



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

# DSM - DAPNIA

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DEPARTEMENT D'ASTROPHYSIQUE, DE PHYSIQUE DES PARTICULES,  
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE L'INSTRUMENTATION ASSOCIÉE

SERVICE D'INSTRUMENTATION ET DES SYSTEMES

## NOTE de CALCUL

DATE : <b>08/07/2002</b> N/RÉF. : DAPNIA/SIS/258/02/DL	OBJET : <b>Comportement thermo-mécanique des extrémités des segments du RFQ d'IPHI</b>
DE : <b>Didier LEBOEUF</b>	A : <b>CEA/DSM/DAPNIA/SACM: P.Y. Beauvais, M. Painchault</b> <b>CEA/DIF/SPTA/SP2A : P. Balleyguier</b> <b>CNRS/IN2P3/IPNO: F. Launay</b>



Injecteur de **P**rotons **H**aute **I**ntensité

Approbation	Rédacteur	Approb. Technique.	Émetteur
Unité	DAPNIA/SIS/LCAP	DAPNIA/SIS/LCAP	DAPNIA/SIS
Fonction		Chef de Labo	Chef de Service
Nom	D. LEBOEUF	J.M. BAZE	P.Y. CHAFFARD
Visa	12/6/02 	12/6/02 	13.06.02 

## Résumé

Les courants de surface générés par l'alimentation Radio Fréquence (352 MHz) de la cavité accélératrice RFQ d'IPHI, l'échauffent de façon non négligeable ( $210 \text{ W/cm}^2$  au max par endroit). Cette chaleur est évacuée par de l'eau circulant dans des canaux de refroidissement traversant les lames.

La modélisation thermo-mécanique des extrémités des tronçons par les éléments finis, permet de prédire les déplacements et les contraintes que subit le nez de lame en fonctionnement. Elle permet également de vérifier l'efficacité du refroidissement (disposition et diamètre des canaux, température et vitesse de l'eau).

Le calcul présenté, mené sur le logiciel Samcef-Design, est destiné à valider la conception.

Les déplacements maxima calculés, de l'ordre de 0,1 mm au nez, sont acceptables.

Le système de refroidissement à 5 canaux est convenable pour les tronçons 1 à 3 : la contrainte maximum est de l'ordre de 50 MPa, valeur de la limite élastique du cuivre recuit. Par contre pour les autres tronçons plus fortement échauffés, la nécessité d'un 6<sup>ième</sup> canal est démontrée afin que la contrainte maximum reste située autour de 70 MPa. Cette valeur, bien que légèrement supérieure à la limite élastique, est très localisée et pénètre très peu dans la matière. Elle peut donc être considérée comme acceptable compte-tenu en outre, de l'aspect pessimiste la modélisation.

## 1- INTRODUCTION

IPHI, Injecteur de Protons Haute Intensité, est l'étage basse énergie d'un accélérateur linéaire de protons à forts courant (100 mA). Il se compose de 3 parties :

- Une source de protons (SILHI) et son transport de faisceau basse énergie,
- Un accélérateur linéaire : le RFQ (Radio Frequency Quadripole),
- Un accélérateur à tube de glissement : le DTL.

Le RFQ d'IPHI est une structure résonante accélératrice composée de huit tronçons en cuivre recuit d'une longueur d'un mètre environ. De façon schématisée, ce sont des cylindres creux, d'à peu près 350 mm de 'diamètre', à l'intérieur desquels quatre électrodes délimitent quatre cavités (fig. 1). Le rôle des électrodes est d'accélérer et de focaliser le faisceau de protons.

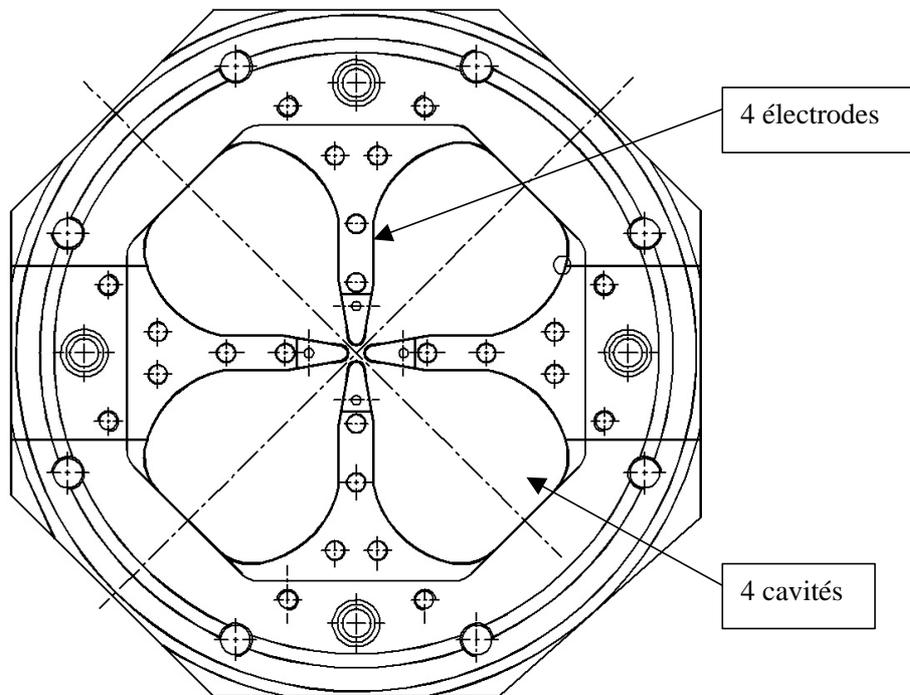


Figure 1 : Vue transversale d'un tronçon

Chaque tronçon a une extrémité de forme spéciale destinée à favoriser le couplage entre les segments (assemblage de 2 tronçons tête-bêche) comme le montre la figure 2.

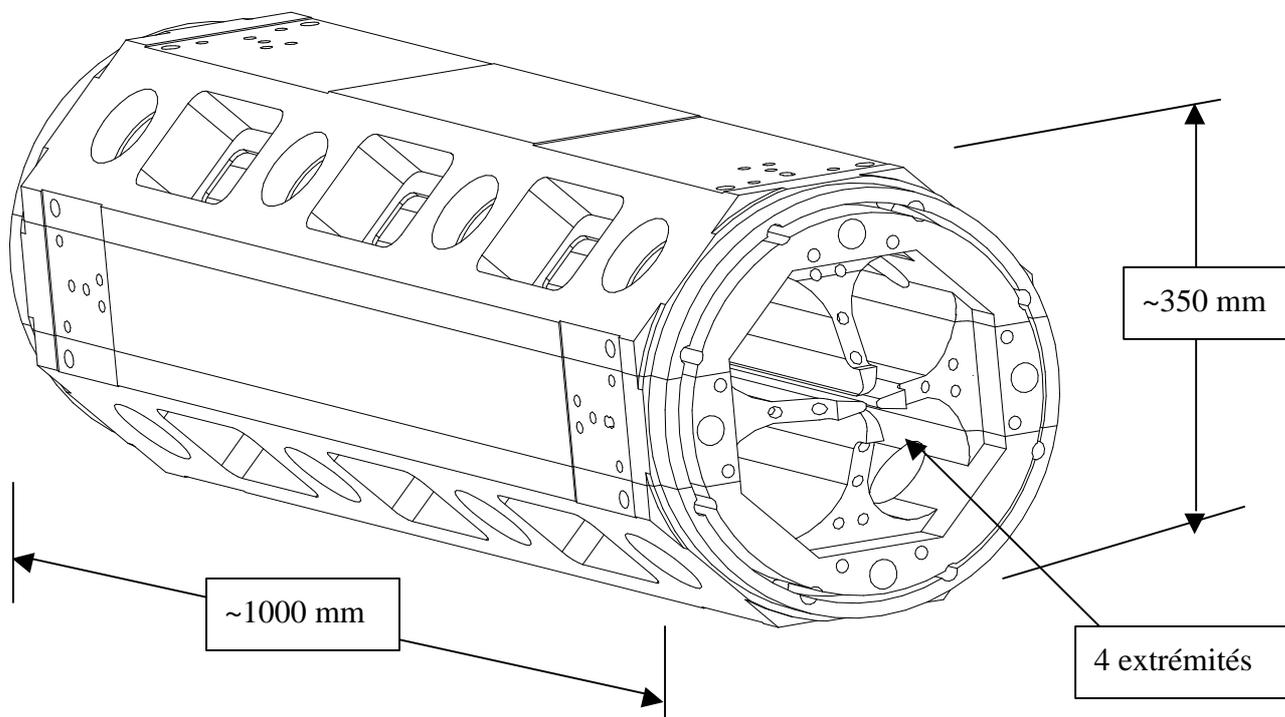


Figure 2 : Vue axonométrique d'un tronçon

En fonctionnement, la cavité résonante est alimentée par une tension haute fréquence à 352 MHz qui circule essentiellement en courants de surface. Malgré la faible résistivité du cuivre, ceux-ci provoquent par effet Joule, un dépôt de chaleur non négligeable.

En échauffant le matériau, ce dépôt de puissance surfacique non homogène va entraîner des dilatations susceptibles de déformer la géométrie initiale.

Or les performances d'une cavité résonante dépendent, entre autres facteurs, de sa géométrie propre : distance entre électrodes, profil de la section, etc...

Ainsi, une déformation trop importante ou mal maîtrisée pourra affecter les performances de la cavité.

De plus, les déformations entraînent des contraintes qu'il s'agit d'estimer pour vérifier qu'elles restent en-deçà des valeurs admissibles par le matériau.

Pour évacuer la puissance déposée, les électrodes ou lames, sont percées de canaux longitudinaux les traversant de part en part (fig. 3 & 4) dans lesquels circule de l'eau.

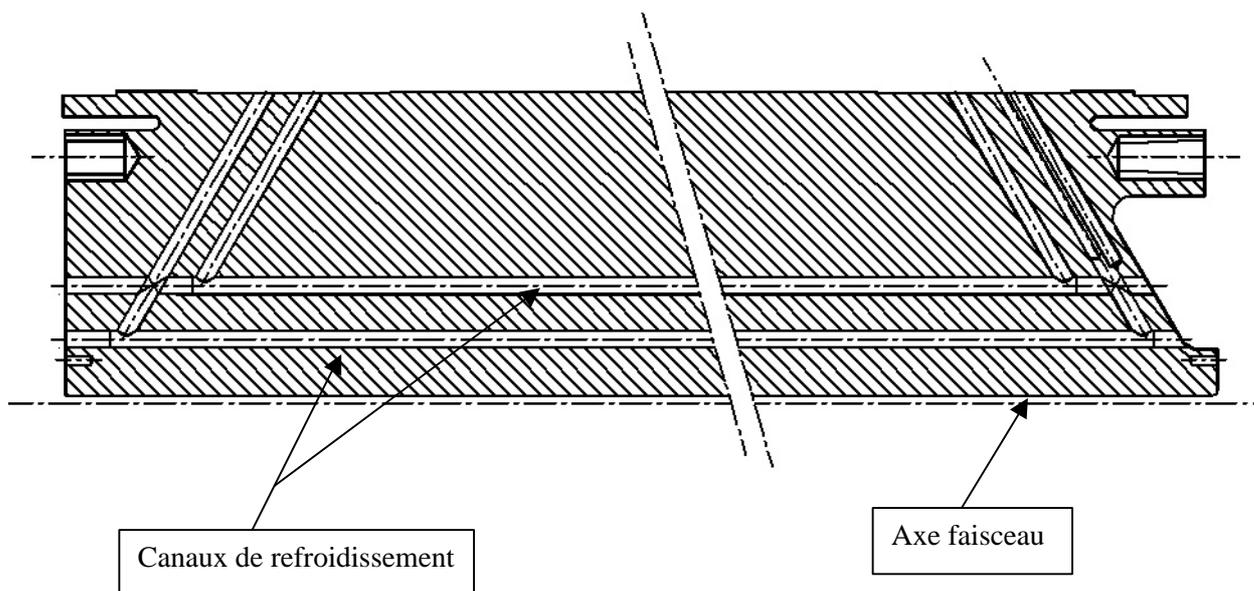


Figure 3 : Coupe longitudinale d'une lame

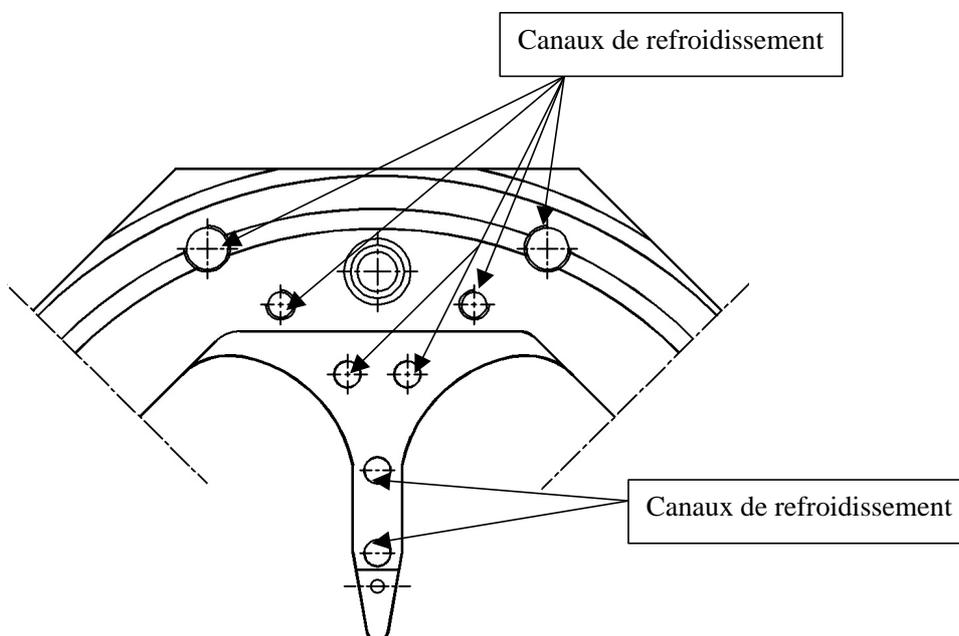


Figure 4 : Vue transversale d'une lame

Cette note de calcul présente les résultats de la modélisation par les éléments finis du comportement thermo-mécanique des extrémités de lame.

L'objectif du calcul est de prédire les déplacements du nez de lame et les niveaux de contraintes que subit l'extrémité en fonctionnement. C'est à dire sous l'effet du dépôt de puissance surfacique généré par l'alimentation radio-fréquence du RFQ.

Il permet également d'évaluer l'efficacité du système de refroidissement : disposition et diamètre des canaux, température et vitesse de l'eau.

Le calcul présenté ici est un calcul de validation de la conception. À savoir : efficacité du refroidissement et niveau de contrainte. Il donne aussi un ordre de grandeur du déplacement du nez.

Il est mené sur le logiciel Samcef-Design.

Un autre calcul, visant une plus grande précision (maillage affiné et dépôt de puissance directement récupéré de la modélisation électromagnétique) est également mené sur le logiciel Ideas par F. Launay (CNRS/IN2P3/IPNO) et fait l'objet d'un autre rapport.

## 2- CALCUL

### 2.1- Cas de calcul

La géométrie des extrémités de lame n'est pas identique pour tous les tronçons. En effet, pour fonctionner correctement, une cavité résonante doit être accordée. Pour cela, dans une section transversale, c'est à dire dans un plan perpendiculaire à l'axe faisceau, son profil intérieur doit avoir une géométrie bien spécifique correspondant aux impératifs de pilotage du faisceau. Celui-ci évolue donc continûment de l'entrée à la sortie du RFQ en relation avec la dynamique de faisceau désirée, fixant la fréquence d'accord de la section. Il en est de même pour les extrémités de tronçon, qui en plus ont une fonction de couplage inter-segments.

En outre, comme le montre la figure 5, le dépôt de puissance totale par section transversale, n'est pas constant le long des 8 mètres du RFQ.

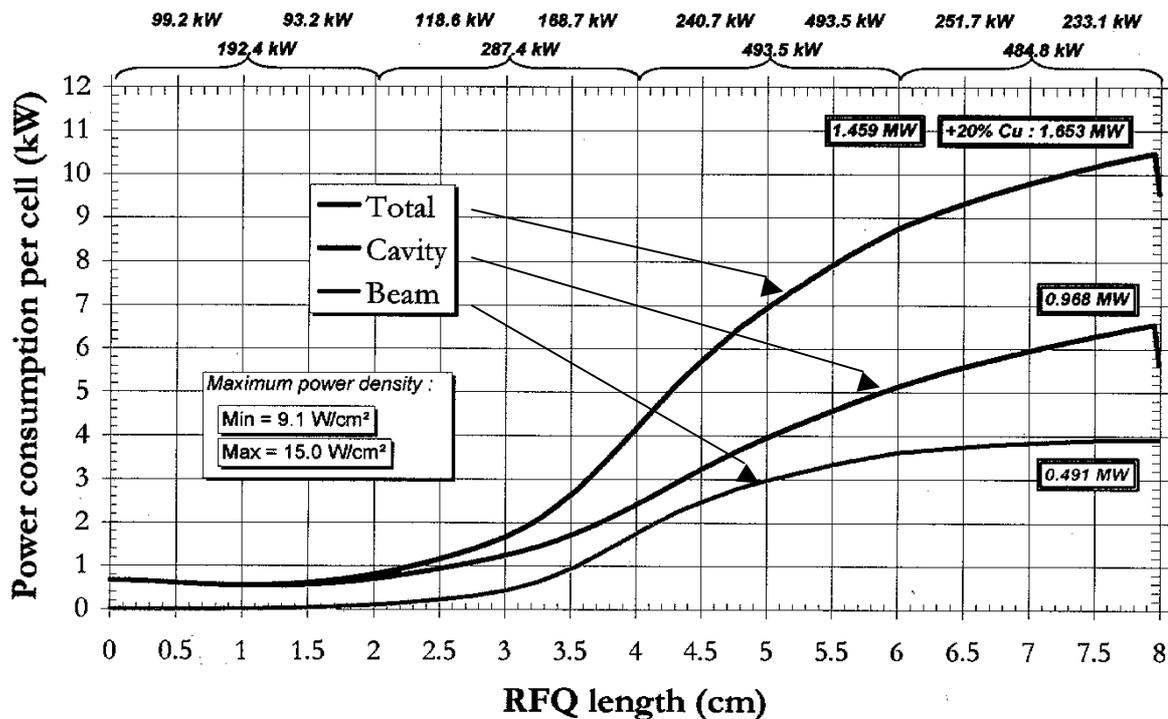


Figure 5 : Puissance dissipée dans le RFQ d'après [1]

Pour ne pas calculer les 8 géométries différentes des 8 tronçons du RFQ, on retient pour le calcul 2 extrémités type :

- celle de l'entrée du RFQ,
- celle de sortie,

sur lesquelles on appliquera le dépôt de puissance correspondant.

Le calcul comporte 2 étapes :

- un calcul thermique avec pour chargement le dépôt de puissance RF issu de la modélisation électromagnétique 3D sur le logiciel Mafia [2] et correspondant à la géométrie (flux surfacique) ainsi que le flux évacué par les canaux (flux convectif).  
Le résultat obtenu est le champ de température dans l'extrémité,
- un calcul mécanique avec pour chargement le champ de température précédent et des conditions limites, qui permet d'obtenir le champ de déplacement et le champ de contrainte dans la pièce.

Compte tenu de la symétrie de la géométrie, du chargement (dépôt de puissance) et des conditions limites, seul un huitième de la cavité, soit une demi-lame, est modélisé. Et pour être conforme à la modélisation RF des extrémités [2], ne sera modélisée qu'une longueur de 200 mm à partir du plan inter-segment.

## 2.2- Modélisation

La géométrie d'une extrémité est récupérée directement de la conception surfacique CAO (logiciel Euclid). De cette façon, toutes les formes évolutives de raccordement sont prises en compte, ainsi que la disposition spatiale des canaux (fig. 6).

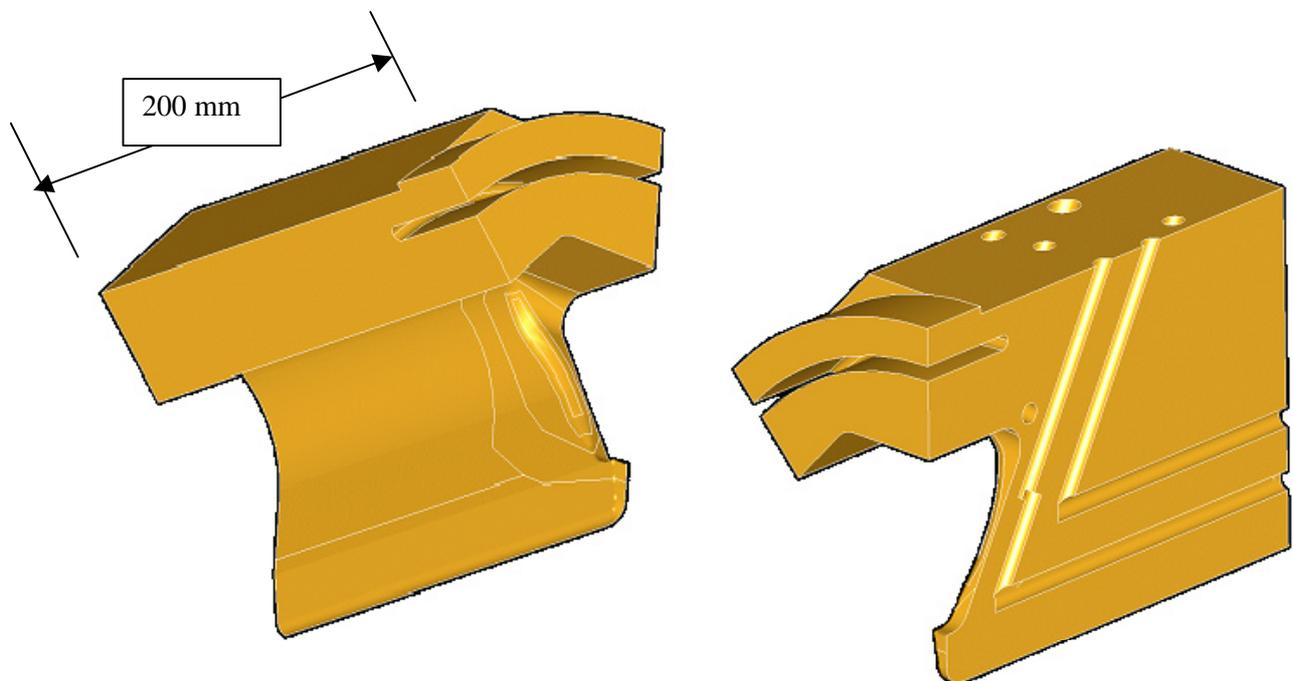


Figure 6 : Géométrie d'une extrémité (récupérée de la CAO)

Le maillage est réalisé avec des éléments tétraédriques de taille moyenne 8 mm sauf au niveau des canaux où elle descend à 5 mm (fig. 7 & 8). Ce qui donne environ 25000 à 30000 éléments, selon la géométrie et à peu près 6000 nœuds.

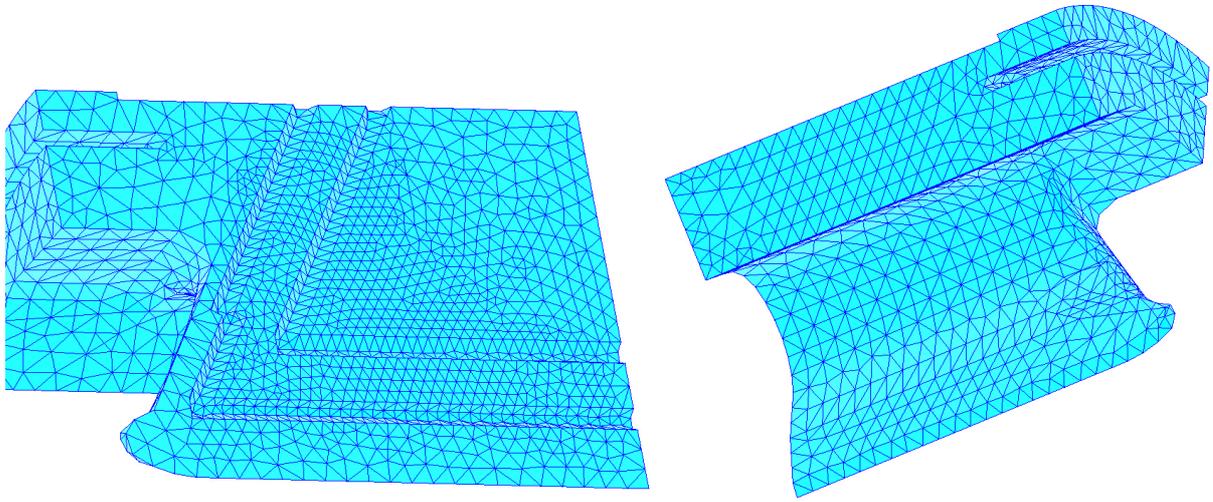


Figure 7 : Maillage général d'une extrémité

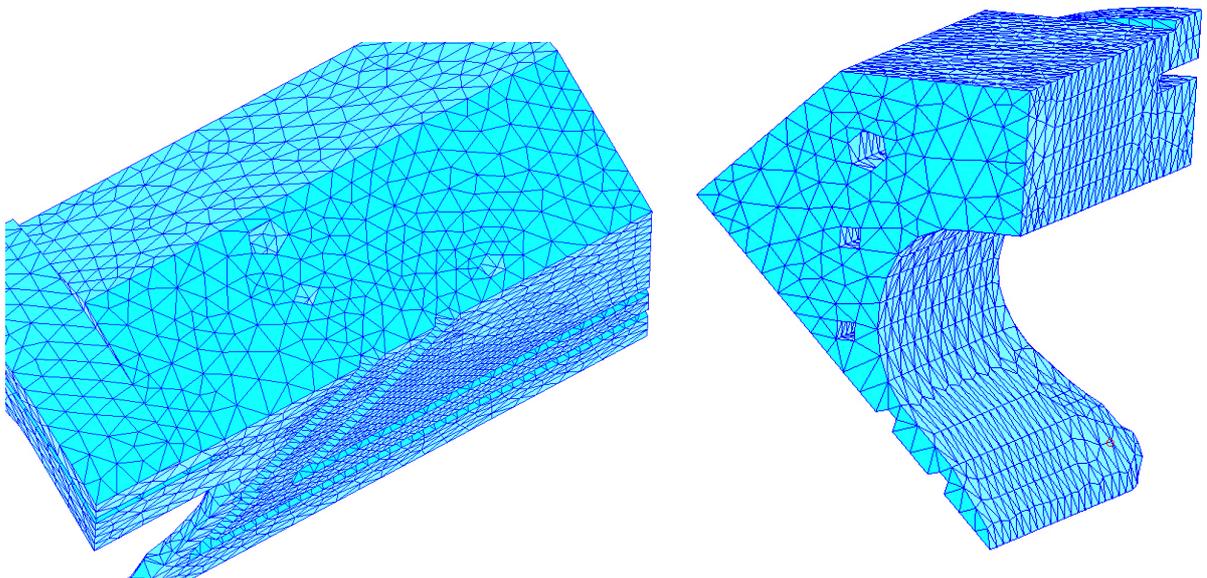


Figure 8 : Maillage d'une extrémité (canaux)

### 2.3- Conditions limites

Pour le calcul thermique aucune condition limite n'est nécessaire.

Il n'en est pas de même pour le calcul mécanique.

Compte tenu de la conception des tronçons (fig. 9), des conditions de blocage des déplacements au niveau de la bride inox sont appliquées : déplacement normal à la zone d'appui bloqué. En fait cette condition est pessimiste car l'inox se dilatant de manière proche du cuivre, la bride ne bloque que faiblement l'extrémité.

De même au niveau du pion de piétage de l'assemblage des plaques de couplage, qui empêche tout déplacement de la partie haute de la pièce, les déplacements en X (axe faisceau) sont bloqués. Combinés au blocage précédent cette condition simule bien l'action des pions.

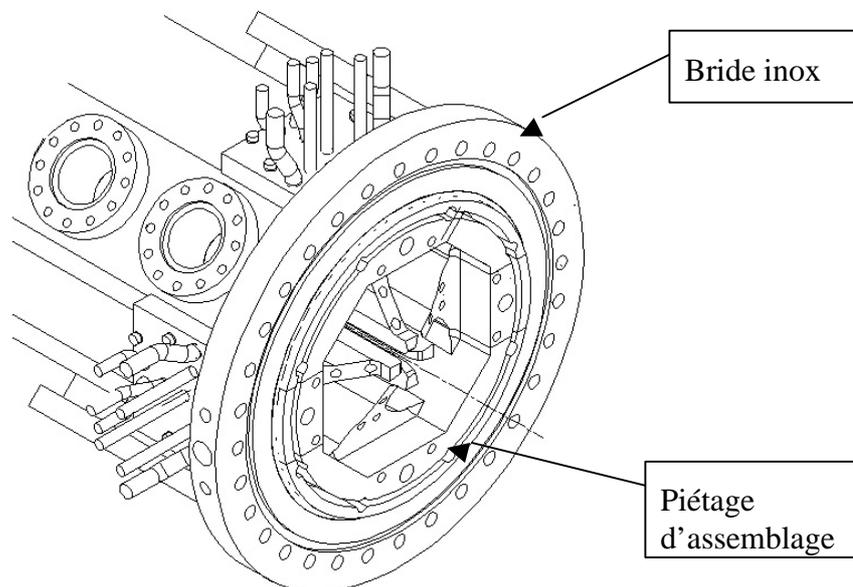


Figure 9 : Conception d'un tronçon côté couplage inter-segment

De plus, pour tenir compte de la partie droite du tronçon non modélisée, la face située à 200 mm est bloquée en déplacement X. Ce qui simule en fait, une dilatation homogène du tronçon dans sa partie droite. Ce qui n'est pas tout à fait correct mais suffisant pour ce calcul.

Du fait qu'un seul huitième de l'extrémité est modélisé, on applique bien sûr aux plans de symétrie les conditions de symétrie usuelles : blocage des déplacements normaux au plan.

La figure 10 résume les conditions limites appliquées.

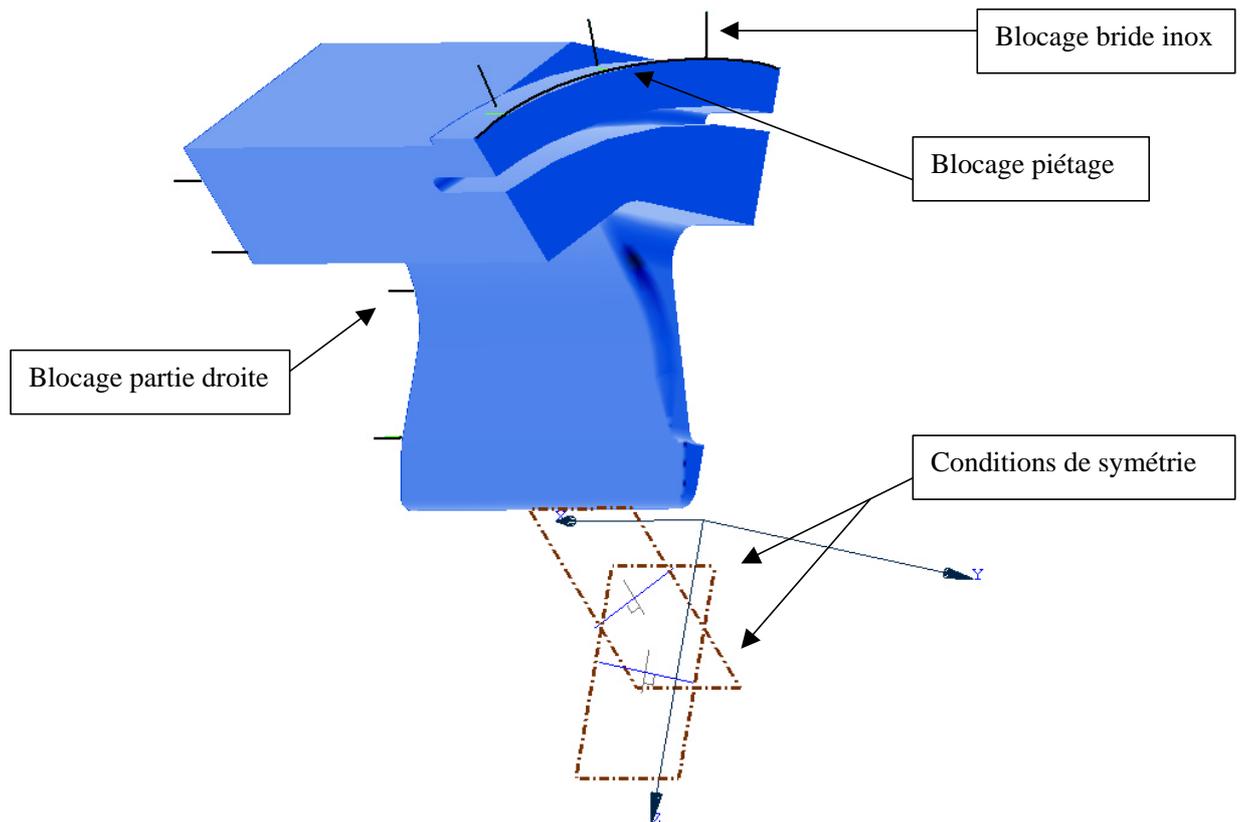


Figure 10 : Conditions limites appliquées

## 2.4- Chargement

Pour le calcul thermique, le chargement est constitué :

- des flux surfaciques déposés par les courants RF, issus de [2],
- des flux convectifs évacués par les canaux traversant l'extrémité.

### 2.4.1- Flux surfaciques

La note [2] précise les dépôts de puissance auxquels il faut s'attendre dans la cavité au niveau des extrémités. Ceux-ci sont présentés sur différentes planches générales comme celles de la figure 11 ou plus détaillées sur une zone particulière de la cavité.

À partir de ces données et en accord avec son auteur (P. Balleyguier), la surface de la cavité est découpée en différentes zones. Sur chacune d'elles est déposé un flux surfacique constant (fig. 12).

On adapte les valeurs appliquées pour que sur la partie modélisée, l'intégrale de la puissance déposée soit égale à celle obtenue dans la modélisation RF de [2].

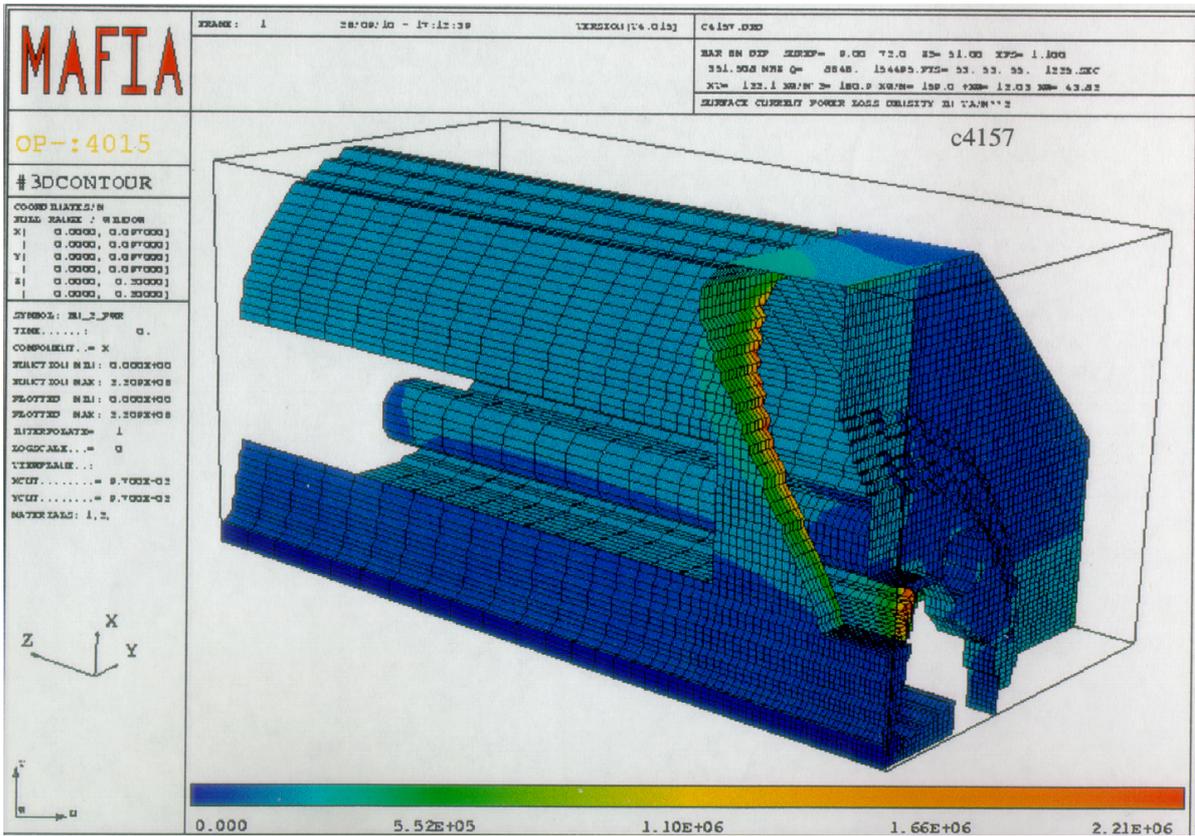


Figure 11 : Exemple de planche MAFIA du dépôt de puissance RF

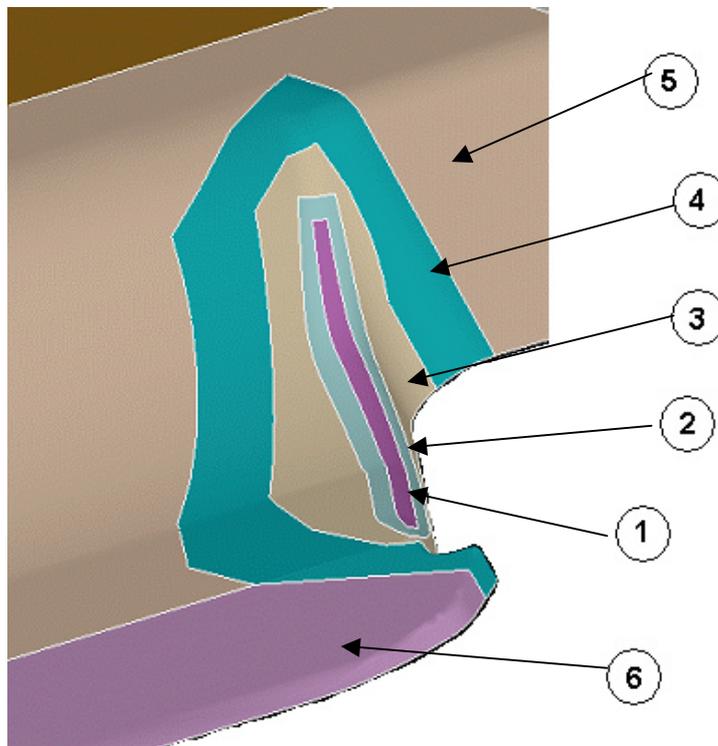


Figure 12 : Zones de découpage des flux superficiels déposés

### 2.4.2- Flux convectifs

Les valeurs de flux évacués dépendent des valeurs des coefficients d'échange sur les parois des canaux et de la température du fluide de refroidissement.

Dans notre étude, ceux-ci ont été déterminés par des essais menés par le DAPNIA/SACM sur une pièce en cuivre dans laquelle circulait de l'eau. Plusieurs types de canaux, filetés ou non, de différents diamètres avec de l'eau à différentes températures circulant à différentes vitesses ont été testés. Ce sont ces valeurs expérimentales du coefficient d'échange, communiquées après analyse, qui sont utilisées pour le calcul.

Ainsi, chaque canal, selon ses caractéristiques a des coefficients d'échange spécifiques. Ils sont résumés par la figure 13 et le tableau 1.

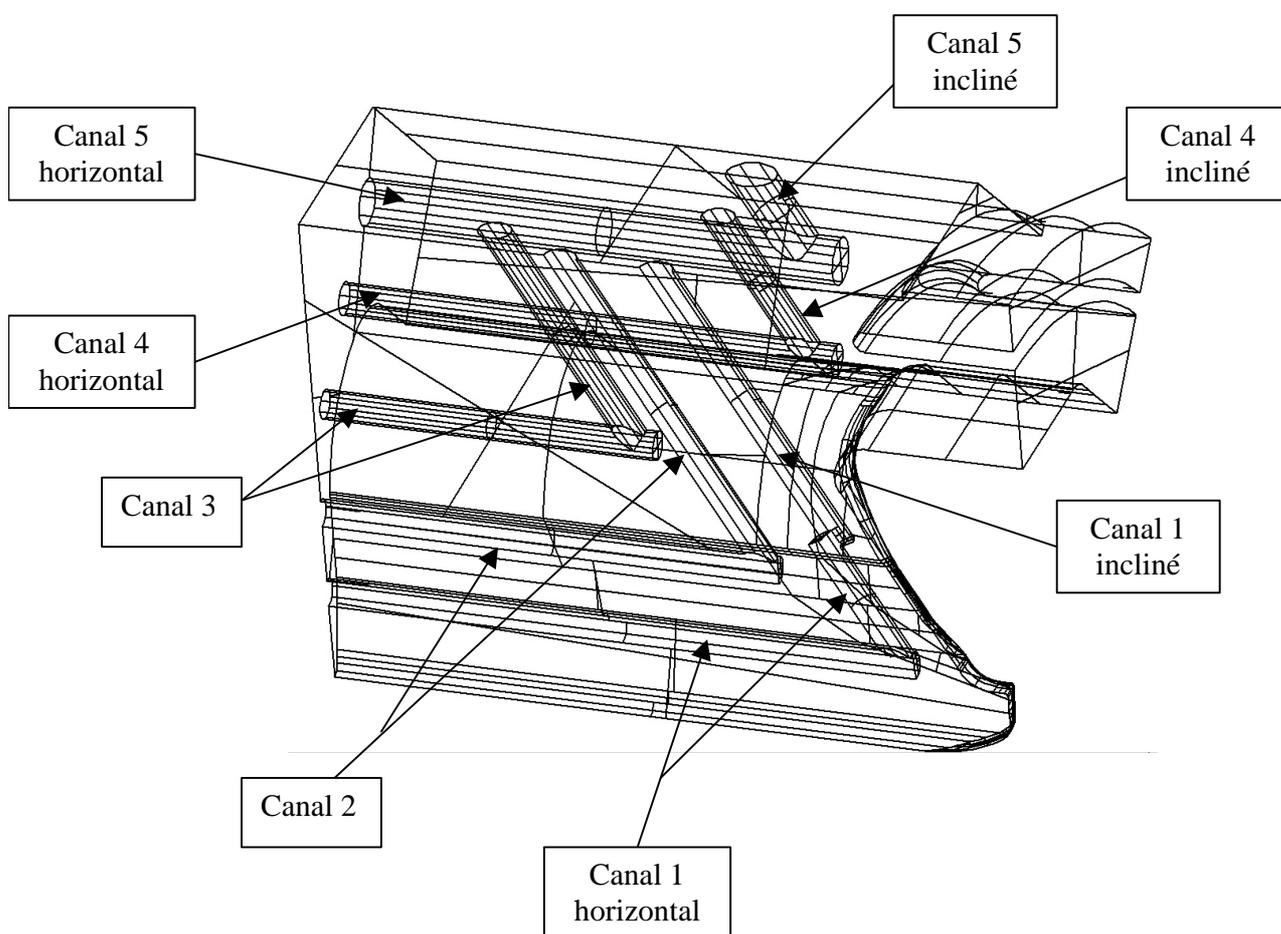


Figure 13 : Repérage des canaux de refroidissement

Canal	Filetage	Diamètre (mm)	Vitesse de l'eau (m.s <sup>-1</sup> )	Coefficient d'échange (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	Température d'eau (°C)
canal1_hor	non	8	6	21500	10
canal1_incl	oui	8	6	33800	10
canal2	non	8	6	21400	10
canal3	non	8	5	17800	10
canal4_hor	oui	8	5	27900	10
canal4_incl	non	8	5	17800	10
canal5_hor	oui	12	5	25700	10
canal5_incl	non	12	5	16000	10

Tableau 1 : Caractéristiques des flux convectifs des canaux de refroidissement

### 2.4.3- Mécanique

Pour le calcul mécanique le chargement est le champ de température obtenu à partir du calcul thermique.

### 2.5- Caractéristiques matériau

La pièce est en cuivre recuit CuC2 de limite élastique de l'ordre de 50 MPa et de caractéristiques mécaniques suivantes :

Module d'Young :	120 000 MPa
Coefficient de Poisson :	0,3
Coefficient de dilatation :	16 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Coeff de conductivité thermique :	384 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

### 2.6- Calcul de l'extrémité d'entrée

Le chargement ainsi que les résultats sont présentés en annexe 1.

Le champ de température ne présente pas de surprise puisque c'est au niveau du nez de lame que la valeur est maximale, 85°C environ, là où les canaux de refroidissement sont le plus loin de la peau de la pièce, donc le moins efficace.

Les déplacements sont très faibles, 0,06 mm maximum au nez.

Le champ de contraintes fait apparaître une zone particulièrement chargée au niveau du ‘double arrondi’ de fond de cavité. Ceci s’explique en remarquant que l’extrémité modélisée peut être comparée à une équerre qui est sollicitée au bout de l’une de ses branches. La sollicitation est ici due aux dilatations engendrées par le champ de température, dilatations qui ont donc tendance à ‘ouvrir’ l’équerre. C’est donc dans son angle intérieur que les contraintes se concentrent.

La contrainte maximale ne dépasse pas la limite élastique de 50 MPa.

Nota: La zone située au niveau du fond de gorge ainsi que celle située au point anguleux combinant les blocages de symétrie et de la bride inox montrent également une contrainte élevée. En fait, en ce dernier endroit, en raison des conditions limites appliquées, le comportement mécanique est mal modélisé. C’est pourquoi les valeurs obtenues ici ne doivent pas être interprétées de façon trop stricte.

Ce premier calcul montre que le design de l’extrémité du tronçon 1 est tout à fait correct compte tenu des valeurs de puissance déposée en entrée du RFQ.

Cette conclusion reste même valable pour les extrémités situées à 3 m. C’est à dire celles des tronçons 2 et 3 puisque si la géométrie varie un peu, le dépôt de puissance est pratiquement identique.

## **2.7- Calcul de l’extrémité de sortie (5 canaux)**

Le chargement ainsi que les résultats sont présentés en annexe 2.

Par rapport au cas de l’extrémité d’entrée, le champ de température garde la même topographie. Seules changent les valeurs : la température max passe à 140°C au nez de lame.

De même, les déplacements passent à des valeurs qui restent acceptables pour le fonctionnement de la cavité, mais doublées par rapport au cas d’entrée. Soit 0,12 mm au nez.

Quant aux contraintes, elles sont beaucoup plus importantes et deviennent dangereuses pour la tenue mécanique de la pièce. En effet, avec une valeur au ‘double arrondi’ du fond de cavité, avoisinant les 120 MPa (on ne tient pas compte des valeurs singulières mentionnées au nota du §2.6) la limite élastique du matériau est largement dépassée.

Le design pour ces extrémités doit donc être revu.

Afin de diminuer les contraintes, un sixième canal est mis en place au niveau de ce ‘double arrondi’. En le plaçant au plus près de la peau de la pièce, les températures seront plus homogènes, générant moins de contraintes (fig. 14).

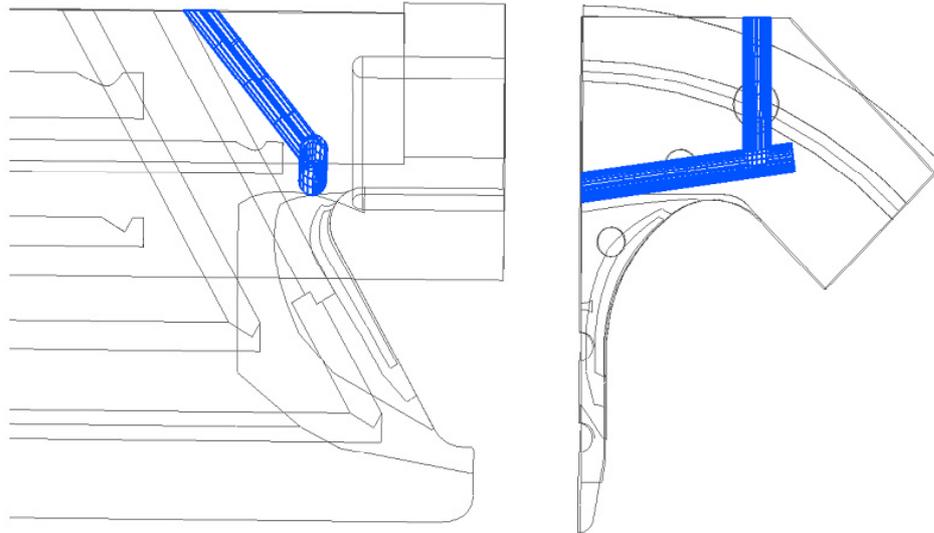


Figure 14 : Implantation du 6<sup>ième</sup> canal

## **2.8- Calcul de l'extrémité de sortie (6 canaux)**

Le chargement, identique au cas précédent, ainsi que les résultats sont présentés en annexe 3.

La topographie du champ de température est bien sûr très modifiée par le canal 6. Ce qui prouve son efficacité. Ainsi, le 'double arrondi' est plus homogène en température et aussi plus froid. Néanmoins la température max reste toujours au niveau du nez de lame et à une valeur identique (140°C). Ce qui est normal puisqu'à cet endroit le refroidissement n'est pas altéré.

Par le fait, le déplacement max est sensiblement inchangé, 0,12 mm, toujours au nez.

Par contre la répartition de contraintes est complètement différente. L'endroit le plus chargé n'est plus tout à fait au 'double arrondi' du fond de cavité, mais un peu plus sur la lame. De plus la valeur max a bien diminué puisqu'elle est maintenant à 70 MPa environ ce qui est acceptable compte tenu de leur faible pénétration dans la matière.

### **3- CONCLUSION**

Grâce à la mise en place d'un 6<sup>ième</sup> canal de refroidissement la contrainte maximum reste acceptable.

Ce design à 6 canaux doit être retenu pour les tronçons les plus fortement chargés, c'est à dire ceux où le dépôt de puissance électromagnétique est le plus important. Soient les tronçons 4 à 8.

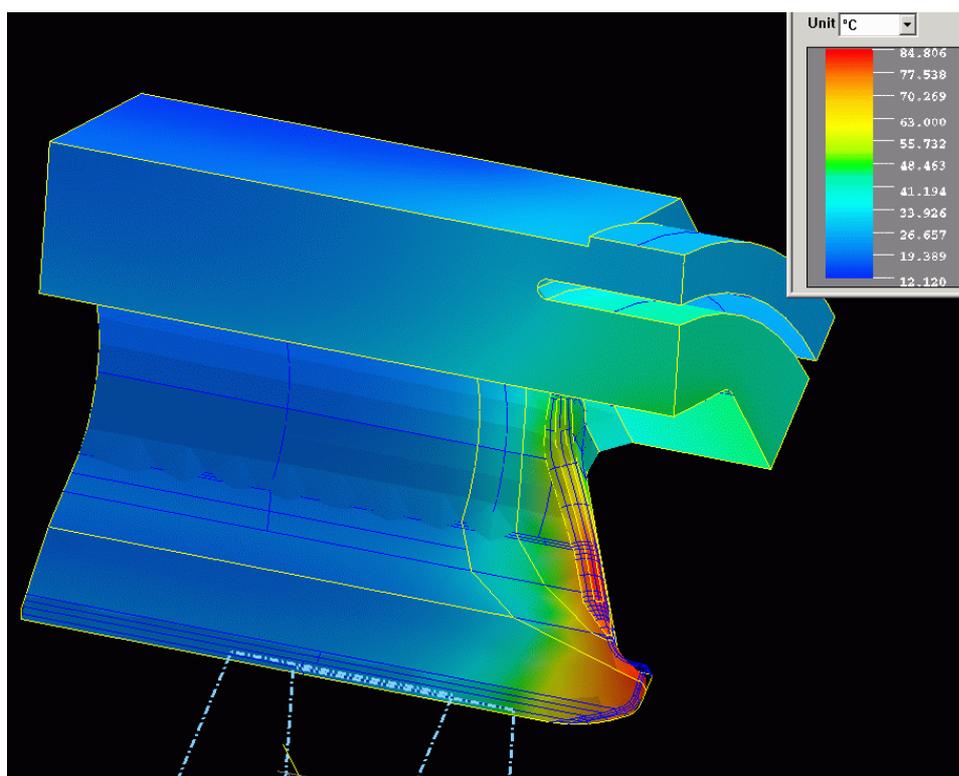
Nota : Comme la géométrie des extrémités change d'un tronçon à l'autre, l'orientation du canal 6 doit être bien entendu à chaque fois adaptée, pour être le plus près possible du 'double arrondi'.

Extrémité d'entrée

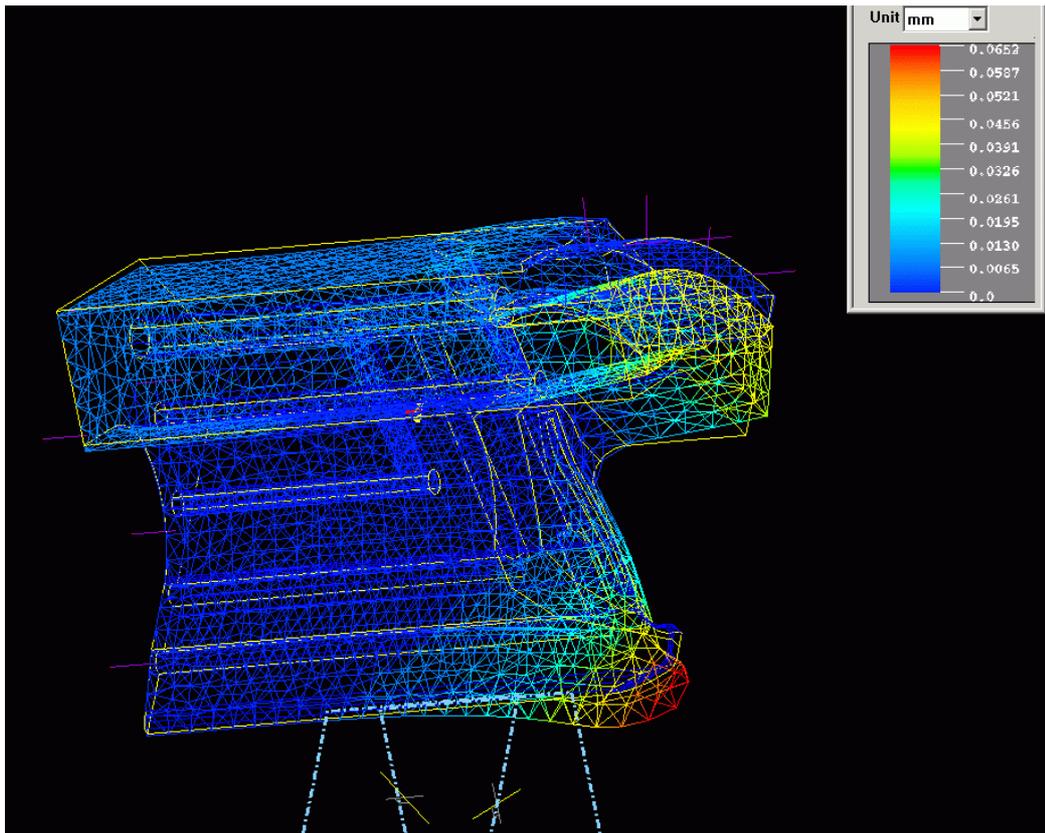
Zone	Puissance (W.cm <sup>-2</sup> )	Aire (cm <sup>2</sup> )	Puissance déposée (W)
1	125	2.1	262.5
2	75	5.3	397.5
3	30	12.4	372
4	20	23.2	464
5	10	189	1890
6	3	53	159

Puissance totale (W) = 7 090  
 (pour un quadrant)

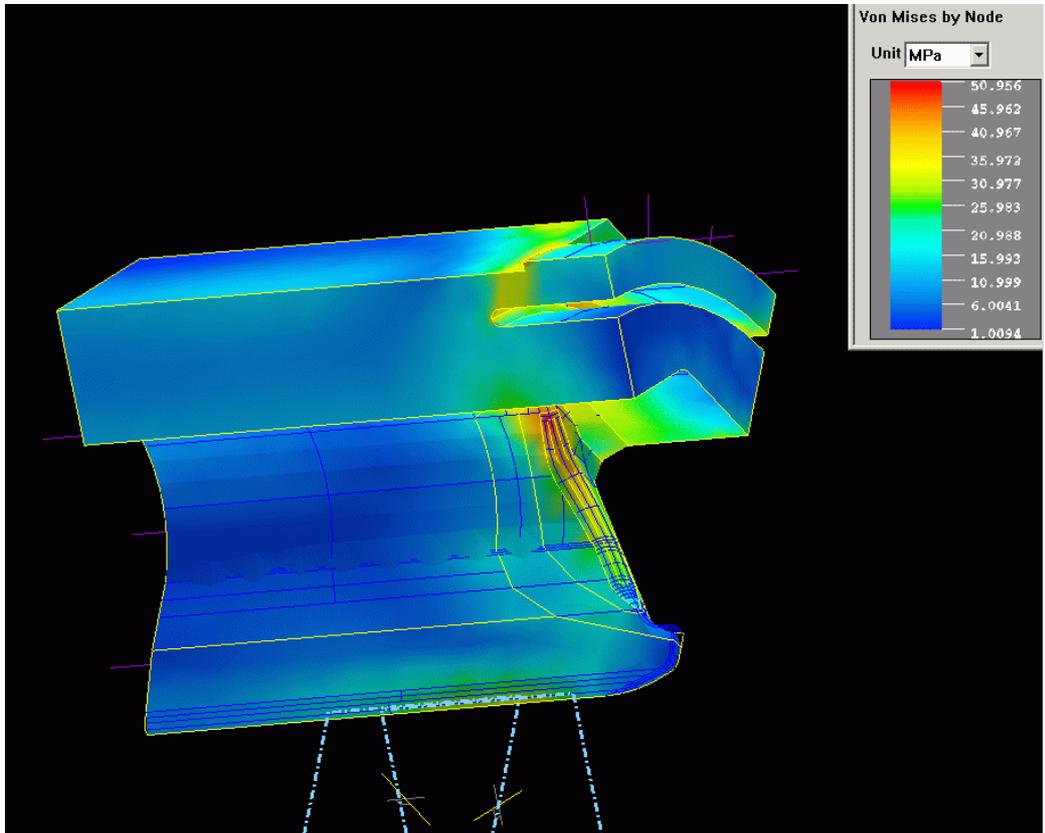
Puissance déposée en extrémité d'entrée



Champ de température sur l'extrémité d'entrée



Champ de déplacement sur l'extrémité d'entrée



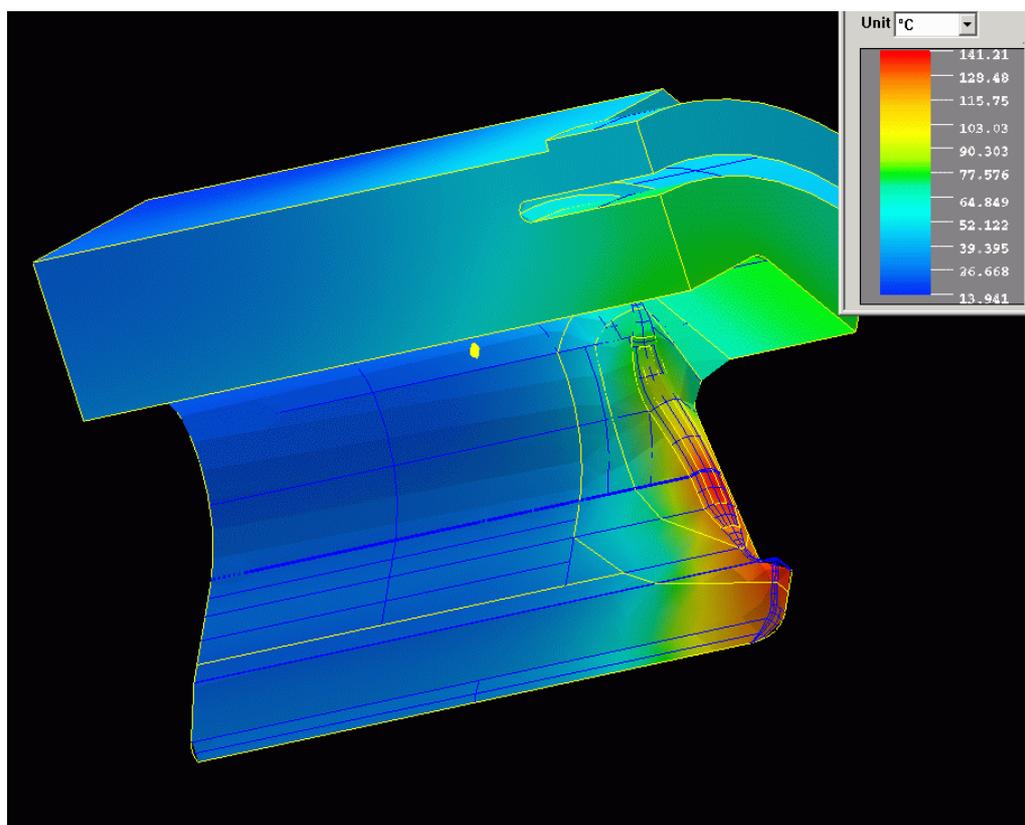
Contraintes de Von Mises aux nœuds sur l'extrémité d'entrée

**Extrémité de sortie (5 canaux)**

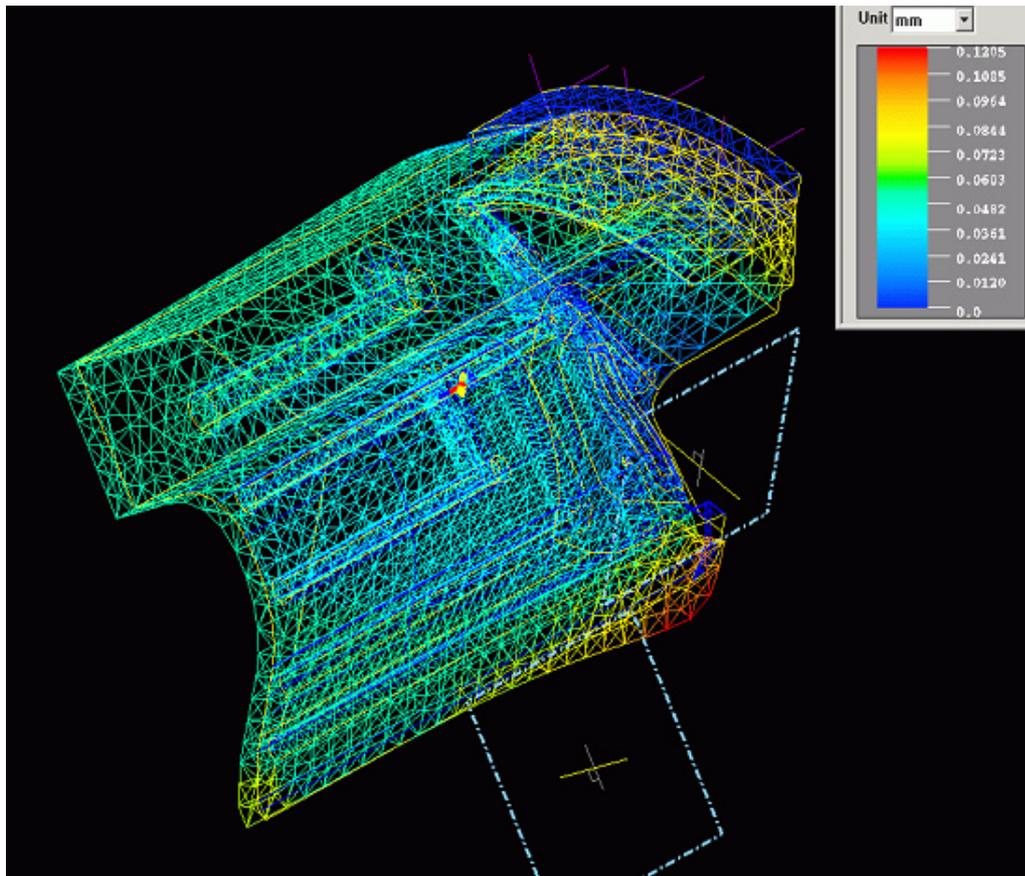
<b>Zone</b>	<b>Puissance (W.cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>Aire (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Puissance déposée (W)</b>
1	210	2.1	441
2	105	4.2	441
3	55	13.8	759
4	30	25.1	753
5	16	198.4	3174.4
6	5	51.9	259.5

**Puissance totale (W) =** 11 656  
(pour un quadrant)

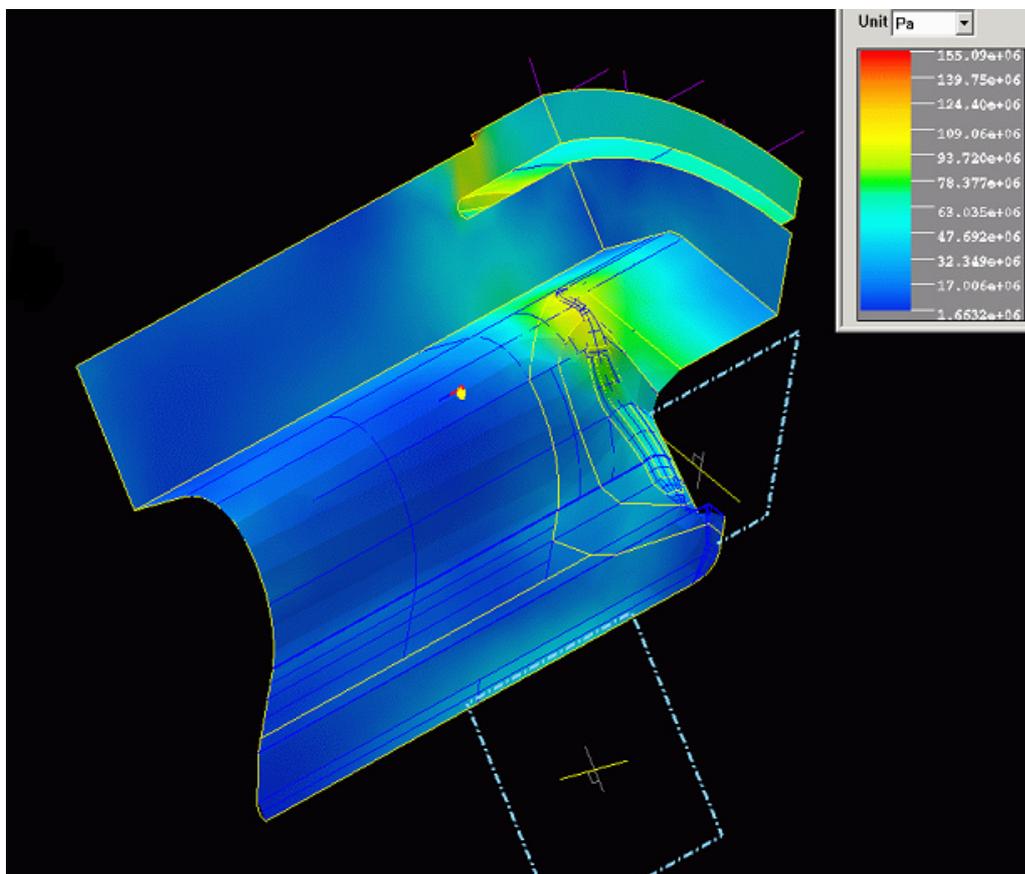
Puissance déposée en extrémité de sortie (5 canaux)



Champ de température sur l'extrémité de sortie (5 canaux)



Champ de déplacement sur l'extrémité de sortie (5 canaux)



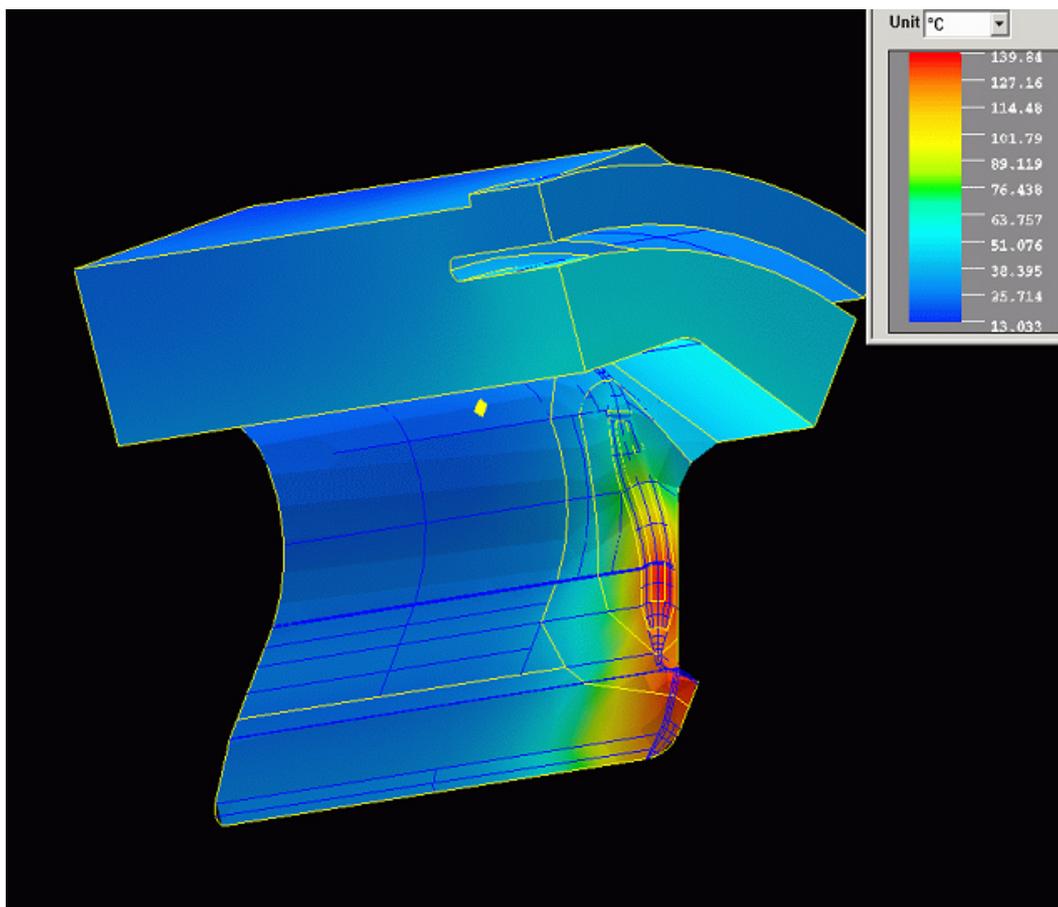
Contraintes de Von Mises aux nœuds sur l'extrémité de sortie (5 canaux)

Extrémité de sortie (6 canaux)

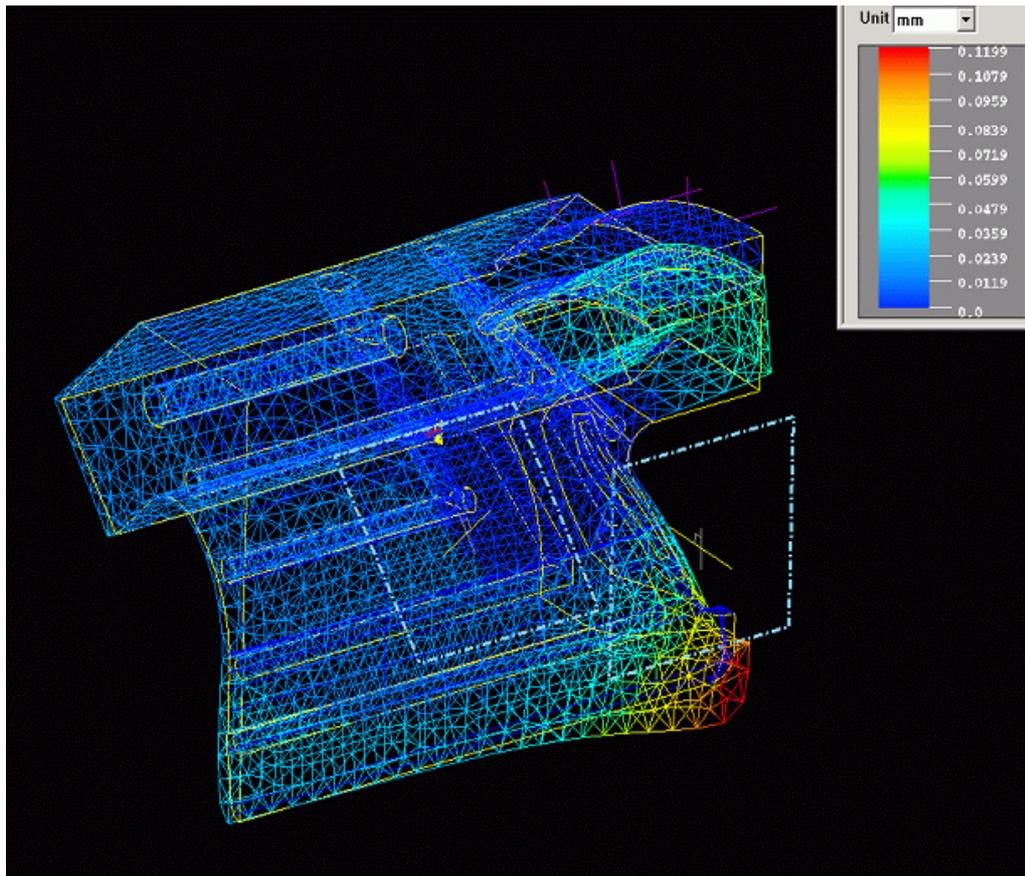
Zone	Puissance (W.cm <sup>-2</sup> )	Aire (cm <sup>2</sup> )	Puissance déposée (W)
1	210	2.1	441
2	105	4.2	441
3	55	13.8	759
4	30	25.1	753
5	16	198.4	3174.4
6	5	51.9	259.5

Puissance totale (W) = 11 656  
 (pour un quadrant)

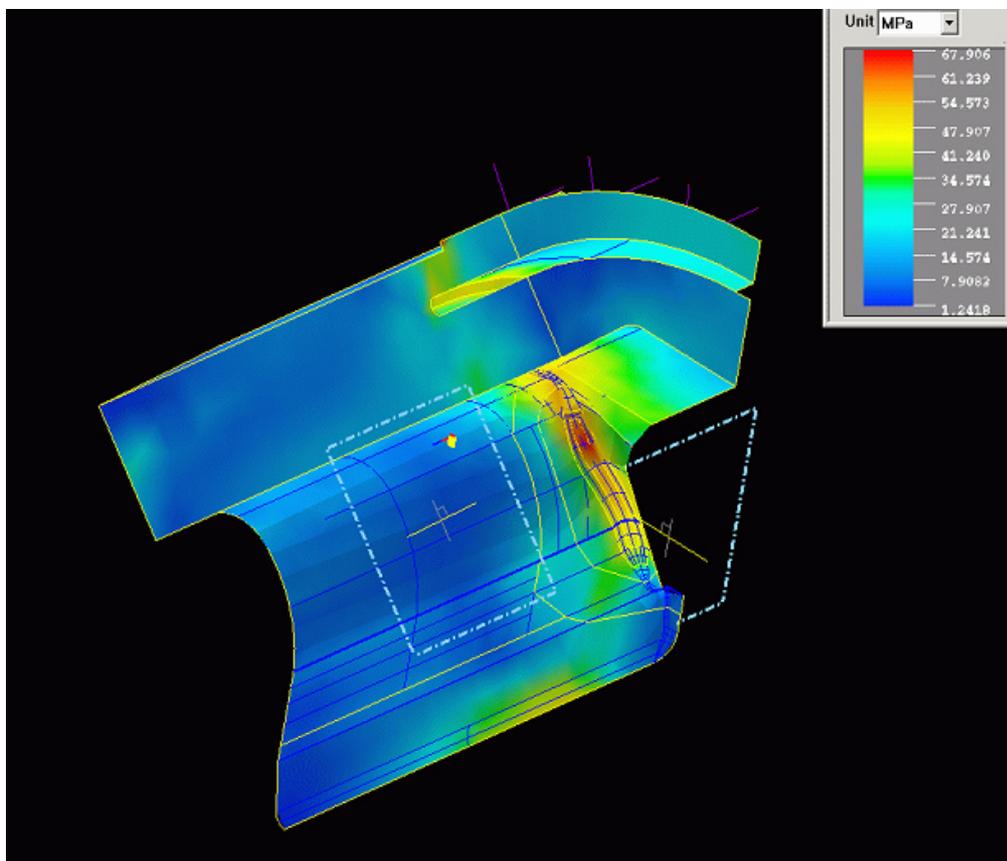
Puissance déposée en extrémité de sortie (6 canaux)  
 identique au cas avec 5 canaux



Champ de température sur l'extrémité de sortie (6 canaux)



Champ de déplacement sur l'extrémité de sortie (6 canaux)



Contraintes de Von Mises aux nœuds sur l'extrémité de sortie (6 canaux)

## **Références bibliographiques**

- [1] : « Le RFQ du projet IPHI » de R. Ferdinand, P. Mattéi et R. Duperrier, Sept. 99  
(DSM/DAPNIA/SEA/IPHI 99/62)
- [2] : « Nouvelles plaques de couplages et terminales du RFQ d'IPHI » de P. Balleyguier, Oct. 00