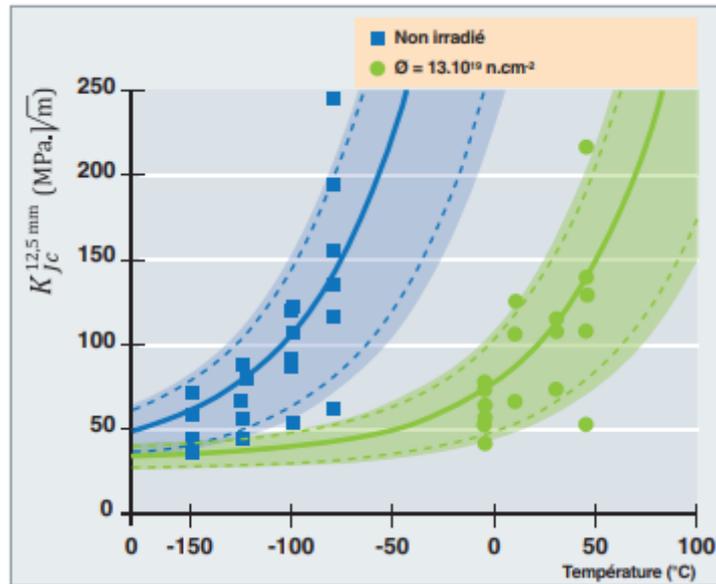


Figure I.7 : Ténacité de l'acier de cuve des réacteurs à eau sous pression, en fonction de la température avant (en bleu) et après irradiation (en vert). Après irradiation, la courbe se décale vers les températures plus élevées. [16]

- les structures internes inférieures sont en acier austénitique de structure cristalline cubique à faces centrées : 304 hypertrempé pour le cloisonnement et 316 écroui pour les vis qui en assurent l'assemblage. Ces équipements internes forment une construction de 13 m de haut et de 3 m de diamètre, dont l'intégrité et la stabilité dimensionnelle doivent être assurées. Ces aciers austénitiques ont été retenus pour leur bonne résistance mécanique et leur caractère inoxydable. En service, ces aciers durcissent et voient leur ductilité et leur ténacité diminuer : comme la cuve, ils se fragilisent. Des nano-cavités et des nano-bulles d'hélium¹ ont été observées, en Microscopie Électronique en Transmission (MET), avec des échantillons prélevés sur des vis. Ces aciers pourraient donc gonfler pour les fortes doses envisagées en cas de prolongation de la durée de fonctionnement des réacteurs, avec comme conséquences des variations dimensionnelles des structures et des contraintes mécaniques induites par les gradients de gonflement associés aux gradients thermiques, ce qui pourrait affecter la stabilité dimensionnelle et l'intégrité de ces composants internes. Le phénomène de corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation a été observé sur quelques vis, le développement de la fissuration intergranulaire ayant lieu dans les congés de ces vis pour des doses d'environ 5 dpa.

C'est la transparence aux neutrons du zirconium qui est la raison de la sélection des alliages à base de Zr pour le gainage du combustible :

- Le Zircaloy-4 a été l'alliage utilisé dans les réacteurs du parc EDF. Sa composition chimique et sa gamme de fabrication (état détendu) ont été optimisés pour améliorer la résistance mécanique et la tenue à la corrosion. L'oxygène est un élément interstitiel dans le réseau cristallin hexagonal compact du zirconium, qui contribue fortement à accroître la limite d'élasticité de l'alliage. L'étain, en substitution, améliore significativement la tenue au fluage. Le fer et le chrome ont des limites de solubilité modestes dans le zirconium (~150 ppm à 850 °C) ; ils précipitent sous forme de phases intermétalliques, $Zr(Fe, Cr)_2$ et $Zr(Nb, Fe)$, qui limitent la taille de grains et améliorent la tenue à la corrosion. Le phénomène de croissance sous irradiation de ces alliages conduit à des allongements qui peuvent provoquer une déformation rédhibitoire des assemblages.

- les alliages M5 d'AREVA, et ZIRLO de Westinghouse, résultent de nouvelles optimisations de la composition chimique et de la gamme de fabrication (état recristallisé pour le M5 et partiellement recristallisé pour le ZIRLO) conduisant, en service, à un gain en terme de croissance, de fluage sous irradiation, et à une tenue à la corrosion considérablement améliorée, sans sacrifier pour autant les qualités mécaniques de la gaine, ce qui permet d'atteindre des temps de séjour en réacteurs plus longs qu'avec le Zircaloy-4. [16]

I.7.2. L'assemblage combustible :

Un assemblage combustible REP est formé de l'arrangement géométrique de 17x17 crayons combustibles. Le maintien des crayons est assuré par des embouts à chaque extrémité de l'assemblage, complétés par des grilles disposées régulièrement sur la longueur de l'assemblage (Figure I.8). [17]

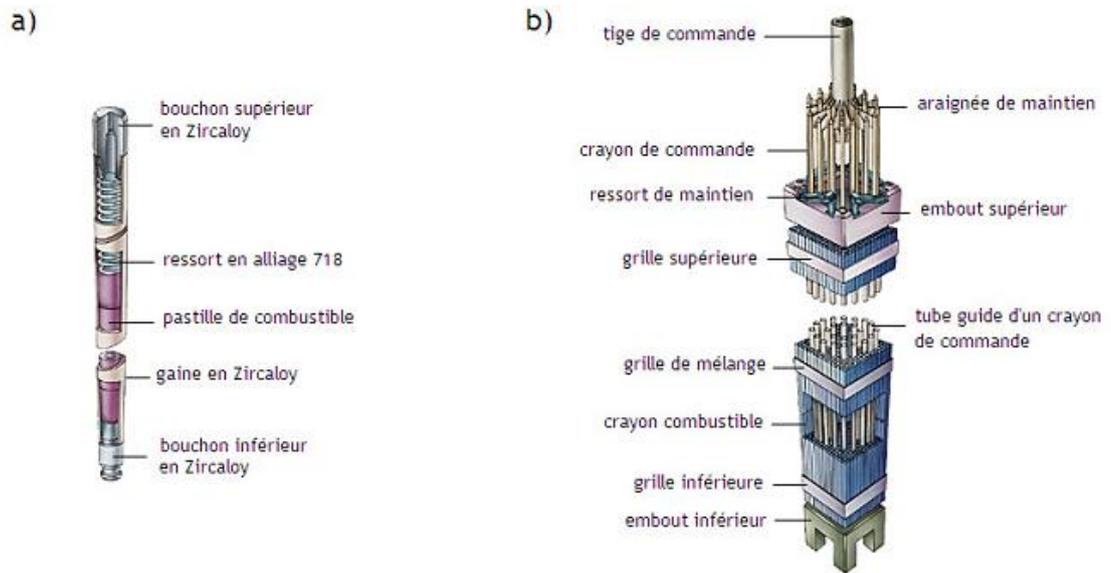


Figure I.8 : a) Détail d'un crayon de combustible et b) d'un assemblage de combustible [8].

I.7.3. Le crayon combustible :

Le crayon combustible est un ensemble cylindrique formé d'un tube de gainage en alliage de zirconium, le Zircaloy, dans lequel sont empilées des pastilles de combustible. Le crayon est fermé par deux bouchons en Inconel. Un ressort de maintien permet de comprimer les pastilles. Les dimensions caractéristiques d'un crayon combustible sont données à la figure I.9. Initialement, les pastilles et la gaine ne sont pas en contact. L'espace qui les sépare est appelé jeu pastille-gaine. Le crayon est également rempli d'hélium sous pression. La pression interne initiale dans le crayon varie entre 1, 5 et 3 MPa. [18]

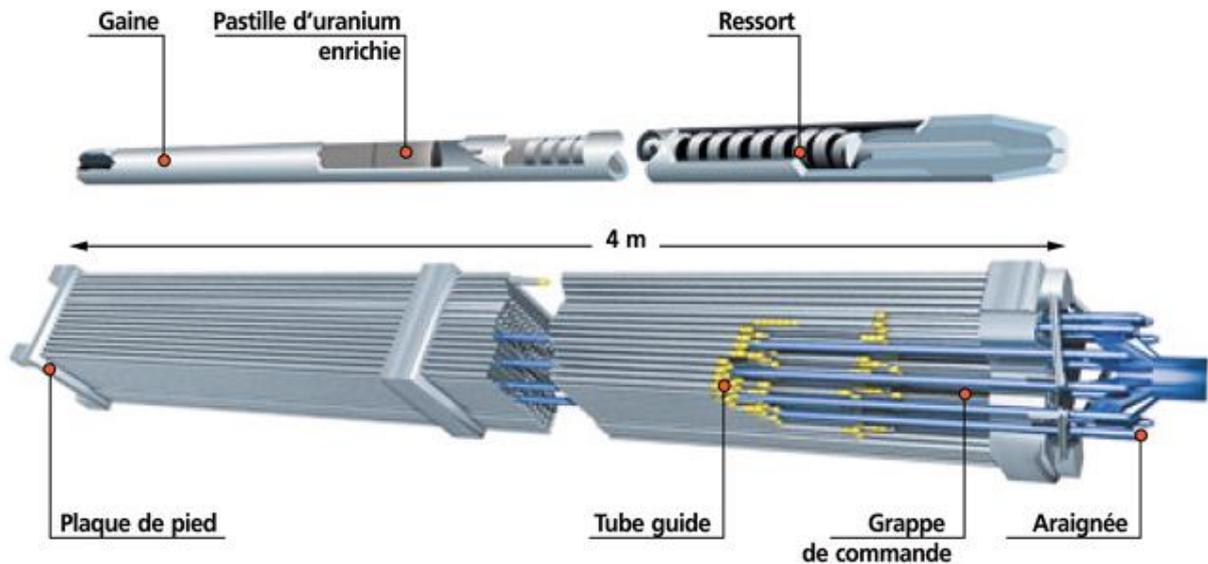


Figure I.9 : Détail d'un crayon de combustible nucléaire. [19]

I.7.4. La gaine :

La gaine est un tube en alliage de zirconium, matériau choisi pour ses propriétés neutroniques, ses propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion par le fluide caloporteur à haute température. Le premier rôle de la gaine est d'être la première barrière de protection de l'environnement vis à vis des produits de fissions générés par les réactions nucléaires dans le combustible. [18]

I.7.5. La pastille combustible :

Dans les REP, le combustible est conditionné sous forme de pastilles cylindriques (La figure I.10) en donne les caractéristiques géométriques principales. Les pastilles présentent un évidement hémisphérique à leurs extrémités. Son but est d'accommoder les déformations de la pastille. Les pastilles sont chanfreinées pour faciliter leur introduction dans la gaine. Cette géométrie est telle que le crayon, constitué d'un empilement de pastilles identiques, présente initialement un axe de symétrie qui sera identifié avec l'axe Oz des coordonnées cylindriques dans la suite. Au cours des applications, une pastille particulière de l'empilement est décrite, ce qui conduit à introduire deux plans particuliers de cote axiale constante (figure I.10) :

- le plan médian-pastille, qui divise la pastille considérée en deux parties égales ;

– le plan inter-pastilles, qui sépare la pastille considérée des pastilles avec lesquelles elle est en contact. [18]

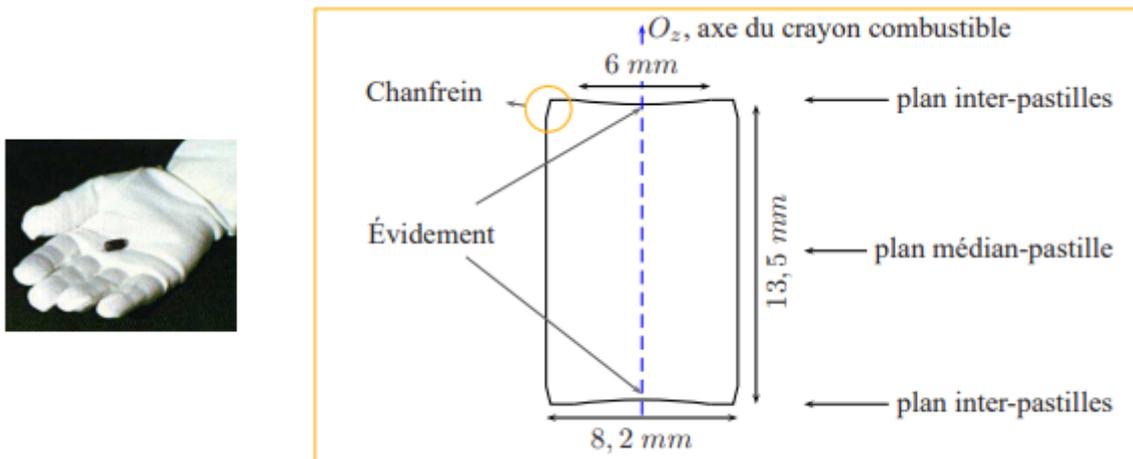


Figure I.10. Dimensions caractéristiques des pastilles combustibles utilisées dans les REP. [18]

I.7.6. Le combustible nucléaire :

Par analogie avec les autres centrales thermiques, et bien que la combustion n'y joue aucun rôle, on appelle combustible nucléaire le matériau fissile qui dégage la chaleur recherchée. Il faut donc qu'il contienne des noyaux fissiles d'uranium ou de plutonium. Ce matériau peut être élaboré sous plusieurs formes physico-chimiques, mais le combustible le plus utilisé est une céramique frittée à partir d'oxydes en poudre et formée en pastille cylindrique (Figure I.11).

Le combustible est contenu dans des assemblages combustibles (on dit aussi élément combustible) dont la fonction est double :

- Transférer efficacement la chaleur dégagée par les réactions nucléaires au fluide caloporteur (gaz ou liquide) qui transmettra celle-ci à l'installation de production d'électricité et maintiendra le combustible à la température souhaitée, et
- Maintenir confinés les divers éléments radioactifs produits dans le combustible.

La conception d'un assemblage est spécifique d'un modèle donné de réacteur, ce qui peut conduire à des formes et des dimensions très variées.

Un assemblage REP typique est constitué d'un faisceau de tubes métalliques étanches dans lesquels sont empilées des pastilles de combustible. On appelle ces tubes crayons ou, parfois, aiguilles, et leur enveloppe métallique est la gaine.

Très généralement, l'ensemble du combustible d'un réacteur est contenu dans plusieurs assemblages, qui constituent le cœur du réacteur. Le nombre d'assemblages d'un cœur varie beaucoup en fonction du type de réacteur considéré et, bien sûr, de sa puissance. [10]



Figure I.11 : Des pastilles d'uranium - Source : Le Nucléaire TPE. [10].

I.8. Propriétés d'exigence et types des matériaux :

I.8.1. Propriétés d'exigence :

Les conditions spécifiques imputables aux rayonnements régnant dans les réacteurs nucléaires imposent d'avoir recours à des matériaux présentant des propriétés particulières qui peuvent être classés en deux grandes catégories : Les matériaux de gainage et de structure d'une part, et les matériaux combustibles d'autre part.

Parmi les caractéristiques propres aux matériaux métalliques, utilisés en production d'énergie nucléaire, se trouvent les points suivants :

- Faible section efficace de capture et d'activation des divers éléments d'alliage ;
- Excellente tenue à la corrosion et hydruration faible et bien contrôlée ;
- Forte ductilité et bonne résistance au fluage et à la fatigue ;
- Propriétés thermo-physiques convenables (conductivité thermique) ;
- Compatibilité chimique entre matériaux (combustible/gaine, gaine/réfrigérant).

Concernant les tubes de gainage, ses principales fonctions sont de divers ordres :

- Assurer le maintien de la colonne combustible ;

- Isoler le combustible du fluide caloporteur pour le protéger de son action corrosive ;
- Évacuer l'énergie ;
- Assurer le confinement des produits de fission.

La qualité des matériaux utilisés et leur fabrication contribuent à assurer ces fonctions. Leur respect assure que ces mêmes fonctions sont bien remplies. Ces critères concernent notamment le tube de gainage, lui imposant, entre autres :

- Une épaisseur maximale de la couche de zircone et une teneur maximale en hydrogène absorbé ;
- Des déformations et des contraintes maximales en fonctionnement normal ;
- Une contrainte maximale en cas de transitoire de classe 2 (interaction pastille gainage) ;
- Une pression interne maximale dans les crayons de combustible ;
- Des jeux minimaux entre les crayons et les embouts ;
- Un nombre de cycles de puissance maximal pour éviter la fatigue. [20]

I.8.2. Types des matériaux :

I.8.2.1 Les alliages de Zr comme matériaux de gainage :

Tout au long du développement des alliages de Zr destinés aux matériaux de gainage, de nombreux éléments d'addition furent introduits pour améliorer les performances de ces nuances.

La première série d'alliages de Zr utilisés pour le gainage fut celle des Zircaloy, notamment avec le Zircaloy-2 (Zy-2) et le Zircaloy-4 (Zy-4), où le zirconium était allié à l'étain (Sn) majoritairement, au fer (Fe) et au chrome (Cr) ainsi qu'au nickel (Ni) dans le cas du Zy-2. L'étain, présent après addition en solution solide dans la matrice de Zr ainsi que sous forme de précipités intermétalliques de types Zr_4Sn et Zr_3Sn , avait pour but premier d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage d'une part, et de réduire l'effet néfaste de l'azote sur la corrosion d'autre part. Ces gains de propriétés furent cependant acquis au détriment de la tenue générale à la corrosion. Le fer et le chrome, additionnés en faibles quantités, étaient quant à eux, présents sous forme de précipités intermétalliques de taille nanométrique (150 nm environ). On retrouve notamment des précipités de type $Zr(Fe, Cr)_2$ (phase de Laves) ou plus rarement Zr_3Fe . Ces inclusions nanométriques, réparties de manière homogène (intra- et inter-granulaires), améliorent la résistance à la corrosion de l'alliage.

Le nickel, présent dans le Zy-2, était également destiné à améliorer la tenue à la corrosion de l'alliage. Il favorisait, cependant, la prise d'hydrogène par le métal, élément connu comme étant très fragilisant vis-à-vis des matériaux métalliques. L'adjonction de Ni fut de ce fait abandonnée lors du développement du Zy-4 pour pallier cet effet indésirable. Enfin, une certaine quantité résiduelle d'oxygène (O) est introduite dans la matrice métallique (solution solide d'insertion), pour améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage.

Les alliages ayant progressivement remplacés le Zy-4 jusqu'à aujourd'hui restent des nuances base-Zr, mais cette fois-ci alliées à d'autres éléments comme le niobium (Nb) pour le M5 ou encore le Sn, le Fe et le Nb pour le ZIRLO. Le Nb se trouve alors sous forme de solution solide dans la matrice de Zr, ainsi que sous forme de précipités β -Nb de quelques dizaines de nanomètres, ou au sein d'inclusions de types $Zr(Nb, Fe)_2$ et $(Zr, Nb)_4Fe_2$. Ces alliages relativement récents, ont la particularité de présenter de meilleures résistances à la corrosion aqueuse et à l'hydruration par rapport à leurs prédécesseurs. [21].

I.8.3. Caractéristiques de zirconium :

Les caractéristiques physiques, thermiques, mécaniques et chimiques sont données dans les tableaux ci-dessous :

I.8.3.1 Caractéristiques physiques :

Le tableau ci-dessous regroupe les principales caractéristiques physiques du zirconium.

Tableau II.1 : caractéristiques physiques du Zr [22].

Numéro atomique	40
Masse atomique	91,2
Densité à 20 °C	6.5g/cm ³
Point de fusion	1588°C
Maille cristalline à 20°C	α structure HC
Température de transformation allotropique	865 °C structure β CC
Résistivité électrique à 20°C	44 $\mu\Omega$. Cm
Section de capture des neutrons	0.182 barns

Son rayon de capture des neutrons (aptitude à absorber les neutrons) très faible fait du zirconium un matériau idéal pour des applications dans l'industrie nucléaire où la transparence du matériau vis à vis de ces particules est prépondérante. On l'utilise

notamment dans les éléments constitutifs du cœur des réacteurs : gaines pour pastilles de combustible, tube de circulation de l'eau bouillante [22].

I.8.3.2 Caractéristiques chimiques :

Le tableau ci-dessous regroupe les principales caractéristiques chimiques du zirconium.

Tableau II.2 : caractéristiques chimiques du Zr [22].

Enthalpie de formation	
Des oxydes	1091 kJ/mol
Des nitrures	-343 kJ/mol
Des chlorures	-961 kJ/mol
Des carbures	-184 kJ/mol
Des hydrures	-125 kJ/mol
Potentiels par rapport à l'électrode à hydrogène	
(Zr ⁴⁺ /Zr)	1,45V
(ZrO ₂ /Zr)	-1,55V
Electronégativité	1,33

Les enthalpies de formation des oxydes et des sels de zirconium ainsi que le potentiel redox sont très élevés, il s'agit donc d'un métal très réactif. Néanmoins, au contact de l'air, de l'eau ou tout milieu contenant une faible quantité d'oxygène, le zirconium s'oxyde en zircone ZrO₂.

Cette couche protectrice résiste à de nombreux agents chimiques dans une large gamme de pH. L'oxyde à la fois très adhérent et imperméable confère au zirconium et à ses alliages une excellente tenue à la corrosion jusqu'à 350°C.

On peut donc dire qu'il se comporte comme un métal "inoxydable" vis à vis d'une grande variété de produits chimiques. Le zirconium résiste très bien à la plupart des acides, des bases, des sels et milieux organiques ainsi qu'aux différentes formes de corrosion. L'attaque du métal n'aura lieu qu'en cas de dégradation localisée du film ou de dissolution de ce dernier dans le milieu

Pour le zirconium, la corrosion sous contrainte entraîne une dissolution anodique à la pointe de la fissure fortement déformée plastiquement. Le métal reste néanmoins peu sensible à ce type de détérioration.

Le zirconium résiste également très bien à la corrosion cavernueuse en raison de sa résistance aux milieux acides réducteurs qui peuvent se former dans les environnements confinés.

Le fretting corrosion est la conséquence du frottement sur une pièce antagoniste sous de petits débattements. Dans ce type de sollicitations, le zirconium se comporte sensiblement moins bien que les aciers inoxydables. Ceci est lié à la sensibilité du métal vis à vis des rayures qui endommagent la couche d'oxyde protectrice. [22].

I.8.3.3. Caractéristiques mécaniques :

Le tableau ci-dessous regroupe les principales caractéristiques mécaniques du zirconium

Tableau II.3: caractéristiques mécaniques du Zr [22]

Module d'élasticité à 20°C	98GPa
Module de compressibilité	90GPa
Module de cisaillement à 20°C	37GPa
Coefficient de poisson à 20°C	0.35
Résistance à la traction	360MPa
Allongement	15 à 35%

Les alliages de zirconium ont un comportement élasto-viscoplastique anisotrope. Plus précisément, la contrainte d'écoulement évolue avec la déformation plastique (écrouissage), la vitesse de déformation (sensibilité de la contrainte à la vitesse de déformation) et la direction de sollicitation (anisotropie). Ces propriétés dépendent notamment de la température, l'irradiation, la teneur en hydrogène, l'état métallurgique et la composition chimique du matériau. Cette partie dresse une synthèse bibliographique des principales propriétés abordées durant notre étude ; les propriétés telles que la croissance sous irradiation, le fluage d'irradiation ou la restauration par exemple ne sont pas traitées. [22].

I.8.3.4 Caractéristiques thermiques :

Le tableau II.4 regroupe les principales caractéristiques thermiques du zirconium

Tableau II.4: caractéristiques thermiques du Zr [22]

Conductivité thermique	22.1W/m/K
Coefficient de dilatation linéique	$5.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Chaleur latente d'évaporation	6360 J/g
Chaleur latente de fusion	211 J/g
Capacité thermique	267 J/Kg/°C

Parmi ces caractéristiques thermiques, on peut noter un coefficient de dilatation linéaire faible qui limite la distorsion des ensembles notamment lors du soudage. La conductivité thermique particulièrement basse permet également d'avoir une bonne soudabilité opératoire. Retenons également que le zirconium ne présente pas de transition ductile/fragile à basse température [22].

I.9. Les alliages de Zirconium :**I.9.1. Généralités :**

Les alliages de zirconium sont utilisés dans l'industrie nucléaire depuis de nombreuses années, du fait de leur faible section de capture neutronique et de leurs propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion. Elaboration de produits en alliages de zirconium nécessite l'utilisation de procédés de métallurgie extractive, de fusion et de mise en forme à chaud. Chacune des étapes de déformation à chaud a pour objectif de converger vers la géométrie finale des produits en assurant l'absence de défauts.

Elles doivent aussi fournir aux produits une microstructure capable de résister aux sollicitations auxquelles le combustible est soumis tout au long de sa vie dans le réacteur. Par conséquent, et afin de répondre aux exigences de sûreté élevées du domaine nucléaire, il est nécessaire de connaître et maîtriser les évolutions de microstructure.

Dans cet objectif, ce projet de thèse propose un travail de caractérisation et de modélisation de l'influence de la microstructure initiale sur la recristallisation d'alliages de zirconium. Pour ce faire, la microstructure d'échantillons en Zircaloy-4 présentant différents états

métal de transition, il possède une conductivité thermique particulièrement basse et des propriétés mécaniques qui dépendent de son état métallurgique, c'est-à-dire du traitement thermomécanique qu'il a subi [26].

I.9.3. Classification des alliages de zirconium :

Les alliages de zirconium, peu nombreux, sont faiblement alliés pour satisfaire au compromis entre une bonne tenue à la corrosion et une faible absorption neutronique. Parmi eux, les zircalloys représentent environ 90 % des matériaux produits industriellement. Les principaux alliages sont :

- Le zircalloy 2 qui contient 1,2 à 1,7 % d'étain, 0,07 à 0,20 % de fer, 0,05 à 0,15 % de chrome, 0,03 à 0,08 % de nickel. Cet alliage est utilisé dans les réacteurs à eau bouillante.
- Le zircalloy 4 qui contient 1,2 à 1,7 % d'étain, 0,18 à 0,24 % de fer, 0,07 à 0,13 % de chrome. Cet alliage est utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée.
- Le zirconium à 25 % de niobium, utilisé pour les tubes de force des réacteurs CANDU. Le zirconium à 1 % de niobium, utilisé dans les réacteurs occidentaux à eau pressurisée.
- Le zirconium de qualité courante pour les applications non nucléaires, c'est-à-dire essentiellement pour l'usage en génie chimique, appelé couramment zirconium 702.

Les alliages pour usage nucléaire contiennent moins de 100 ppm d'hafnium, voire moins de 50 ppm. En revanche pour les usages non nucléaires, l'hafnium est toléré jusqu'à 4,5 %. L'oxygène est en général considéré comme un élément d'alliage et sa teneur est souvent contrôlée pour se situer dans un intervalle entre 900 et 1600 ppm [27].

I.10. L'utilisation industrielle du zirconium :

I.10.1. Application dans le domaine nucléaire :

Le zirconium et l'hafnium possèdent plusieurs qualités qui en font les matériaux de choix pour les installations nucléaires : résistance mécanique, résistance à la corrosion, Absorption ou non des neutrons. L'émergence de l'utilisation du zirconium dans le domaine nucléaire date des années 1950. En effet, en 1946, les Etats-Unis décident de développer un sous-marin à propulsion nucléaire. En 1947, le zirconium est choisi comme matériau de

gainage ce qui suppose la création de toute une industrie. Et en janvier 1955, le premier sous-marin à propulsion nucléaire voyait le jour, le USS Nautilus [28,29].

Le zirconium et l'hafnium sont très réactifs à l'air et en milieux aqueux. Il se forme immédiatement à leur surface un film d'oxyde qui les rend très résistants en milieux agressifs (acides, bases) [30,31] Ils sont de plus très stables sous irradiation [28]

La qualité essentielle du zirconium pour son utilisation dans l'industrie nucléaire est sa très faible capacité à absorber les neutrons du combustible nucléaire. Il y a donc peu de perte d'efficacité celui-ci. En effet, pour ne pas être gênant pour le combustible nucléaire, la section efficace d'absorption neutronique d'un métal ne doit pas dépasser 1,6 barns. Or celle du zirconium n'est que de 0,18 barns. Cette propriété ne se retrouve pas chez l'hafnium.

Dans le cadre des réacteurs à eau pressurisée, le combustible UO_2 , sous forme de pastille, est confiné dans un tube de zircalloy, appelé gaine, ayant une épaisseur d'environ 0,7 mm, de diamètre de 9 mm et une longueur de 3 à 4 m. Dans le réacteur, les crayons subissent une forte irradiation neutronique lors de la fission de l'uranium. La face externe de la gaine est en contact avec le fluide caloporteur qui est de l'eau pressurisée à 200 bars et à une température de 350°C.

Dans ces conditions d'utilisation, la structure et la composition chimique de la gaine changent, de part l'oxydation et l'hydruration de l'alliage du zirconium. Le zircalloy hydrure est entouré de deux couches d'oxyde dont l'une est formée à l'interface eau/gaine et l'autre à l'interface combustible/gaine. L'eau oxyde la gaine sur une épaisseur de plusieurs microns. Au cours de l'oxydation, il se forme de l'hydrogène qui est adsorbé en surface. Sa diffusion est importante dans le zircalloy, il est ainsi réparti dans toute la masse. Les modifications à l'interface combustible/gaine sont liées en particuliers à deux phénomènes importants.

Des gaz sont produits lors de la fission et de la désintégration alpha. La formation de bulles dans le combustible augmente le volume des pastilles. La pression interne de la gaine augmente. Le contact entre le combustible et la gaine est ainsi renforcé au cours de la fission. L'augmentation des contraintes peut permettre alors la diffusion de l'oxygène du combustible dans la gaine. Les produits de fission s'implantent dans le zircalloy sur une profondeur de l'ordre de 10 μm . Lors de cette dissolution un certain nombre de produits de fission peuvent se fixer dans le zirconium oxydé. [32]

I.11. Comportement du matériau de tube de gainage D'un REP :

Le zirconium pur possède deux structures cristallographiques :

Au-dessous de 865 °C, la structure alpha, hexagonale compacte, est thermodynamiquement stable. Au-dessus de cette température, c'est la structure bêta, cubique centrée, qui l'est.

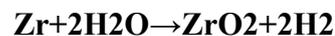
Dans la phase bêta, tous les additifs d'alliages sont solubles, alors que les métaux de transition (Fe, Cr, Ni) sont pratiquement insolubles dans la phase alpha et forment des précipités intermétalliques dont la distribution de taille influe sur la résistance à la corrosion de l'alliage.

L'addition d'étain améliore la résistance mécanique, en particulier la résistance au fluage, mais il détériore la tenue à la corrosion généralisée, l'oxygène durcit l'alliages, le niobium et les métaux de transition apportent une amélioration de la résistance à la corrosion.

I.11.1. La résistance à la corrosion :

Un autre élément important est la résistance à la corrosion de la gaine. Température, état métallurgique, irradiation, chimie de l'eau : de nombreux facteurs influencent la cinétique de corrosion du Zircaloy.

L'agresseur est ici l'eau du circuit primaire, à une température de l'ordre de 300°C. Celle-ci oxyde le zirconium selon la réaction :



Qui conduit à la formation d'un oxyde solide à la surface du métal. Une partie de l'hydrogène ainsi formé s'incorpore dans la matrice métallique, migre sous gradient thermique pour s'accumuler dans les zones les moins chaudes et y forme des hydrures susceptibles de fragiliser la gaine lors du refroidissement du combustible. Les deux phénomènes, oxydation et hydruration, sont donc intimement liés [33].

I.11.2. Comportement mécanique :

La gaine est sous contrainte sous les effets conjugués de la pression extérieure du circuit primaire (environ 15 MPa dans un REP), du gonflement de la pastille, des dilatations différentielles pastille-gaine lors des variations de puissance et du relâchement des gaz de fission. [34]

I.12. Evolution physico-chimique de la gaine :

Les matériaux de gainage des réacteurs nucléaires sont des alliages à base de zirconium pur, débarrassé de tout hafnium et contenant des éléments d'addition pour prévenir de la corrosion et assurer de bonnes propriétés mécaniques.

Cet alliage s'appelle le Zircaloy-4, et les éléments d'addition sont les suivants :

Sn (1,2-1,7 %), Fe (0,18-0,24 %), Cr (0,07-0,14 %) et O (0,1-0,14 %).

Les fonctions de la gaine sont multiples :

- Eviter la contamination du fluide caloporteur par les produits de fission. Le concept de « réacteur propre » retenu en général impose d'éviter la dispersion de ces éléments. La gaine constitue la première barrière de confinement des matières radioactives.
- Confiner à l'intérieur d'une couche étanche le combustible pour le protéger du fluide caloporteur contre son action corrosive.
- Assurer le transfert de l'énergie thermique produite par fission vers le fluide caloporteur.

Le zirconium et ses alliages ont été choisis comme matériau de gainage pour leur conjonction de propriétés particulières :

- Une très faible section efficace de capture des neutrons thermiques ($\sigma = 0,18$ barns à condition de bien séparer du zirconium l'hafnium qui a une forte section efficace de capture neutronique).
- Une bonne résistance à la corrosion dans l'eau à haute température.
- Une résistance mécanique suffisante aux températures de fonctionnement du réacteur.
- Une résistance suffisante aux effets de l'irradiation (fragilisation, gonflement...).
- Une bonne conductivité thermique.

Dans le réacteur, le matériau de gainage subit de nombreuses modifications Physico-chimiques. Le crayon combustible est en contact direct avec le fluide caloporteur. Dans ces conditions, la face externe de la gaine s'oxyde. Lors de ce processus d'oxydation, la radiolyse de l'eau libère de l'hydrogène dont une partie est incorporée dans la gaine. La face interne de la gaine subit elle-aussi une oxydation due au combustible nucléaire et une contamination en éléments radioactifs. La figure I.13 représente une coupe schématique d'un crayon dans le réacteur.

Les principales modifications physicochimiques de la gaine en réacteur sont donc l'oxydation, l'hydruration et la contamination en éléments radioactifs et l'apparition de défauts d'irradiation. Les caractéristiques du matériau de gainage utilisé dans les REP ainsi que les principales modifications de la gaine lors du fonctionnement en réacteur vont maintenant être décrites [35].

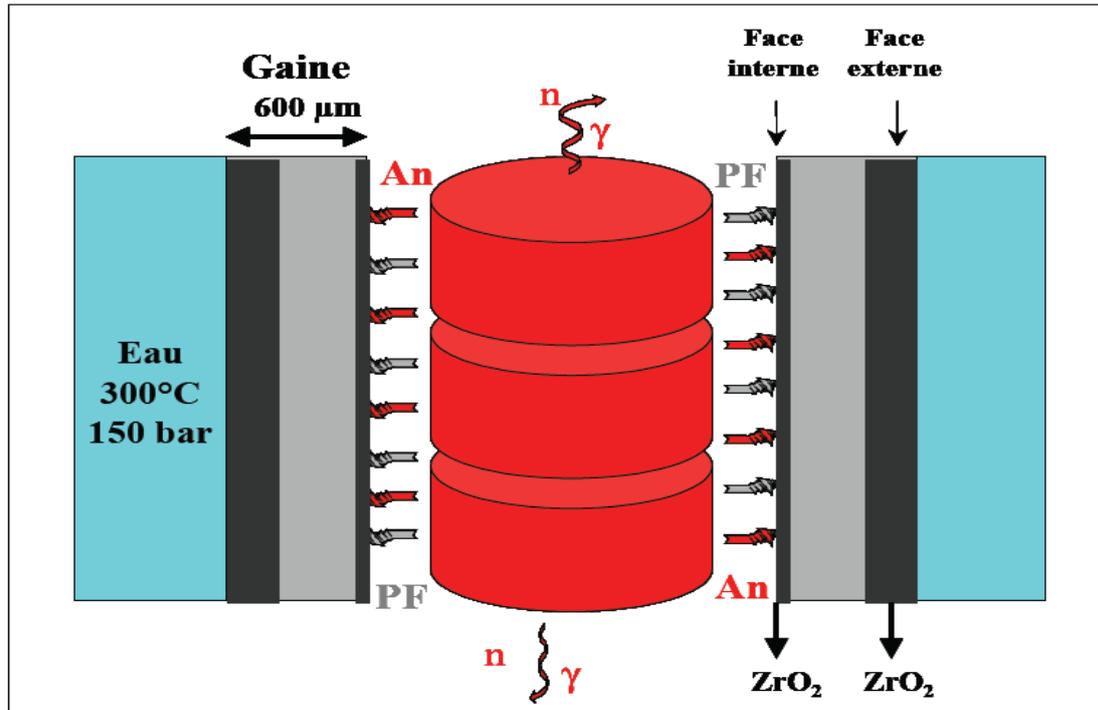
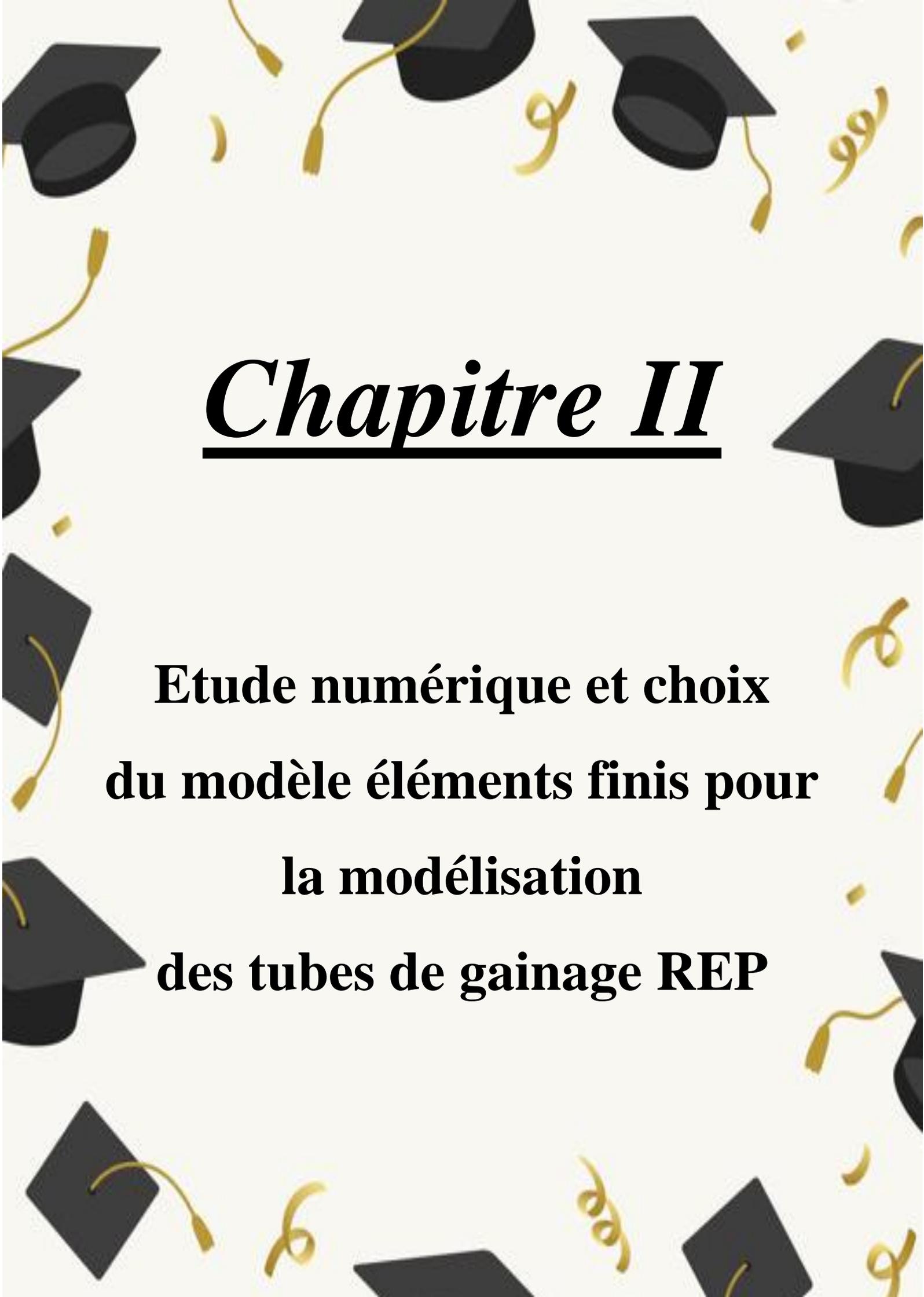


Figure I.13 : Coupe schématique d'un crayon combustible dans le réacteur. PF et AN représentent respectivement l'implantation des produits de fission et des actinides [36].

I.13. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'étude est portée sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires ainsi que les matériaux constituent l'ensemble d'organes essentielles dans ce type de machines thermique. Le matériau d'étude est choisi en fonction des superpositions de plusieurs contraintes à savoir la température, la pression est la radioactivité générée par la réaction de fission.

L'irradiation accélère ou amplifie en effet des phénomènes comme le fluage (fluage d'irradiation) ou en crée d'autres comme le gonflement ou la croissance, qui désigne une déformation anisotrope obtenue sous flux de neutrons en l'absence de toute autre sollicitation. Les matériaux de structure sont notamment soumis au phénomène d'activation par bombardement par les neutrons ou d'autres particules (photons, électrons). Ceux qui entre dans la structure des combustibles (les assemblages, les gaines ou autres plaques) sont en outre soumis à d'autres contraintes.



Chapitre II

**Etude numérique et choix
du modèle éléments finis pour
la modélisation
des tubes de gainage REP**

Chapitre II

Etude numérique et choix du modèle éléments finis pour la modélisation des tubes de gainage REP

II.1. Introduction :

La modélisation numérique est devenue incontournable dans le monde de la conception industrielle et de la recherche scientifique. Les problèmes à résoudre étant de plus en plus complexes, il est nécessaire d'adopter une approche adaptée au problème traité. En effet, la méthode des éléments finis (MEF) est une technique d'analyse numérique permettant d'obtenir des solutions approximatives à une large variété des sciences de l'ingénieur [37]. Le principe de base de la MEF consiste à remplacer le domaine réel par un ensemble d'éléments discrets, qui peuvent être réunis de plusieurs manières, et donc les employer pour représenter les formes les plus complexes.

Dans ce chapitre nous avons abordé les principales étapes de la MEF ainsi que le logiciel d'étude (CAST3M) utilisé pour identifier le comportement thermomécanique de la structure de la gaine.

II.2. Principe de base de MEF :

La méthode des éléments finis est devenue un outil puissant pour la simulation numérique d'un grand nombre de problèmes d'ingénierie. Ses applications vont de l'analyse des déformations et des contraintes dans les structures mécaniques telles que les ponts, les immeubles, les avions ; aux problèmes de conduction thermique, d'écoulement des fluides, de flux gazeux ou magnétiques etc. Son principe consiste à discrétiser une région continue complexe en éléments géométriques simples, appelés éléments finis. Les propriétés physiques sont interpolées sur chaque élément en fonction de leurs valeurs en certains points donnés. Puis, un processus d'assemblage prenant en compte les interactions entre éléments voisins mène à la construction d'un ensemble d'équations. La résolution de ce système d'équations, en tenant compte des conditions imposées aux limites du système, permet d'obtenir une approximation de la solution sur du domaine. [38]

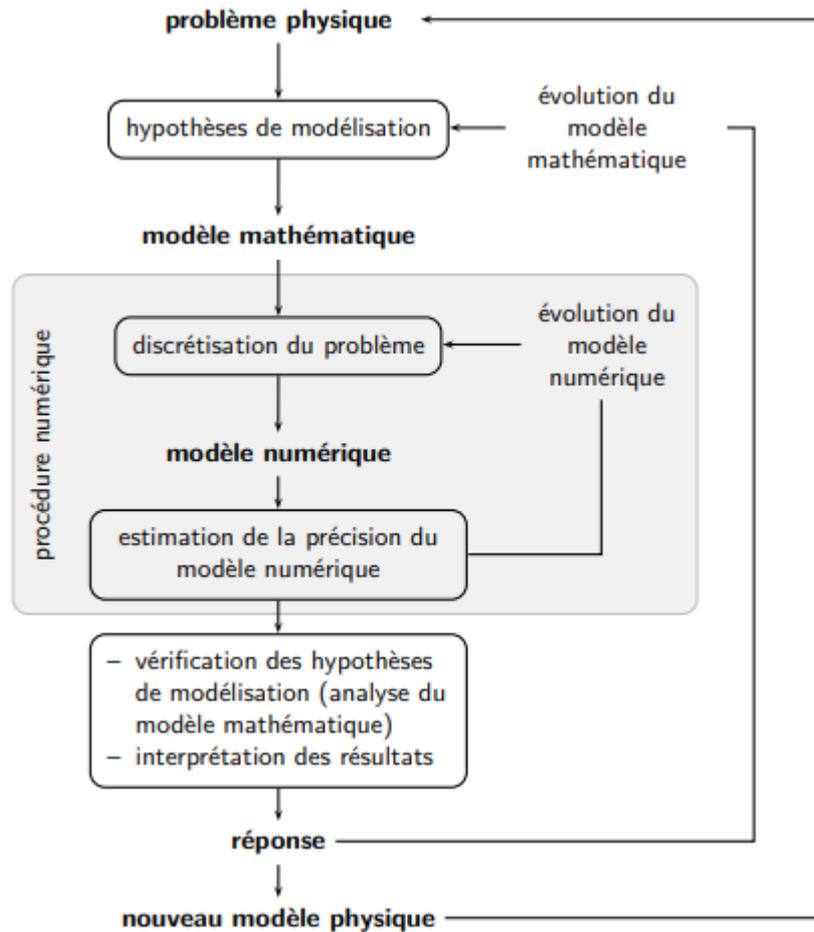


Figure II.1 : Processus d'analyse utilisant un modèle numérique. [39]

II.2.1. Démarche éléments finis :

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes [39] :

- ✓ Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- ✓ Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- ✓ Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- ✓ Assemblage des matrices élémentaires ;
- ✓ Prise en compte des conditions aux limites ;
- ✓ Résolution du système d'équations.

II.2.3. Principe de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis à dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments.

Etape 1 : Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites :

La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour. L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale. La formulation faible est souvent utilisée pour inclure les conditions aux limites.

Etape 2 : Division du domaine en sous domaines :

Cette étape consiste à discrétiser le domaine en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds. Elle constitue ainsi la phase de préparation des données géométriques.

Etape 3 : Approximation sur un élément :

Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, la température, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autres. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

Etape 4 : Assemblage et application des conditions aux limites :

Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité, ...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

Etape 5 : Résolution du système global :

Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il peut définir soit un problème d'équilibre, de valeurs critiques ou de propagation. Le problème d'équilibre concerne les cas

statiques et les cas stationnaires. Dans un problème de valeurs critiques, on s'intéresse aux fréquences et aux modes propres de vibrations du système physique étudié. Les problèmes de propagations, concernent les cas transitoires dans lesquels sont déterminées les variations dans le temps des variables physiques. Les méthodes d'intégration pas à pas conviennent mieux pour ce type de problème. Les plus utilisées sont : méthode des différences finies centrales, méthode de Newmark, méthode de Wilson. A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus fréquente est la méthode de Newton Raphson. [40]

II.2.4. Choix du type d'élément et discrétisation :

La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné, ensuite on discrétise le milieu continu en un certain nombre d'éléments. En général, les points suivants sont à prendre en considération dans la sélection du type d'élément.

II.2.4.1. Type d'élément :

- La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement ils sont groupés en quatre classes :
 - Les contraintes planes ; les déformations planes ; axisymétriques (problème à deux dimensions).
 - La flexion des plaques.
 - Les coques.
 - L'analyse des solides tridimensionnels.
- On distingue plusieurs classes d'éléments finis suivant leur géométrie :
 - Les éléments unidimensionnels (1D) : sont utilisés de façon individuelle ou associée des plaques pour modéliser les raidisseurs.

Exemple : barre, poutre rectiligne ou courbe.

- Les éléments bidimensionnels (2D) : Élasticité plane : (déformation ou contrainte plane).

Exemple : plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire.

- Les éléments tridimensionnels (3D) : élément de volume, ou coques épaisses. Les éléments axisymétriques : qui constituent une classe bien particulière.
- Dans chaque groupe des différents niveaux de précision peuvent être atteints. Ceci dépend du nombre de degrés de liberté associée avec le type d'élément. Les points nodaux se trouvent généralement sur les frontières des éléments bien que des nœuds internes peuvent aussi être inclus dans certains éléments pour augmenter leur efficacité.

Généralement, avec l'augmentation de l'ordre de l'élément, celui-ci devient plus précis et plus coûteux.

Cependant certaines conditions doivent être satisfaites dans la sélection du type d'élément pour assurer une bonne convergence (Convergence vers la solution exacte). Ces conditions sont :

- Le champ des déplacements à l'intérieur de l'élément doit être continu.
- Le modèle du déplacement doit inclure un état de déformation constante (L'élément doit être capable de reproduire un champ de déformation constant, si les déplacements nodaux le requièrent).
- L'élément doit être capable de reproduire un mouvement de corps rigide : par exemple quand les degrés de liberté nodaux correspondent à un mouvement de corps rigide, l'élément doit avoir une déformation égale à zéro et des forces nodales nulles. Ceci est un cas particulier du critère de la déformation constante.
- L'élément doit être compatible, il ne doit pas y avoir de vide entre deux éléments.

L'élément qui ne remplit pas cette condition est dit incompatible ou non conforme. Cependant un élément incompatible peut être valide et sa convergence maintenue si les incompatibilités disparaissent en augmentant le maillage et si l'élément se rapproche d'un état de déformation constante.

- L'élément n'a pas une direction privilégiée, c'est-à-dire que l'élément doit être

Géométriquement invariant et donne les mêmes résultats pour n'importe quelle orientation de l'élément. [41]

II.2.5. Formes classique des éléments :

Il existe plusieurs formes d'éléments classiques correspondant à des domaines à une, deux ou trois dimensions. Chaque type d'élément est identifié par un nom précisant sa forme et par le nombre de nœuds géométrique qui le composent.

- Eléments à une dimension



Linéaire (2)



Quadratique (3)



Cubique (4)

- Eléments à deux dimensions triangulaires



Linéaire (3)



Quadratique (6)



Cubique (9)

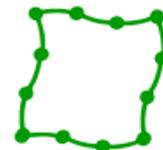
- Eléments à deux dimensions quadrangulaires



Linéaire (4)



Quadratique (8)



Cubique (12)

- Eléments à trois dimensions tétraédriques



Linéaire (4)



Quadratique (10)



Cubique (16)

- Eléments à trois dimensions hexaédriques (briques)

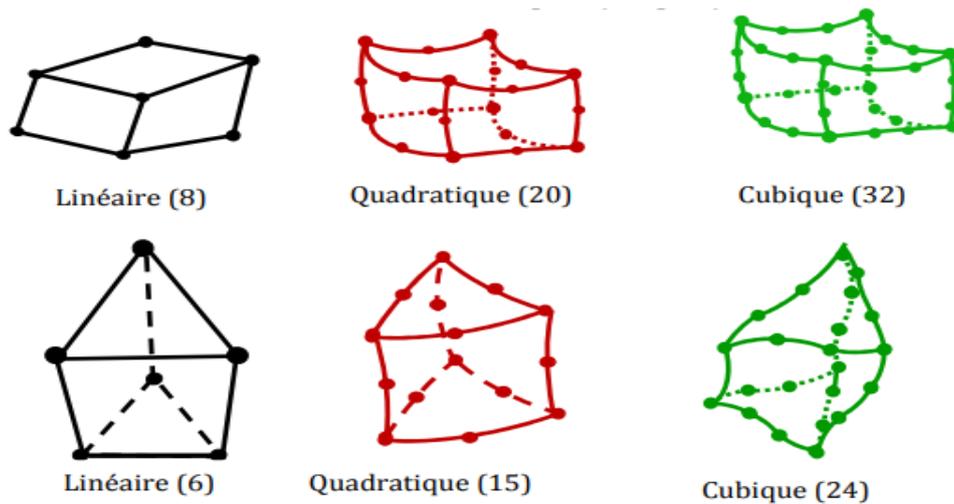


Figure III.2 : Formes classique des éléments. [40]

II.2.6. Utilisation d'un logiciel éléments finis :

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CAST3M, CESAR, SAMCEF, etc. Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyse linéaire ou non d'un système physique continu ;
- Analyse statique ou dynamique ;
- Prise en compte de lois de comportement complexes ;
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) pouvant être couplés ;
- Problèmes d'optimisation, etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale [42]

II.3. Présentation générale de Cast3M :

Cast3M est avant tout un outil pour faire des calculs. Il intègre tous les processus utilisés par le passé et doit pouvoir accueillir tous ceux dont on aura besoin dans l'avenir pour traiter de nouveaux problèmes. Il permet à l'utilisateur d'adapter ses calculs selon Les problèmes qu'il doit résoudre. Il donne à l'utilisateur la connaissance du problème posé et des méthodes employées. Ceci a été rendu possible par l'application :

- d'un principe : La simplicité,
- l'observation de quatre règles : L'orthogonalité, La visibilité, La régularité et la documentation,
- la poursuite d'un objectif : La qualité.

➤ **La simplicité** : Il s'agit d'un principe de bon sens, mais dont l'application n'est pas si aisée. C'est le fondement de la démarche scientifique : il est facile de faire des choses compliquées à partir de choses simples. Par ailleurs, simple ne signifie pas simpliste.

- **L'orthogonalité des processus** : Cette règle est basée sur deux idées :
- Les processus sont indépendants entre eux : on peut changer ou modifier un processus sans toucher aux autres.
 - Tous les processus peuvent se combiner, c'est ce qui fait la puissance du code.

Il en résulte que l'on peut tester le fonctionnement des processus de manière indépendante.

➤ **La visibilité et la localité des processus** : La visibilité vise à supprimer l'existence de données cachées, en imposant que toutes les données soient indiquées au processus de manière visible, là où elles sont utilisées.

La localité permet principalement de détecter les erreurs de données à l'endroit où elles sont définies et non pas beaucoup plus loin dans le calcul, ce qui rendrait leur diagnostic malaisé. Cette double règle a un corollaire immédiat : l'information créée par le processus doit aussi être visible.

- **La régularité des processus** : Il s'agit d'une part de la régularité dans l'utilisation des processus et d'autre part de la régularité dans les possibilités d'un processus.

– Régularité dans l'utilisation des processus : il n'existe pas d'exception dans la syntaxe des données. Ceci permet d'avoir des syntaxes identiques pour des processus différents ayant besoin des mêmes données.

– Régularité dans les possibilités d'un processus : il n'existe pas d'exception dans les opérations possibles du processus.

- **La documentation des processus** : La documentation d'un processus fait partie du processus et elle doit être développée simultanément au processus. C'est elle qui permet à l'utilisateur de connaître la fonction du processus et son utilisation.

La règle est que c'est la documentation qui a raison et non pas la programmation du processus. [43]

II.3.1. Mise en œuvre :

Langage GIBIANE : Afin de convertir les noms des objets en entités informatiques utilisables par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage GIBIANE qui va permettre à l'utilisateur de communiquer directement avec le programme.

Les opérations avec GIBIANE consistent en une manipulation des objets existants dans le but de les modifier ou d'en créer de nouveaux.

Utilisation de procédures : Une des conséquences de l'architecture adoptée pour Cast3M est la possibilité de créer des procédures, c'est-à-dire des méta-processus constitués d'un ensemble de processus élémentaires. Ces procédures sont créées pour des besoins de nature diverse :

- certains enchaînement de données peuvent se retrouver de manière répétitive, les regrouper dans une seule instruction permet d'améliorer la lisibilité du programme,
- faciliter l'utilisation du programme pour des personnes peu familiarisées avec la méthode des éléments finis en revenant à un principe de boîte noire,
- pour des problèmes assez difficiles tels que des calculs non linéaires, il n'est pas raisonnable d'obliger l'utilisateur à définir explicitement un algorithme de résolution,

– à l’inverse, l’utilisateur peut vouloir créer de nouveaux opérateurs, modifier ou remplacer certains opérateurs selon ses besoins. Les procédures sont écrites en langage de données et ont les propriétés suivantes :

- elles sont utilisables comme des opérateurs élémentaires,
- une procédure peut en appeler une autre et peut s’appeler elle-même,
- on peut surcharger un opérateur ou une procédure existante par une procédure,
- la séquence d’opérateurs élémentaires contenus dans une procédure est entièrement visible. Grâce aux procédures, l’utilisateur peut programmer lui-même les processus nécessaires à la résolution de son problème. Il peut encore écrire et tester très rapidement de nouveaux algorithmes sans avoir besoin de modifier le logiciel.

À l’inverse, les procédures permettent de rendre transparents pour l’utilisateur des algorithmes et des méthodes relativement complexes, tels que les algorithmes de calcul en plasticité, en grands déplacements, contacts unilatéraux, etc.... [43]

II.4. Conclusion :

Dans les réacteurs à eau sous pression (REP), les alliages de zirconium sont largement utilisés comme tubes de gainage de combustible et autres composants internes du cœur. Ces alliages présentent des propriétés favorables telles qu'une résistance mécanique élevée, une bonne ductilité, une section transversale d'absorption des neutrons très faible et une bonne résistance à la corrosion. Pendant le fonctionnement du réacteur à eau sous pression, les tubes de gaine s'oxydent à la fois sur les côtés interne et externe, l'oxydation externe d'environ 100 μm épaisseur est due au contact avec l'eau de refroidissement. L'oxydation interne due au contact avec le combustible UO_2 est beaucoup plus mince (environ $10\mu\text{m}$).

Nous proposons dans ce travail une méthode par éléments finis pour la simulation du comportement de la barrière de confinement du combustible nucléaire dans une oxydation avec élévation de température. Nos études concernent l'une des dernières technologies opérationnelles adaptées. Ce projet décrit les systèmes actuellement utilisés et le problème de l'interaction entre les propriétés mécaniques et la réponse du matériau lors d'un essai mécanique.

The background of the slide is white and decorated with several dark grey graduation caps (mortarboards) and scattered yellow and gold confetti. The caps are positioned at various angles, some pointing towards the center and others towards the corners. The confetti consists of small, curved, ribbon-like shapes.

Chapitre III

**Modélisation du comportement du
matériau de gainage
du combustible
dans un réacteur REP
(Réacteur à eau pression)**

Chapitre III

Modélisation du comportement du matériau de gainage du combustible dans un réacteur REP (Réacteur à eau sous pression)

III.1. Introduction :

Ce dernier chapitre a pour but de mettre en regard l'ensemble des résultats, dans le cadre de l'étude du comportement élastique des matériaux hétérogènes soumis à des différentes sollicitations mécaniques, thermiques et radioactives. L'ensemble de ces résultats ont été récapitulées dans des tableaux et figures, puis interprétés.

III.2. Modèle proposé :

L'objectif de notre problème est de calculer l'état stabilisé d'un transfert de chaleur avec convection en deux dimensions, avec la combinaison d'une force mécanique de compression.

Les calculs attribués au modèle proposé comme illustré dans la figure III.1 est la combinaison d'un calcul thermique due à la variation de la température qui peuvent être à l'origine de contraintes thermiques dues au phénomène de fission du combustible nucléaire provoquant une dilatation de la structure, et aussi d'un calcul mécanique à l'intérieur de la tube de gainage due au forces de compression dans la circuit d'eau (cette force a pour but de ne pas avoir une vaporisation de l'eau lors de l'augmentation de la température). Il est donc parfois intéressant de mener un calcul thermomécanique, où les contraintes thermiques et mécaniques sont également prises en compte.

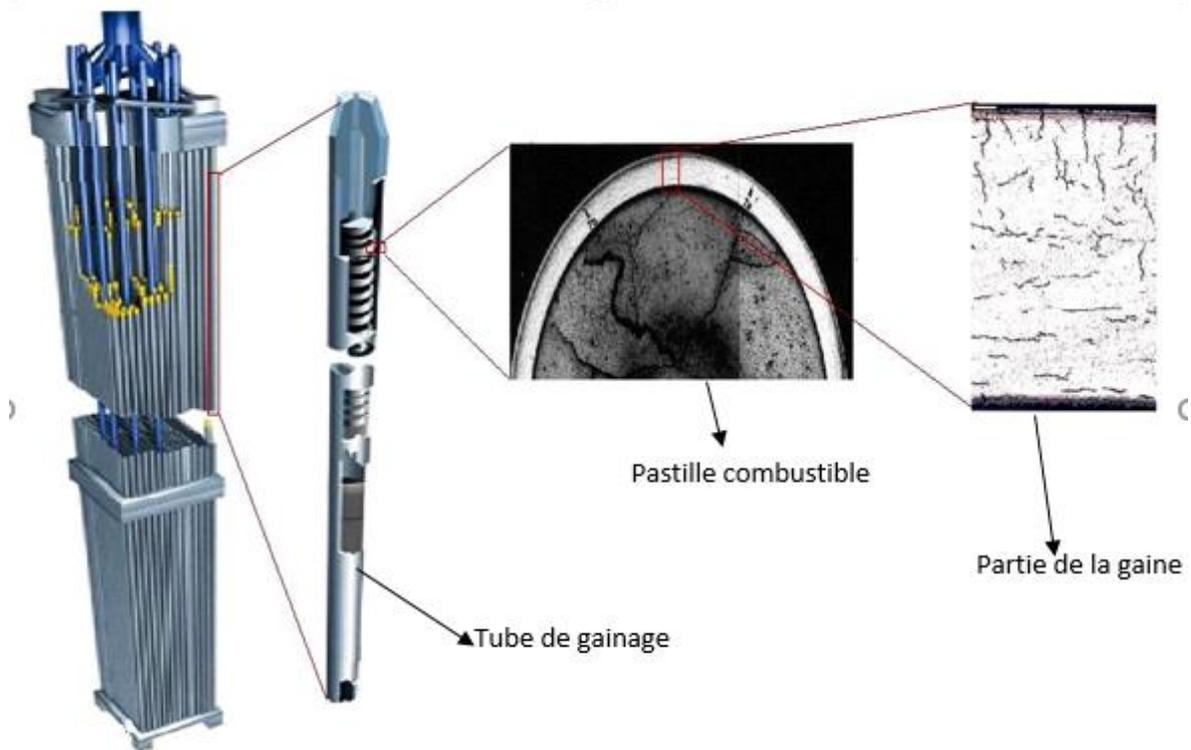


Figure III.1 Modèle réel étudié.

L'utilisation d'un logiciel de calcul en EF permet de chercher un modèle numérique tridimensionnelle (3D) correspond au modèle réel (figure III.2), avec toutes les dimensions attribuées (figure III.1).

Pour avoir une simplification dans les calculs des variables définissant le comportement thermomécanique (température, déplacements, contraintes, déformations) de la structure une étude en deux dimension (2D) a été établis (figure III.3).

Le déroulement des étapes de calcul de ce type de problème est le suivant :

- calcul thermique (variable de température) dues au phénomène de fission du combustible, pour obtenir la distribution de température dans la structure.
- calcul mécanique (déplacements, contraintes, déformations) due aux forces de compression avec prise en compte du chargement thermique que l'on calcule à partir des résultats du calcul thermique.

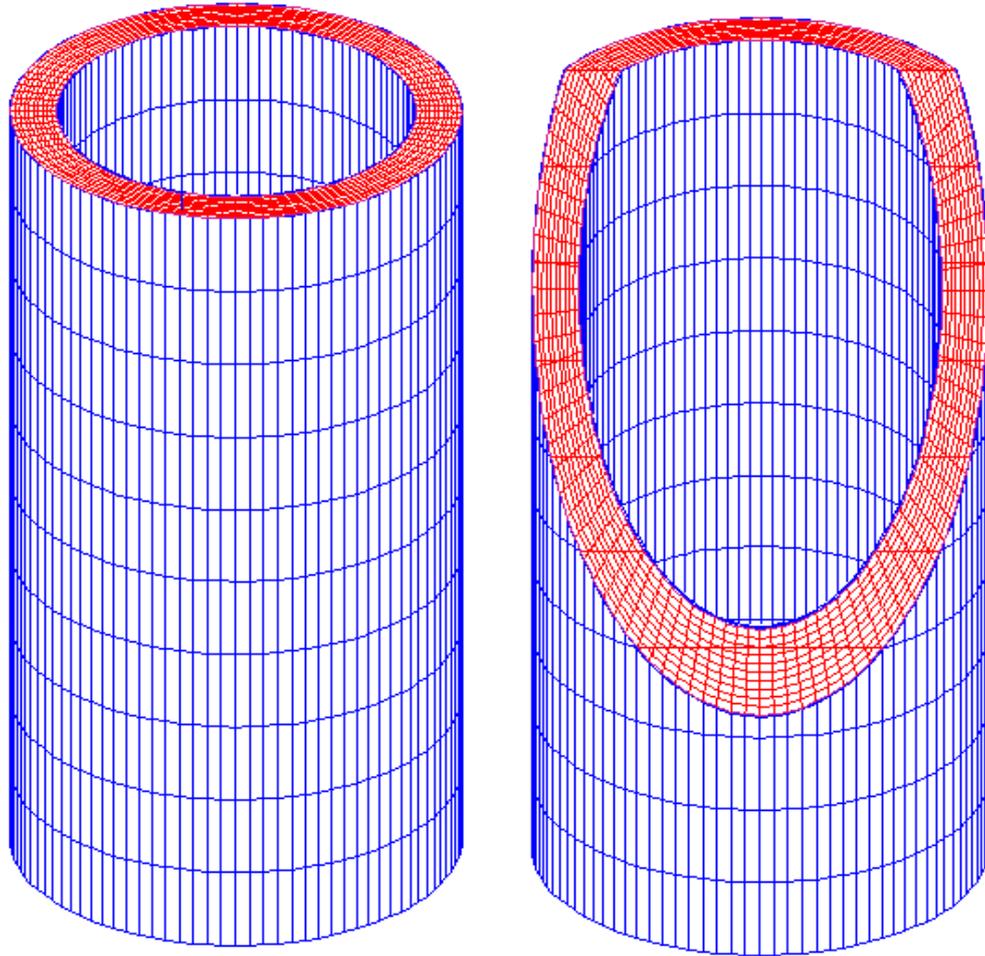


Figure III.2: Modèle proposé 3D et maillage de la structure.

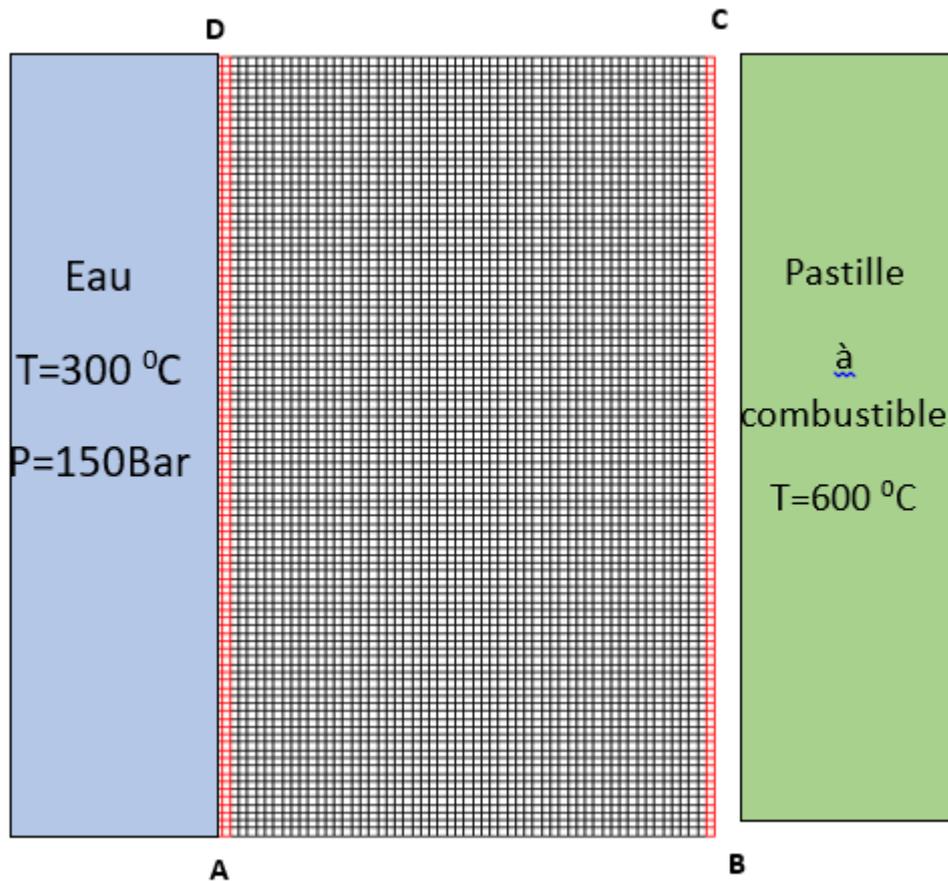


Figure III.3: Sollicitations imposées et maillage de la structure.

Le but de ce calcul est de calculer la carte de température sur l'ensemble de la structure ainsi que la distribution des contraintes mécanique due aux forces de pression. Nous intéressons aux calculs avec conditions suivantes :

Sur la ligne BC : température imposée à 600°C

Sur la ligne AD : convection avec température à l'infini de 300°C

Et on ajoute les conditions mécaniques suivantes :

La ligne AB et CD : nous avons un encastrement

La ligne DA : nous avons une pression imposée à 150 Bar

On cherche la déformée de la structure ainsi que la répartition des contraintes (les zones infectées par les sollicitations).

Les caractéristiques mécaniques et thermiques du matériau utilisé (Zircaloy 4) et leur oxyde sont donnés dans le tableau III.1

Tableau III.1 caractéristiques mécaniques et thermiques du matériau utilisé (Zircaloy 4) et leur oxyde

Caractéristique	Coef de poisson	Module de Young MPa	H W/(m² k⁻¹)	K W(m⁻¹k⁻¹)
Zr-4	0.3	98 000 MPa	3.0	27.5
ZrO₂	0.25	192 000 MPa	3.0	52.0

Avec :

H : Coefficient de convection du matériau

K : Conductivité thermique du matériau

III.3. Analyse des résultats :

III.3.1. Loi de comportement élastique :

Afin de pouvoir tester notre géométrie et voir si les chargements et les conditions aux limites imposées étaient correctes, nous avons réalisé des calculs préliminaires : ce sont des calculs linéaires. Pour cela le calcul sera effectué en axisymétrique dans le domaine élastique.

Pour simplifier les calculs, la modélisation s'effectue avec un modèle élément finis en 2D, le maillage est fait automatiquement avec un élément finis quadratique à 4 nœuds pour occuper le maximum de la géométrie.

III.3.2. Résultats obtenus et interprétation :

L'objet du maillage est de discrétiser géométriquement le domaine d'analyse de manière à pouvoir ultérieurement associer une formulation éléments finis au support géométrique (figure III.4). Concrètement cette discrétisation s'effectue par la création d'objets de type maillage (points, lignes, surfaces, volumes) à l'aide des opérateurs géométriques.

La technique à suivre est presque toujours la même:

- Construction des points.
- Construction des lignes à partir des points.
- Construction des surfaces à partir des lignes.
- Construction des volumes à partir des surfaces.

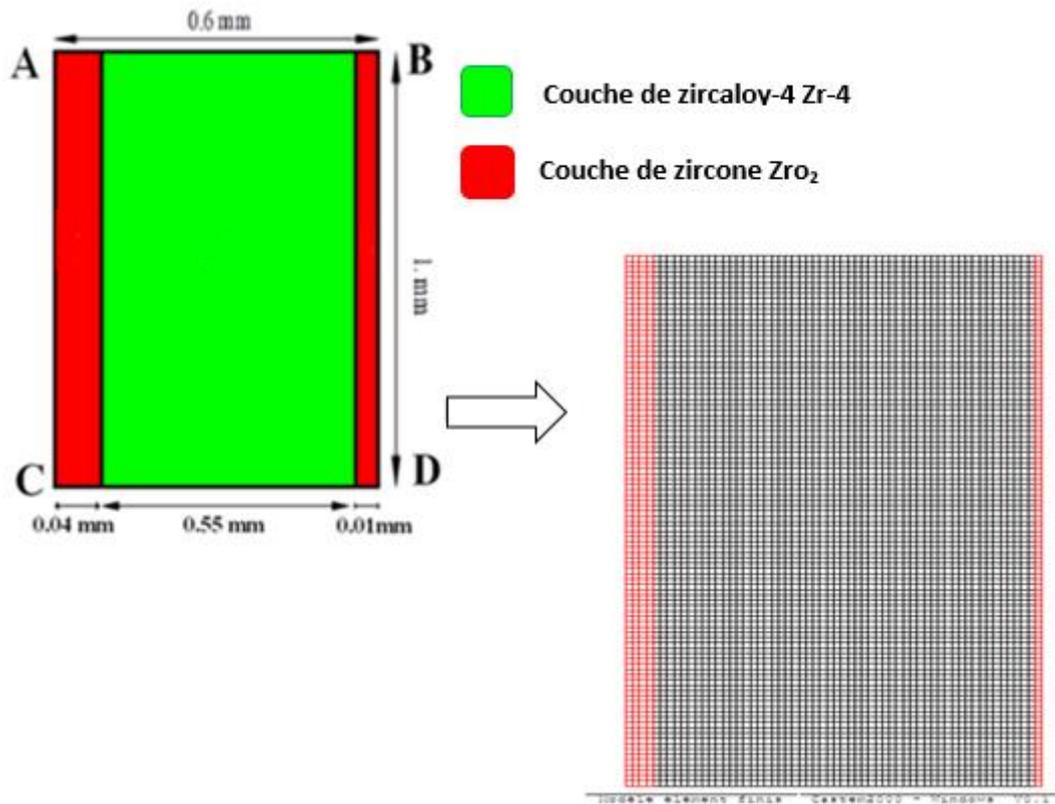


Figure III.4 : Caractéristiques géométriques du modèle proposé (EF).

La distribution de champs température obtenue dans la structure en 2D est représentée sur la figure III.5

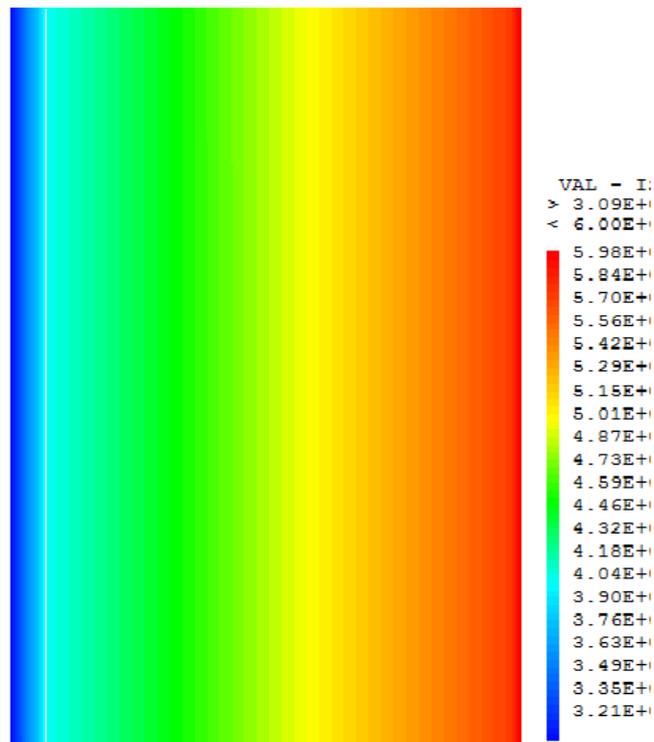


Figure III.5 : Cartographie des températures.

Sur la figure au-dessus, la distribution de la température suit une ligne descendante de l'intérieure (face du contact gaine/ pastille), avec une variation linéaire dans chaque couche (figure III.6).

Nous remarquons que les couches de zircone ou les couches de zircaloy permettent de diminuer la température engendrée dans la réaction de fission du combustible nucléaire. Cette diminution est grande dans les deux couches d'extrémités (couche oxydée) et moins dans la couche intermédiaire.

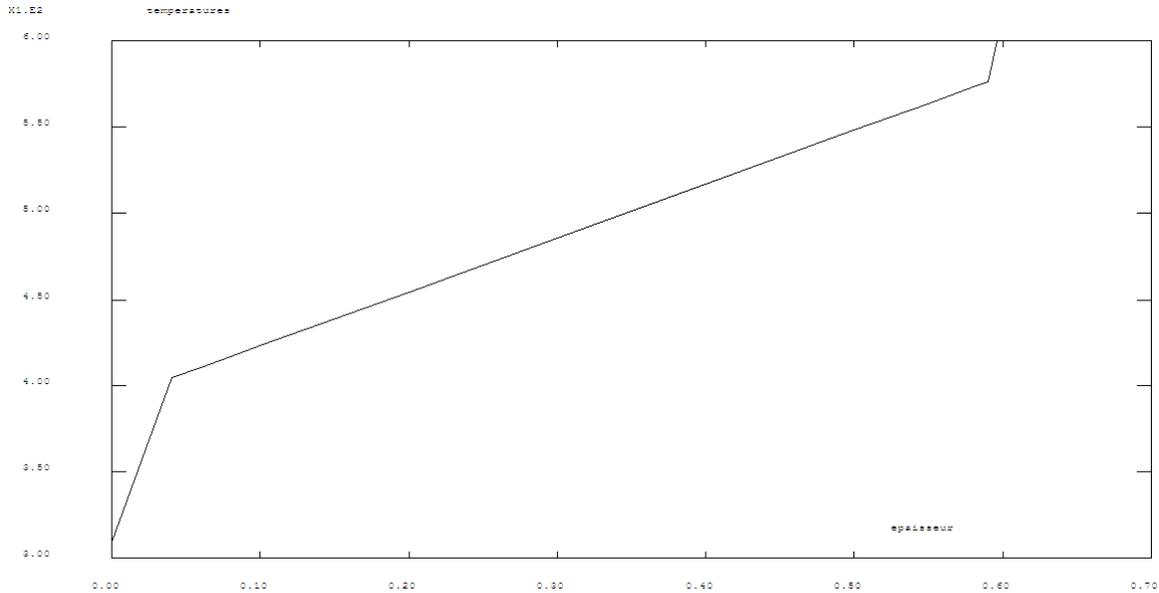


Figure III.6: distribution de la température ($^{\circ}\text{C}$) au niveau de l'épaisseur (μm)

En comparons nos résultats obtenus lors de la modélisation, avec celles obtenues par S. ZOGHLAMI [44] (figure III.7), nous trouvons que la distribution de la température dans la structure de tube de gainage suite la même allure.

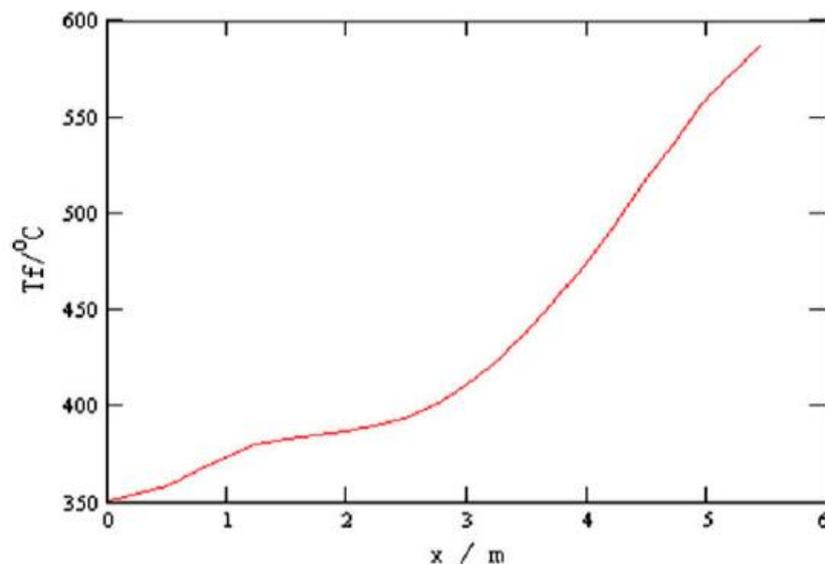


Figure III.7: distribution de la température ($^{\circ}\text{C}$) au niveau de l'épaisseur (μm) Obtenue par S. ZOGHLAMI [44].

Les sollicitations combinées entre les forces mécaniques engendrées par la force de pression de l'eau et l'augmentation de la température engendrée par la réaction de fission permettent de générer des déformations dans toute la structure comme illustre (la figure III.8) Cette déformation reste toujours dans la phase élastique.

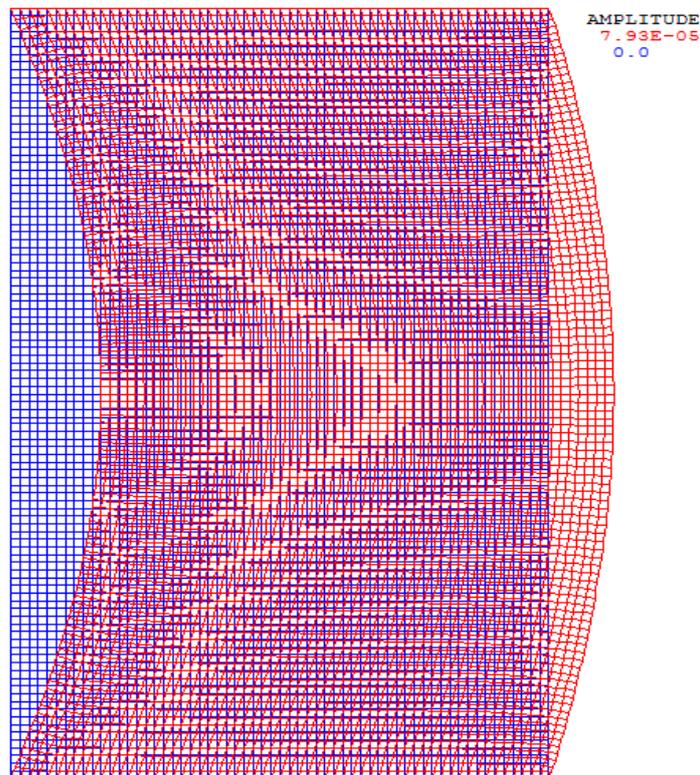


Figure III.8 : Effet de la pression d'eau sur la structure (déformée).
(En bleu : structure initiale, en rouge : structure déformée)

La figure III.9 représente une cartographie de la distribution des contraintes totale suivant les critères de Von-Mises dans la gaine. En néglige les effets de Bord des contraintes dans les extrémités de la structure, les contraintes sont concentrées dans les deux couches extérieures (de zircone), allant de 10.5 Gpa jusqu'à 127 Gpa, et ceux logiquement implémentable

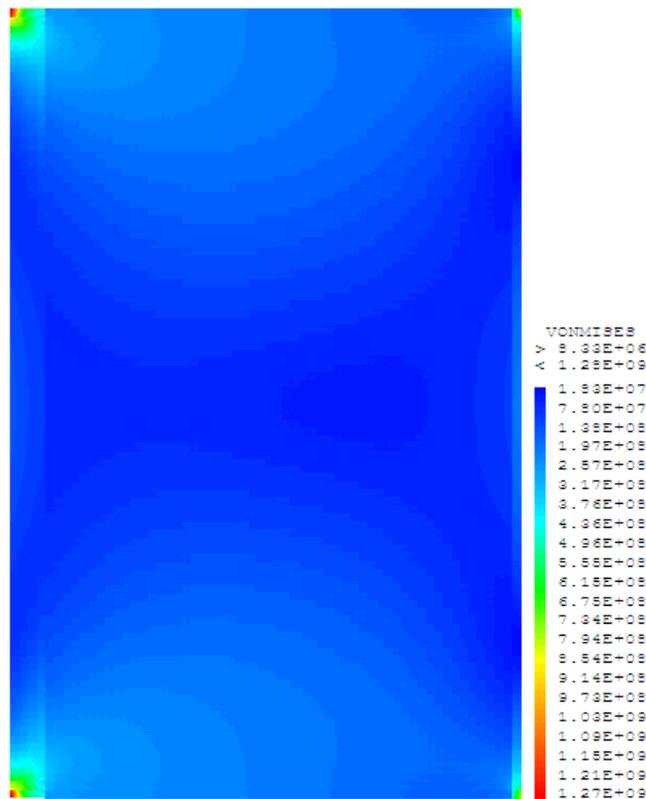


Figure III.9 : Iso-valeurs de la distribution des contraintes totales (VON MISES)

La figure III.10 confirme les résultats obtenus dans la figure III.8 ou les valeurs extrêmes de des contraintes sont obtenues dans les zones des couches extérieures des extrémités. Les contraintes les plus élevés sont trouvées sur la couche d'oxyde externe ou l'effet de la pression et de la température sont prise en compte.

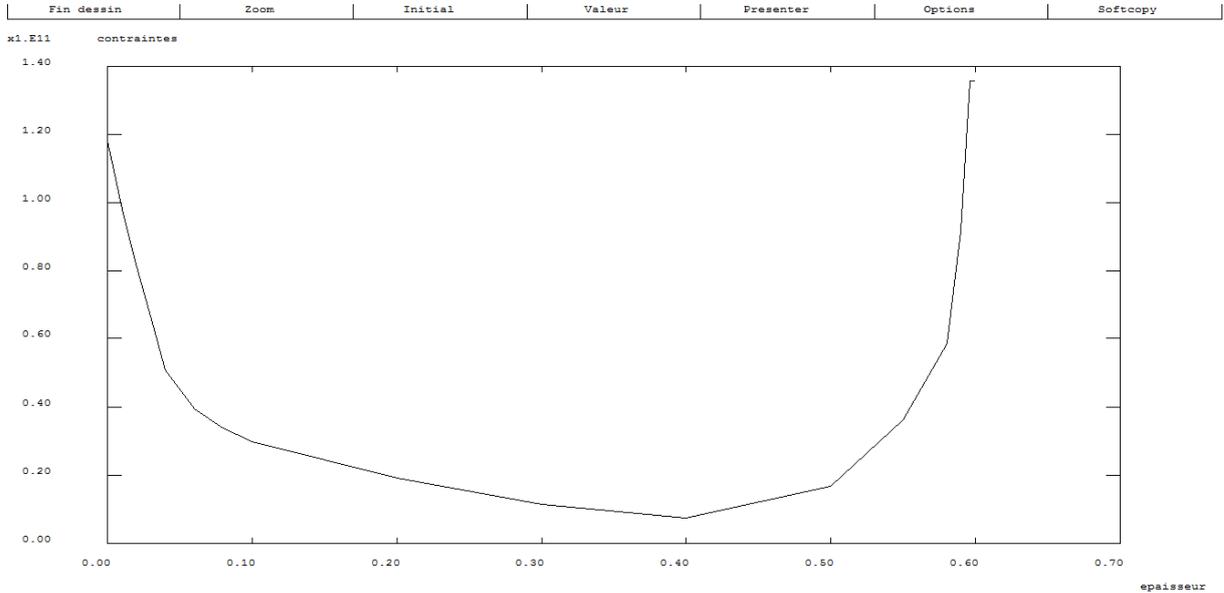


Figure III.10 : Evolution des contraintes (GPa) au niveau de l'épaisseur (μm).

Les résultats obtenus par Y. D. KWON [45] lors de la modélisation des contraintes de traction dans le tube de gainage dans le cœur du centrale REP (figure III.11), confirment celles obtenus dans cette recherche. L'évolution des contraintes au niveau de l'épaisseur dans la structure de tube de gainage suite la même allure.

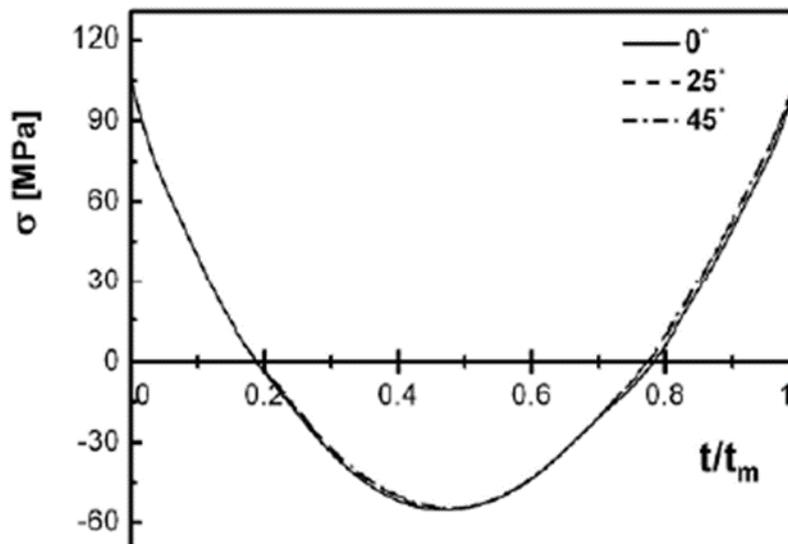


Figure III.11 : Evolution des contraintes (GPa) au niveau de l'épaisseur (μm) obtenue par Y. D. KWON [45].

La figure (III.12) illustre l'évolution des contraintes totales lors de l'évolution des températures, nous constatons que cette allure est logiquement réelle, ou trois stades sont coexisté.

- * Si les T °C sont évolués jusqu'à 420 °C, les valeurs des contraintes sont en augmentation rapides (stade 1)
- * Si les T °C sont entre 420-550 °C, les contraintes sont presque évoluées linéairement (stade 2) (relaxation).
- * Si les T °C sont plus de 550 les contraintes sont retournés à évoluer rapidement.

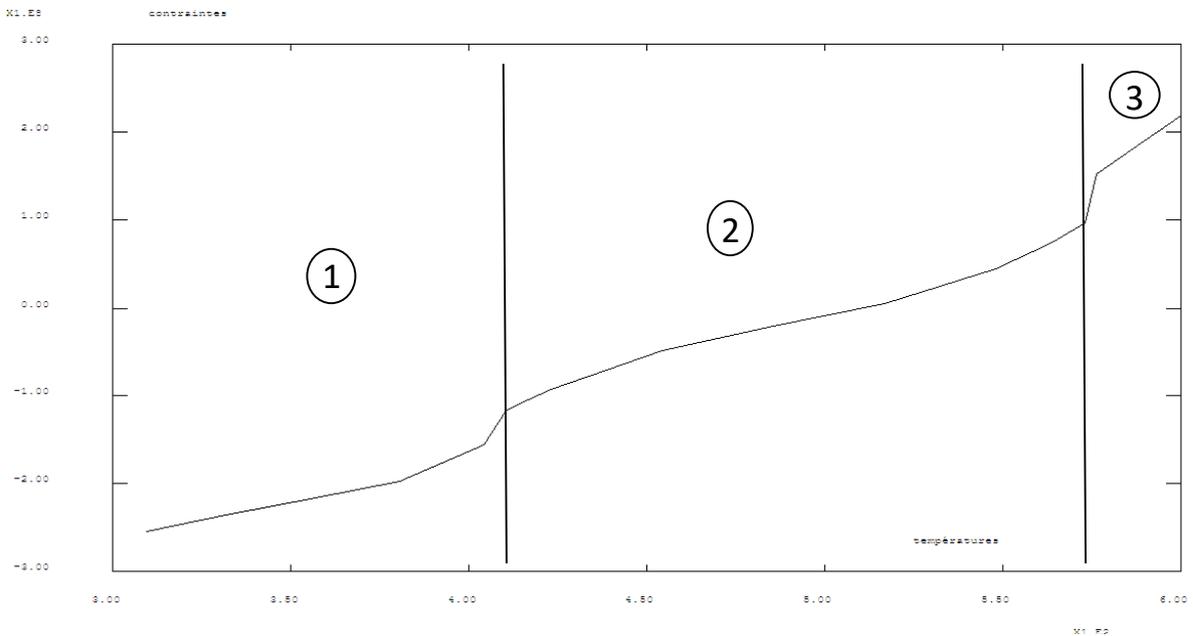


Figure III.12 : Evolution des contraintes (GPa) en fonction de la température (°C)

Nous pouvons comparer nos résultats avec ceux qui publier par J. MARDON, [46], et T. MATSUOKA [47] (figure III.13), qui ont étudiés la caractérisation du comportement à rupture de tubes de gaines des crayons combustibles dans les REP en modélisant plusieurs facteurs à s'avoir l'élongation, contrainte à la traction et module de Young, Chaque facteurs ci-définies ayant leur propre variation en fonction de la température. Par exemple, l'évolution du module de Young suite un courbe descendant, tandis que l'élongation suite un courbe ascendant.

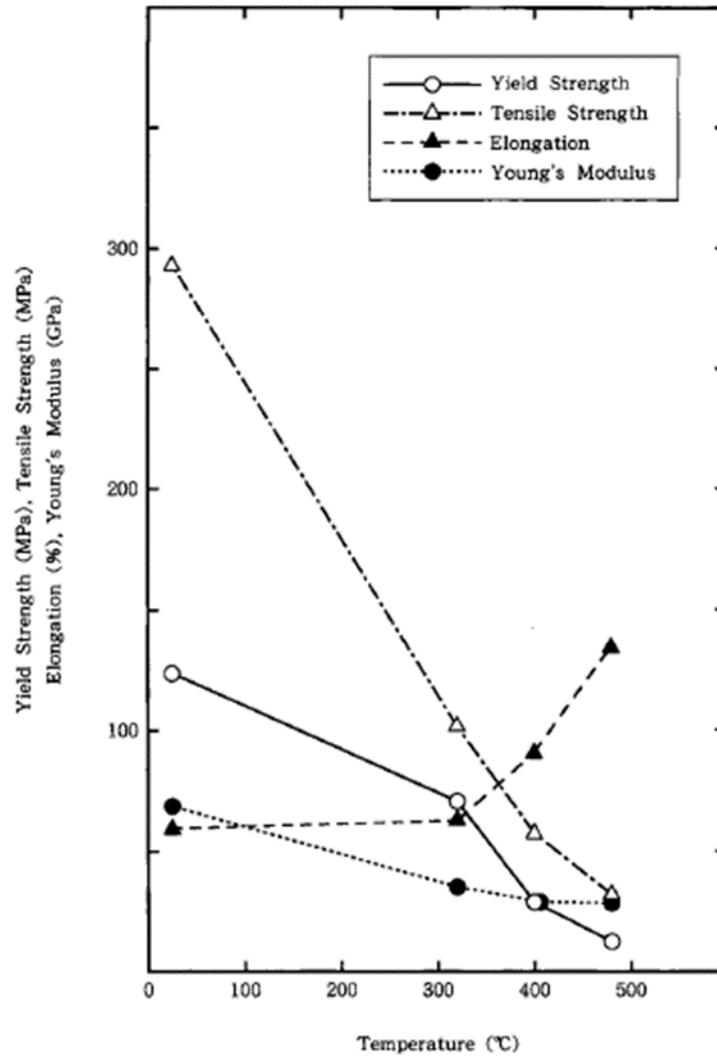
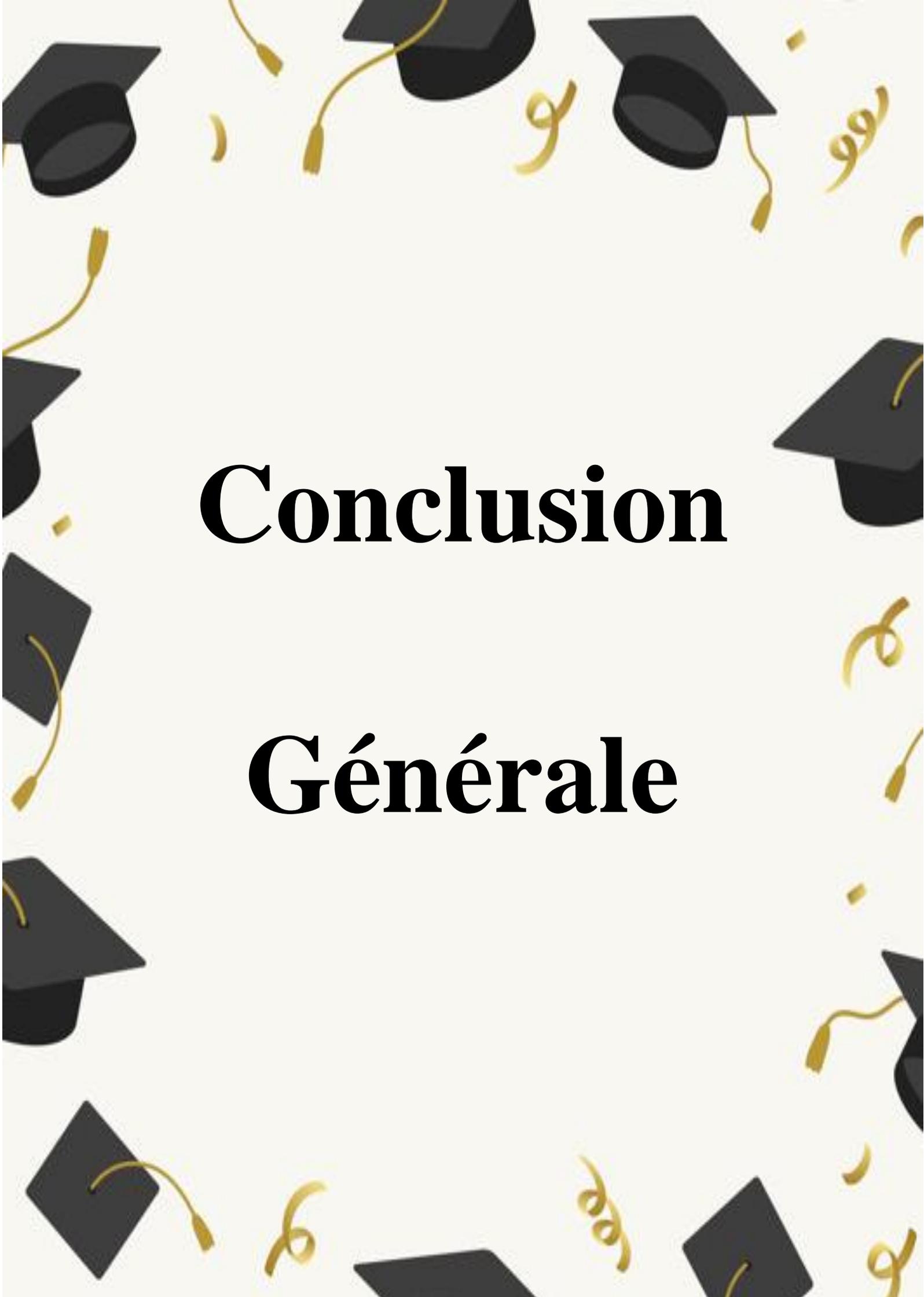


Figure III.13 : Evolution des contraintes (GPa) en fonction de la température (°C) de T. obtenue par T. MATSUOKA [47].

III.4. Conclusion :

L'étude du comportement thermomécanique des structures ayant des conditions de travail très sévères (haute température, forces mécaniques élevées, irradiation...etc.) nécessite un outil numérique très puissant qui remplace l'expérience (qui dans notre cas irréalisable ou nécessite l'utilisation des objets très chères). La modélisation numérique utilisant la MEF permet d'étudier le comportement de ce genre des structures avec l'identification de toutes les variables mécaniques et thermiques.

The background is white and decorated with several black graduation caps (mortarboards) and gold streamers scattered across the page. The caps are positioned at various angles, and the streamers are in various shapes, some curled and some straight.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le travail réalisé concernant l'identification du comportement thermomécanique définie par variables thermomécanique (température, contrainte, déplacements, déformation) des tubes de gainages qui comportent les pastilles d'uranium (UO_2) et ceux dans réacteurs à eau sous pression (REP). Les alliages de zirconium (Zr) sont largement utilisés comme élément de base pour les tubes de gainage de combustible et autres composants internes du cœur. Et ceux pour ces propriétés favorables.

La modélisation numérique basée sur la MEF et en utilisant le logiciel Cast3m permet de résoudre, simplifié et traiter notre problème de façon correcte et précis. Le calcul est réalisé en deux étapes : un calcul thermique (variable de température) dues au phénomène de fission du combustible, pour obtenir la distribution de température dans la structure, et un + Calcul mécanique (déplacements, contraintes, déformations) due aux forces de compression avec prise en compte du chargement thermique que l'on calcule à partir des résultats du calcul thermique.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont les suivantes :

- La distribution de la température dans la surface du tube suite une ligne descendante de l'intérieure (facette pastille/ gaine) vers l'intérieur (facette gaine/ eau), avec une variation linéaire dans chaque couche, les deux couches d'extrémités (de zircone) permettent de protéger la couche intermédiaire (Zr-4) contre l'augmentation de la température engendrée dans la réaction de fission du combustible nucléaire.
- Les sollicitations combinées entre les forces mécaniques engendrées par la force de pression de l'eau et l'augmentation de la température engendrée par la réaction de fission permettent de générer des déformations ou elle reste toujours dans la phase élastique.
- La distribution des contraintes totale suivant les critères de Von-Mises dans la gaine en néglige les effets de bord dans les extrémités de la structure, est concentrées dans les deux couches extérieurs (de zircone), les contraintes les plus élevés sont trouvées sur la couche d'oxyde externe ou l'effet de la pression et de la température sont prise en compte.

Conclusion Générale

- Les résultats de l'évolution des contraintes totales en fonction de l'augmentation de la température dans les trois couches de la structures (tube de gainage) permet de constater que les contraintes maximums sont trouvées ou la température est maximum (couches extrémum), tandis que la couche intermédiaire influée par des contraintes plus au moins faibles.
- Pour une ultérieur perspective, l'étude élasto-plastique combinée avec l'étude de fluage sont indispensable pour identifier le comportement à long terme.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9.
- [2] <https://new.sfen.org/academie235/comment-une-centrale-nucleaire-produit-elle-de-l%27electricite/>.
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire.
- [4] NUCLEAR ENERGY AGENCY “Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident(LOCA) Conditions” Nuclear Safety ISBN 978-92-64-99091-3.
- [5] <https://www.google.com/search?q=r%C3%A9acteur+nucl%C3%A9aire+%C3%A0+eau+pressuris%C3%A9&tbm>.
- [6] J. FLAMBARD, Effets des étapes d'un redémarrage de réacteur à eau sous pression sur l'oxydation et le relâchement des produits de corrosion des tubes de générateur de vapeur en alliage 690, thèse de doctorat, Université de TOULOUSE 2020, page 2.
- [7] E. ROYER, Principes et physique des réacteurs nucléaires, Enseignants BTS Environnement Nucléaire 2012., page 19-21.
- [8] A. BELLEFLEUR, Cinétique de réaction et solubilité des produits de corrosion dans les conditions physico-chimiques du circuit primaire des réacteurs à eau sous pression (REP), thèse de doctorat, Université de TOULOUSE 19 Avril 2012, page 10,13.
- [9] J. HUTIN, La durée d'exploitation des centrales nucléaires, Centrale Energies. Janvier 2017.
- [10] B. BERTRAND. Les réacteurs nucléaires. site internet «<https://www.encyclopedie-energie.org/les-reacteurs-nucleaires/>.»
- [11] Les activités contrôlées par l'ASN, chapitre 12 Les centrales électronucléaires.
- [12] J. HUTIN, la maintenance des centrales nucléaires, Préface de Dominique Minière, editions.lavoisier.fr.
- [13] G. MULLER, évaluation de la sensibilisation de la population face à la menace nucléaire et concomitamment du rôle pharmacien lors de la distribution des comprimés d'iode, thèse de doctorat, Université Henri Poincare - Nancy 1, 2008, page 08
- [14] N. BAKLOUTI, Modélisation de la dispersion atmosphérique des radionucléaires, mémoire de projet de fin d'études, Université de Monastir 2009/2010, Page 08.

Références Bibliographiques

- [15] B. CLMENT, A. BENTAIB, H. BONNEVEILLE, G. GENERINO. Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance, chapitre 02 conception et fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression
- [16] J. BOUTARD, B. BONIN et Ch. CAPPELAERE, les matériaux du nucléaire, Modélisation et simulation des matériaux de structure.
- [17] J. GUILLET, Y. GUERIN, B. BONIN, Commissariat à l'Energie Atomique, Les combustibles nucléaires, Le Moniteur Editions (2008).
- [18] T. HELFER, étude de l'impact de la fissuration des combustibles nucléaires oxyde sur le comportement normal et incidentel des crayons combustible, thèse de doctorat, École centrale de Lyon, Année 2006, Numéro d'ordre n° EC2006-10.
- [19] https://www.google.com/search?q=D%C3%A9tail+d%E2%80%99un+crayon+de+combustible+nucl%C3%A9aire.&sxsrf=ALeKk00Rxe5ErwsEgfmq6U5uyFg0Rhnfw:1623969468208&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKewi395za3Z_xAhVJKBoKHVWXBTIQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657.
- [20] J. MARDON, Expert international du groupe AREVA, Matériaux des tubes de gainage pour réacteurs à eau pressurisée, techniques de l'ingénieur.
- [21] P. BARBERIS, D. CHARQUET, V. REBEYROLLE, Ternary Zr–Nb–Fe(O) system: phase diagram at 853 K and corrosion behaviour in the domain Nb < 0.8%, Journal of Nuclear Materials, 326 (2004) 163–174.
- [22] Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux, « Le zirconium et ses alliages » le 1er août 1998.
- [23] A. STERN, Comportements métallurgique et mécanique des matériaux de gainage du combustible REP oxydes à haute température, theses.fr/2007ENMP1506.
- [24] <https://www.societechimiquedefrance.fr/Zirconium.html>.
- [25] M. LESAUX « Comportement et rupture de gaines en zircaloy-4 détendu vierges, hydrurées ou irradiées en situation accidentelle de type RIA » Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.
- [26] M. LASSERRE « Modélisation des phénomènes de corrosion du zircaloy-4 sous mélanges oxygène-azote à haute température » Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2013.
- [27] M. COLOMBIE, Matériaux industriels ; matériaux métalliques, Ed. Dunod, Paris, 2000, p.727-739.

Références Bibliographiques

- [28] R. Tricot, « Zirconium et hafnium - Métallurgie », Techniques de l'ingénieur, M 2 360,1-15.
- [29] N. OZANNE, M.L. LEMAIRE, A. GUY, J.-L. J.H FOOS, S. PELLET-ROASTING, F. CHITRY, Brevet WO, 0220408, 2002, (Compagnie Européenne du Zirconium Cezus, Fr.). "Complexation-membrane separation method for separating dissolved zirconium and hafnium"
- [30] P. ALBERT, A Chrétien, J. FLAHAUT, W. FRENDLICH, J.P. LANGERON, P. LEHR, "Séparation de l'hafnium et du zirconium", Nouveau traité de chimie minérale, Masson&Cie : Paris, 1963, Vol. IX, 774-824.
- [31] R.L. SKAGGS, D.T. ROGERS, D.B. HUNTER, "Review of anhydrous zirconium-hafnium séparation techniques", Inf. Cire. - U. S., Bur. Mines, Boulder City Eng. Lab, Bur. Mines, Boulder City, NV, USA., 54986, 1984, 29 pp.
- [32] S. BOUTARFAIA, élaboration et caractérisation d'alliages réactifs à base de zirconium, thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Année 2009.
- [33] J. GUILLET, Y. GUERIN, B. BONIN, Combustibles nucléaires, édition le monitor HAL Id : cea-01153334
- [34] F. ONIMUS, Approche expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des alliages de zirconium irradiés, thèse de doctorat ECP, décembre 2003.
- [35] H. Bailly, Le combustible nucléaire des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs à neutrons rapides : conception et comportements, édité par H. Bally, D. Ménessier et C. Prunier 1996.
- [36] F. Brossard ; Etude de la migration de l'iode dans la zircone : Application au stockage des coques, Thèse de doctorat, UCBL,1999.
- [37] F. HAMRIT, Analyse dynamique des structures mécaniques par la méthode des éléments finis, Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2017-2018.
- [38] I. HAMANI, Modélisation par la méthode des éléments finis 3d du chauffage infrarouge d'une membrane semi-transparente en polyéthylène téréphtalate amorphe, mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec, février 2007,
- [39] H. OUDIN, Introduction à la méthode des éléments finis, centrale Nantes, HAL Id : cel-00341772. 28/09/2008, page1, 14.

Références Bibliographiques

- [40] S. DEGHBODJ, Méthode des éléments finis, polycopie de cours, Université Larbi Tébessi-Tébessa, Année 2017-2018, page 14-16.
- [41] Y. SAYAD, Modélisations des plaques de formes géométriques irrégulières par la méthode des éléments finis, Mémoire de magister en génie civil, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [42] H. OUDIN. Méthode des éléments finis. École d'ingénieur. Nantes, France. 2008, pp.74. Cel00341772v3f.
- [43] E. LE FICHOUX, Présentation et utilisation de Cast3M, Documentation Cast3M 2011, à l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA), Édition 2011.
- [44] S.ZOGLAMI ; analyse du transfert de chaleur et de la perte de pression pour des écoulements supercritiques dans le réacteur candu-scw. département de génie physique école polytechnique de montréal thèse en maîtrise et sciences appliquées (génie énergétique) avril 2013
- [45] Y. D. Kwon, Y. S. Yang, J. S. Kim and S. B. Kwon, A study on the flow characteristics in an annular type fuel pellet of PWR Journal of Mechanical Science and Technology 27 (1) (2013) 257~261.DOI 10.1007/s12206-012-1205-x.
- [46] J. MARDON, Mécanismes d'endommagement de la gaine de combustible en situation accidentelle RIA . Thèse de doctorat 25-27 septembre 2006 Université de rattachement : INSA Lyon
- [47] T. MATSUOKA, T.YONEZAWA, K.NAKAMURA, K.MURAKAMI, J.SHIMIZU & T. NAGATA, Life Time Estimation for Cladding Tube Cracking Caused by Absorber Swelling of PWR RCCA Rodlets Journal of Nuclear Science and Technology. 35:8, 564-578, DOI: 10.1080/18811248.1998.9733910

Annexe

Annexe :

```
*****
***** SIMULATION DES CONTRAINTES *****
*****
***** Données numérique de la poutre *****
*****
* Longueur      : 1 mm          *
* Largeur       : 0.6 mm        *
* Pression imposé : 150 bar      *
* Température imposé1 : 600 °c   *
* Température imposé2 : 300 °c   *
*
*
* Couche de Zy-4 : Module de Young 98 000 MPa *
*      Epaisseur 0.55 mm          *
*      coef de poisson 0.3         *
*
* Couche1 de ZrO2 : Module de Young 192 000 MPa *
*      Epaisseur 0.01 mm          *
*      coef de poisson 0.25        *
*
* Couche2 de ZrO2 : Module de Young 192 000 MPa *
*      Epaisseur 0.04 mm          *
*      coef de poisson 0.25        *
*
*****
opti dime 2 elem qua4 ;
dens 0.01;
*****
*      construction des points      *
*****
p0= 0. 0.;
p1= 0.04 0.;
p2= 0.59 0.;
```

Annexe

p3= 0.6 0.;

p4= 0.6 1.;

p5= 0.59 1.;

p6= 0.04 1.;

p7= 0. 1.;

* construction des lignes *

l0= d p0 p1;

l1= d p1 p6;

l2= d p6 p7;

l3= d p7 p0;

l4= d p1 p2;

l5= d p2 p5;

l6= d p5 p6;

l7= d p6 p1;

l8 = d p2 p3;

l9 = d p3 p4;

l10= d p4 p5;

l11= d p5 p2;

*l7= inve l2;

lt1= l0 et l1 et l2 et l3 coul rouge;

lt2= l4 et l5 et l6 et l7 ;

lt3= l8 et l9 et l10 et l11 coul rouge;

* construction des surfaces *

surf1= surf lt1;

surf2= surf lt2;

surf3= surf lt3;

surft= surf1 et surf2 et surf3;

Annexe

trac titr 'Modèle élément finis' surft;

elimine 0.001 surft;

* CALCUL THERMIQUE *

*

***** CHOIX DU COMPORTEMENT ET DU MODELE EF *****

*couche zircalloy *****

MO1=MODE surf2 THERMIQUE ISOTROPE ;

*couche 1 Zro2 *****

MO2=MODE surf1 THERMIQUE ISOTROPE ;

MO3=MODE I3 CONVECTION ;

* couche 2 Zro2 *****

MO4=MODE surf3 THERMIQUE ISOTROPE ;

mot1=mo1 et mo2 et mo4;

MOT=mo1 et mo2 et mo3 et mo4;

***** DONNEES MATERIAU ET ELEMENTS *****

*

MAT1=MATE MO1 K 22.7 ;

MAT2=MATE MO2 K 3. ;

MAT3=MATE MO3 H 750.0 ;

MAT4=MATE MO4 K 3. ;

matt1= mat1 et mat2 et mat4;

matt = mat1 et mat2 et mat3 et mat4 ;

*

***** CONDITIONS AUX LIMITES *****

*

CL1=BLOQ I9 T ;

FCL1=DEPI CL1 600. ;

*

Annexe

***** CHARGEMENT (FLUX) *****

*

FLU1=CONV MO3 MAT3 T 300. ;

***** RESOLUTION *****

*

* MATRICES DE CONDUCTIVITE

COND1=COND MOt1 MATt1 ;

COND2=COND MO3 MAT3 ;

CONDTOT=COND1 ET cond2 et CL1 ;

***** FLUX *****

FLUTOT=FCL1 et flu1 ;

* RESOLUTION

CHPO1=RESO CONDTOT FLUTOT ;

*

* POST-TRAITEMENT

*

TRAC CHPO1 SURFt 11;

* CALCUL MECANIQUE *

*

***** CHOIX DU COMPORTEMENT ET DU MODELE EF *****

*

MO5=MODE SURF1 MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE ;

MO6=MODE SURF2 MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE ;

MO7=MODE SURF3 MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE ;

Annexe

MO567=mo5 et mo6 et mo7 ;

*

* DONNEES MATERIAU ET ELEMENTS

*

MAT5=MATE MO5 YOUN 192000 NU 0.25 RHO 7800. ALPH 1.E-5 ;

MAT6=MATE MO6 YOUN 98000 NU 0.3 RHO 7800. ALPH 1.E-5 ;

MAT7=MATE MO7 YOUN 192000 NU 0.25 RHO 7800. ALPH 1.E-5 ;

mat567= mat5 et mat6 et mat7;

*

* CONDITIONS AUX LIMITES

*

CL3=BLOQ DEPL (10 ET 14 et 18 et 110 et 16 et 12) ;

*

***** CHARGEMENT THERMIQUE ET PRESSION*****

*

SIGT3=THET MO567 CHPO1 MAT567 ;

F3=BSIG MO567 SIGT3 ;

PRES3=PRES MASS MO567 150.E6 13 ;

***** RESOLUTION *****

*

RIG3=RIGI MO567 MAT567 ;

RIGCL3=RIG3 ET CL3 ;

DEP3=RESO RIGCL3 (F3 ET PRES3) ;

*

* POST-TRAITEMENT *

*

***** DEFORMEE *****

*

DEF0=DEFO SURFt DEP3 0. Bleu ;

DEF1=DEFO SURFt DEP3 ROUG ;

TRAC (DEF0 ET DEF1) ;

Annexe

*

***** CALCUL DES CONTRAINTES TOTALES ET MECANIKUES *****

*

SIGTOT3=SIGM MO567 MAT567 DEP3 ;

trace sigtot3 mo567 l0;

vm=vmis mo567 sigtot3;

titre 'contraintes de von-mises(maxi=(maxi vm)MPa)';

trac mo567 vm l2;

v1= changer chpo vm mo567;

sigyy= exco smyy sigtot3;

contryy= chan chpo sigyy mo567;

titre 'contrainte suivant yy' ;

trac mo567 sigyy l2 ;

sigxx= exco smxx sigtot3;

contrxx= chan chpo sigxx mo567 ;

titre 'contrainte ssuivant xx' ;

trac mo567 sigxx l2 ;

uy1= exco uy dep3;

*uy2= chan chpo uy1 mo567;

trac titre 'evolution sigma y' def0 contryy l2;

l01= l10 et l6 et l2 ;

pr1= surft poin proc (0. 0.5);

pr2= surft poin proc (0.01 0.5);

pr3= surft poin proc (0.02 0.5);

pr4= surft poin proc (0.03 0.5);

pr5= surft poin proc (0.04 0.5);

Annexe

pr6= surft poin proc (0.06 0.5);
pr7= surft poin proc (0.08 0.5);
pr8= surft poin proc (0.10 0.5);
pr9= surft poin proc (0.20 0.5);
pr10= surft poin proc (0.30 0.5);
pr11= surft poin proc (0.40 0.5);
pr12= surft poin proc (0.50 0.5);
pr13= surft poin proc (0.55 0.5);
pr14= surft poin proc (0.58 0.5);
pr15= surft poin proc (0.59 0.5);
pr16= surft poin proc (0.596 0.5);
pr17= surft poin proc (0.598 0.5);
pr18= surft poin proc (0.60 0.5);

valsx1= extr contryy smyy pr1;
valsx2= extr contryy smyy pr2;
valsx3= extr contryy smyy pr3;
valsx4= extr contryy smyy pr4;
valsx5= extr contryy smyy pr5;
valsx6= extr contryy smyy pr6;
valsx7= extr contryy smyy pr7;
valsx8= extr contryy smyy pr8;
valsx9= extr contryy smyy pr9;
valsx10= extr contryy smyy pr10;
valsx11= extr contryy smyy pr11;
valsx12= extr contryy smyy pr12;
valsx13= extr contryy smyy pr13;
valsx14= extr contryy smyy pr14;
valsx15= extr contryy smyy pr15;
valsx16= extr contryy smyy pr16;
valsx17= extr contryy smyy pr17;
valsx18= extr contryy smyy pr18;

xdef1 = prog valsx1 valsx2 valsx3 valsx4 valsx5 valsx6 valsx7

Annexe

valsx8 valsx9 valsx10 valsx11 valsx12 valsx13 valsx14 valsx15
valsx16 valsx17 valsx18 ;

xcont1= prog 0. 0.01 0.02 0.03 0.04 0.06 0.08 0.10 0.20 0.30
0.40 0.50 0.55 0.58 0.59 0.596 0.598 0.60 ;

evol1= EVOL MANU 'epaisseur' xcont1 'contraintes' xdef1 ;
dess evol1;

T1=EXTR CHPO1 T Pr1 ;
T2=EXTR CHPO1 T Pr2 ;
T3=EXTR CHPO1 T Pr3 ;
T4=EXTR CHPO1 T Pr4 ;
T5=EXTR CHPO1 T Pr5 ;
T6=EXTR CHPO1 T Pr6 ;
T7=EXTR CHPO1 T Pr7 ;
T8=EXTR CHPO1 T Pr8 ;
T9=EXTR CHPO1 T Pr9 ;
T10=EXTR CHPO1 T Pr10 ;
T11=EXTR CHPO1 T Pr11 ;
T12=EXTR CHPO1 T Pr12 ;
T13=EXTR CHPO1 T Pr13 ;
T14=EXTR CHPO1 T Pr14 ;
T15=EXTR CHPO1 T Pr15 ;
T16=EXTR CHPO1 T Pr16 ;
T17=EXTR CHPO1 T Pr17 ;
T18=EXTR CHPO1 T Pr18 ;

valt = prog t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 t9
t10 t11 t12 t13 t14 t15 t16 t17 t18 ;

xt1= prog 0. 0.01 0.02 0.03 0.04 0.06 0.08 0.10 0.20 0.30
0.40 0.50 0.55 0.58 0.59 0.596 0.598 0.60 ;

Annexe

```
evol2= EVOL MANU 'epaisseur' xt1 'temperatures' valt ;  
dess evol2;
```

```
xdef2 = prog valsx1 valsx2 valsx3 valsx4 valsx5 valsx6 valsx7  
valsx8 valsx9 valsx10 valsx11 valsx12 valsx13 valsx14 valsx15  
valsx16 valsx17 valsx18 ;
```

```
valt2 = prog t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 t9  
t10 t11 t12 t13 t14 t15 t16 t17 t18 ;
```

```
evol3= EVOL MANU 'températures' valt2 'contraintes' xdef2 ;  
dess evol3 coul rouge;
```

```
fin;
```

