

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC A TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**

**PAR
LAKHSASI AHMED**

**"MODÉLISATION EN ÉLÉMENTS FINIS À 3-D D'UNE
DEMI-SPHÈRE EN ACIER INOXYDABLE
À REVÊTEMENT VARIABLE DE CARBURE DE TITANE"**

Août 1990

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Table des matières

	Page
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des symboles et abréviations.....	IX
Remerciements.....	XII
Introduction.....	1

Chapitre I

I-1 Généralités.....	5
I-2 Programme de Recherche.....	10
I-3 Tokamak de Varennes	11
I-4 Fusion Thermonucléaire Contrôlée.....	12
I-4-1 Réactions Nucléaires.....	12
I-4-1-1 Niveau Atomique.....	12
I-4-1-2 Niveau Nucléaire.....	12

I-4-2 Fusion des Noyaux Légers.....	15
I-4-3 Fusion Contrôlée.....	18
I-4-3-1 Fusion par confinement magnétique.....	18
I-4-3-2 Fusion par confinement Inertiel.....	19
I-5 Les limiteurs.....	19
I-6 Diagnostic.....	21
I-7 Problèmes des limiteurs.....	24
I-8 Besoin d'un modèle thermique à 3-D	26

Chapitre II Description du problème

II-1 Description du limiteur.....	29
II-2 Données.....	30
II-2-1 Propriétés thermiques.....	30
II-2-2 Résultats expérimentaux.....	31
II-3 Coup tokamak	37

Chapitre III Analyse analytique

III-1 Transfert de chaleur.....	38
III-1-1 Conduction.....	38
III-1-2 Radiation.....	39

III-1-3 Convection.....	39
III-2 Équations de la chaleur.....	39
III-3 Hypothèses.....	41
III-4 Solution.....	44
III-5 Suggestion de la méthodologie.....	47

Chapitre IV Méthode des éléments finis

IV-1 Concept d'éléments finis.....	49
IV-2 Critères de convergence.....	52
IV-3 Problème de l'extrémum.....	54
IV-4 Discrétisation en éléments finis.....	56
IV-5 Analyse transitoire.....	59

Chapitre V Analyse numérique

V-1 Modélisation.....	62
V-1-1 Description du programme.....	62
V-1-2 Principes.....	64
V-1-3 Modèle en éléments finis.....	65
V-1-4 Validation du modèle.....	68
V-2 Simulation.....	71
V-2-1 Conditions aux limites.....	72
V-2-2 Cartes de contrôle de la simulation.....	72

V-2-3 Régime Transitoire.....	73	
Chapitre VI	Analyse des résultats	
VI-1 Utilité des résultats obtenus.....	77	
VI-2 Discussion.....	78	
VI-3 Mesure du flux.....	80	
Chapitre VII	Conclusion	81
RÉFÉRENCES	84	
ANNEXES	85	

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
1 I-1 Prévision pour l'évolution mondiale.....	7
2 I-2 Réserves et ressources pour les différentes formes d'énergie.....	8
3 I-4.1 Schéma simplifié de l'utilisation de la fusion	17
4 II-2.1 Propriétés thermique du TiC	30
5 II-2.2 Propriétés thermiques de l'acier inoxydable.....	31
6 II-3 Essais sur le limiteur hémisphérique.....	33

LISTE DES FIGURES

Figures		Page
1	I-4-1 Réactions nucléaires exoénergétiques.....	14
2	I-4-2 Section efficace en fonction de l'énergie.....	15
3	I-4-3 Barrière de potentiel.....	16
4	I-5-1 Les types de limiteurs.....	20
5	I-6-1 Montage pour le diagnostique optique.....	22
6	I-6-2 Emission des atomes de titane du limiteur.....	23
7	I-8-1 Distribution de la température à 2-D.....	27
8	II-1-1 Limiteur hémisphérique.....	29
9	II-2 Montage pour tester le limiteur.....	32
10	II-3 Couches du revêtement du LM4.....	32
11	II-4 Résultats de la simulation à 2-D d'un coup tokamak	34
12	II-5 Puissance déposée sur le LM4.....	35
13	II-6 Température du LM4 pour un coup tokamak	35
14	II-7 Photos du LM4 après un coup tokamak	36
15	II-8 Courant I_p dans le plasma lors d'un coup tokamak.....	37

1 6	III-2	Coordonnées sphériques.....	40
1 7	III-3	Données du problème.....	41
1 8	IV-1	Division à 3-D du LM4 en éléments finis.....	51
1 9	IV-2	Zone de transition entre deux éléments.....	53
2 0	IV-3	Division en éléments finis à 3-D du LM4	59
2 1	V-1	Analyse d'un problème de transfert de chaleur.....	63
2 2	V-2	Quelques éléments finis de NISA.....	66
2 3	V-3	Élément solide NKTP=104.....	66
2 4	V-4	Maillage d'un quadrant à 2-D du LM4.....	67
2 5	V-5	Connectivité d'un élément quadrilatère.....	68
2 6	V-6	Normale de l'élément quadrilatère.....	68
2 7	V-7	Modèle en éléments finis du limiteur.....	69
2 8	V-8	Zones du modèle du LM4.....	70
2 9	V-9	Maillage complet de la zone1.....	70
3 0	V-10	Maillage complet des zones 2 et3.....	71
3 1	V-11	Conditions aux limites de la simulation.....	72
3 2	V-12	Résultats de la simulation de la distribution de la température en régime permanent (410 μ m).....	73
3 3	V-13	Évolution de la température à l'interieur du LM4.....	74
3 4	V-14 a	Résultat de la simulation après le coup tokamak	74
3 5	V-14 b	Résultat de la simulation après le coup tokamak ..	75
3 6	V-15	Simulation de la température relevée par le TC3	75

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symboles

a	Petit rayon du tokamak
a	Diffusivité thermique
α	Coefficient de transfert de chaleur
A	Aire
B	Champ d'induction magnétique
β	Rapport de P_{cin}/P_{cha}
C	Vitesse de la lumière
C_p	Chaleur spécifique
Δ	Divergence
∂	Dérivé partielle
E	Énergie déposée
E_0	Module de l'énergie déposée
ϵ, ϵ_0	Permittivité
f	Flux
F_e	Flux électronique
F_i	Flux ionique
F_0	Flux du plasma
ϕ	Fonction inconnue
$\{\phi\}^e$	Fonction inconnue d'un élément

γ	Rayon du LM4	X
H	Champ magnétique	
I_p	Courant induit dans le plasma	
J_m	Courant macroscopique	
K	Conductivité thermique	
$\lambda \lambda_p$	Longueur caractéristique	
λ_j	Libre parcours moyen	
M	Masse du noyau	
μ	Coefficient thermique de diffusabilité (1/a)	
μ_0	Perméabilité magnétique du vide	
N	Fonction de pondération	
n/n_e	Densité électronique du plasma	
n_a	Densité atomique	
n_e	Densité électronique	
n_i	Densité ionique	
$\langle \sigma v \rangle$	Taux d'ionisation	
P	Puissance	
P_{cin}	Puissance cinétique	
P_{cha}	Puissance du champ	
P_{diss}	Puissance dissipée	
Q	Quantité de chaleur par unité de temps (W)	
q	Flux de chaleur par unité de surface (W/m ²)	
R	Grand rayon du tokamak	
∇	Gradient	
ρ	Densité du solide	
σ	Constante de stefan-Boltzman	

S	Surface
T	Température
T_e	Température électronique
T_i	Température ionique
t	Temps
τ_E/t_E	Temps de confinement
χ	Fonction de la fonction inconnue
Z	Nombre atomique
Z_{eff}	Section efficace

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements au professeur **Adam Skorek** dont l'enthousiasme pour la méthode des éléments finis a attiré mon attention et dont l'amitié durable a permis ma collaboration avec sa remarquable équipe du laboratoire d'**ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE** à l'**U.Q.T.R.**, ainsi qu'à toute l'équipe du **GREI**.

Au docteur **Guy Le Clair** et à son groupe de recherche du **CCFM** qui m'ont permis de concrétiser et de réaliser ce projet, ainsi qu'à toute l'équipe du **TOKAMAK de Varennes**.

Introduction

Le but de ce travail est de réaliser un modèle thermique de la tête du limiteur test en demi-sphère du **TOKAMAK** de Varennes. La modélisation est effectuée à trois-dimensions pour différentes couches de carbure de titane (TiC).

Ce travail de recherche est fait pour le compte du centre canadien de fusion magnétique (CCFM) dans le cadre du projet **Tokamak de Varennes**.

Plus précisément pour le groupe **THEORIE ET INTERPRETATION**; ce groupe développe et supporte divers types de codes numériques utilisés pour vérifier ou planifier différents aspects du programme expérimental sur le **Tokamak de Varennes (TdeV)**. Ce groupe développe divers modèles relatifs aux problèmes traités aux **CCFM** comme : la physique des mécanismes de transport, d'équilibre et de stabilité, les méthodes d'entraînement de courant, le chauffage auxiliaire , le divergeur et le limiteur.

La recherche en fusion thermonucléaire est avancée au point où la taille du réacteur thermonucléaire du futur se pose. Mais il rest encore différents problèmes à régler. En quelque sorte le problème fondamental est le choix des métaux des composantes qui peuvent entrer en contact avec le plasma chaud.

Dans le **TdeV** le rôle joué par les limiteurs principaux en C disposés régulièrement le long de l'équateur du tore est d'empêcher le contact entre le bord du plasma et la surface de la chambre à vide. Ces limiteurs doivent être capables de résister au contact du bord de la décharge et en particulier à des flux thermiques intenses et localisés provenant d'électrons énergétiques ou d'instabilités du plasma. Comme les limiteurs doivent pouvoir résister à des chocs thermiques, ils sont en acier inoxydable. Mais la pulvérisation par les particules chargées et même l'évaporation, entraînent une pollution du plasma par le revêtement. Cela cause deux problèmes : premièrement, le plasma se dégrade et sa température baisse en présence des impuretés, et deuxièmement, la paroi elle-même subit des dommages, d'où l'importance des limiteurs.

L'équipe de recherche du TdeV a essayé un type de limiteur hémisphérique en acier inoxydable avec revêtement variable de carbure de titane, les résultats sont très prometteurs.

La simulation à 2-D de la distribution de la température sur la tête du limiteur a été faite par Dr LeClair. La décoloration du revêtement des limiteurs n'est pas symétrique, elle dépend du champ magnétique poloïdal

produit par le courant du plasma . L'angle d'asymétrie est approximativement 9 degrés .

La simulation à 2-D reproduit la température intérieure en variant l'intensité du flux à la surface du limiteur sphérique qui est de la forme $E_0 e^{-\gamma/\lambda}$. Donc , c'est la distribution du flux sur la surface qu'il faut varier pour reproduire la température intérieure. Donc il est préférable de faire une simulation de la distribution de température à 3-D . En adaptant la distribution du flux , la simulation devra reproduire l'évolution de la température mesurée par les thermocouples de la tête du limiteur .

La version sur PC (**286**) du logiciel EMRC NISA II est utilisée pour faire la simulation . Cette version est limitée à 500 éléments ou 2000 degrés de liberté .

Le limiteur de 35 mm de rayon est supporté par une structure de 300 Kg et d'un mètre de longueur . Pendant les étapes de la modélisation on s'est rendu compte que ce n'est pas possible de modéliser toute la structure : il faut se limiter au limiteur lui même et considérant des pertes par radiation sur les limites comme condition frontière .

On suppose que le flux de chaleur du côté électronique est dix fois plus fort que celui du côté ionique .

Donc l'objectif général de ce travail est de faire la simulation de la distribution de la température dans la tête du limiteur avec un programme

en **ÉLÉMENTS FINIS** à 3-D . En adaptant la distribution du flux sur la surface du limiteur , la simulation devra reproduire l'évolution de la température et calculer la distribution de la température à la surface . Cela va nous permettre d'obtenir des revêtements résistants au plasma chaud.

Chapitre I

Description du Tokamak

I-1 Généralités :

Le principe de la configuration **Tokamak** a été proposé avant 1960 par Sakharov et Tamm en URSS . Le nom de Tokamak a été composé à partir des mots russes Tok (courant) , Kamera (chambre) et Magnit (aimant) . Pendant une dizaine d'années , globalement pendant les années 60 , les appareils du type Tokamak ont été construits , étudiés et perfectionnés exclusivement en URSS à l'institut Kurchatov de Moscou ⁽³⁾. L'idée a tout de même pu germer dans d'autres pays , mais sans donner lieu à des développements significatifs .

Il a fallu tout d'abord un certain nombre d'années pour vaincre le premier obstacle expérimental qui était la pollution du plasma par interaction avec la paroi de la chambre à vide . Le développement de chambres métalliques satisfaisantes a été long et difficile et il a abouti aux premiers appareils performants TM3 et T3 . Les premiers résultats vraiment marquants ont été obtenus sur T3 avec une température électronique d'environ 1keV et un temps de vie de l'énergie de plusieurs millisecondes⁽³⁾ . Ces résultats ont été communiqués en 1968 . Mais certains spécialistes occidentaux restaient sceptiques et les doutes n'ont pu être levés dans tous les esprits qu'à la suite d'une opération montée par une équipe de physiciens Anglais du laboratoire de Culham⁽³⁾ pour mesurer la température électronique dans T3 par diffusion Thomson . Une équipe de physiciens anglais de Culham a

transporté et installé son matériel auprès de T3 et a pu finalement confirmer les valeurs mesurées de façon plus indirecte par leurs collègues soviétiques . A la suite de ces résultats , l'occident s'est converti brusquement aux Tokamaks .

Besoin énergétique (3)

La production d'**énergie** est un problème que l'homme a rencontré tout au long de son histoire et on observe une continuité remarquable dans sa recherche d'énergies nouvelles , de la conquête du feu jusqu'à la maîtrise de technologies nucléaires très sophistiquées .

Pour apprécier le potentiel énergétique ouvert par la **fusion** , il est bon de préciser l'évolution de la consommation mondiale d'énergie et les ressources offertes par les autres formes d'énergie .

Evolution de la consommation mondiale d'énergie(3)**Tableau I-1**

Prévisions pour l'évolution mondiale

Année	1975	2030	limite
Population (10E9 habitants)	4	8	12
Consommation/tête(kW an/an)	2	3.5	6
Consommation(10E21J/an)	0.25	0.65	2

Le tableau I-1 indique les prévisions pour l'évolution de la population et de la consommation mondiale d'énergie primaire . L'énergie primaire (la seule considérée ici) est la chaleur obtenue en « brulant » les combustibles de base (fossiles , uranium) . Pour une centrale électrique , c'est donc l'énergie thermique produite avant transformation en électricité .

Réserves et ressources pour les principales sources d'énergie⁽³⁾

Le tableau I-2 ci-dessous indique les réserves et les ressources pour les principales sources d'énergie .

Tableau I-2

Réserves et ressources pour les différentes formes d'énergie
(Consommation mondiale au XXI^e siècle : ~1E21J/an)

Type d'énergie	Réserves en années	Ressources en années
Energies Fossiles		
Pétrole	3.8	12
Gaz naturel	2.2	9.9
Total Pétrole+Gaz+huile	6	31
Charbon	18	100-300
Energie Nucléaire		
Fission		
Brûleurs (LWR):Uranium	—	2600
Surgénérateurs	—	50000
Fusion D-T	—	9.6E6
Fusion D-D	1.5E10	1.5E10

Le pétrole et le gaz seront épuisés dans les premières décennies du siècle prochain . Le charbon peut fournir de l'énergie à plus long terme . On sait qu'une stratégie fondée sur des ressources purement fossiles aurait pour effet de **doubler** d'ici à 2050 la concentration atmosphérique du CO₂ ,

provoquant par **effet de serre** une augmentation de la température de 4 °C qui ferait fondre les glaces des pôles ce qui produirait une augmentation catastrophique du niveau de la mer .

Pour la **fission** , les surgénérateurs donnent de l'énergie à très long terme. Le principal inconvénient est lié à la manipulation et au stockage de quantités importantes de matières radioactives .

Le potentiel de l'**énergie solaire** est considérable mais le coût du kWh limite actuellement son développement . Quant aux autres énergies renouvelables , leur potentiel technique est non négligeable à condition de les développer toutes simultanément .

L'énergie de fusion (3):

La réaction utilisée dans les réacteurs de la première génération sera la fusion Deutérium-Tritium . Les véritables combustibles de la fusion D-T sont le deutérium et le lithium .

Le deutérium est abondant dans l'eau de mer (33 g/m³) et peut en être extrait économiquement . Les réserves ainsi constituées sont de 4.6E7 mégatonnes .

Le **lithium** terrestre apparaît sous forme de minerais . Le contenu énergétique du gramme de lithium naturel est de 6 à 18 kWh/g , pour un total de 40 E21 Joules /mégatonne .

Le **lithium** existe cependant dans l'eau de mer sous forme très diluée (0.17 g/m^3) soit 240 000 mégatonnes . Comme on le voit sur le tableau I-2 , l'extraction du lithium de l'eau de mer ou la maîtrise de la fusion D-D ouvrent à l'humanité des perspectives énergétiques véritablement illimitées.

I-2 Programme de recherche

Le Tokamak de Varennes est un projet conjoint de l'Energie Atomique du Canada et d'Hydro-Québec réalisé par l'Institut de Recherche en Énergie d'Hydro-Québec, l'Institut National de la Recherche scientifique , l'Université de Montréal , MPB Technologies et Canatom Inc .

Le Centre canadien de fusion magnétique (CCFM) a un programme de recherche très varié et de niveau international .

Parmis les sujets traités au CCFM , on trouve :

- * La physique du transport pour le plasma central , incluant les impuretés .
- * La physique du plasma de bord , incluant la caractérisation du plasma du divergeur .
- * Mécanismes de production des impuretés à la paroi , des techniques de conditionnement des parois , de l'optimisation des matériaux utilisés pour le divergeur et les **LIMITEURS** .
- * Haute Fréquence (30 à 75 MHz) qui est requis pour l'entraînement de courant et le chauffage du plasma du **TdeV** par résonance cyclotronique électronique (**RCE** , 56 à 140 GHz) .

I-3 Tokamak de Varennes(CCFM) :

Le Tokamak de Varennes permet d'obtenir des données expérimentales de première importance sur le fonctionnement d'un dispositif de fusion , informations qui sont très utiles lors de l'exploitation des réacteurs commerciaux dont l'exploitation est prévue dans une trentaine d'années .

Le **Tokamak de Varennes** produit de longues impulsions de plasma . Ce mode de fonctionnement permet de vérifier le concept de la machine dans les conditions de hautes températures érosives qui sont celles des futures centrales de thermofusion .

I-4 Fusion thermonucléaire contrôlée [3]

I-4-1 Réaction nucléaires

I-4-1-1 Niveau atomique (ou moléculaire)

Tous les atomes sont formés d'un noyau entouré d'un cortège d'électrons répartis sur différentes orbites . La dimension globale d'un atome est de l'ordre de 10^{-10} m et l'interaction entre noyau (chargé positivement) et électrons (chargé négativement) est une interaction électromagnétique .

La mécanique quantique nous apprend que les divers niveaux d'énergie pour un électron gravitant autour d'un noyau sont quantifiés et que les écarts entre ces niveaux sont de l'ordre de l'électron-Volt (1.6×10^{-19} joules) [3]. Dans les réactions chimiques , ce sont ces niveaux d'énergie électroniques qui entrent en jeu . En particulier la production d'énergie par combustion du carbone est une réaction exothermique qui fournit ~ 4 eV par molécule de CO_2 formée [3] .

I-4-1-2 Niveau nucléaire[3] :

Le noyau d'un atome est constitué de deux types de particules : les protons (chargés positivement) et les neutrons (charge nulle) . Ces particules sont appelées des nucléons .

Les nucléons sont regroupés de façon très compacte au sein du noyau

(diamètre environ 10^{-15}m) . La cohésion de ces particules dans ce petit volume est assurée par l'existence d'une force d'interaction à courte portée ($\leq 10^{-15}\text{ m}$) : C'est l'*interaction forte* [3] . Cette force de liaison qui s'oppose à la *force coulombienne* répulsive entre les protons est responsable de la stabilité des noyaux .

Le point important à noter dans le cas du noyau est que la différence entre les niveaux d'énergie permis est toujours de l'ordre de **plusieurs MeV** . L'exploitation de l'énergie potentielle au niveau *nucléaire* permet donc un gain de l'ordre de 10^6 pa rapport à l'exploitation de l'énergie potentielle au niveau *atomique* [3] .

Pour avoir accès dans la pratique à l'énergie interne des noyaux , deux voies d'approche sont envisageables :

1) La *fission* des noyaux lourds (la fission d'un atome d' ^{235}U fournit environ **200MeV**) .

2) La *fusion* de noyaux légers (la fusion d'un atome de deutérium et d'un atome de tritium fournit une énergie de l'ordre de **18 MeV**) .

Une réaction nucléaire faisant passer d'un système de noyaux à un autre où l'énergie moyenne par nucléon est plus faible est donc exoénergétique . Les réactions nucléaires exoénergétiques sont donc les réactions de fusion des noyaux légers en noyaux plus lourds ou de fission des noyaux lourds en fragments plus légers .

La figure I-4-1 montre les réactions nucléaires exoénergétique.

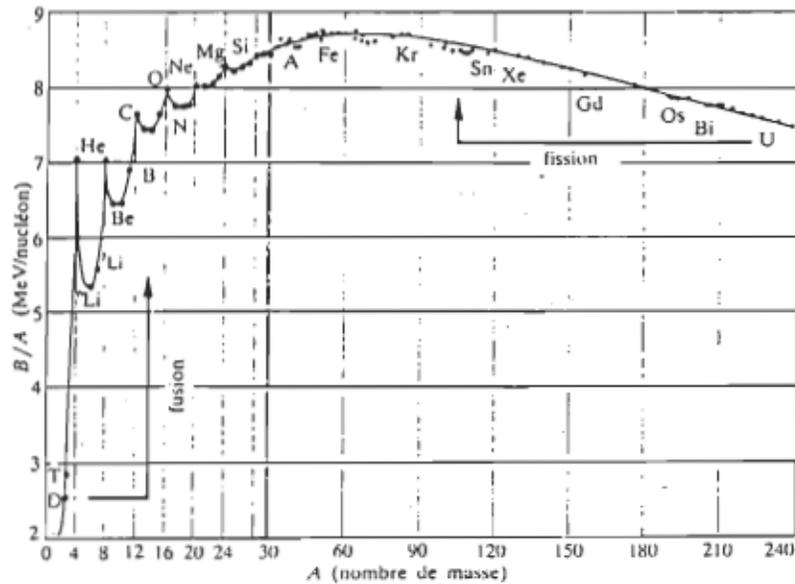


Figure I-4-1[3]

Réactions nucléaires exoénergétiques

* Définition de l'état plasma[3]:

L'état de la matière appelé *plasma* est peu familier sur terre mais répandu dans l'univers et il est souvent appelé le « quatrième état de la matière ». Il complète en effet la chaîne des états de la matière que l'on rencontre à des températures croissantes. Au solide succède le liquide puis le gaz et si on chauffe encore beaucoup plus on arrive à l'état de gaz ionisé ou *plasma*. Pour cela, il faut atteindre des températures telles que les collisions entre atomes ou molécules libèrent leurs électrons et les transforment en ions. Suivant la température, les atomes peuvent être partiellement ou totalement ionisés. Dans cet état se trouvent les étoiles, certaines parties des atmosphères planétaires (l'univers est

constitué de plasma pour plus de 99 %) . Sur terre le plasma n'existe pas à l'état naturel et il ne peut être produit qu'artificielement au moyen de décharge dans les gaz, dont les **tubes luminescents** utilisés pour l'eclairage constituent l'exemple le plus familier .

I-4-2 Fusion des noyaux légers(3) :

Les réactions de fusion qui existent sont nombreuses , mais seules celles qui possèdent une **section efficace** suffisante jouent un rôle dans les réacteurs à fusion . La figure I-4 . 2 montre la variation avec l'énergie de la section efficace totale des principales réactions de fusion des noyaux légers .

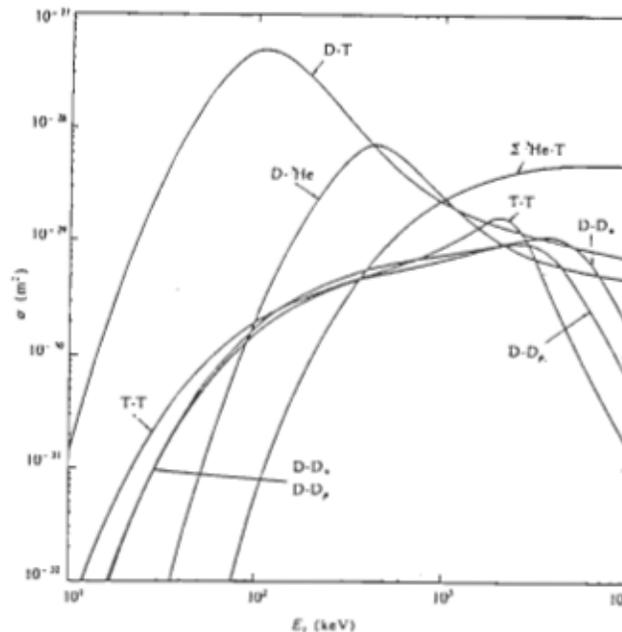


Figure I-4 . 2 (3)

Section efficace en fonction de l'énergie du projectile pour les principales réaction de fusion (le projectile est le premier indiqué) .

Les noyaux qui fusionnent sont chargés positivement et il apparaît entre eux une force de répulsion qui correspond en terme d'énergie d'interaction à une barrière de potentiel (Fig I-4 . 3)[3] . Il est donc nécessaire de donner aux noyaux en interaction suffisamment d'énergie pour vaincre cette barrière.

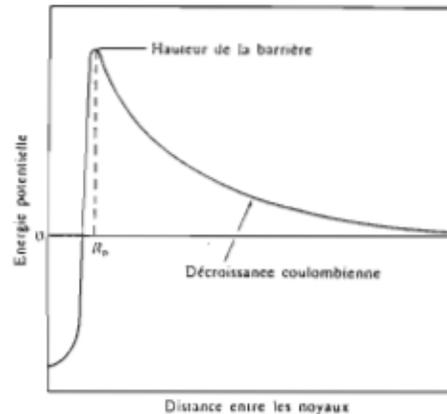


Figure I-4 . 3 [3]

Énergie potentielle d'interaction entre deux noyaux en fonction de leur distance ($R_0 \approx 5 \cdot 10^{-15}$ m , diamètre du noyau)

Alors , le moyen le plus prometteur pour *réaliser la fusion* consiste à porter les composants de la réaction à une *température très élevée* . Pour des températures de l'ordre de 10 keV , soit environ **100 millions de degrés** ($1\text{eV} \approx 11600 \text{ }^\circ\text{K}$) , les probabilités d'interaction sont suffisantes pour que l'on puisse envisager l'exploitation industrielle de certaines réactions de fusion [4]. A ces températures les atomes sont dissociés en ions positifs (noyaux) et électrons . Nous avons alors un plasma qui , compte tenu de sa température , ne peut toucher un mur matériel et doit être , soit en expansion libre , soit isolé des parois par une force de confinement (d'origine magnétique) . Le schéma simplifié de l'utilisation de la fusion comme source d'énergie est donné par le tableau I-4 . 1[3]

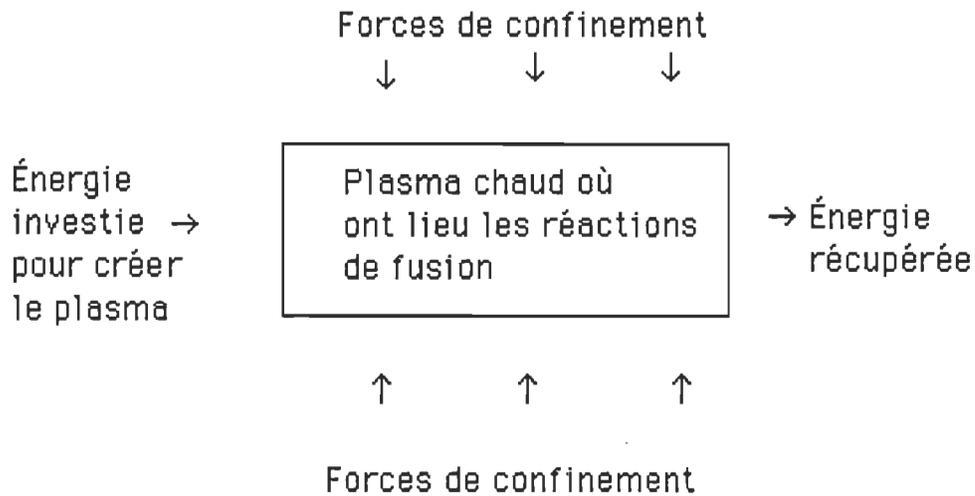


Tableau I-4 . 1

Schéma simplifié de l'utilisation de la fusion

Dans le cas du **Tokamak** , on cherche à réaliser un plasma en équilibre thermique où la source de chaleur est l'énergie des particules chargées de la réaction (piégées par le champ magnétique) et les pertes sont dues à la diffusion de la chaleur et des particules à travers le champ . Un tel plasma (qui est l'équivalent d'une étoile en remplaçant le champs de gravitation par un champ magnétique est dit en *ignition*) .

I-4-3 Fusion contrôlée (4):

En bref , les conditions élémentaires pour obtenir un bilan d'énergie positif pour la fusion thermonucléaire sont :

$$T \sim 10 \text{ à } 20 \text{ keV} \quad [3]$$

$$n \tau_E \geq 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \quad 1-1$$

La deuxième condition (critère de **Lawson**) permet une liberté de choix pour les paramètres du plasma , puisqu'elle ne concerne pas n (densité électronique) et τ_E (temps de confinement) séparément mais seulement leur produit . Après une période de recherches dans plusieurs directions , deux voies d'approche sont révélées comme les plus prometteuses :

I-4-3 . 1 Fusion par confinement magnétique[CCFM] , où la densité est limitée par les méthodes de création du champ magnétique de confinement . En effet , le confinement par un champ magétique d'intensité B n'est possible que si le rapport

$$\beta = 2nKT/(B^2/2\mu_0) \quad 1-2$$

entre la pression cinétique , $p = 2nKT$, et la pression du champ $B^2/2\mu_0$, est inférieur a 1 . En pratique , la valeur de β dans un Tokamak est limitée à quelques pourcentages à cause de l'apparition d'instabilités macroscopiques.

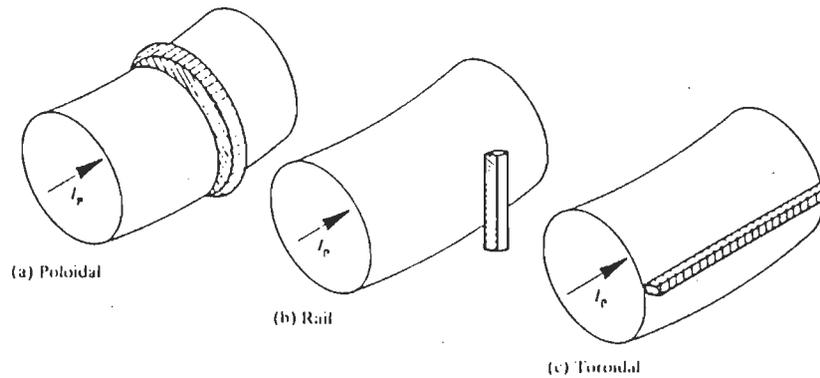
L'intensité maximale des champs pratiquement réalisables est limitée par

des contraintes technologiques et économiques à une dizaine de Teslas , et la température de fonctionnement d'un réacteur de fusion est fixée à quelques dizaines de keV . La limite sur β conduit donc à une limitation de la densité : $n < \beta (B^2/2\mu_0) / 2KT$. En supposant par exemple $B = 10$ Teslas , $T=20\text{KeV}$ et $\beta = 10\%$, on trouve $n < 6 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ [4] . Le problème essentiel de la fusion par confinement magnétique est l'obtention d'un temps de confinement τ_E long , de l'ordre de la seconde ($\tau_E \approx 1$ Seconde) .

I-4-3 . 2 Fusion par confinement inertiel [CCFM] , où l'on se contente d'un temps de réaction extrêmement court ($\sim 10^{-11}$ sec) déterminé uniquement par l'expansion libre de la matière en combustion . La vitesse de cette expansion est limitée par l'inertie de la matière . Pour réaliser l'ignition avec un temps τ_E aussi court , une densité très élevée ($n > 10^{31} \text{ m}^{-3}$) doit être obtenue par compression de la matière combustible .

I-5 Les limiteurs [CCFM] :

Dans tous les **Tokamaks** , il existe un dispositif qui empêche le contact entre le bord du plasma et la surface de la chambre à vide . Dans le TdeV, le limiteur est toroïdal et ceinture le plasma à l'extérieur dans le plan équatorial . Le limiteur n'est pas un anneau complet , mais il est constitué de quatre patins en C disposés régulièrement autour du plasma (voir figure I-5 .1) . Le TdeV est équipé d'un autre moyen pour maîtriser l'interaction du bord du plasma avec les parois de la chambre à vide . Ce moyen est le divergeur (un double divergeur poloïdal fermé) .



(a) Limiteur de type Poloïdal

(b) Limiteur en rail

(c) Limiteur de type Torioïdal

Figure : I-5 . 1[4]

Schéma représentant quelques types de limiteurs

L'impact des particules du plasma sur la surface du patin produit du gaz neutre qui est une source de pollution du plasma . Le nombre des impuretés dans le plasma doit être minimum pour pouvoir augmenter la température du plasma à un niveau thermonucléaire .

Dans l'opération du **Tokamak** , le premier rôle joué par les limiteurs est d'empêcher le contact entre le bord du plasma et la surface de la chambre à vide . Deuxièmement , la forme du limiteur détermine la surface d'interaction avec le plasma . Les métaux du limiteur doivent satisfaire quatre critères .

- * Résister aux chocs thermiques pendant la décharge
- * Produire le minimum possible d'impuretés
- * Les impuretés produites doivent avoir un nombre atomique Z faible
- * Avoir une bonne conductivité thermique pour le transfert de chaleur .

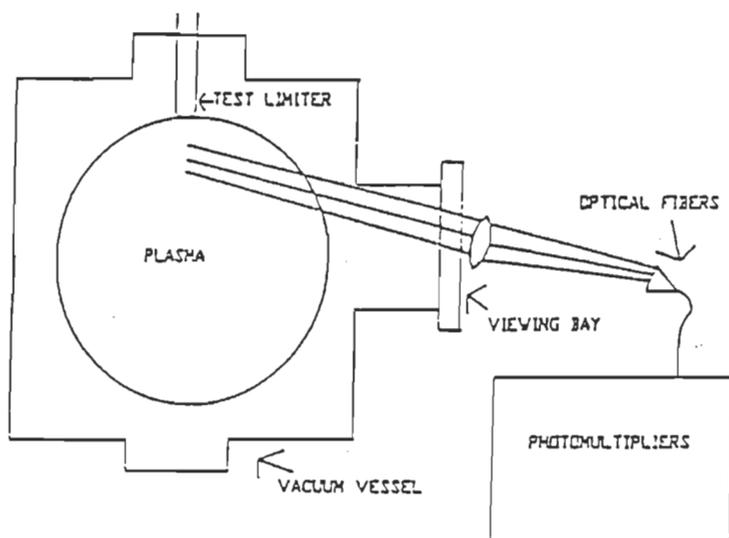
En général , ces critères sont difficiles à obtenir simultanément . Le TdeV s'est équipé d'une superstructure qui porte le limiteur test (LM4 sphérique).

Le limiteur test mobile peut être inséré dans le haut du plasma , et extrait pour l'analyse . Cette technique a été utilisée pour l'étude des trois couches de Carbone de Titane (TiC) en contact avec le plasma . Cela va permettre d'obtenir des revêtements résistant au plasma , donc moins de contamination et d'évaluer la puissance sur les limiteurs .

I-6 Diagnostic (CCFM) :

Un diagnostic optique a été développé au TdeV pour permettre de mesurer le taux de production des atomes de titane sur la surface du limiteur en contact avec le plasma du **Tokamak** . Cela permet de calculer la densité et la température du bord du plasma .

Les propriétés du bord du plasma dans cette région sont définies par la variation spatiale de la densité atomique sur la région du dépôt de puissance .

Vocabulaire Français :

Test Limiter/Limiteur d'essais

Optical Fibers/Fibres Optiques

Viewing Bay/Fenêtre de visionnement

Photomultipliers/Photomultiplicateur

Plasma/plasma

Figure I-6 . 1 [CCFM]

Montage pour le diagnostic optique

La puissance déposée sur la tête du limiteur test est calculée avec le gradient de la température pendant chaque décharge du **Tokamak** relevée avec une série de trois thermocouples .

Résultats[CCFM]

Pour la décharge traitée dans ce rapport , le courant du plasma est maintenu à 200 KA à une densité moyenne de $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$. Cela correspond à une puissance ohmique de 440 kW .

L'émission des atomes de titane du limiteur d'essais est représentée sur la figure I-6 . 2 , on constate que le maximum de la radiation est à-côté de la surface du limiteur en contact avec le plasma .

ÉMISSIVITÉ - POSITION

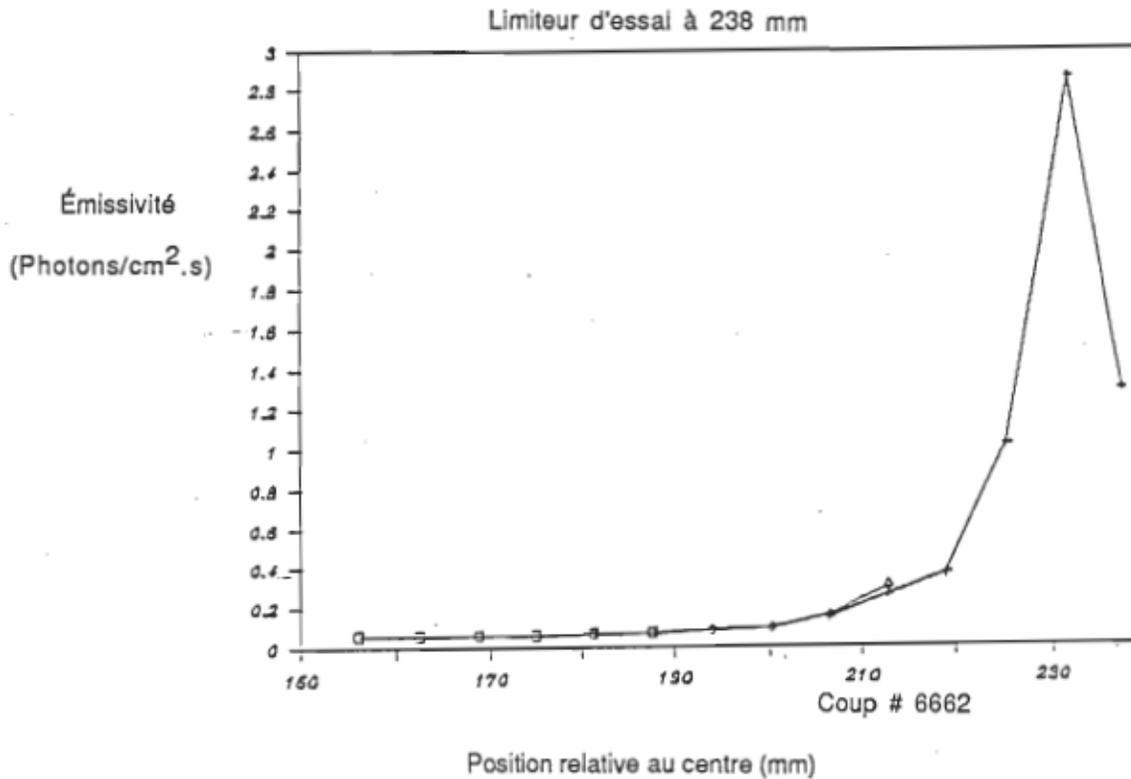


Figure I-6 . 2

La diminution de la densité atomique peut être décrite par :

$$n_a(x) = n_a(0) e^{-x/\lambda_i} \quad 1-3$$

où λ_i est le " mean free path " libre parcours moyen pour l'ionisation des atomes de titane . Alors

$$\lambda_i = \frac{V}{n_e \langle \sigma V \rangle_i} \quad 1-4$$

où V est la vitesse des atomes éjectés , n_e la densité des électrons et $\langle \sigma v \rangle$ est le coefficient du taux d'ionisation . La vitesse moyenne des atomes de titane est de 3×10^5 cm/s . En observant la décroissance exponentielle on

trouve $\lambda_i \approx 5 \text{ mm}$. Sachant que λ_i est très difficile à mesurer on ne peut pas avoir une valeur unique de la densité et de la température .

La densité de puissance déposée sur la tête du limiteur test suit en général une variation exponentielle avec le rayon , avec la longueur caractéristique , λ_p . En tenant compte de la tête hémisphérique , on peut calculer la densité de puissance déposée si on connaît la puissance totale déposée et le rapport du rayon du limiteur par rapport à λ_p . Dans notre cas , $\lambda_p \approx 10 \text{ mm}$ alors la densité de puissance sur le limiteur d'essais calculée est approximativement 3.6 kW/cm^2 . En utilisant le calcul de la densité de puissance et la relation du flux de puissance du plasma sur la surface , on peut développer une relation entre n_e et la température électronique , T :

$$P = K n_e T^{3/2} \quad 1-5$$

où K est la conductivité thermique du limiteur d'essai.

En principe , l'intersection des deux courbes représentant les équations (1-4) et (1-5) détermine n_e et T . Dans ce cas , on trouve une densité de plasma de l'ordre de $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ et une température électronique de 170 eV . Pour ce n_e les valeurs trouvées sont très faibles ; la majorité d'erreur dans ce calcul peut être attribuée à l'interprétation de λ_i (équation (1-4)) . Donc on voit que le diagnostic ne peut donner des valeurs uniques .

I-7 Problèmes des limiteurs :

La puissance produite dans le plasma par chauffage ohmique , par des techniques de chauffage additionnel , ou par réaction de fusion , doit être atténuée au voisinage des parois de la chambre à vide . Il y a deux modes de propagation de puissance :

- * Radiation de la puissance .
- * Transport dans le plasma .

La radiation de puissance entraîne une déposition uniforme. Le transport, par conduction ou convection, résulte par une déposition localisée de puissance sur les limiteurs puisque le transfert de puissance prédominant est le long des lignes de champ. Il est important dans les systèmes de **Tokamak** de grande puissance que les limiteurs résistent à des flux de chaleur intenses. Dans le cas du TdeV, des différents limiteurs cylindriques, sphériques ont été testés avec différentes couches de carbone et de carbure de titane (**TiC**). Les facteurs qui déterminent l'intégrité d'un revêtement du limiteur sont : l'évaporation, érosion de la surface, contamination du plasma, résistance au chocs thermique.

Pendant une courte impulsion ($t \leq 1\text{Sec}$), on peut considérer que le limiteur comme un solide semi-infini, car la puissance sur la surface est initialement équilibrée par la conduction de la chaleur dans le solide. L'accroissement de la température sur le revêtement ΔT due au flux de puissance **P** est donné par :

$$\Delta T = 2 P (t / (\pi K C_p \rho))^{1/2} \quad 1-6$$

où

- K : la conductivité thermique
- C_p : la chaleur spécifique
- ρ : densité du solide

Donc la surface du revêtement en contact avec le plasma doit être maintenue à une température telle que l'évaporation est négligeable .

Pour régler ce problème des limiteurs , l'équipe de recherche du TdeV a effectué des expériences sur les revêtements des limiteurs en (TiC) .

Les objectifs de ces expériences sont :

- * D'étudier le comportement du revêtement en TiC en fonction de son épaisseur .

Sous faisceau d'électrons

- Résistance mécanique

Dans un plasma (limiteur dans le Tokamak)

- Résistance mécanique
- Contamination du plasma
- Puissance du plasma

I-8 Besoin d'un modèle thermique à 3-D

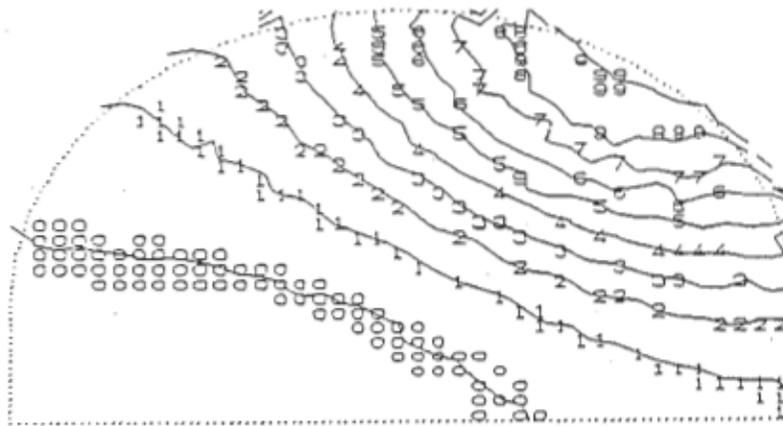
Les résultats de la simulation à 2-D de la distribution de la température dans la tête du limiteur sont présentés à la page suivante (figure I-8 . 1) .

Après 1sec.



0	+3.14E+01
1	+1.62E+02
2	+2.93E+02
3	+4.20E+02
4	+5.54E+02
5	+6.85E+02
6	+8.15E+02
7	+9.45E+02
8	+1.08E+03
9	+1.21E+03

Après 30 sec .



0	+1.77E+00
1	+5.19E+00
2	+8.60E+00
3	+1.20E+01
4	+1.54E+01
5	+1.88E+01
6	+2.23E+01
7	+2.57E+01
8	+2.91E+01
9	+3.25E+01

Figure I-8 . 1

Distribution de la température à 2-D sur le limiteur d'essai

L'épaisseur des revêtements de la tête du limiteur sphérique sont :

- * 204 μm
- * 280 μm
- * 410 μm
- *son rayon est de 35 mm

La simulation à 2-D reproduit la température intérieure en variant l'intensité du flux à la surface . Or , d'après les résultats obtenus par **W.Zuzak** de l'**INRS-Énergie** , la déposition d'énergie sur la surface du limiteur sphérique est d'une forme exponentielle $E = E_0 e^{-\gamma/\lambda}$.

Donc la simulation à 2-D ne peut être exacte , car la distribution du flux sur la surface doit être à 3-D .

En changeant la distribution du flux sur la surface du limiteur , la simulation reproduit l'évolution de la température mesurée par les thermocouples de la tête du limiteur .

Chapitre II

Description du problème

A cause des problèmes associés à l'utilisation des limiteurs de forme cylindrique, l'équipe du TdV a testé trois têtes hémisphériques d'épaisseurs différentes de carbure de titane. Ces trois têtes sont insérées dans un plasma de 200 kA et $3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Des courbes, représentant l'évolution interne de la température due au flux thermique sur la surface du limiteur ont été relevées. On demande de faire la simulation de la distribution de la température sur la surface et l'évolution de la température interne.

II-1 Description du limiteur :

La tête du limiteur est fait d'acier inoxydable # 304 (masse = 1179.2 mg , volume = 154.82 cm^3 , densité = 7.616 mg/cm^3) avec un rayon $R=35\text{mm}$. Trois thermocouples sont insérés près de la surface (figure II-1 . 1) .

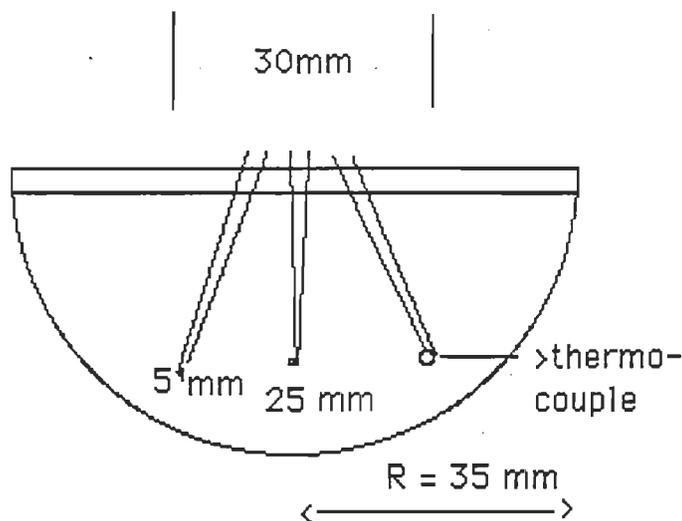


Figure II-1 . 1

Limiteur hémisphérique LM4

La tête du limiteur est recouverte par une couche variable de carbure de titane (TiC), d'épaisseur 204 , 280 , 410 μm .

II-2 Données

II-2 - 1 Propriétés thermique

II-2-1 . 1 TiC

Les valeurs données dans le tableau II-2 .1 sont fournies par Frédérik Bordeaux de l'INRS-Énergie .

TiC [NB : les valeurs données dépendent fortement

des concentrations en carbone dans le dépôt]. La

température de fusion du TiC est de l'ordre de 3100 °C.

Température	Conductivité	Module de Young
T (K)	K (W/mK)	E (N/ μ m ²)
300	31.8	0.486
400	32.6	0.482
500	35.7	0.479
600	35.1	0.476
700	35.8	0.473
800	34.3	0.469
1000	40.2	0.46
1200	40.0	0.45
1400	40.3	0.439
1600	43.8	0.421

Tableau II-2 . 1

Propriétés thermique du TiC

Module de cisaillements : $G = 1.8616 \times 10^{11} \text{ Pa}$

Emissivité : $\epsilon = 0 . 53611 + 7 . 3953 \times 10^{-5} T$ avec T en K

Dilatation thermique :

$\alpha = 5 . 71 \times 10^{-6} + 2.348 \times 10^{-9} T + 7.23 \times 10^{-14} T^2$ avec T(K)

Coefficient de poisson : $\nu = 0.191$

Chaleur spécifique : C_p [J/Kg . K]

$$C_p = 450 + 0.39357 T \quad (\text{J/Kg} \cdot \text{K}^\circ)$$

Conductivité thermique : pour $300 \text{ K} < T < 1300 \text{ K}$

$$K = 28.69 + 0.01038 T \quad [\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}] \quad \text{avec } T \text{ en } \text{K}^\circ$$

Densité : $\rho = 4930 \text{ Kg} / \text{m}^3$

Constant de **Stefan - Boltzman**

$$\sigma = 5.67033 \cdot 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K}^4)$$

II-2-1 . 2 Acier inoxydable

K (W / m . K)				C_p (J / Kg . K)
373°K	773°K	1273°K	1690°K	510
16.2	21.6	25	30	

Tableau II-2 . 2

Propriétés thermiques de l'acier inoxydable

Densité : $7616.6 \text{ Kg} / \text{m}^3$

Conductivité Thermique : $12.29 + 0.010478 T$ avec T (K)

Emissivité : 0.04

II-2-2 Résultats expérimentaux (CCFM) :

Le schéma de la figure II-2 montre le montage pour tester le limiteur sphérique LM4 , dans le plasma du TdeV . En fait, les limiteurs principaux LM3 en forme de C limitent le plasma. Par contre, le LM4 est introduit dans le plasma pour évaluer les chocs thermiques, des différents matériaux, sous forme de revêtement du LM4 . Cela va nous permettre de sélectionner les revêtements des limiteurs qui résistent le plus aux contacts avec le plasma chaud.

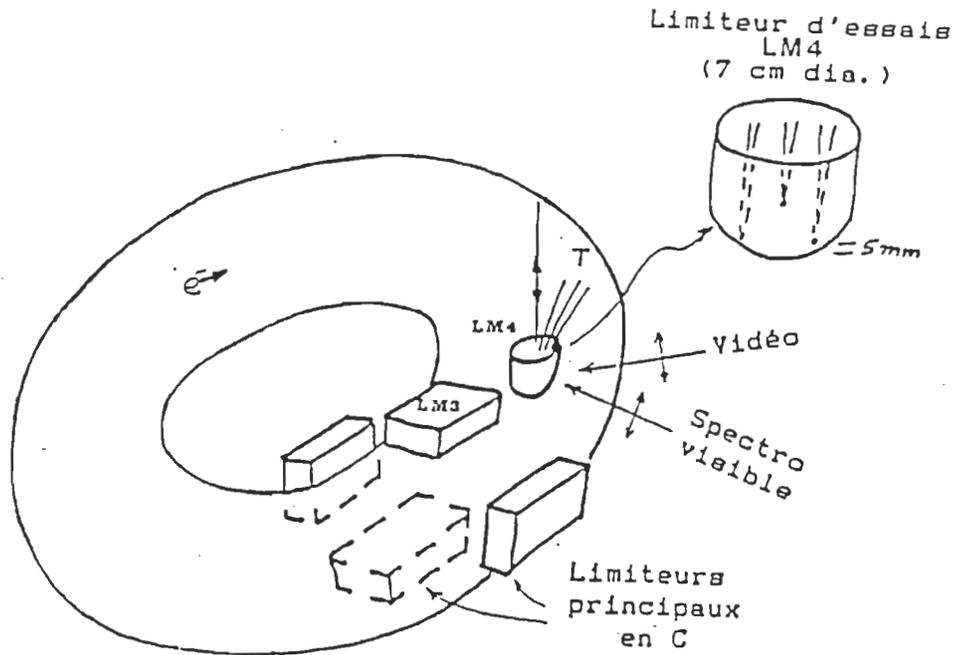


Figure II-2

Montage pour tester le limiteur LM4

Les couches du revêtement du LM4 sont représentées à la figure II-3 , ainsi que la tête elle même .

FABRICATION

TiC projeté par plasma sous atmosphère d'argon

Substrat en Inconel 625

Tête hémisphérique (7 cm dia.)

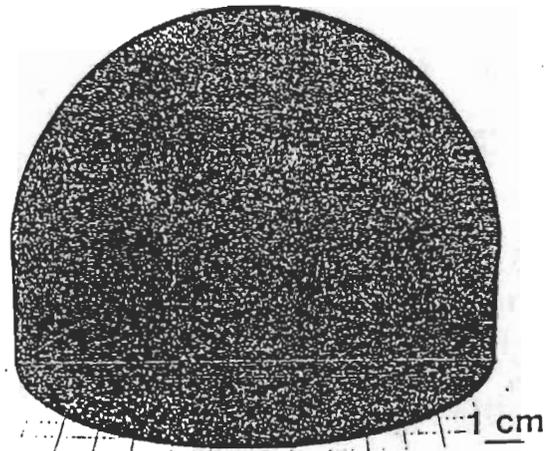
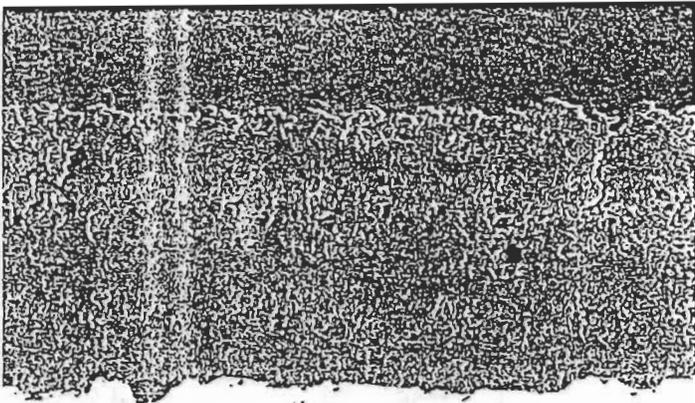


Figure II-3

Couches du revêtement du LM4

Le tableau II-3 résume les essais sur le limiteur Hémispherique. Pour des impulsions de durée variable avec un Canon e⁻ ou comme limiteur dans le Tokamak , la puissance absorbée par le LM4 et les dommages causés au revêtements du LM4 .

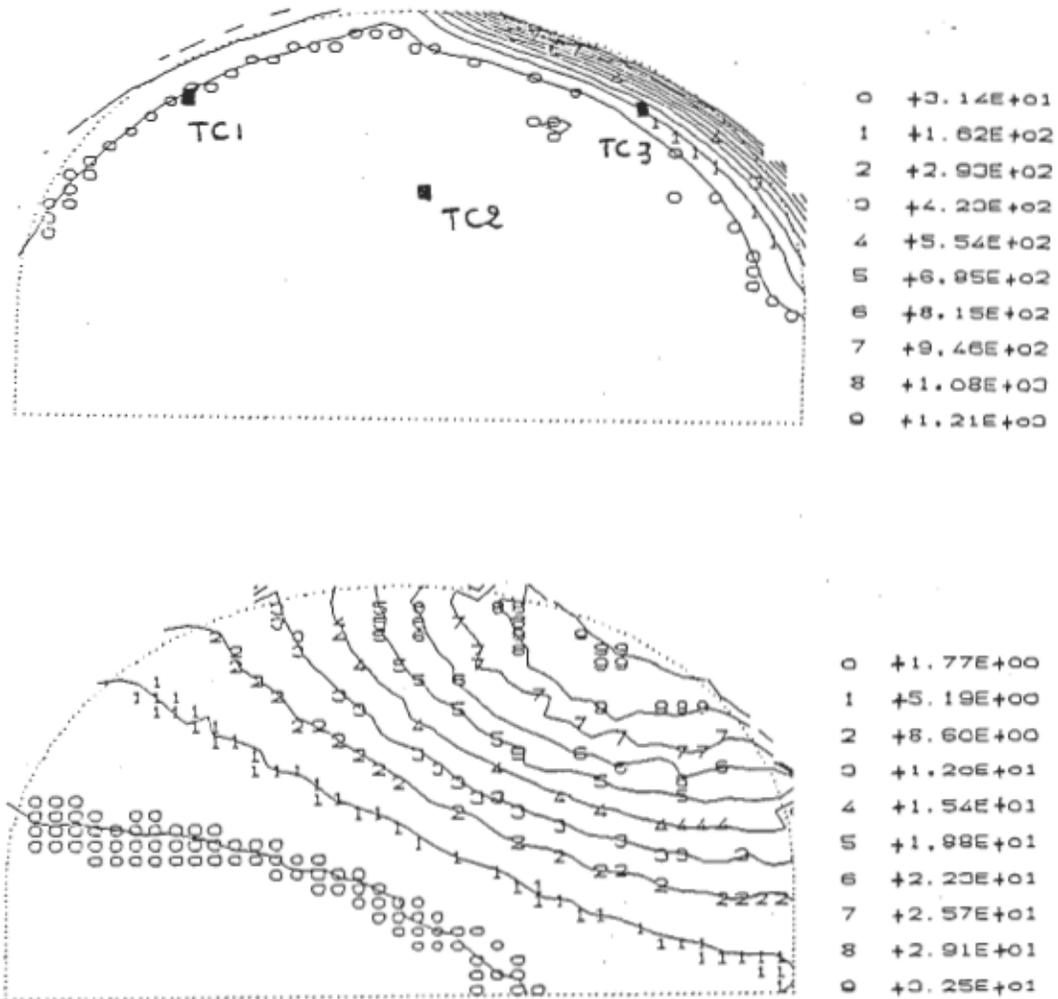
	ESSAIS CANON e ⁻					ESSAIS TOKAMAK			
PROJECTION — Epaisseur Tic (μ m)	100	220	400		550	204	270	410	
Atmosphère	Air	Air	Argon		Air	Argon	Argon	Argon	
IMPULSION — Durée (ms)	500	500	100	500	100	500	800	800	
Puissance (kW/cm ²)	1.5	1.5	1.5	2.0	2.5	1.5	1.5 2.5	1.6 2.1	1.0 1.9
Nombre	50	15-27	5	50	10	6	17 1	9 1	5 3
DOMMAGES	1	2	3		2	4	5	6	

Tableau II-3

Essais sur le limiteur hémishérique

- 1 Petites fissures
- 2 Macrofissures , fusion de la surface
- 3 Légère décoloration , fissures de surface
- 4 Macrofissure , fusion du substrat
- 5 Microfissures
- 6 Micofissure, macrofissure et écaillage

Les résultats de la simulation à 2-D d'un coup Tokamak sont montrés dans La figure II-4 .



TC1 : Thermocouple 1

TC2 : Thermocouple 2

TC3 : Thermocouple 3

Figure II-4

Résultats de la simulation à 2-D d'un coup Tokamak

La figure II-5 montre la puissance déposée sur le limiteur d'essais .

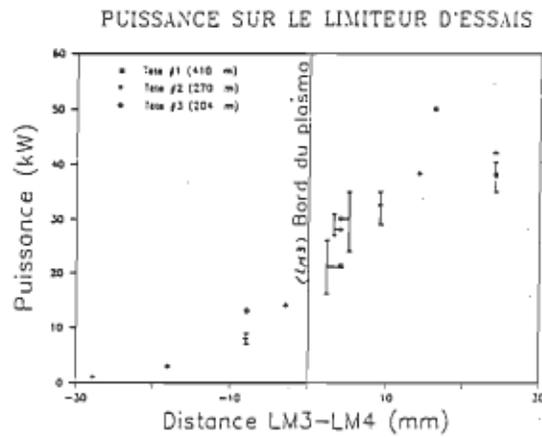


Figure II-5

Puissance déposée sur le LM4

La figure II-6 montre la température du limiteur d'essais pour un **coup tokamak**

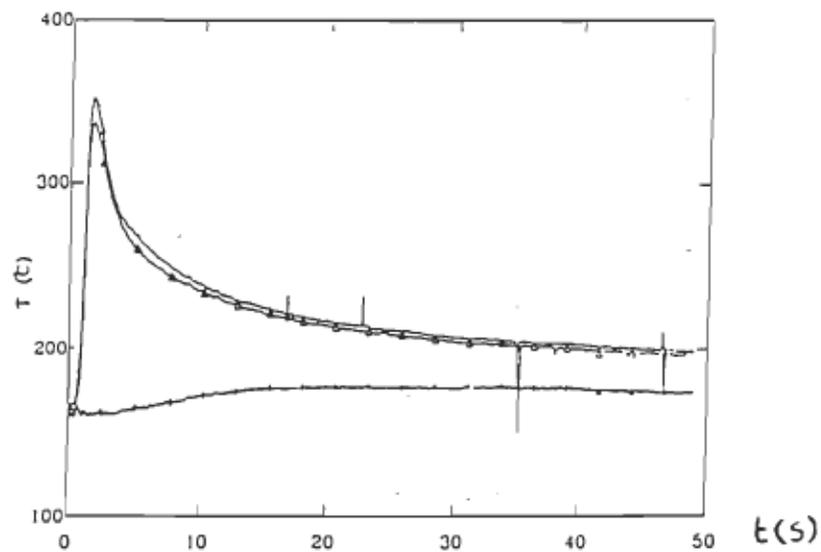
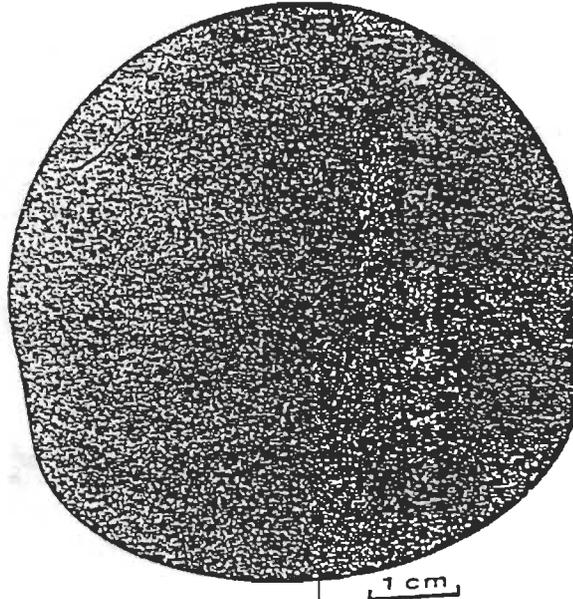


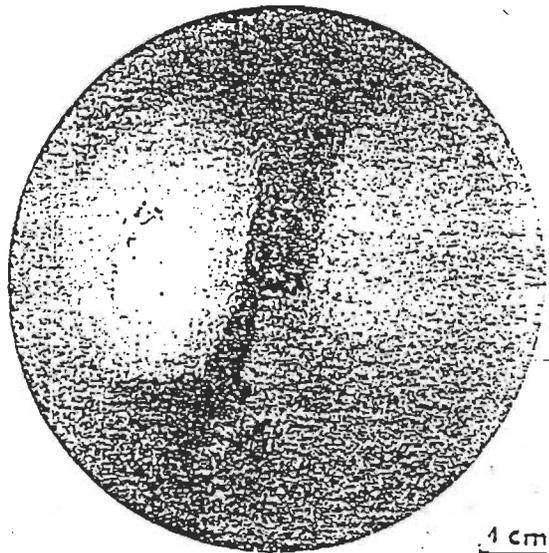
Figure II-6

Température intérieur du LM4 pour un **coup tokamak**

La figure II-7 montre les photos du limiteur avec un revêtement de $204 \mu\text{m}$ et $410 \mu\text{m}$ après un coup Tokamak ($t \approx 0.77 \text{ sec}$).



$204 \mu\text{m}$



$410 \mu\text{m}$

Figure II-7

Photos du LM4 après un coup tokamak

II-3 Coup tokamak

Le **coup tokamak** est en fait une impulsion de courant induit dans le plasma . Dans le cas du **TdeV** le coup est d'une durée d'environ 1seconde . La figure II-8 montre l'amplitude du courant I_p dans le plasma pendant un coup tokamak .

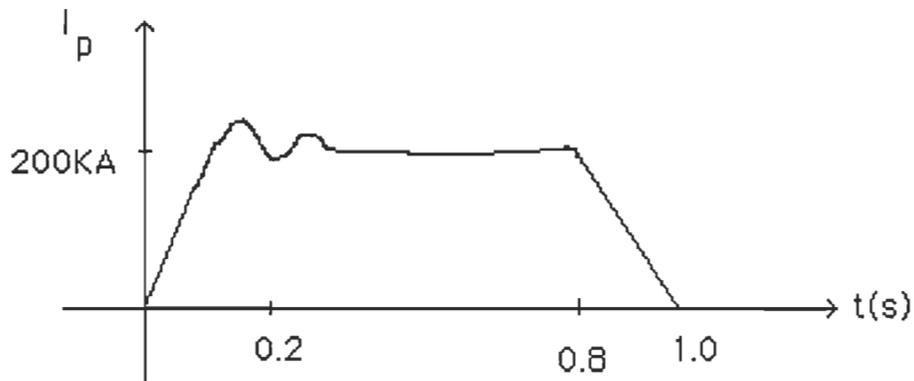


Figure II-8

Courant I_p dans le plasma lors d'un coup tokamak

Chapitre III

Étude analytique

L'étude analytique du problème du limiteur nécessite l'emploi de certaines hypothèses et la définition des conditions aux limites du problème.

III-1 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur peut être défini comme une transmission d'énergie d'une région à une autre causant une différence de température entre eux . La littérature du transfert de chaleur reconnaît qu'il y a trois différents mode de transmission de la chaleur : *Conduction* , *Radiation* et *Convection* . Seulement , les modes *conduction* et *radiation* sont classés comme transfert de chaleur , car ils dépendent seulement de l'existence d'une différence de température . Le mode de transfert par *convection* ne répond pas à la définition du transfert de chaleur seulement , car il dépend également du transfert de masse . La transmission d'énergie se fait d'une région à haute température à une autre à basse température .

III-1-1 Conduction :

La conduction est un processus par lequel le flux de chaleur passe d'une région à haute température à une autre à basse température dans un milieu (solide , liquide , ou gaz) ou entre différents milieux en contact physique direct .

III-1-2 Radiation :

La radiation est un procédé par lequel le flux de chaleur passe d'un corps à haute température à un corps à basse température où les deux corps sont séparés par un espace vide . Le terme " radiation " est généralement utilisé pour les ondes électromagnétiques . Donc l'énergie est transmise par radiation .

III-1-3 Convection :

La *convection* est un processus par lequel le transfert d'énergie se fait par la combinaison de l'action de la conduction de chaleur , le stockage d'énergie, et un mélange de mouvement (transfert de masse) .

III-2 Équations de la chaleur :

Soit l'équation de la chaleur en coordonnées cartésiennes [6] :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{K} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3-1$$

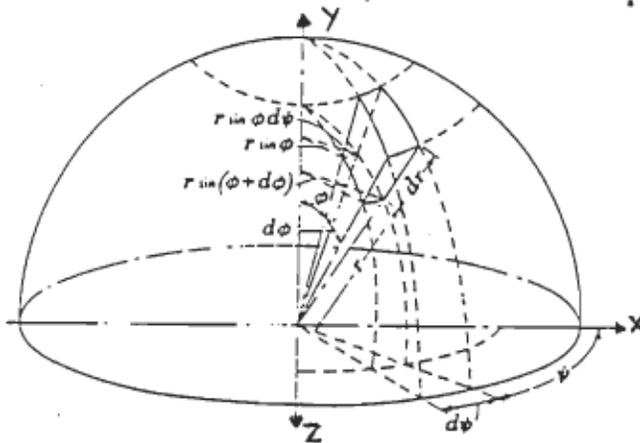
où la constant $a = K / (\rho C_p)$ est appeler la diffusibilité thermique en m^2/s .

Si le système ne contient pas de source interne de chaleur alors on a :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3-2$$

En coordonnées sphériques (Figure III-2), l'équation générale de conduction de la chaleur devient :

$$\frac{1}{r^2} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{q}{K} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3-3$$



$$x = r_1(\phi, \psi) = r \sin \phi$$

$$y = r_2(\phi, \psi) = r \cos \phi$$

$$z = r_3(\phi, \psi) = r$$

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \sin \phi$$

$$\frac{\partial z}{\partial r} = 1$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial x}$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \cos \phi$$

Figure III-2

Coordonnées sphériques

III-3 Hypothèses :

Pour faciliter l' étude du problème du limiteur , il faut certaines hypothèses . En fait , le problème réel est complexe à résoudre car :

- * La distribution du flux de chaleur n'est pas constante et elle est le long des lignes de champ .
- * C'est un solide composite (Tic et Acier #304)
- * La conductivité thermique K dépend de la température
- * La chaleur spécifique C_p dépend de la température
- * Il y a combinaison de la conduction et la radiation de la chaleur
- * Il y a présence d'un flux du côté électronique et du côté ionique .

Donc le problème réel est un problème **non linéaire** et **asymétrique** de transfert de chaleur qui nécessite une **analyse numérique** transitoire à 3-D .

Les données du problème sont montrées dans la figure III-3 .

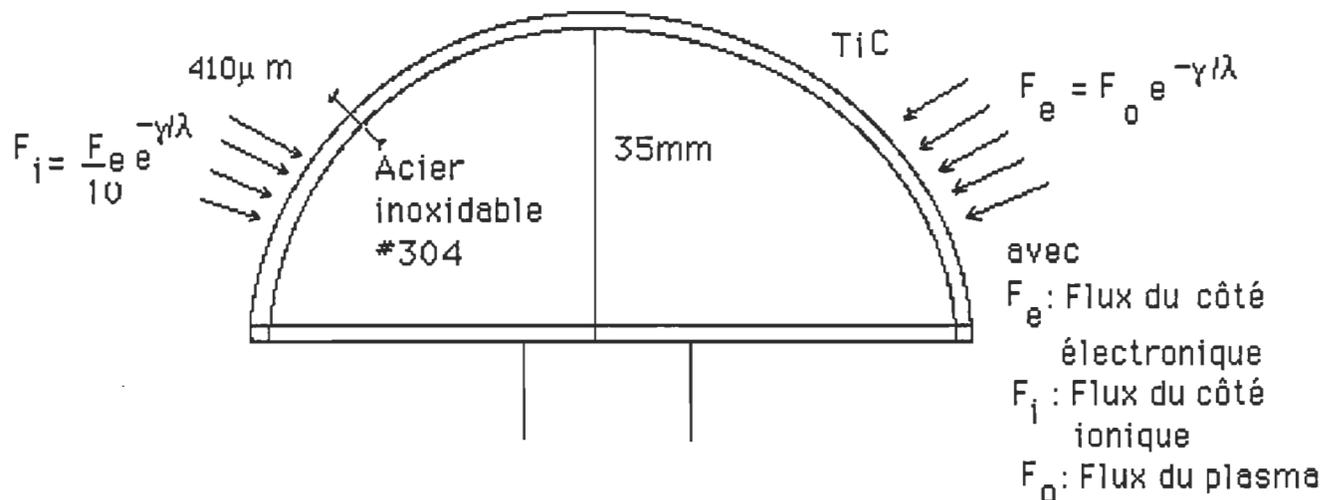


Figure III-3

Données du problème de LM4

Hypothèse No 1

Puisque le flux du côté électronique est dix fois plus fort que celui du côté ionique , alors on néglige ce dernier .

Hypothèse No 2

L'impulsion de courant I_p est d'une durée d'une seconde avec un temps de montée $t_m \approx 125$ ms , un temps de descente $t_d \approx 125$ ms et un plateau de 750 ms . On peut négliger t_m et t_d pour l'étude analytique et considérer que I_p est constant avec une durée d'une seconde . Donc , le flux F_0 sera constant .

Hypothèse No3

L'analyse est faite pour un temps $t = 1$ seconde , alors on peut considérer la tête du limiteur d'essai comme un solide *semi-infini* , puisque la puissance déposée sur la surface est initialement dissipée par la conduction de la chaleur dans le solide .

Hypothèse No 4

L'influence du support de la tête du limiteur est négligeable sur la distribution de la température à la sur la surface de la tête . Donc l'analyse est limitée à la tête elle même .

Hypothèse No 5

Pour simplifier le calcul analytique , on suppose que la tête soit composée d'un seul métal ; de l'acier inoxydable #304 avec

la conductivité thermique , $K = \text{constante}$

la chaleur spécifique , $C_p = \text{constante}$

à une température initial , $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{K}$

III-4 Solution :

Le solide est semi-infini . Le flux de chaleur est fonction du temps à $x=0$.
On suppose que **la température initiale soit nulle** pour simplifier les équations de transfert de chaleur .

Soit F_0 un flux constant par unité de temps et de surface . Alors le flux peut s'écrire comme suite :

$$f = - K \frac{\partial T}{\partial x} \quad 3-4$$

avec $K = a \rho C_p \quad 3-5$

où K : conductivité thermique

a : diffusivité thermique

C_p : Chaleur spécifique

ρ : Densité du solide

Le flux f doit satisfaire l'équation différentiel

$$K \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial f}{\partial t} , x > 0 , t > 0 \quad 3-6$$

Soit la fonction d'erreur

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx \quad 3-7$$

avec $\operatorname{erfc}(\infty) = 1$, $\operatorname{erfc}(x) = -\operatorname{erfc}(x)$,

et $\operatorname{ierfc}(x) = (1/\sqrt{\pi}) e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x)$,

où $\operatorname{ierfc}(x)$ est l'**integral** de la fonction d'erreur

La solution de l'équation 3-6 avec

$$f = F_0 = \text{Flux constant} , x = 0 , t > 0 \quad 3-8$$

est :

$$f = F_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad 3-9$$

alors , de l'équation 3-4 , en utilisant l'appendice (II de la référence I , et les équations (10) et (11) :

$$T = \frac{F_0}{K} \int_x^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} dx \quad 3-10$$

$$T = \frac{2F_0 \sqrt{at}}{K} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad 3-11$$

$$\Rightarrow T = \frac{2F_0}{K} \left\{ \left(\frac{at}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\frac{x^2}{4at}} - \frac{x}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \right\} \quad 3-12$$

La table des valeurs de la fonction $\operatorname{ierfc} x$ (intégrale de la fonction d'erreur de x) est donnée à annexe 7 .

La température sur la surface du limiteur au centre est :

$$T(x=0) = \frac{2F_0}{K} \left(\frac{at}{\pi} \right)^{1/2}$$

Application numérique:

pour $C_p = 510 \text{ (J/Kg . K)}$

$K = 30 \text{ (W/ m . K)}$

$\rho = 7616.6 \text{ Kg / m}^3$

$t = 1 \text{ S}$

$\Rightarrow a = K / (\rho C_p) = 7.723 \cdot 10^{-6}$

le terme $\left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{7.723 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{\pi} \right)^{1/2} = 1.5679 \cdot 10^{-3}$

avec un flux F de 12 MW/m^2

On trouve $\Delta T(x=0) = 1254 \text{ }^\circ\text{C}$

Ce qui est satisfaisant pour un calcul analytique approché .

III-5 Suggestion de la méthodologie :

Il est clair d'après l'étude analytique du problème que la solution analytique est réservée particulièrement à des problèmes linéaires avec une géométrie simple . Pour des corps de formes compliquées , chargement non-symétrique , ou des conditions aux limites non-linéaires , il est sûr qu'une méthode numérique est plus appropriée .

Pour un problème donné , la première étape dans la détermination du système des flux et des gradients de la température consiste à définir des équations régissant la solution et qui prescrivent , la satisfaction des conditions d'équilibre et de compatibilité . Une difficulté majeure , mis à part la résolution des équations choisies , réside dans leur aptitude à représenter fidèlement les conditions réelles , c'est-à-dire toutes les complexités pouvant intervenir dans la géométrie , le chargement , et les propriétés intrinsèques des matériaux constituant le solide .

Après cette première difficulté et les approximations qui en découlent , la deuxième difficulté est la résolution des équations . Lorsque le problème est à 2-dimension ou 3-dimension , il s'agit d'équations aux dérivées partielles . Il est bien rare que la solution exacte en soit connue , il faut donc disposer d'un grand nombre de termes pour obtenir une solution précise . Heureusement , l'apparition des ordinateurs nous a permis de résoudre les équations aux dérivées partielles , et les solutions numériques sont aujourd'hui accessibles .

Il y a la méthode des différences finies , par laquelle l'équation différentielle est approchée à l'aide de valeurs discrètes des variables en un certain nombre de points .

La méthode des **éléments finis** , en revanche , est une méthode où on peut exprimer le comportement de tout le solide à l'aide d'une équation différentielle unique , la méthode des éléments finis ne constitue , avec la représentation en série et les différence finies , qu'un des procédés possibles de résolution approchée de cette équation . Mais si le solide est hétérogène , constitué d'un certain nombre de domaines répondant chacun à une équation différentielle distincte , alors seule la méthode des *éléments finis* est applicable directement .

Chapitre IV

IV Méthode des éléments finis^[2] :

La méthode des *éléments finis* est essentiellement un procédé qui permet de faire l'approximation d'un continu possédant un nombre infini de degrés de liberté par un assemblage de sous-régions (ou éléments) comportant chacun un nombre fixé , mais cette fois fini , d'inconnues . De plus, chacun de ces éléments est en liaison avec les autres .

IV-1 Concept d'élément fini^[2] :

Les problèmes de physique appliquée qui se posent à l'ingénieur peuvent être formulés de deux manières différentes : ou bien on pose les équations différentielles définissant le comportement d'un domaine infinitésimal typique , ou bien on postule un principe variationnel valable sur tout le domaine étudié , la solution correcte étant celle qui minimise une quantité χ définie par intégration convenable des inconnues sur tout le domaine étudié .

Une integrale telle que χ , fonction de fonctions inconnues , porte le nom de *fonctionnelle* . La méthode des éléments finis , effectue directement une minimisation approchée de la fonctionnelle .

La formulation physique du problème nécessite la minimisation de la fonctionnelle χ [1] définie comme une integrale sur le volume V et une partie de sa limite S , dans laquelle intervient la fonction inconnue $\{ \phi \}$ et ses dérivées , c'est-à-dire :

$$\chi = \int_V f(\{\phi\}, \frac{\partial}{\partial x} \{\phi\} \dots) dv + \int_S g(\{\phi\}, \frac{\partial}{\partial x} \{\phi\} \dots) ds \quad 4.1$$

Supposons le domaine divisé en domaines plus petits , ou sous-régions , que nous appelons **éléments** , et supposons que la fonction que l'on veut déterminer puisse , dans chaque élément , être mise sous la forme suivante [1] :

$$\{\phi\} = [N] \{\phi\}^e \quad 4.2$$

où $\{\phi\}^e$: Valeurs nodales de la fonction associée à l'élément

[N] : Fonctions de pondération (coordonnées)

Pour minimiser la fonctionnelle χ par rapport à tous les paramètres $\{\phi\}$ associés au domaine entier , il faut écrire le système d'équations [1]

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{\phi\}} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \chi}{\partial \phi_1} \\ \frac{\partial \chi}{\partial \phi_2} \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right\} = 0 \quad 4.3$$

$$\chi = \sum \chi^e \quad 4.4$$

Utilisant l'équation (4.4) , chaque équation du système peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial \chi}{\partial \phi_n} = \sum \frac{\partial \chi^e}{\partial \phi_n} \quad 4-5$$

où la sommation est étendue à l'ensemble des éléments .

La figure 4-1 montre le limiteur à 3-D subdivisé en *éléments finis* .

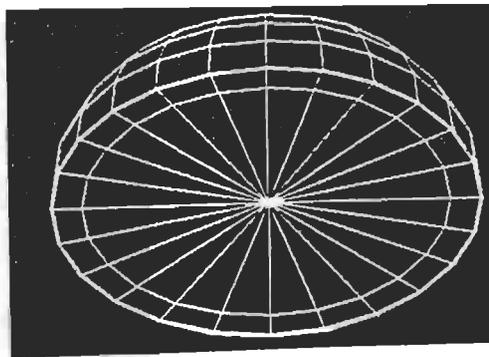
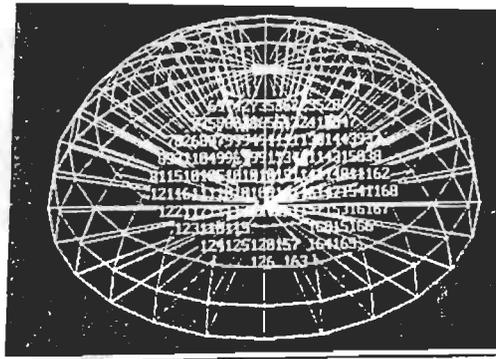


Figure 4-1

Division à 3-D du LM4 en éléments finis

V-2 Critères de convergence^[1] :

La fonction d'approximation définie par l'équation (4.1) doit obéir à certaines règles de convergence des résultats lorsque l'on réalise une subdivision en éléments de plus en plus petits .

Critère n° 1 : Premièrement les fonctions de pondération $[N]$ de l'élément doivent être telles que , par un choix convenable des $\{ \phi \}^e$, toute valeur constante de $\{ \phi \}$ ou de ses dérivées , dans χ puisse être obtenue , à la limite , lorsque la taille des éléments tend vers zéro .
Deuxièmement , $\chi = \sum \chi^e$ doit être préservée , et , pour tenir compte des frontières communes entre éléments , avec f et g finis . Ceci est vrai si les dérivées de plus haut rang de ϕ sont finies , ce qui conduit au :

Critère n° 2 : Les fonctions de pondération $[N]$ de l'élément doivent être choisies de telle sorte que $\{ \phi \}$, et toutes ses dérivées jusqu'à (n-1) de l'expression de f et g qui définissent la fonctionnelle , soient continues aux interfaces des éléments .

Ce critère peut s'expliquer simplement si l'on imagine les éléments séparés par une couche mince qui doit être prise en compte dans les intégrales définissant χ , et dans laquelle se réalise une transition régulière de la fonction inconnue entre les valeurs qu'elle prend sur les éléments adjacents .

Une telle zone fictive de transition entre deux éléments est montrée à la figure (4.2) , χ étant la fonction de la fonction inconnue et x est la position

local selon l'axe x . La continuité de ϕ seule suffit à assurer que la zone comprise entre les éléments est sans contribution sur χ , à condition que la fonctionnelle ne contienne que la dérivée première de ϕ . Si, par contre, elle contient des dérivées secondes, alors χ sera indéterminée (résultant du produit d'une quantité infinie par une surface nulle), ainsi la validité de l'équation (4.4) ne pourrait plus être garantie .

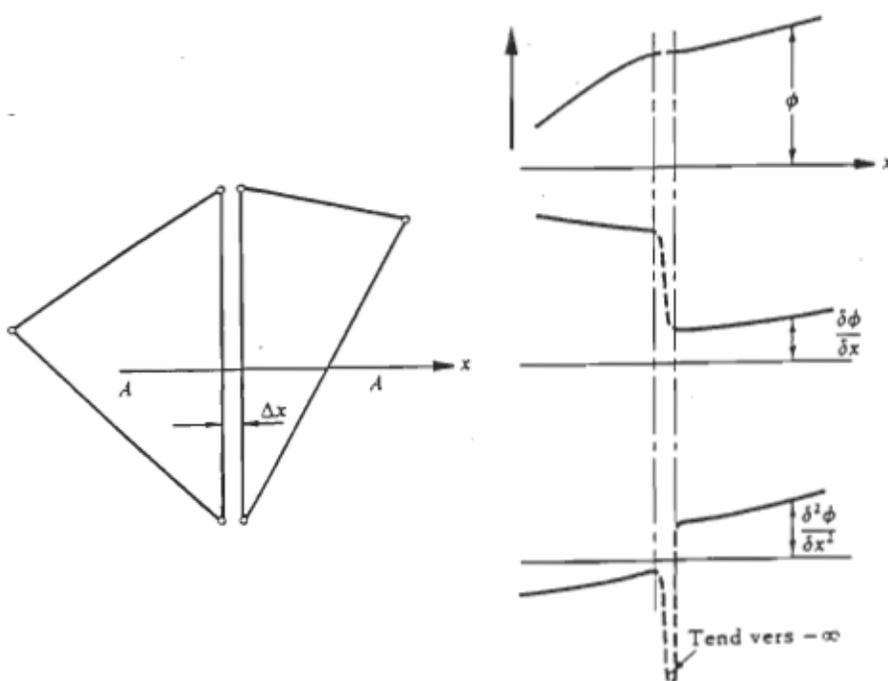


Figure 4-2 [1]

Zone de transition entre deux éléments

Les erreurs commises dans la détermination de la vraie valeur de χ disparaissent quand la taille des éléments devient infiniment petite .

IV-3 Problème de l'extrémum^[1] :

L'équation générale « quasi-harmonique » régissant le comportement en régime permanent d'une quantité physique inconnue , ϕ , peut être écrite sous la forme [1] :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \phi}{\partial z}) + Q = 0 \quad 4.6$$

ϕ est la fonction inconnue que l'on suppose définie de manière unique en tout point du domaine , K_x , K_y , K_z et Q sont connues .

Dans notre cas , on a un problème de transmission de chaleur , alors K_x , K_y , K_z sont les coefficients anisotropes de conductivité , Q est la quantité de chaleur émise par unité de temps , et la fonction inconnue ϕ est la température (T).

Il y a **deux** types de conditions aux limites :

(a) la valeur de ϕ sur la limite est imposée

$$\phi = \phi_\beta \quad 4.7$$

ou

$$(b) \quad K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} L_x + K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} L_y + K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} L_z + q + \alpha \phi = 0 \quad 4.8$$

où L_x , L_y et L_z sont les cosinus directeurs de la normale extérieure à la surface .

Pour un solide isotrope $K_x = K_y = K_z$ et si q et α sont nuls , l'équation 4.8 se réduit à

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{limites non conductrices} \quad * 4.9$$

Dans le cas de la transmission de chaleur , q représente le **flux** de chaleur par unité de surface et $\alpha\phi$ les **pertes** par convection où α représente le coefficient de transfert de chaleur et ϕ représente la température.

D'une manière plus simple on peut définir le problème en employant le calcul des variations . Selon **Euler [1]** , étant donné l'intégrale

$$\chi(\phi) = \iiint_V f(x,y,z,\phi, \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z}) dx dy dz \quad 4.10$$

que l'on veut minimiser dans un solide de volume V , la condition nécessaire et suffisante pour que ce minimum soit atteint est que la fonction inconnue $\phi(x,y,z)$ vérifie l'équation différentielle suivante **[1]** :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial f}{\partial (\frac{\partial \phi}{\partial x})} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial f}{\partial (\frac{\partial \phi}{\partial y})} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\partial f}{\partial (\frac{\partial \phi}{\partial z})} \right\} - \frac{\partial f}{\partial \phi} = 0 \quad 4.11$$

Pour avoir cette équation sous la forme générale (4.6) , il suffit de minimiser l'intégrale de volume suivant :

$$\chi = \iiint \left[\frac{1}{2} \left\{ K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} - Q\phi \right] dx dy dz \quad 4.12$$

Les conditions de type (a) ne causent pas de problèmes , les conditions de type (b) causent des difficultés quasi insurmontables .

Pour résoudre ce problème , il suffit de n'imposer aucune contrainte à la fonction sur les limites où la condition (b) doit être satisfaite , aussi il faut ajouter à la fonctionnelle (4.10) une autre intégrale étendue aux portions de la limite du solide dont la minimisation conduit **automatiquement** à la condition recherchée .

Si on applique l'équation d'**Euler**(¹) , l'intégrale (4.12) se réduit à

$$\int_S \left(q \phi + \frac{1}{2} \alpha \phi^2 \right) ds \quad 4.13$$

où S est la surface sur laquelle s'applique la condition (b) . Cette integrale est ajoutée à l'équation (4.12) qui est la fonctionnelle . On trouvera dans l'annexe 6 de la référence 1 , plus de détails sur cette forme très générale de l'**équation d'Euler** .

IV-4 Discrétisation en élément finis [1] :

*** Problème à trois- Dimensions :**

Pour des problèmes de transfert de chaleur la **fonction inconnue** ϕ est la température T , T est définie élément par élément par la relation

$$T = [N_i, N_j, \dots] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ \vdots \end{Bmatrix} = [N] \{T\}^e \quad 4.14$$

où $[N]$ est une matrice ligne

$\{T\}^e$ est une matrice colone

et T_i , etc., sont les paramètres nodaux, il est possible d'effectuer une minimisation approchée.

On évalue la contribution de chaque élément en utilisant les relations 4.12 - 4.14. Pour chaque noeud on peut écrire, par différentiation des expressions (7) et (8) :

$$\frac{\partial \chi^e}{\partial T_i} = \int_{V^e} \left\{ k_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q \frac{\partial T}{\partial T_i} \right\} dx dy dz$$

$$+ \int_{S^e} \left(q \frac{\partial T}{\partial T_i} + \alpha \phi \frac{\partial T}{\partial T_i} \right) ds \quad 4.15$$

La seconde intégrale n'existe que si une frontière de l'élément coïncide avec une partie de la limite extérieure sur laquelle les conditions de type (b) sont appliquées.

Soit

$$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial N_i}{\partial \mathbf{x}}, \frac{\partial N_j}{\partial \mathbf{x}}, \dots \right] \{\phi\}^e, \text{ etc.}$$

et

$$\frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial N_i}{\partial x}, \quad \frac{\partial T}{\partial T_i} = N_i, \quad , \text{etc.} ,$$

pour tout élément .

$$\frac{\partial \chi^e}{\partial \{T\}^e} = [h]^e \{T\}^e + [F]^e \quad 4.16$$

où $[h]^e$ est obtenue à partir des équations 4.14 et 4.15

$$h_{ij}^e = \int_{V^e} \left\{ k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} dx dy dz \quad 4.17$$

et , en posant $dV = dx dy dz$,

$$F_i^e = - \int_{V^e} Q N_i dv + \int_{S^e} q N_i ds + \left(\int_{S^e} [N] \alpha N_i ds \right) \{\phi\}^e \quad 4.18$$

Le système d' équations de minimisation devient :

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{\phi\}} = 0 = [H] \{\phi\} + \{F\}$$

$$\text{avec } H_{ij} = \sum h_{ij}^e \quad F_i = \sum F_i^e$$

La figure 4-3 montre la division en éléments finis du limiteur hémisphérique à 3-D .

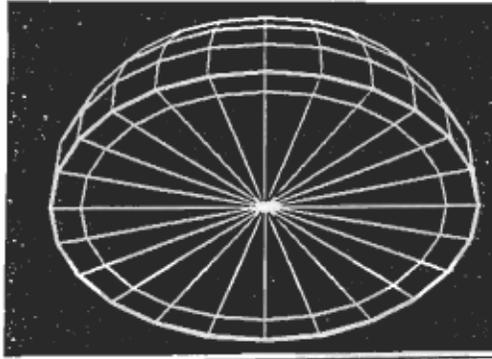


Figure 4-3

Division en éléments finis à 3-D du LM4

IV-5 Analyse transitoire :

Soit l'équation quasi-harmonique à 3-D , dans laquelle interviennent les dérivées par rapport au temps de la fonction inconnue T [1] :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial T}{\partial z}) + Q - \mu \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 4.19$$

où $K_x = K_x(t)$, $\mu = 1/a$ (a : diffusivité thermique)

$Q = Q(t)$, et c .

Si l'on considère cette configuration à un instant donné , $\partial\phi/\partial t$ ainsi que tous les paramètres physique du solide (K , ρ et C_p) peuvent être traités comme des fonctions fixes des coordonnées d'espace .

Si on pose

$$T = [N(x, y, z)] \{T\}^e \quad 4.20$$

Pour chaque éléments , on obtient par assemblage un système d'équations sous la forme :

$$[H]\{T\} + \{F\} = 0 \quad 4.21$$

Les contributions de chaque élément aux matrices précédentes sont définies par la relation 4.18 . Après développement des divers termes de $\{F\}$ (référence no 3) et assemblage du système , on obtient l'**équation différentielle matricielle** générale [1] :

$$[H]\{T\} + [C] \frac{\partial}{\partial t} \{T\} + [G] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{T\} + \{F\} = 0 \quad 4.22$$

dans laquelle toutes les matrices sont assemblées à partir de sous-matrices élémentaires , les sous-matrices élémentaires $[h]^e$ et $\{F\}^e$ sont définies par les relations 4.17 et 4.18 et

$$C_{ij}^e = \int_{V^e} \mu N_j dv \quad 4.23$$

Donc la méthode des **éléments finis** implique la formation et la résolution de systèmes d'équations algébriques . Parmi les avantages de cette méthode il y a l'aisance avec laquelle on peut **automatiser la formation des équations** , et son pouvoir d'analyser des structures et des chargements **extrêmement complexes** .

Chapitre V

Analyse numérique :

La programmation de la méthode des *éléments finis* pour les calculateurs numériques à grande vitesse est déjà réalisée , elle se fait de façon relativement simple ; cette méthode serait limitée s'il n'existait pas d'ordinateurs permettant de résoudre les systèmes d'équations simultanées auxquels conduit le processus de discrétisation.

Depuis le milieu des années cinquante , les techniques de l'analyse par *éléments finis* n'ont cessé de se développer ; **Zienkiewicz [1]** a grandement contribué à la progression de cette méthode d'analyse .

Un certain nombre de programmes d'analyse par *éléments finis* à très grande capacité ont été mis au point . Le programme d'éléments finis à 3-D **EMRC NISA-II** version PC(286) [7] est disponible au laboratoire d'ÉLECTROTHERMIE INDUSTRIELLE à l'**U.Q.T.R** . La capacité de ce programme est de 500 éléments ou 2000 degrés de liberté (D.L) . Cette version n'est pas suffisante pour des problèmes de transfert de chaleur non-linéaire . Tous les résultats de la simulation qui sont présentés dans ce rapport sont obtenu avec la version PC **(386)** qui est disponible au **CCFM** .

V-1 Modélisation

V-1-1 Description du programme [7]:

Le programme d'analyse par éléments finis **NISA II** est composé d'une série de modules qui, selon les cas traités, peuvent se prêter à différentes utilisations. NISA II utilise quatre phases pour l'*analyse* d'un problème donné. La figure 5-1 à la page suivante montre les quatre phases groupées en forme d'organigramme. Le module **DISPGDB** de **NISA II** comprend les phases N° 1 et 2. La phase no 3 est représentée par **NISAHEAT**. Enfin, la phase No 4 est représentée par **DISPPOST**.

* **Phase N° 1** : La première phase est celle de l'*entrée des données*. Cette phase est utilisée pour faire la description géométrique du problème, les propriétés des matériaux, du chargement et des conditions aux limites du problème physique.

* **Phase N° 2** : La deuxième phase est la *bibliothèque des éléments*. Cette phase présente un intérêt particulier : c'est là où se trouvent programmés les algorithmes de formulation de tous les éléments disponibles. Cette seconde phase exploite donc les données entrées à la première pour expliciter les équations algébriques des éléments à l'aide des algorithmes programmés adéquats. Elle comprend également les calculs nécessaires pour déterminer la position des équations de chaque élément par rapport à celle des éléments voisins, ainsi que les opérations permettant leur combinaison. Ces dernières étapes permettent d'obtenir un système complet d'équations algébriques pour la représentation en *éléments finis* de l'ensemble du solide.

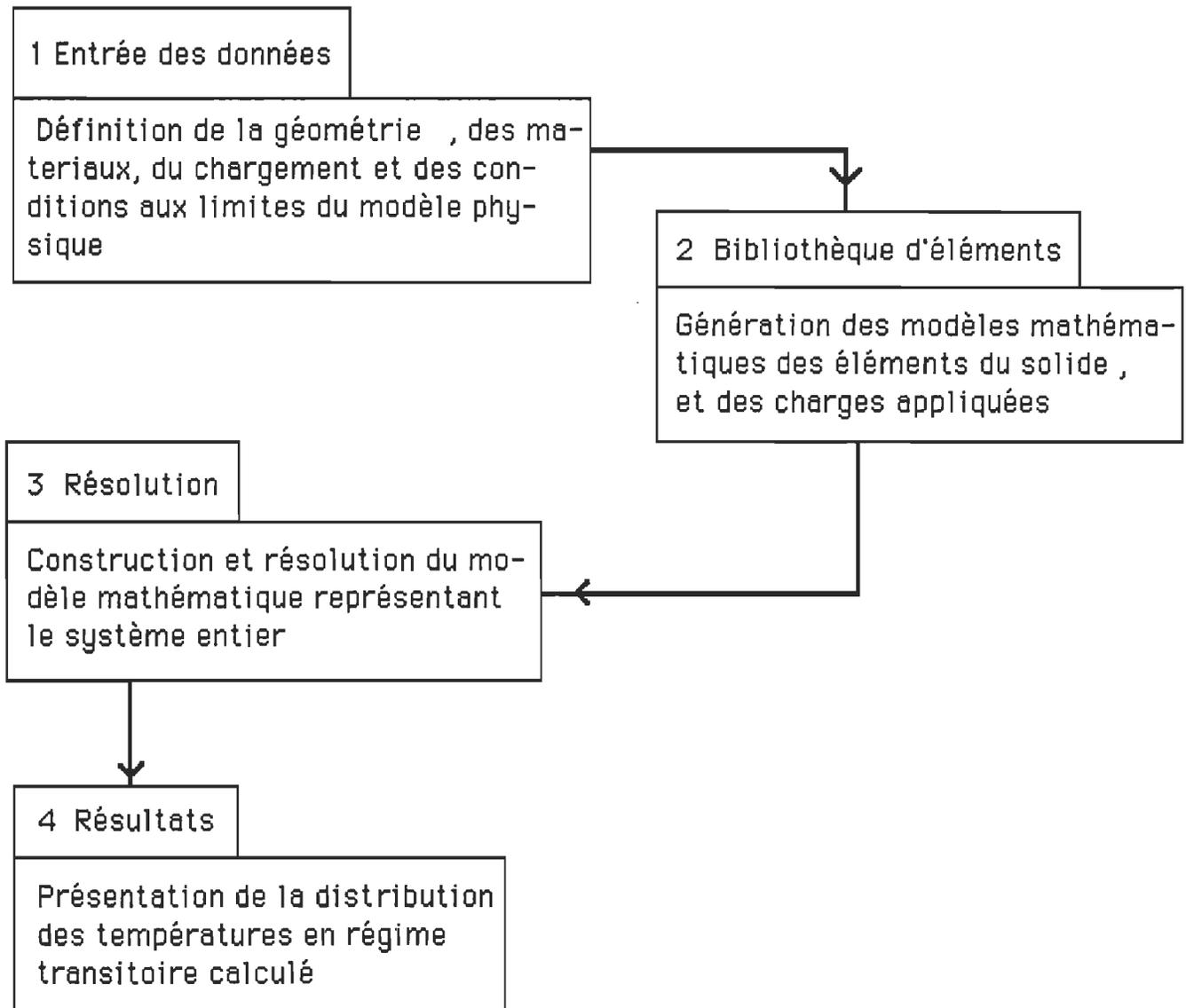


Figure 5-1

Déroulement de l'analyse d'un problème de transfert de chaleur

* **Phase N° 3 : NISAHEAT** est le programme de la phase N° 3 (en transfert de chaleur) qui est la phase de ***résolution*** qui traite les équations formées à la phase précédente . Pour l'analyse **non-linéaire transitoire** de transfert de chaleur, le programme utilise de vaste calculs portant sur toute l'histoire du chargement , des propriétés et des conditions aux limites .

* **Phase N° 4** : la phase N° 4 est représentée par **DISPPOST**, Cette phase est celle de l'***impression*** qui nous fournit un document de présentation des résultats sur lequel on peut fonder des décisions concernant par exemple un choix de proportions , ou d'autres questions de **conception** .

Le module utilisé pour réaliser le modèle thermique est le **NISA II/HEAT TRANSFER** . **NISA II/ HEAT** est un programme pour l'analyse en *éléments finis* du transfert de chaleur linéaire et non-linéaire en régime permanent et en régime transitoire . Le programme utilise une méthode et un temps d'intégration optimal pour résoudre les problèmes linéaires et non-linéaires de *conduction* , *radiation* , *changement de phase* . Le module est directement relié par un interface avec **DISPLAY II** pour la sortie des résultats .

V-1-2 Principes :

Un fichier **NISA** comprend trois blocs de données :

1- Commandes exécutables :

Commandes alphanumériques qui spécifient les paramètres de contrôle pour l'analyse , c'est-à-dire , spécifient le type d'analyse qui va être utilisée .

2- Modèle :

Ce bloc représente généralement la majeure partie des données à entrer . Il décrit les caractéristiques du modèle comme les *noeuds* , *éléments* , *matériels* et propriétés géométriques .

3- Analyse :

Ce bloc décrit les *données* pertinentes pour l'analyse c'est-à-dire , *chargement* , conditions aux limites , contrôle de la sortie des résultats .

Le modèle et l'analyse ont chacun une **carte** pour l' identification , elle indique la fonction du groupe de données . On utilise parfois des termes anglais , de peur de mal traduire et ainsi perdre la signification des mots .

V-1-3 Modèle en éléments finis

Puisque le limiteur est sphérique , un choix judicieux du *type d'éléments* utilisés pour modéliser le limiteur est très important . la précision et le temps de calcul dépendent fortement du maillage utilisé . La figure 5-2 à la page suivante montre quelque éléments finis de la bibliothèque d'éléments de **NISA II** .

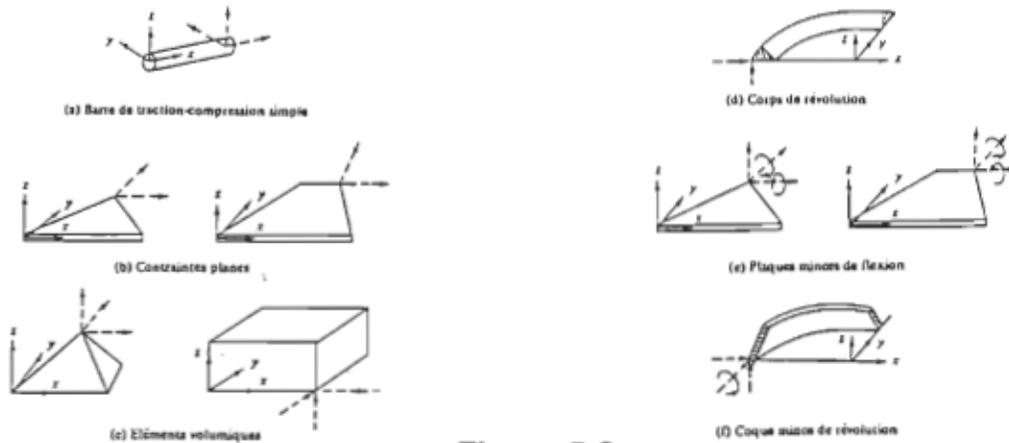
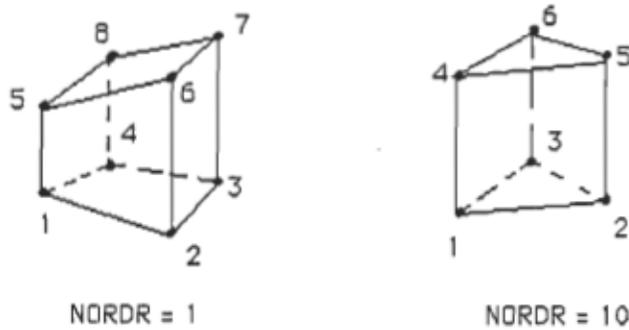


Figure 5-2

Quelques éléments finis du code NISA

La division du limiteur en *éléments finis* ne doit pas présenter de discontinuité. Vu la symétrie sphérique, les éléments qui répondent le plus aux critères de convergence des résultats sont montrés à la figure 5-3. C'est un élément solide pour le transfert de chaleur coder (NKTP=104).



Face No	NORDR	
	1	10
1	1,2,3,4	1,2,3
2	5,6,7,8	4,5,6
3	1,2,6,5	1,2,5,4
4	2,3,7,6	2,3,6,5
5	3,4,8,7	3,1,4,6
6	4,1,5,8	-

Figure 5-3

configurations de l'élément et la convention adoptée pour la numérotation des faces

Cet élément **hexaédrique** modélise un état de flux de chaleur à 3-D dans des structures solides . Les types coder NORDR = 1 et NORDR = 10 sont les plus appropriés . Cet élément a la température (T) comme seul degré de liberté . Pour une question de mémoire , on utilise NORDR = 1 (8 noeuds) et NORDR = 10 (6 noeuds) car le programme sur PC est limité à 2000 noeuds . Cela va être balancé par un artifice numérique, soit une diminution du pas d'intégration .

Pour une raison de clarté , on a représenté à la figure 5-4 seulement les maillages à 2-D d'un quadrant , car en réalité les maillages sont à 3-D autour de l'axe Y (voir la figure 5-7 à la page 69).

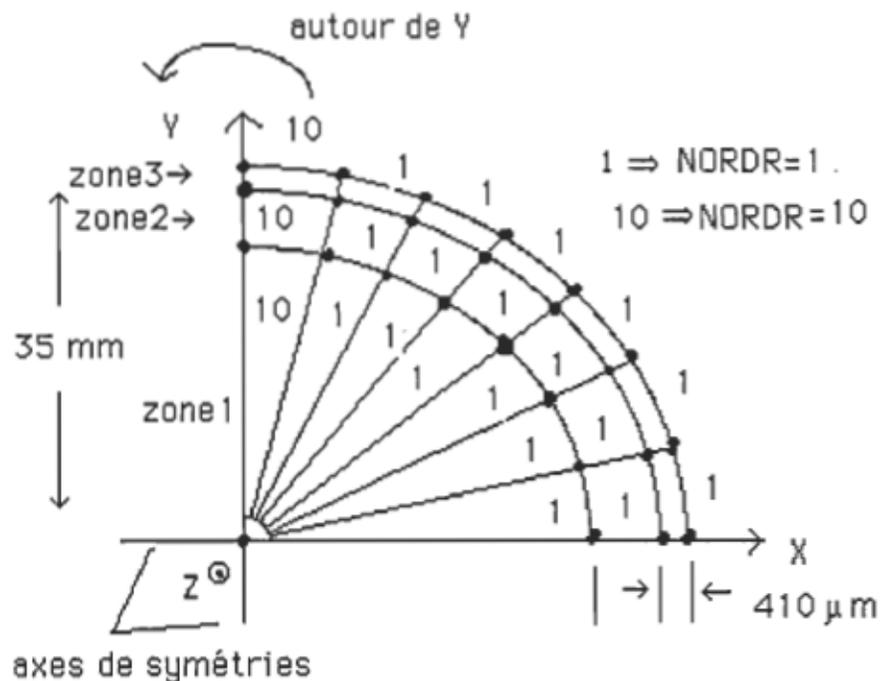


Figure 5-4

Représentation par éléments finis de l'un des deux quadrants du limiteur à 2-D . Des éléments d'ordres différents sont utilisés , NORDR = 1 et NORDR = 10 .

V-1-4 Validation du modèle [7]:

Pour qu'un modèle en *éléments finis* soit valide , il faut respecter certains critères de validation :

- Connectivité
- Normale
- Indice de distorsion

La connectivité d'un élément est l'ordre dans lequel les noeuds de l'élément sont définis . Elle est utilisée pour définir le numéro des faces de l'élément . La figure 5-5 montre la connectivité d'un élément quadrilatère .

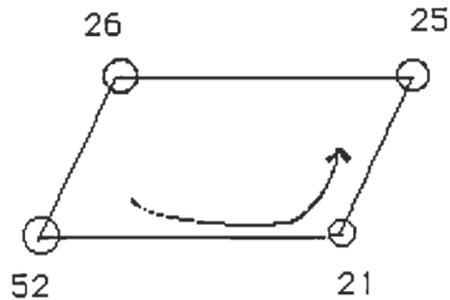


Figure 5-5

Définition de l'élément : 52 , 21 , 25 , 26

La normale de l'élément est définie suivant la règle de la main droite . La figure 5-6 montre la normale de l'élément quadrilatère .

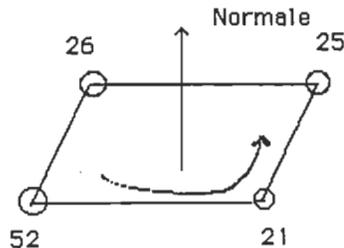


Figure 5-6

Normale de l'élément

* **Indice de distorsion [7]:**

Le déterminant du **jacobien** est évalué à chaque point gaussien (noeud actif : noeud qui se trouve dans une zone de transition entre deux éléments adjacents) . Le rapport du jacobien minimum et du jacobien moyen est appelé l'indice de distorsion . L'indice de distorsion de tous les éléments doit être supérieur à 0.4 .

En résumé , pour qu'un modèle géométrique en éléments finis soit valide , il faut que les trois critères de validation soient respectés et qu'il ne présente pas de discontinuité dans la structure . La figure 5-7 montre le modèle en éléments finis du limiteur vu avec un angle de 45 degrés autour de l'axe x .

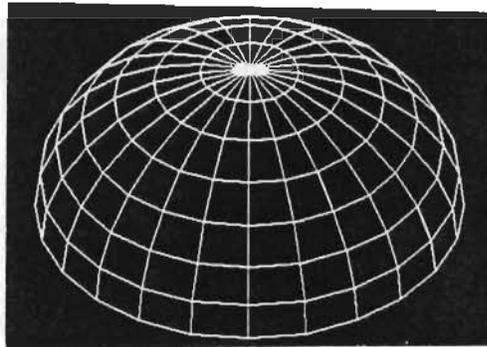
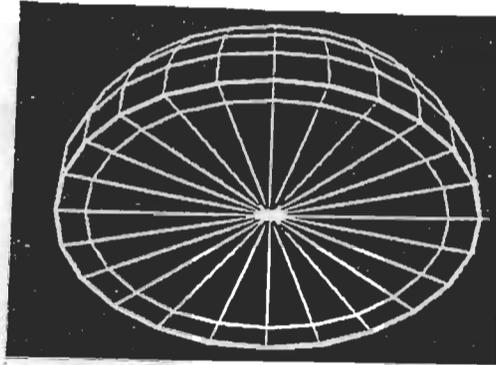


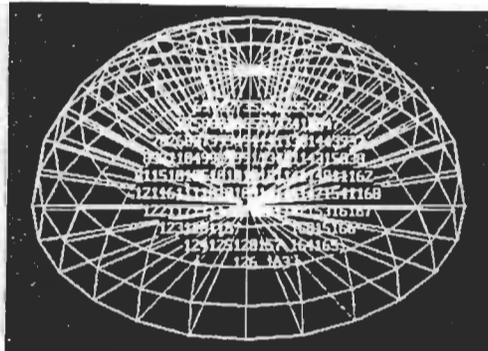
Figure 5-7

Le modèle en éléments finis du limiteur montré à la figure 5-8 contient trois zones . Ces zones sont divisées chacune en 168 éléments distincts (24 de type NORDR 10 ET 144 de type NORDR 1 , figure 5-3) .

**Figure 5-8**

Zones du modèle du LM4

La figure 5-9 montre le maillage complet de la zone 1 (fig 5-3) vu avec un angle de 45° autour de l'axe x .

**Figure 5-9**

Maillage complet de la zone1

La figure 5-10 à la page suivante montre le maillage complet des zones 2 et 3 sans numérotation (pour une raison de clarté) vu avec un angle de -45° autour de l'axe x .

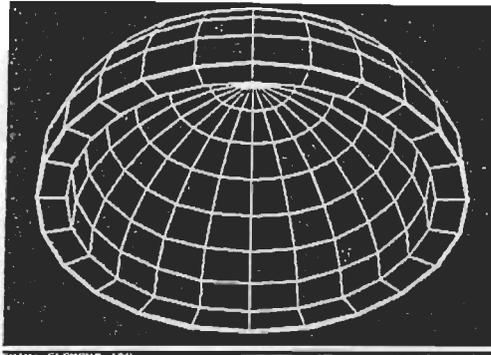


Figure 5-10

Maillage complet des zones 2 et 3

Le modèle en *éléments finis* du limiteur comprend 504 éléments et seulement 667 noeuds actifs (gaussien) ; les noeuds d'une face entre deux éléments voisins sont communs à ces deux éléments , cela est généralisé à 3-D . Le modèle ne présente pas de discontinuité , la connectivité des noeuds est bien définie , la normale aussi et l'indice de distorsion est égal à 1 . Alors on peut dire que le modèle géométrique en éléments finis est valide .

V-2 Simulation :

Cette section définit les conditions aux limites et la présentation des résultats de la simulation , l'analyse des résultats sera traitée au chapitre VI . Pour une question de capacité du programme NISA , la simulation va se limiter à la tête elle même . Les résultats présentés dans ce chapitre , sont ceux du revêtement en carbure de titane d'épaisseur 410 μm . Par contre ceux du 204 et 280 μm seront en annexe 4 et 5 respectivement .

V-2-1 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites de la simulation du problème du limiteur sphérique se rapprochent du cas réel . Le support de la tête du limiteur n'est pas inclu dans la simulation .

La figure 5-11 montre les conditions aux limites considérées pour faire la simulation .

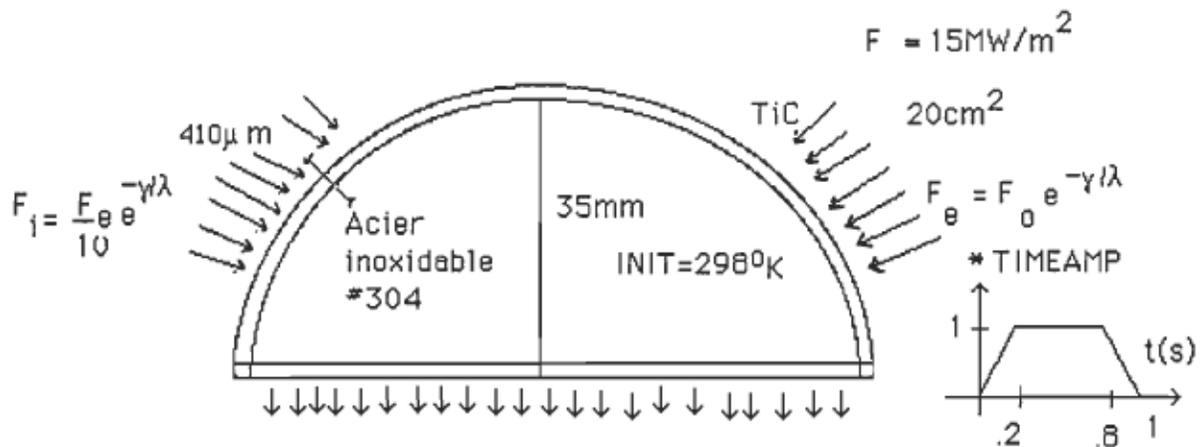


Figure 5-11

Conditions aux limites de la simulation

V-2-2 Cartes de contrôle de la simulation :

Les cartes de contrôle de la simulation sont regroupées dans un fichier **NISA** . En fait ce sont des cartes de commande , qui contiennent les paramètres de contrôle de l'exécution du programme (voir annexe 8) .

La simulation en régime transitoire est divisée en deux parties : Soit , la simulation après une seconde de la distribution de la température sur la surface du revêtement du limiteur et soit l'évolution de la température intérieure après le **coup Tokamak** (partie relaxation) . La figure 5-12 montre le résultat de la simulation de la distribution de la température sur la surface du revêtement du limiteur LM4 (410 μm) après un **coup Tokamak** .

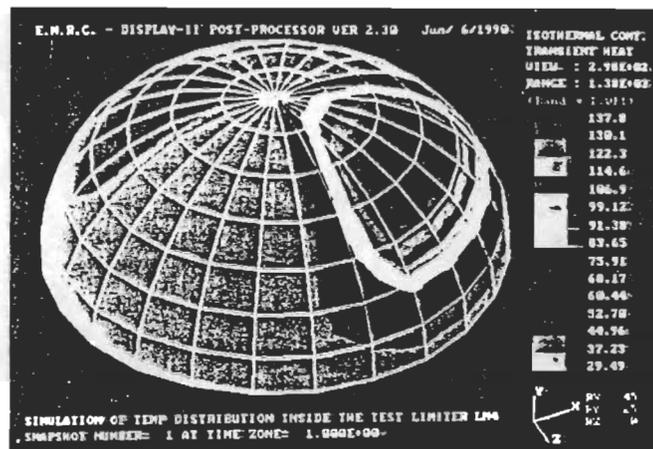


Figure 5-12

Simulation de la distribution de la température sur le LM4 , pour une épaisseur de 410 μm , avec une surface d'exposition de 20 cm^2 et un flux de puissance distribué de 15 MW/m^2 .

La figure 5-13 à la page suivante , montre l'évolution de la température à l'intérieur du limiteur après un **coup Tokamak** .

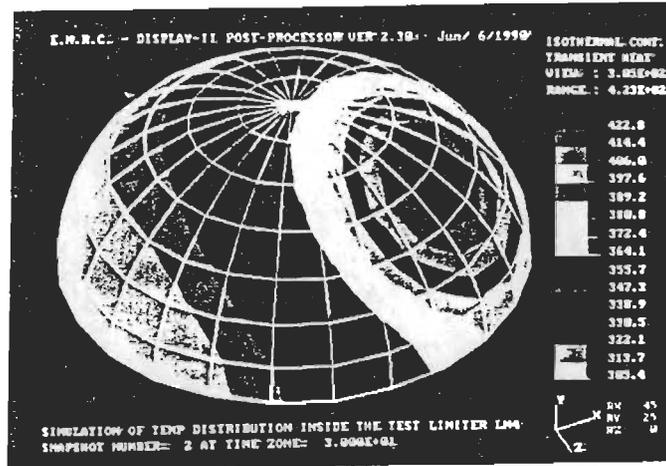


Figure 5-13

Evolution de T à l'intérieur du LM4

Les figures 5-14 a et b montrent les résultats de la simulation , partie relaxation , du limiteur hémisphérique d'épaisseurs 204 μm et 280 μm sous des angles différents .

204 μm

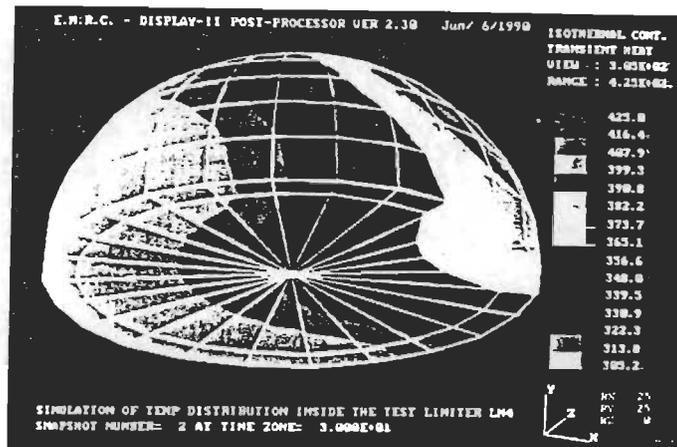


Figure 5-14 a

Résultat de la simulation après le coup Tokamak

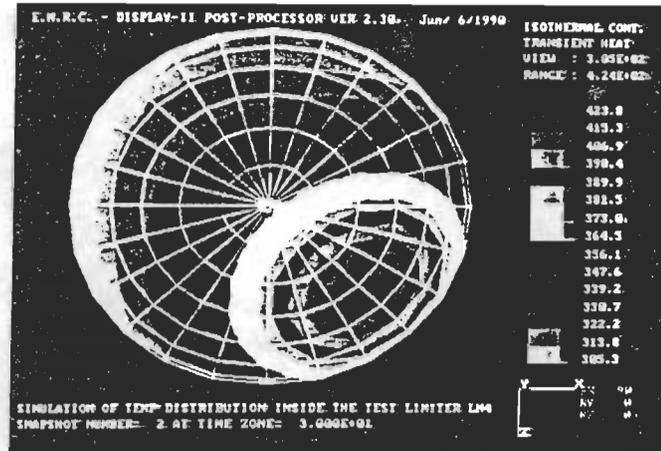
280 μm 

Figure 5-14 b

Résultat de la simulation après le coup Tokamak

La figure 5-15 montre le résultat de la simulation de l'évolution de la température à l'intérieur du limiteur aux noeud N^o 362 qui correspond au TC3 .

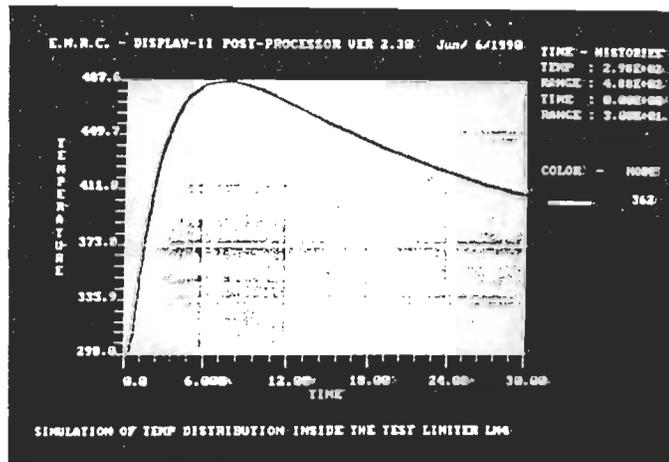


Figure 5-15

Simulation de la température relevée par le TC3

Chapitre VI

Analyse des résultats

En changeant la distribution du flux de puissance , la simulation numérique reproduit l'évolution de la température mesurée par les thermocouples de la tête du limiteur .

La figure II-4 (page 34) montre les résultats de la simulation à 2-D d'un coup Tokamak . On note que la température maximale du côté électronique est de 1200°C . Si l'on fait la comparaison avec la température maximale trouvée par la simulation à 3-D , qui est de 1150°C , la différence est minime . Par contre , avec la simulation , la relaxation est moins prononcée si on la compare avec celle recueillie par le TC3 (thermocouple N^o 3) et cela pour les trois couches variable de TiC . Autrement dit , la température maximale atteinte par les deux courbes est presque la même , par contre , la température minimale après une période de relaxation de 30 secondes atteinte par la simulation est nettement supérieur à celle recueillie par le TC3 (figure II-6 page 35) .

En fait, le limiteur de 35 mm de rayon est supporté par une structure de 300 Kg et d'un mètre de longueur . Pendant les étapes de la modélisation on s'est rendu compte que ce n'est pas possible de modéliser toute la structure: il faut se limiter au limiteur lui même . Cela explique la différence de

température entre les deux courbes , car en réalité la structure qui supporte la tête du limiteur accélère la relaxation .

VI-1 Utilité des résultats obtenus :

Les résultats de la simulation seront utiles pour l'étude des trois couches de carbure de titane (TIC) en contact avec le plasma . Cela va permettre d'obtenir des revêtements résistants au plasma , donc moins de contamination , et d'évaluer la puissance déposée sur le limiteur . Indirectement , pour les températures des centrales de thermofusion (\approx **100 millions de degrés celcius**) , la simulation nous donne une idée sur la distribution de la température sur la surface du limiteur sphérique .

VI-2 Discussion :

L'accroissement de la température sur le revêtement pour un **coup Tokamak** ΔT dû au flux de puissance F (section I-7) est :

$$\Delta T = 2 F (t / (\pi k C \rho))^{1/2} \quad 6.1$$

Pour un gradient de température de $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ (figure 5-13) , on peut calculer le flux de puissance sur la surface correspondante :

$$F = \frac{\Delta T}{2 (t / (\pi K c \rho))^{1/2}} \quad 6.2$$

avec $t = 770 \text{ ms}$ $k = 43.69 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$

$\rho = 4930 \text{ [Kg / m}^3 \text{]}$

$C_p = 700 \text{ [J / Kg} \cdot \text{K]}$

Application numérique :

$F = 14.88 \text{ MW/m}^2$

$\Rightarrow F \approx 15 \text{ MW/m}^2$

Il est intéressant de comparer la puissance déposée sur le limiteur test avec la puissance totale injectée dans le plasma . Si l'on utilise une surface effective de 20 cm^2 pour un flux de chaleur de 15 MW/m^2 , on trouve que le limiteur intercepte 30 KW , soit $P = F \cdot S$. Si on compare cette puissance avec celle du plasma 440 KW (2 V et 220 KA) , on trouve que la puissance

interceptée par le limiteur est égale à 6.8 % de la puissance totale .

Pour les mêmes conditions , pour un coup Tokamak de durée 770 ms ,
l'énergie déposée sur la tête du limiteur est :

$$E_{in} = 1.5 (n_i K T_i + n_e K T_e) * Vol \quad 6.3$$

E_{in} : Énergie interne

n_i : Densité ionique

n_e : Densité électronique

T_i : Température ionique

T_e : Température électronique

Vol : Volume du plasma

Z_{eff} : Section efficace

a : rayon du plasma

R : Grand rayon du Tokamak

P_{diss} : Puissance dissipée

où $n_i = 310^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_i = 300 \text{ eV}$, $n_e = Z_{eff} n_i$, $Z_{eff} = 2$, $T_e = 600 \text{ eV}$

$$Vol = 2 * \pi R * \pi * a^2 \quad 6.4$$

pour T_{deV} $R = 0.82 \text{ m}$, $a = 0.2 \text{ m}$

$$\Rightarrow E_{in} \approx 7 \text{ KJ}$$

Alors , le temps de confinement de l'énergie , défini par

$$\begin{aligned} t_E &= E_{in} / P_{diss} && 6.5 \\ \Rightarrow t_E &= 7 \text{ KJ} / 440 \text{ KW} \end{aligned}$$

alors $t_E \approx 16 \text{ ms}$.

VI-3 Mesure du flux :

L'équipe de recherche du TdeV a développé des diagnostics pour mesurer la densité et la température du bord du plasma . Mais , ces diagnostics supposent qu'on connaisse la puissance total déposée sur la tête du limiteur . C'est l'un des objectifs de ce travail de recherche de calculer la puissance totale déposée sur la tête du limiteur hémisphérique :

$$P = F \cdot S$$

où P est la puissance totale [W]

F est le flux de puissance [W / m²]

S est la surface de contact avec le plasma [m²]

Par simulation on a obtenu une puissance de 30 KW pour un flux de plasma de 15 MW/m² et une surface de contact de 20 cm² .

VII Conclusion

La modélisation en éléments finis de la tête hémisphérique du limiteur du **Tokamak de Varennes** a été réalisée . Le modèle thermique est à trois-dimensions pour différentes couches de carbure de titane (TiC) .

En effectuant des mesures avec les thermocouples de la tête du limiteur , nous pourrons à l'aide du modèle thermique , trouver de nouveau , la puissance totale déposée sur la tête du limiteur .

L'équipe du Tokamak de Varennes a testé trois têtes hémisphériques d'épaisseurs différentes de carbure de titane .

La couche , de **TiC** Projeté par plasma d'épaisseur **300 μm** , semble , résistée le plus aux **chocs thermiques** .

Une étude de la conception et la réalisation d'un **modèle thermique** du limiteur hémisphérique du **TdeV** , basée sur l'analyse en *éléments finis* avec le programme **NISA** , a été effectuée .

En particulier ,

- Deux résultats importants ont été obtenus :
 - * La simulation de la distribution de la température sur la surface du limiteur après un **coup Tokamak** .
 - * La simulation de l'évolution de la température dans la tête du limiteur , pendant un temps de relaxation de 30 secondes.

En adaptant la distribution du flux de puissance sur la surface du LM4, la simulation numérique reproduit l'évolution de la température mesurée par le thermocouple de la tête du limiteur. La relaxation est moins prononcée, en la comparant avec celle recueillie par le TC3 , et cela pour les trois couches variable de TiC. Autrement dit, la température maximale atteinte par les deux courbes est presque la même; par contre, la température minimale après une période de relaxation de 30 secondes, atteinte par la simulation est nettement supérieure à celle recueillie par le TC3 .

En fait, le limiteur de 35 mm de rayon est supporté par une structure de 300 kg et d'un mètre de longueur. Cela explique la différence de température entre les deux courbes, car en réalité la structure qui supporte la tête du limiteur accélère la relaxation.

Le travail présenté dans ce rapport concerne la mesure indirecte, sur le limiteur hémisphérique du Tokamak de Varennes, du flux de puissance en

utilisant la méthode des éléments finis à 3-D.

Pour cela, nous avons réalisé un modèle thermique du limiteur , en éléments finis, grâce au code de simulation NISA, nous avons pu déterminer le flux de puissance sur la surface du limiteur.

Les résultats de la simulation seront utiles pour l'étude des trois couches de carbure de titane en contact avec le plasma. Cela va nous permettre d'obtenir des revêtements résistant au plasma chaud, donc moins de contamination , et d'évaluer la puissance déposée sur le limiteur.

Indirectement, la simulation nous donne une idée sur la distribution de la température sur la surface du limiteur hémisphérique. Le modèle thermique réalisé peut servir, ultérieurement, pour mesurer le stress thermique et évaluer les distorsions des différents revêtements du LM4.

Le facteur qui limite actuellement l'épaisseur du revêtement du limiteur est la résistance aux chocs thermiques[8]. Avec un courant de plasma de 200 KA, la tête hémisphérique a absorber une puissance de 30 KW pendant un temps de 0.77 seconde, lorsqu'elle est exposée à un flux de puissance de 15 MW/m².

En effectuant des mesures avec les thermocouples de la tête du limiteur, nous pouvons à l'aide du modèle thermique, trouver de nouveau, la puissance. La couche, de carbure de titane d'épaisseur 300 mm, semble, résistée le plus aux chocs thermiques.

RÉFÉRENCES

- 1- **Zienkiewicz , O.C .** The Finite Element Method in Engineering Science .
Wales : University of Wales , 1971 (Traduit de l'anglais , 1973) .

- 2- **Gallagher , R .H .** Introduction aux éléments finis . Paris : Pluralis ,
1976 .

- 3- **Commissariat à l'énergie Atomique** . Série Scientifique . La fusion
thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique . Paris : Haut -
Commissaire à l'énergie atomique , 1987 .

- 4- **Wesson , J .** Tokamaks . Oxford : Clarendon Press , 1987

- 5- **Clarslaw and Jaeger , (Ed)** . Conduction of Heat in Solids (2nd ed.) .
Oxford : Clarendon Press , 1959 .

- 6- **Kreith , F .** Principles of Heat Transfer (3 th ed .) . New York : Intext
Press , 1973 .

- 7- **Engineering Mechanics Research Corporation (EMRC)** . Publication
Manual . Michigan , Troy . EMRC , 1987 .

- 8- **Saint-Jacques , R.G., Bordeaux, F.,Veilleux, G. , Leclair , G.
,Zuzak, W. , Stansfield, B et Lakhsasi , A.** "Thermal shock evaluation
of plasma-sprayed TiC thick coatings by means of the limiter facility of the
Tokamak de Varennes", The proceedings of the 16 symposium on fusion
technology. London, UK, September 3-7, 1990.

ANNEXES

	page
1- Programme : Fichier NISA (204 μm).....	86
2- Programme : Fichier NISA (280 μm).....	89
3- Programme : Fichier NISA (410 μm).....	92
4- Résultats de la simulation : Revêtement 204 μm	95
5- Résultats de la simulation : Revêtement 280 μm	96
6- Résultats de la simulation : Revêtement 410 μm	97
7- Table des valeurs de la fonction erfc/ierfc x	98
8 - Cartes de contrôle de la simulation.....	99

Annexe 1

Programme NISA du revêtement 204 μm

Ce fichier contient les cartes de contrôle de la simulation du modèle 204 μm . En fait, se sont des cartes de commande, qui contiennent les paramètres de contrôle de l'exécution du programme et les données géométrique du LM4, pour plus d'information sur les cartes (voir annexe 8).

```

** EXECUTIVE
ANAL=THEAT
FILE=SPHER2
SAVE=26,39
INIT=298
MASS = LUMPED
*TITLE
SIMULATION OF TEMP DISTRIBUTION INSIDE THE TEST LIMITER LM4
WITH THICKNESSE 204  $\mu\text{m}$  AND 20  $\text{cm}^2$  EXPOSED SURFACE TO 15MW/m $^2$ 
*ELTYPE
  1, 104,    10
  2, 104,     1
*ELEMENT
  1, 1, 1, 0, 0
  1, 2, 3, 51, 52, 53,
  2, 1, 1, 0, 0
  1, 3, 4, 51, 53, 54,
  503, 2, 2, 0, 0
  789, 788, 795, 796, 1191, 1192, 1199, 1198,
  504, 2, 2, 0, 0
  788, 693, 700, 795, 1192, 1087, 1094, 1199,
*NODES
  1 , , , , 0.0000, 0.0010, 0.0000,
  2 , , , , 0.0002, 0.0010, 0.0000,
  1198 , , , , 0.0176, 0.0000, 0.0305,
  1199 , , , , 0.0092, 0.0000, 0.0341,
*MATHEAT
KXX,1,1,0,12.29,0.010478
KYY,1,1,0,12.29,0.010478
KZZ,1,1,0,12.29,0.010478
C,1,0,0,510.
DENS,1,0,0,7616.6
KXX,2,1,0,29.03,9.23E-3
KYY,2,1,0,29.03,9.23E-3
KZZ,2,1,0,29.03,9.23E-3
C,2,1,0,450.,0.39357
DENS,2,0,0,4930

```

```

*TIMEAMP
10,61,0
0,0,2,1,.8,1,1.0,0
2.0,0,32.0,0
*HEATCNTL
*TIMEINTEG
.5,30.0
*STEPSIZE
.1,1,1,1,1,1,1,1,1
.1,1,1,1,1,1,2,2,2
.3,3,3,4,4,4,5,5
1,1,1,1,1,1,1,1
2,2,2,2,2,2,2,2
1
*TEMPHISTORY
16,54,61,62,55,154,161,162,155,254,261
262,255,354,361,362,355
*PRINTCNTL
HFLT ,
HFLR ,
*TEMPOUT
1.0,30.0,29.0
*RADBC,SIGMA=5.67033E-8
37,42,1,4,-1,0,0,0
.4,298
79,84,1,4,-1,0,0,0
.4,298
121,126,1,4,-1,0,0,0
.4,298
163,168,1,4,-1,0,0,0
.4,298
205,210,1,4,-1,0,0,0
.4,298
247,252,1,4,-1,0,0,0
.4,298
289,294,1,4,-1,0,0,0
.4,298
331,336,1,4,-1,0,0,0
.4,298
373,378,1,5,-1,0,0,0
.56,298
415,420,1,5,-1,0,0,0
.56,298
457,462,1,5,-1,0,0,0
.56,298
499,504,1,5,-1,0,0,0
.56,298

```

```
*DFLUX
499,504,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E6,05E6
493,498,1,2,-1,0,10
05E6,05E6,12.5E6,12.5E6
487,492,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,15E6,15E6
481,486,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,15E6,15E6
475,480,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,12.5E6,12.5E6
469,474,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,7.5E6,7.5E6
463,468,1,2,-1,0,10
7.5E6,7.5E6,0
415,420,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E5,05E5
409,414,1,2,-1,0,10
05E5,05E5,12.5E5,12.5E5
403,408,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,15E5,15E5
397,402,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,15E5,15E5
391,396,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,12.5E5,12.5E5
385,390,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,7.5E5,7.5E5
379,384,1,2,-1,0,10
7.5E5,7.5E5,0
*ENDDATA
```

Annexe 2

Programme NISA du revêtement 280 μm

Ce fichier contient les cartes de contrôle de la simulation du modèle 280 μm . En fait, se sont des cartes de commande, qui contiennent les paramètres de contrôle de l'exécution du programme et les données géométrique du LM4, pour plus d'information sur les cartes (voir annexe 8).

```

** EXECUTIVE
ANAL=THEAT
FILE=SPHER3
SAVE=26,39
INIT=298
MASS = LUMPED
*TITLE
SIMULATION OF TEMP DISTRIBUTION INSIDE THE TEST LIMITER LM4
WITH THICKNESSE 280  $\mu\text{m}$  AND 20  $\text{cm}^2$  EXPOSED SURFACE TO 15MW/ $\text{m}^2$ 
*ELTYPE
  1, 104, 10
  2, 104, 1
*ELEMENT
  1, 1, 1, 0, 0
  1, 2, 3, 51, 52, 53,
  2, 1, 1, 0, 0
  1, 3, 4, 51, 53, 54,
  503, 2, 2, 0, 0
  789, 788, 795, 796, 1191, 1192, 1199, 1198,
  504, 2, 2, 0, 0
  788, 693, 700, 795, 1192, 1087, 1094, 1199,
*NODES
  1 ,,,, 0.0000, 0.0010, 0.0000,
  2 ,,,, 0.0002, 0.0010, 0.0000,
  1198 ,,,, 0.0176, 0.0000, 0.0306,
  1199 ,,,, 0.0092, 0.0000, 0.0342,
*MATHEAT
KXX,1,1,0,12.29,0.010478
KYY,1,1,0,12.29,0.010478
KZZ,1,1,0,12.29,0.010478
C,1,0,0,510.
DENS,1,0,0,7616.6
KXX,2,1,0,29.03,9.23E-3
KYY,2,1,0,29.03,9.23E-3
KZZ,2,1,0,29.03,9.23E-3
C,2,1,0,450.,0.39357
DENS,2,0,0,4930

```

```

*TIMEAMP
10,6,0,0
0,0,.2,1,.8,1,1,0,0
2.0,0,32.0,0
*HEATCNTL
*TIMEINTEG
.5,30.0,
*STEPSIZE
.1,1,1,1,1,1,1,1,1
.1,1,1,1,1,1,2,2,2
.3,3,3,4,4,4,5,5
1,1,1,1,1,1,1,1
2,2,2,2,2,2,2,2
1,1,1,1,1,1,1,1
*TEMPHISTORY
16,54,61,62,55,154,161,162,155,254,261
262,255,354,361,362,355
*PRINTCNTL
HFLT ,
HFLR ,
*TEMPOUT
1.0,30.0,29.0
*RADBC,SIGMA=5.67033E-8
37,42,1,4,-1,0,0,0
.4,298
79,84,1,4,-1,0,0,0
.4,298
121,126,1,4,-1,0,0,0
.4,298
163,168,1,4,-1,0,0,0
.4,298
205,210,1,4,-1,0,0,0
.4,298
247,252,1,4,-1,0,0,0
.4,298
289,294,1,4,-1,0,0,0
.4,298
331,336,1,4,-1,0,0,0
.4,298
373,378,1,5,-1,0,0,0
.56,298
415,420,1,5,-1,0,0,0
.56,298
457,462,1,5,-1,0,0,0
.56,298
499,504,1,5,-1,0,0,0
.56,298

```

```
*DFLUX
499,504,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E6,05E6
493,498,1,2,-1,0,10
05E6,05E6,12.5E6,12.5E6
487,492,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,15E6,15E6
481,486,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,15E6,15E6
475,480,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,12.5E6,12.5E6
469,474,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,7.5E6,7.5E6
463,468,1,2,-1,0,10
7.5E6,7.5E6,0
415,420,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E5,05E5
409,414,1,2,-1,0,10
05E5,05E5,12.5E5,12.5E5
403,408,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,15E5,15E5
397,402,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,15E5,15E5
391,396,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,12.5E5,12.5E5
385,390,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,7.5E5,7.5E5
379,384,1,2,-1,0,10
7.5E5,7.5E5,0
*ENDDATA
```

Annexe 3

Programme NISA du revêtement 410 μm

Ce fichier contient les cartes de contrôle de la simulation du modèle 410 μm . En fait, se sont des cartes de commande, qui contiennent les paramètres de contrôle de l'exécution du programme et les données géométrique du LM4, pour plus d'information sur les cartes (voir annexe 8).

```

** EXECUTIVE
ANAL=THEAT
SAVE=26,39
FILE=SPHE4
INIT=298
MASS = LUMPED
*TITLE
SIMULATION OF TEMP DISTRIBUTION INSIDE THE TEST LIMITER LM4
WITH THICKNESSE 410  $\mu\text{m}$  AND 20  $\text{cm}^2$  EXPOSED SURFACE TO 15MW/m2
*ELTYPE
  1, 104,    10
  2, 104,     1
*ELEMENT
  1,    1,    1,    0, 0
  1,    2,    3,   51, 52, 53,
  2,    1,    1,    0, 0
  1,    3,    4,   51, 53, 54,
  .
  .
  .
  503,    2,    2,    0, 0
  789,   788,   795,   796, 1191, 1192, 1199, 1198,
  504,    2,    2,    0, 0
  788,   693,   700,   795, 1192, 1087, 1094, 1199,
*NODES
  1, . . . ., 0.0000, 0.0010, 0.0000,
  2, . . . ., 0.0002, 0.0010, 0.0000,
  .
  .
  .
  1198, . . . ., 0.0177, 0.0000, 0.0307,
  1199, . . . ., 0.0092, 0.0000, 0.0343,
*MATHEAT
KXX,1,1,0,12.29,0.010478
KYY,1,1,0,12.29,0.010478
KZZ,1,1,0,12.29,0.010478
C,1,0,0,510.
DENS,1,0,0,7616.6
KXX,2,1,0,29.03,9.23E-3
KYY,2,1,0,29.03,9.23E-3
KZZ,2,1,0,29.03,9.23E-3
C,2,1,0,450.,0.39357
DENS,2,0,0,4930

```

```

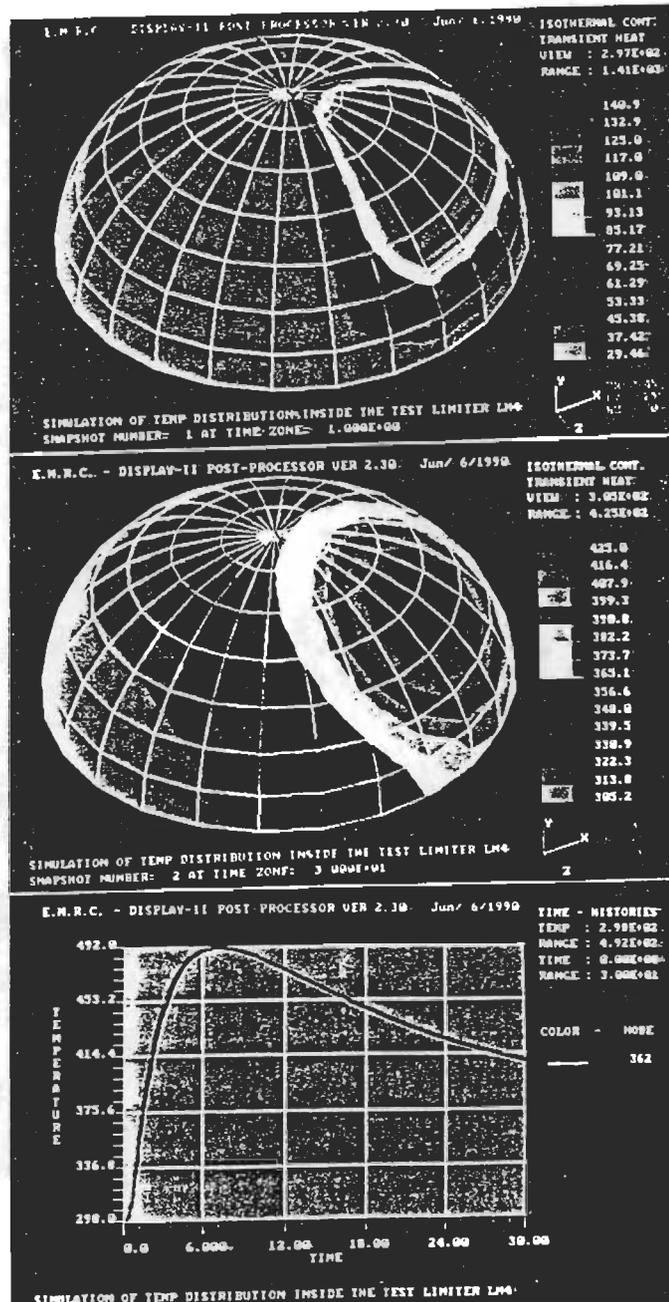
*TIMEAMP
10,6
0,0,2,1,.8,1,1,0,0
2,0,0,32,0,0
*HEATCNTL
*TIMEINTEG
.5,30.0,
*STEPSIZE
.1,1,1,1,1,1,1,1,1
.1,1,1,1,1,1,2,2,2
.3,3,3,4,4,4,5,5
1,1,1,1,1,1,1,1
2,2,2,2,2,2,2,2
1
*TEMPHISTORY
16,54,61,62,55,154,161,162,155,254,261
262,255,354,361,362,355
*PRINTCNTL
HFLT ,
HFLR ,
*TEMPOUT
1.0,30.0,29.0
*RADBC,SIGMA=5.67033E-8
37,42,1,4,-1,0,0,0
.4,298
79,84,1,4,-1,0,0,0
.4,298
121,126,1,4,-1,0,0,0
.4,298
163,168,1,4,-1,0,0,0
.4,298
205,210,1,4,-1,0,0,0
.4,298
247,252,1,4,-1,0,0,0
.4,298
289,294,1,4,-1,0,0,0
.4,298
331,336,1,4,-1,0,0,0
.4,298
373,378,1,5,-1,0,0,0
.56,298
415,420,1,5,-1,0,0,0
.56,298
457,462,1,5,-1,0,0,0
.56,298
499,504,1,5,-1,0,0,0
.56,298

```

```
*DFLUX
499,504,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E6,05E6
493,498,1,2,-1,0,10
05E6,05E6,12.5E6,12.5E6
487,492,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,15E6,15E6
481,486,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,15E6,15E6
475,480,1,2,-1,0,10
15.0E6,15.0E6,12.5E6,12.5E6
469,474,1,2,-1,0,10
12.5E6,12.5E6,7.5E6,7.5E6
463,468,1,2,-1,0,10
7.5E6,7.5E6,0
415,420,1,2,-1,0,10
0.00,0.00,05E5,05E5
409,414,1,2,-1,0,10
05E5,05E5,12.5E5,12.5E5
403,408,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,15E5,15E5
397,402,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,15E5,15E5
391,396,1,2,-1,0,10
15.0E5,15.0E5,12.5E5,12.5E5
385,390,1,2,-1,0,10
12.5E5,12.5E5,7.5E5,7.5E5
379,384,1,2,-1,0,10
7.5E5,7.5E5,0
*ENDDATA
```

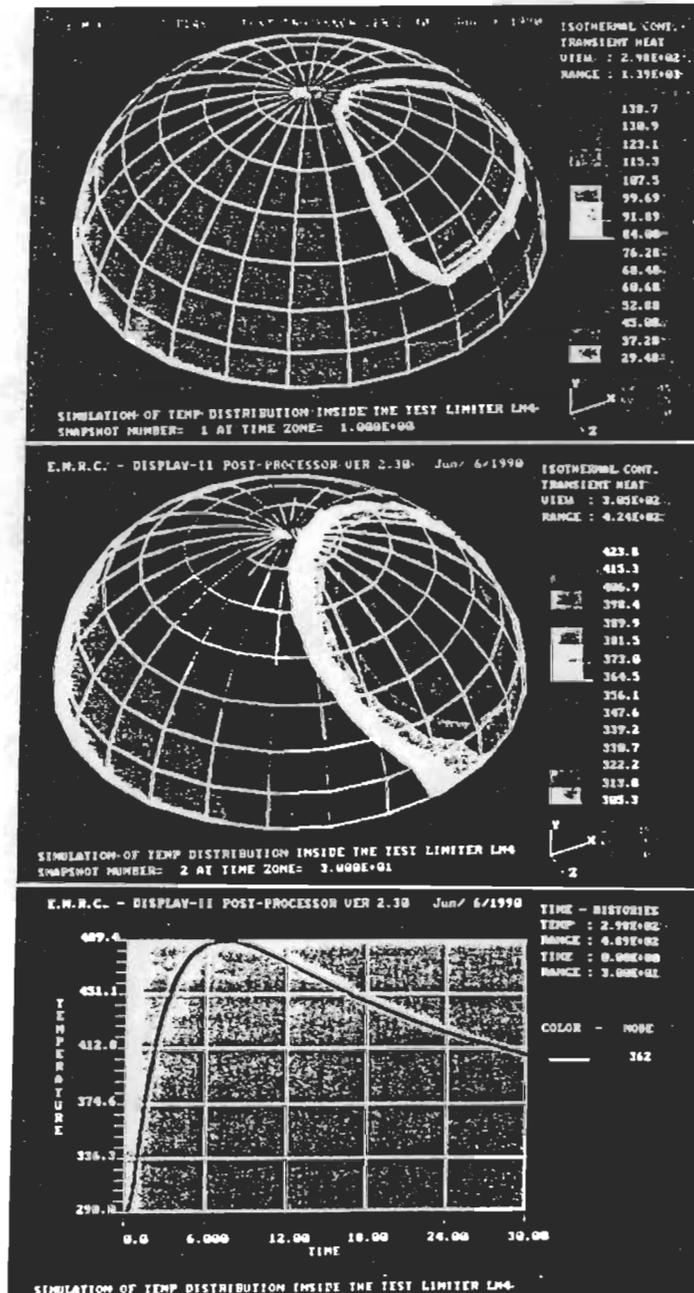
Annexe 4

Résultats de la simulation pour un revêtement 204 µm



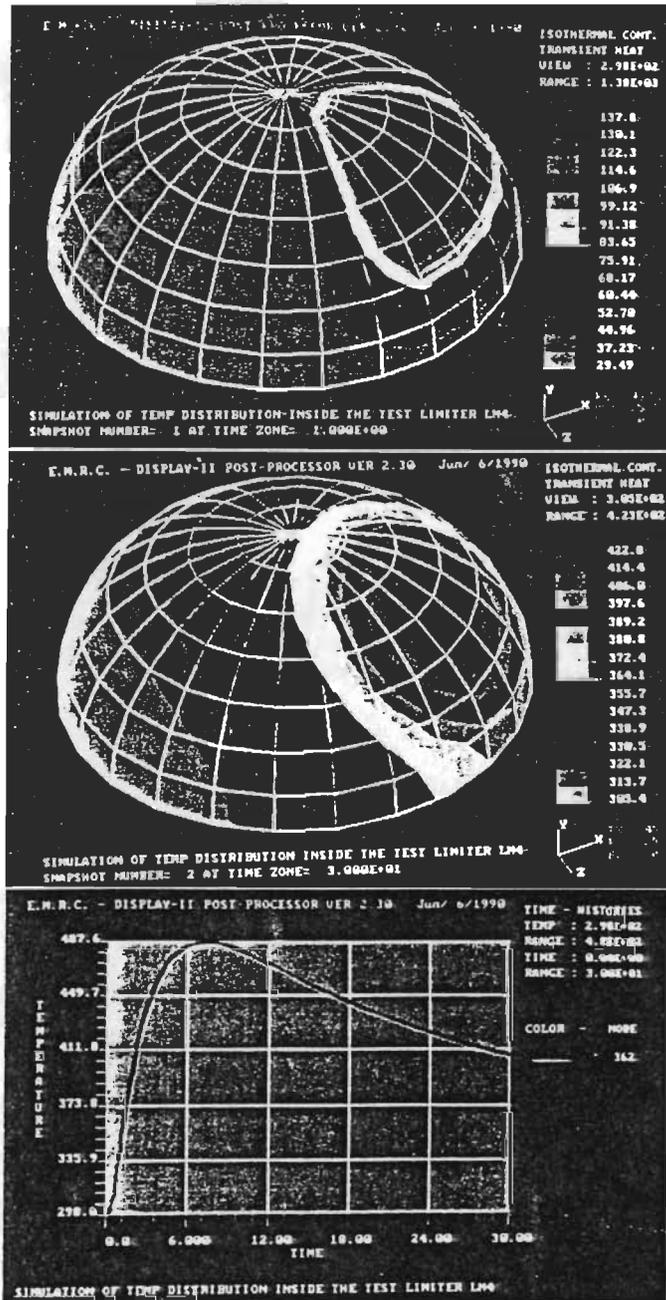
Annexe 5

Résultats de la simulation pour un revêtement 280 µm



Annexe 6

Résultats de la simulation pour un revêtement 410 μm



Annexe 7

Table des valeurs de la fonction d'erreur

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$$

avec $\operatorname{erfc}(\infty) = 1$, $\operatorname{erfc}(x) = -\operatorname{erfc}(x)$,

et $\operatorname{ierfc}(x) = (1/\sqrt{\pi}) e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x)$,

où $\operatorname{ierfc}(x)$ est l'intégral de la fonction d'erreur.

x	$e^{-x^2} \operatorname{erfc} x$	$4\pi^{-1/2} x e^{-x^2}$	$2\pi^{-1/2} e^{-x^2}$	$\operatorname{erf} x$	$\operatorname{erfc} x$	$2 \operatorname{ierfc} x$	$4 \operatorname{i}^2 \operatorname{erfc} x$	$6 \operatorname{i}^3 \operatorname{erfc} x$	$8 \operatorname{i}^4 \operatorname{erfc} x$	$10 \operatorname{i}^5 \operatorname{erfc} x$	$12 \operatorname{i}^6 \operatorname{erfc} x$
0	1.0	0	1.1284	0	1.0	1.1284	1.0	0.5842	0.25	0.0940	0.0313
0.05	0.9460	0.1126	1.1258	0.056372	0.943628	1.0312	0.8921	0.4933	0.2148	0.0795	0.0261
0.1	0.8965	0.2234	1.1172	0.112463	0.887537	0.9396	0.7936	0.4391	0.1841	0.0671	0.0217
0.15	0.8509	0.3310	1.1033	0.167996	0.832004	0.8537	0.7040	0.3740	0.1573	0.0584	0.0180
0.2	0.8090	0.4336	1.0841	0.222703	0.777297	0.7732	0.6227	0.3243	0.1341	0.0474	0.0149
0.25	0.7703	0.5300	1.0600	0.276328	0.723674	0.6982	0.5491	0.2805	0.1130	0.0396	0.0123
0.3	0.7346	0.6188	1.0313	0.328627	0.671373	0.6284	0.4828	0.2418	0.0965	0.0331	0.0101
0.35	0.7015	0.6985	0.9983	0.379382	0.620618	0.5639	0.4233	0.2079	0.0810	0.0275	0.0083
0.4	0.6708	0.7692	0.9615	0.428392	0.571608	0.5043	0.3699	0.1782	0.0687	0.0228	0.0068
0.45	0.6423	0.8294	0.9215	0.475482	0.524518	0.4495	0.3223	0.1522	0.0577	0.0189	0.0055
0.5	0.6157	0.8788	0.8788	0.520500	0.479500	0.3903	0.2799	0.1297	0.0484	0.0156	0.0045
0.55	0.5909	0.9172	0.8338	0.563323	0.436677	0.3535	0.2423	0.1101	0.0404	0.0128	0.0036
0.6	0.5678	0.9447	0.7872	0.603856	0.396144	0.3119	0.2090	0.0932	0.0330	0.0105	0.0029
0.65	0.5462	0.9614	0.7396	0.642029	0.357971	0.2742	0.1798	0.0787	0.0270	0.0086	0.0024
0.7	0.5259	0.9678	0.6913	0.677801	0.322199	0.2402	0.1541	0.0662	0.0231	0.0070	0.0019
0.75	0.5069	0.9644	0.6429	0.711156	0.288844	0.2097	0.1316	0.0555	0.0190	0.0057	0.0015
0.8	0.4891	0.9520	0.5950	0.742101	0.257899	0.1823	0.1120	0.0464	0.0156	0.0046	0.0012
0.85	0.4723	0.9314	0.5479	0.770668	0.229332	0.1580	0.0950	0.0386	0.0128	0.0037	0.0010
0.9	0.4565	0.9035	0.5020	0.796908	0.203092	0.1364	0.0803	0.0321	0.0104	0.0030	0.0008
0.95	0.4416	0.8695	0.4576	0.820891	0.179109	0.1173	0.0677	0.0265	0.0085	0.0024	0.0006
1.0	0.4276	0.8302	0.4151	0.842701	0.157299	0.1005	0.0568	0.0218	0.0069	0.0019	0.0005
1.1	0.4017	0.7403	0.3365	0.880205	0.110795	0.0729	0.0396	0.0147	0.0045	0.0012	0.0003
1.2	0.3786	0.6416	0.2673	0.910314	0.080666	0.0521	0.0272	0.0097	0.0029	0.0007	0.0002
1.3	0.3576	0.5413	0.2082	0.934908	0.065992	0.0366	0.0184	0.0063	0.0019	0.0004	0.0001
1.4	0.3387	0.4450	0.1589	0.952285	0.047715	0.0253	0.0122	0.0041	0.0011	0.0003	0.0001
1.5	0.3216	0.3568	0.1189	0.968105	0.033895	0.0172	0.0080	0.0026	0.0007	0.0002	0.0001
1.6	0.3080	0.2791	0.0872	0.978348	0.023662	0.0115	0.0052	0.0016	0.0004	0.0001	
1.7	0.2917	0.2132	0.0627	0.983790	0.016210	0.0076	0.0033	0.0010	0.0003	0.0001	
1.8	0.2786	0.1591	0.0442	0.989091	0.010909	0.0049	0.0021	0.0006	0.0002	0.0001	
1.9	0.2665	0.1180	0.0306	0.992700	0.007210	0.0031	0.0013	0.0003	0.0001	0.0001	
2.0	0.2554	0.0827	0.0207	0.995322	0.004678	0.0020	0.0008	0.0002	0.0001		
2.1	0.2451	0.0576	0.0137	0.997021	0.002979	0.0012	0.0005	0.0001			
2.2	0.2356	0.0393	0.0089	0.998137	0.001863	0.0007	0.0003				
2.3	0.2267	0.0262	0.0057	0.998857	0.001143	0.0004	0.0002				
2.4	0.2185	0.0171	0.0036	0.999311	0.000689	0.0002	0.0001				
2.5	0.2108	0.0109	0.0022	0.999593	0.000407	0.0001					
2.6	0.2036	0.0068	0.0013	0.999704	0.000236	0.0001					
2.7	0.1969	0.0042	0.0008	0.999806	0.000134						
2.8	0.1905	0.0025	0.0004	0.999925	0.000075						
2.9	0.1846	0.0015	0.0003	0.999959	0.000041						
3.0	0.1790	0.0008	0.0001	0.999978	0.000022						

Annexe 8

Cartes de contrôle de la simulation

- ANAL=THEAT ⇒ type d'analyse transitoire .
- SAVE=26 ⇒ enregistrer les données de sortie dans un fichier de type 26 (binaire) .
- FILE=SPHER4 ⇒ nom du fichier de sortie .
- INIT=298 ⇒ température initiale du limiteur .
- MASS=LUMPED ⇒ utilisée dans certain problèmes de transfert de chaleur, plus précisément, dans les problèmes uniforme de transfert de chaleur en régime transitoir. Ce type d'analyse est appelé "Lumped-heat-capacity-method". Un volume différentielle est utilisé pour expliciter les équations de conduction de chaleur.
- *TITLE ⇒ titre du graphique de sortie des résultats .
- *ELTYPE ⇒ type d'éléments 104 (10) et 104 (1) .
- *ELEMENT ⇒ liste des éléments avec leurs noeuds , faces et propriétés des matériaux .
- *NODES ⇒ liste des noeuds avec leurs coordonnées .
- *MATHEAT ⇒ propriétés des matériaux .
 Matériaux 1 (acier inoxydable)
 $K_{xx}=12.29+0.010478T$ [W/m . K]

$$C = 510 \text{ [J/Kg . K]}$$

$$\text{DENS} = 7616.6 \text{ la densité en [Kg/m}^3\text{)}$$

Matériaux 2 (TIC)

$$K_{xx} = 29.03 + 9.2310^{-3}T \text{ [W/m . K]}$$

$$C = 456 + .39357T \text{ [J/Kg . K]}$$

$$\text{DENS} = 4930 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

- *TIMEAMP ⇒ amplitude du flux en fonction du temps
- *HEATCNTL ⇒ contrôle type transfert de chaleur
- *TIMEINTEG ⇒ temps et méthode d'intégration .
- *STEP SIZE ⇒ pas d'intégration .
- *TEMPHISTORY ⇒ évolution de la température .
- *PRINTCNTL ⇒ contrôle de la sortie des résultats .
- *TEMPOUT ⇒ sortie des résultats à 1 et 30 secondes .
- *RADBC ⇒ radiation .
- *DFLUX ⇒ distribution du flux .
- *ENDDATA ⇒ entrée des données terminée .